

Vollkostenbilanzierung und Bepreisungsszenarien urbaner Mobilität

Daniel Schröder

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

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Rolf Moeckel

Prüfende der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp
2. Prof. Dr.-Ing. Klaus Bogenberger

Die Dissertation wurde am 15.04.2024 bei der Technischen Universität München eingereicht
und durch die TUM School of Engineering and Design am 24.10.2024 angenommen.

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität München in den Jahren 2019 bis 2023.

Zuerst möchte ich mich bei meinem Doktorvater, Markus Lienkamp, für die Betreuung dieser Arbeit und die tatkräftige Unterstützung bei der Erforschung meines Dissertationsthemas bedanken. Neben deiner fachlichen Expertise hat mir vor allem dein unermüdlicher Antrieb für neue, innovative Ideen zur Verbesserung der Mobilität dazu verholfen, eine Begeisterung für meine Forschungsarbeit zu entwickeln. Die Verantwortung und Freiheit in der Lehrstuhlarbeit und insbesondere bei der Gestaltung des BMBF Zukunftsclusters MCube, die du mir von Anfang an anvertraut hast, hat mich sowohl professionell als auch persönlich enorm reifen lassen. Ich habe sehr viel von dir gelernt, danke dafür!

Außerdem bedanke ich mich bei meinem Zweitprüfer, Klaus Bogenberger, für die schnellen und einfachen Absprachen und die Übernahme des Koreferats, sowie bei Rolf Moeckel für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Es gibt viele Menschen, die für mich die letzten vier Jahre einmalig gemacht haben. Dazu gehören meine Smarti Team Kollegen am Lehrstuhl Lennart Adenaw, Sebastian Krapf, Felix Gotzler, Georg Balke, Tobias Herbst, Nico Nachtigall, Fabian Netzler, Fabian Schuhmann und David Ziegler. Danke!

Ein weiterer Dank gilt allen weiteren Kolleginnen und Kollegen des Lehrstuhls und den Studierenden, die ich innerhalb der letzten Jahre bei ihrer Abschlussarbeit betreut habe. Eure Unterstützung und Diskussionen auf den Lehrstuhlgängen oder beim Dokkolloq haben zum Gelingen dieser Dissertation beigetragen.

Einen großen Beitrag für die schöne und erfolgreiche Zeit haben insbesondere meine MCube Kolleginnen und Kollegen geleistet. Vielen Dank an Oliver May-Beckmann, Johanna Wantzen, Julia Kinigadner, Carolin Zimmer, Sophia Knopf, Nienke Buters, Alex Wentland, Sebastian Pfothenhauer, Gebhard Wulfhorst und Markus Lienkamp für die wundervolle Zusammenarbeit bei der Entwicklung und Umsetzung des MCube Clusters.

Einen gesonderten Dank möchte ich an meine beiden Teamleiter Michael Wittmann und Lennart Adenaw sowie meiner Mentorin Julia Kinigadner aussprechen. Ihr habt mich gefordert, unterstützt und am Ende immer wieder motiviert, ein Stückchen über mich hinauszuwachsen.

Zuletzt möchte ich diese Arbeit meinen Eltern Matthias und Ulrike und meiner Freundin Jana widmen. Ihr habt mir während der gesamten Zeit Halt und Zuversicht gegeben und habt mich in allen Höhen und Tiefen begleitet. Danke für euer Verständnis und eure Unterstützung!

Berlin, im März 2024

Daniel Schröder

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	III
Formelzeichen.....	VII
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik	3
2.1 Mobilitätsverhalten	3
2.1.1 Definitionen	3
2.1.2 Ziele und Strategien.....	5
2.2 Mobilitätskosten.....	6
2.2.1 Interne Kosten	7
2.2.2 Externe Kosten	9
2.3 Mobilitätsbepreisung	18
2.3.1 Regulierende Maßnahmen	18
2.3.2 Bepreisungsmechanismen	20
2.3.3 Realisierung in der Praxis	22
2.4 Verkehrsmodellierung	24
2.4.1 Verkehrsnachfragemodellierung.....	25
2.4.2 Verkehrsmittelwahlmodell	26
2.4.3 Szenarioanalyse	27
2.4.4 Modellierung von Mobilitätsbepreisung.....	29
2.5 Forschungslücke	30
3 Methodik.....	33
3.1 Kostenbestimmung.....	34
3.1.1 Interne Kosten	34
3.1.2 Externe Kosten – räumlich und zeitlich konstant	38
3.1.3 Externe Kosten – räumlich und zeitlich variabel	47
3.2 Simulation der Bepreisung	54
3.2.1 Ablauf der Simulation.....	54
3.2.2 Verkehrsmittelwahlmodell	58

3.2.3	Auswahl der Szenarien	59
4	Ergebnisse	63
4.1	Bilanzierung der Vollkosten	63
4.2	Simulationsergebnisse der Bepreisung	73
4.3	Plausibilisierung der Ergebnisse	79
5	Diskussion	87
5.1	Limitationen	87
5.2	Beantwortung der Forschungsfragen	92
5.3	Schlussfolgerungen und Empfehlungen	93
6	Zusammenfassung und Ausblick	97
	Abbildungsverzeichnis	i
	Tabellenverzeichnis	v
7	Literatur	vii
	Vorveröffentlichungsliste	xxiii
	Anhang	xxv

Abkürzungsverzeichnis

ABIT	Engl. activity-based incremental transport model
ABM	Aktivitätsbasiertes Modell
ADAC	Allgemeiner Deutscher Automobil-Club
al.	alia
API	Engl. application programming interface
AV	Engl. autonomous vehicle
BASt	Bundesanstalt für Straßenwesen
BEV	Engl. battery electric vehicle
BMZ	Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
CCZ	Engl. congestion charge zone
CH₄	Methan
CHF	Schweizer Franken
CO₂	Kohlenstoffdioxid
CO₂eq	Kohlenstoffdioxidäquivalent
CS	Car Sharing
ct	cent
DAT	Deutsche Automobil Treuhand
dB	Dezibel
Destatis	Statistisches Bundesamt
EBA	Eisenbahn Bundesamt
E-BS	E-Bike Sharing
ERP	Engl. electronic road pricing
EU	Europäische Union
FCEV	Engl. fuel cell electric vehicle
FF	Engl. free-floating
Fkm	Fahrzeugkilometer
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
GPS	Engl. global positioning system
GWP	Engl. global warming potential

HBEFA	Handbuch für Emissionsfaktoren
HBE	Engl. home-based-education
HBO	Engl. home-based-other
HBS	Engl. home-based-shop
HBW	Engl. home-based-work
HEAT	Engl. health economic assessment tool
HEV	Engl. hybrid electric vehicle
ICCT	Engl. international council on clean transportation
ICEV	Engl. internal combustion engine vehicle
IK	Interne Grenzkosten
Internal.	Internalisierung
IPF	Iterative Proportional Fitting
Kfz	Kraftfahrzeug
LDEN	Gemeinsamer Lärmindex
LHM	Landeshauptstadt München
Lkw	Lastkraftwagen
MaaS	Mobility-as-a-Service
MiD	Mobilität in Deutschland
Mio.	Millionen
MITO	Engl. microscopic transportation orchestrator
MIV	Motorisierter Individualverkehr
MOP	Deutsches Mobilitätspanel
Mrd.	Milliarden
MVV	Münchner Verkehrs- und Tarifverbund
NH₃	Ammoniak
NHBO	Engl. non-home-based-other
NHBW	Engl. non-home-based-work
NO_x	Stickoxide
NMVOC	Engl. non-methane volatile organic compound
NWF	Lärmgewichtungsfaktor
OBU	Engl. on-board unit
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
OSM	OpenStreetMap
OTP	OpenTripPlanner
ÖV	Öffentlicher Verkehr

PHEV	Engl. plug-in hybrid electric vehicle
Pkm	Personenkilometer
Pkw	Personenkraftwagen
PM	Engl. particulate matter
SASIM	Engl. smart advisor for sustainable integrated mobility
SB	Stations-basiert
Sch-Pot	Schadenspotentialansatz
SEK	Schwedische Kronen
SILO	Simple Integrated Land-Use Orchestrator
s.o.	siehe oben
SO₂	Schwefeldioxid
TCO	Engl. total-cost-of-ownership
TDI	Engl. turbocharged direct injection
TREMOD	Berechnungstool für Emissionsfaktoren
Tsd.	Tausend
TSI	Engl. turbocharged stratified injection
TU	Technische Universität
TUM	Technische Universität München
TÜV	Technischer Überwachungsverein
UBA	Umweltbundesamt
UN	United Nations
US	United States
VK	Vollkosten
VKM	Verkehrsmittel
VSL	Engl. value of statistical life
VW	Volkswagen
WBM	Wege-basiertes Modell
WHO	Weltgesundheitsorganisation

Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
a	€/dB ²	Kostenkorrelationsparameter
A^k	m ²	Stirnfläche von Fahrzeug k
AC	€	Unfallkosten für einen Unfall
AC_{ki}	€	Unfallkosten für Unfälle mit Fahrzeugklasse i als Verursacher
AC_{pi}	€	Unfallkosten für Unfälle, bei denen die Fahrzeugklasse i am Unfall beteiligt ist
$AC^k(v)$	€/Fkm	Spezifische Unfallkosten pro Fkm für das Fahrzeug k, das mit der Geschwindigkeit v fährt
AC_{ref}	€/Fkm	Spezifischer Referenzwert für Unfallkosten pro Fkm
ACV_i	€/Fkm	Spezifischen Unfallkosten pro Fkm nach Fahrzeugklasse i
AD_i	min	Durchschnittliche Verspätung für Fahrzeugklasse i
AP_{street}	-	Parameter für die Unfallwahrscheinlichkeit
APC_{mk}	€/g	Spezifische monetäre Kosten pro Gramm des Schadstoffs k für eine Straße der Kategorie m
b	€/dB	Kostenkorrelationsparameter
c	€	Kostenkorrelationsparameter
c_j	€/Person	Spezifischer Kostensatz pro Person nach Grad der Schädigung j
C_A	-	Nutzenkoeffizient Verkehrsmittelwahlmodell
C_C	-	Kalibrierungsparameter Verkehrsmittelwahlmodell
C_T	-	Kalibrierungsparameter Verkehrsmittelwahlmodell
C_{fat}	€	Kostenwert für einen Todesfall
C_{ser}	€	Kostenwert für eine schwere Verletzung
C_{min}	€	Kostenwert für eine leichte Verletzung
C_{ref}	-	Referenzwert für gesamte Lärmkosten
$C(v)$	-	Kosten – Lärm Korrelation
CC	€/Fkm	Spezifische Staukosten pro Fkm
CC_{ref}	€/Fkm	Referenzwert der spezifischen Staukosten pro Fkm

Formelzeichen

CCP_j	€/l	Spezifische Klimakosten pro Liter für die Produktion einer Brennstoffart j
CCP	€	Baukosten pro Stellplatz
CCV_{ij}	€/Fkm	Spezifische Klimakosten pro Fkm nach Fahrzeugklasse i mit Kraftstofftyp j
CNL_{jk}	€/Einwohner	Spezifischer Kostensatz pro Einwohner je Lärmpegel k und Infrastrukturart j
$COCV_i$	€/Fkm	Spezifische Staukosten pro Fkm nach Fahrzeugklasse i
$CONC$	€	Gesamte Staukosten
$E_{kin\ i}$	J	Kinetische Energie für die Fahrzeugklasse i
$E_{kin\ l}$	J	Kinetische Energie des an dem Unfall beteiligten Fahrzeugs l
$E_{kin,ref}$	J	Referenzwert für die kinetische Energie
EF_{ik}	g/Fkm	Spezifischer Emissionsfaktor pro Fkm des Schadstoffs k und der Fahrzeugklasse i
$EPCC_l$	€/kWh	Spezifische Klimakosten pro kWh des Stromerzeugungstyps l im Strommix
$EPPC_l$	€/kWh	Spezifische Luftverschmutzungskosten pro kWh des Stromerzeugungstyps l im Strommix
f^k	-	Rollwiderstandskoeffizient für Fahrzeug k
FC_i	l/100Fkm	Spezifischer Kraftstoffverbrauch pro 100 Fkm der Fahrzeugklasse i
$FC^k(v)$	l/100Fkm	Spezifischer Kraftstoffverbrauch pro 100 Fkm des Fahrzeugs k bei Geschwindigkeit v
FC_{ref}	l/100Fkm	Spezifischer Kraftstoffverbrauch pro 100 Fkm des Referenzfahrzeugs
FL_{lj}	Fkm/a	Jährliche Fahrleistung pro Fahrzeug i der Infrastrukturart j
g	m/s ²	Erdbeschleunigung
$GC_{i,t,m}$	min	Generalisierten Kosten
$GHGE_j$	g CO ₂ eq/l	Spezifische Treibhausgasemissionen pro Liter in CO ₂ -Äquivalenten je Brennstoffart
HB_{ij}	€/Fkm	Spezifischer Gesundheitsnutzen pro Fkm nach Fahrzeugklasse i (nur Fahrrad und Fußgänger) in Abhängigkeit von der Altersgruppe j
INV_j	€/a	Jährliche Investitionen der Gemeinde für den Infrastrukturtyp j
LCV_{ijp}	€/Fkm	Spezifische Landnutzungskosten pro Fkm nach Fahrzeugklasse i, Parkart p und Infrastrukturart (Straße, öffentlicher Verkehr oder Fahrrad) j
LTP	Jahre	Lebensdauer eines Stellplatzes
LUC	€/Fkm	Spezifische Flächenverbrauchs-kosten pro Fkm
LUC_{ref}	€/Fkm	Referenzwert der spezifischen Flächenverbrauchs-kosten pro Fkm

m^k	kg	Masse von Fahrzeug k
MCP	€/a	Jährliche Unterhaltskosten pro Stellplatz
MR_j	-	Sterblichkeitsrate in der Altersgruppe j
n_j	-	Anzahl der verletzten Personen nach Verletzungsgrad j eines Unfallereignisses
$N(v)$	-	Lärm – Geschwindigkeit Korrelation
$NC(v)$	€/Fkm	Spezifische Lärmkosten pro Fkm des Fahrzeugs mit Geschwindigkeit v
NC_{ref}	€/Fkm	Referenzwert der spezifischen Lärmkosten pro Fkm
NCV_{ij}	€/Fkm	Spezifische Lärmkosten pro Fkm nach Fahrzeugklasse i und Infrastrukturart (Straße oder Schiene) j
NP_{street}	-	Parameter für die Lärmwahrnehmung (abhängig von Straßentyp)
NR_j	-	Anzahl der Einwohner in der Altersgruppe j
NT	-	Anzahl der Fahrten pro Tag
NV_i	-	Anzahl der Stellplätze
NWF_i	-	Lärmgewichtungsfaktor pro Fahrzeug i des Infrastrukturtyps j
OC_p	€/m ²	Spezifische Opportunitätskosten pro Quadratmeter je Parkart p (Stellplätze oder Gehweg)
OCP	€/m ²	Spezifische Opportunitätskosten pro Quadratmeter eines Stellplatzes
p_{acc}	-	Kostenfaktor für die Berücksichtigung der Unfallhäufigkeit
$p_{fat}(v)$	%	Wahrscheinlichkeit für einen Todesfall bei Fahrzeuggeschwindigkeit v
$p_{ser}(v)$	%	Wahrscheinlichkeit für eine schwere Verletzung bei Fahrzeuggeschwindigkeit v
$p_{min}(v)$	%	Wahrscheinlichkeit für eine leichte Verletzung bei Fahrzeuggeschwindigkeit v
p_{fatref}	%	Referenzwahrscheinlichkeit für einen Todesfall
p_{serref}	%	Referenzwahrscheinlichkeit für eine schwere Verletzung
p_{minref}	%	Referenzwahrscheinlichkeit für eine leichte Verletzung
$p_{connoise}$	-	Staufaktor für Lärm
p_{conpc}	-	Staufaktor für Energieverbrauch
$p_{contime}$	-	Staufaktor für Stau
$P_{i,t}$	€	Bepreisung
P_{M1M2}	-	Wahlwahrscheinlichkeit
PAC	€	Jährliche Gesamtkosten für das Parken von Autos

Formelzeichen

PC_i	kWh/100Fkm	Spezifischer Stromverbrauch pro 100 Fkm der Fahrzeugklasse i
$PC^k(v)$	kWh/100Fkm	Spezifischer Stromverbrauch pro 100 Fkm des Fahrzeugs k bei Geschwindigkeit v
PC_{ref}	kWh/100Fkm	Spezifischer Stromverbrauch pro 100 Fkm des Referenzfahrzeugs
PCV_{ijm}	€/Fkm	Spezifische Kosten der Luftverschmutzung pro Fkm durch ein Fahrzeug der Klasse i mit Kraftstofftyp j auf einer Straße der Kategorie m
PD	Einwohner/km ²	Einwohnerdichte
PD_{av}	Einwohner/km ²	Durchschnittliche Einwohnerdichte für München
PP	€/a	Jährlicher Gewinn pro Stellplatz
PPC_j	€/l	Spezifische Kosten pro Liter der Verschmutzung bei der Kraftstoffherstellung für einen Kraftstofftyp j
$Pr_t(i)$	-	Eintrittswahrscheinlichkeit der Verkehrsmittelwahl von Verkehrsmittel i und Weg t
PSS	m ²	Größe eines Stellplatzes
RAN_{jk}	-	Von Lärmpegel k und Infrastrukturtyp j betroffene Einwohner in Anzahl der Einwohner
RC_i	€/m ²	Spezifischer Immobilienpreis pro Quadratmeter für das Stadtviertel der Kante i
RC_{av}	€/m ²	Durchschnittlicher spezifischer Immobilienpreis pro Quadratmeter für München
RR	-	Relatives Sterberisiko
SC_i	€/km	Spezifische Standardkosten pro km
SC_{ij}	m ²	Flächenverbrauch pro Fahrzeug i des Infrastrukturtyps j
SP_l	-	Anteil der Stromerzeugungsart l am Strommix ohne Einheit
SPT	-	Anteil des öffentlichen Verkehrs an diesen Fahrten
ST_i	Stunden	Tägliche Standzeit pro Fahrzeugklasse i (Unterschied zwischen Sharing und Privat)
t	min/Woche	Tägliche Reisezeit pro Person
t_{ref}	min/Woche	Tägliche Reisezeit pro Person im Referenzszenario
$TD_{i,t}$	km	Fahrdistanz
TP_i	Pkm/a	Jährliche Transportleistung der Fahrzeugklasse i
$TT_{i,t}$	min	Fahrzeit
$U_{i,t}$	-	Gesamtnutzen Verkehrsmittelwahlmodell
U_{M1}	-	Nutzen von Verkehrsmittel 1
U_{M2}	-	Nutzen von Verkehrsmittel 2
v	m/s	Nominelle Netzwerkgeschwindigkeit

VL	€	Statistischer Wert des Lebens
VOT_m	€/min	Spezifischer Wert der Zeit pro Minute
VT	€/h	Spezifischer Wert der Zeit pro Stunde
w^k	-	Luftwiderstandskoeffizient von Fahrzeug k
α	%(km/h) ²	Wahrscheinlichkeits-Korrelationsparameter
β	%(km/h)	Wahrscheinlichkeits-Korrelationsparameter
γ	%	Wahrscheinlichkeits-Korrelationsparameter
ε	%(km/h)	Wahrscheinlichkeits-Korrelationsparameter
ζ	%	Wahrscheinlichkeits-Korrelationsparameter
κ	%(km/h) ²	Wahrscheinlichkeits-Korrelationsparameter
λ	%(km/h)	Wahrscheinlichkeits-Korrelationsparameter
μ	%	Wahrscheinlichkeits-Korrelationsparameter
η	-	Antriebsstrangeffizienz
ρ	kg/m ³	Luftdichte
λ_{NOIST_i}	-	Verteilungsschlüssel des Verkehrslärms pro Verkehrsmittel
$\Delta RISK_{Mort,i}$	-	Verringertes Sterberisiko
x	dB/(km/h) ^y	Lärmkorrelationsparameter
y	-	Lärmkorrelationsparameter

1 Einleitung

Die öffentliche Verkehrsdebatte beschränkt die Nachhaltigkeit des Verkehrs zunehmend auf die Auswirkungen der verkehrsgebundenen CO₂-Emissionen. Laut Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ) besteht Nachhaltigkeit neben dem Klimaschutz aus den drei Dimensionen „wirtschaftlich effizient, sozial gerecht, ökologisch tragfähig“ [1]. Diese nehmen Einfluss auf die Gesellschaft zukünftiger Generationen.

Ein Ansatz zur Messung der Auswirkungen von Verkehr auf die Gesellschaft sind die Vollkosten. Diese beinhalten sowohl interne als auch externe Kosten und decken damit je nach Definition einen Großteil der vom BMZ definierten Komponenten für Nachhaltigkeit ab. Interne Kosten spiegeln die Kosten wider, die durch den Konsumenten, der die Verkehrsaktivität verursacht, getragen werden [2]. Dies beinhaltet beispielsweise Treibstoff- oder Reparaturkosten für ein eigenes Auto oder Ticketpreise des öffentlichen Nahverkehrs. Niedrige Kosten drücken in diesem Fall eine wirtschaftliche Effizienz und somit einen Teil der Nachhaltigkeit aus. Externe Kosten dagegen werden nicht direkt durch den Konsumenten, der die Verkehrsaktivität verursacht, getragen. Sie bemessen somit die Kosten, die für die gesamte Gesellschaft entstehen und werden durch eine Vielzahl an Herausforderungen im Verkehr hervorgerufen [3]. Einerseits berücksichtigen die Kosten den enormen Zeitverlust durch Staus im Straßenverkehr oder Verspätungen im öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV). Andererseits inkludieren sie die starke Belastung der Umwelt durch lokale Luftschadstoffe und Treibhausgasemissionen, die den Klimawandel vorantreiben. Zusätzlich besteht die konkrete Gefahr, dass jeder einzelne Verkehrsteilnehmer in einen schwerwiegenden Verkehrsunfall verwickelt werden kann. Diese Unfälle erzeugen ebenfalls externe Kosten für die Gesellschaft. Die Sicherheit vulnerabler Verkehrsteilnehmer wie Fußgänger und Fahrradfahrer ist hierbei besonders akut gefährdet [4].

In der Verkehrspolitik wird das Mittel der Regulierung des Verkehrs herangezogen, um bestimmte Ziele hinsichtlich sozialer, wirtschaftlicher und ökologischer Bedingungen (Nachhaltigkeit) zu erreichen [4]. Dadurch können die internen und externen Kosten verringert und die Effizienz des Verkehrssystems gesteigert werden. Vor allem externe Kosten werden reduziert, indem sie internalisiert und damit auf die Verursacher umgelegt werden. Reguliert wird dies über eine Bepreisung in Höhe der externen Kosten [5].

Die aktuelle Forschung bietet viele Ansätze zur Bilanzierung von internen oder externen Kosten. Die berücksichtigten Kostenfaktoren unterscheiden sich jedoch in den Studien fundamental (Tabelle 2.2 und Tabelle 2.3). Zudem untersuchen weitere Studien die Internalisierung von Externalitäten im Verkehr. Jedoch liegt hier der Fokus meist auf Externalitäten durch CO₂-Emissionen, Lärm oder Stau im Autoverkehr [6–8]. Im Stand der Technik lässt sich bisher keine Methodik zur Berechnung der internen und externen Kosten aller urbanen Verkehrsmittel finden, die neben motorisiertem Individualverkehr sowohl öffentlichen Nahverkehr, Sharing Dienste als auch aktive Mobilität beinhalten. Des Weiteren besteht eine Lücke in der Erforschung von Bepreisung des Verkehrssystems auf Basis der Vollkosten aller urbanen Verkehrsmittel. Die Untersuchung von Bepreisung beziehungsweise Internalisierung werden in der Literatur mit Hilfe

von Verkehrssimulationen durchgeführt [7]. Diese berücksichtigen jedoch in der Regel keinen Einfluss auf die Verkehrsmittelwahl.

Ziel dieser Arbeit ist daher die Quantifizierung der internen und externen Kosten aller urbanen Verkehrsmittel am Beispiel des urbanen Raums in München. Dazu werden die wirkungsstärksten Kostenkategorien der aktuellen Literatur für die hier verwendete Methodik ausgewählt. Ein zweites Ziel ist die Gestaltung einer Bepreisungsform, die die vorher bestimmten internen und externen Kosten aller urbanen Verkehrsmittel verwendet. Die Ergebnisse dieser Arbeit sollen die Auswirkungen der Bepreisung auf die Verkehrsmittelwahl zeigen und die Grundlage für gezielte Empfehlungen für die Gestaltung der Bepreisung an Entscheidungsträger darstellen.

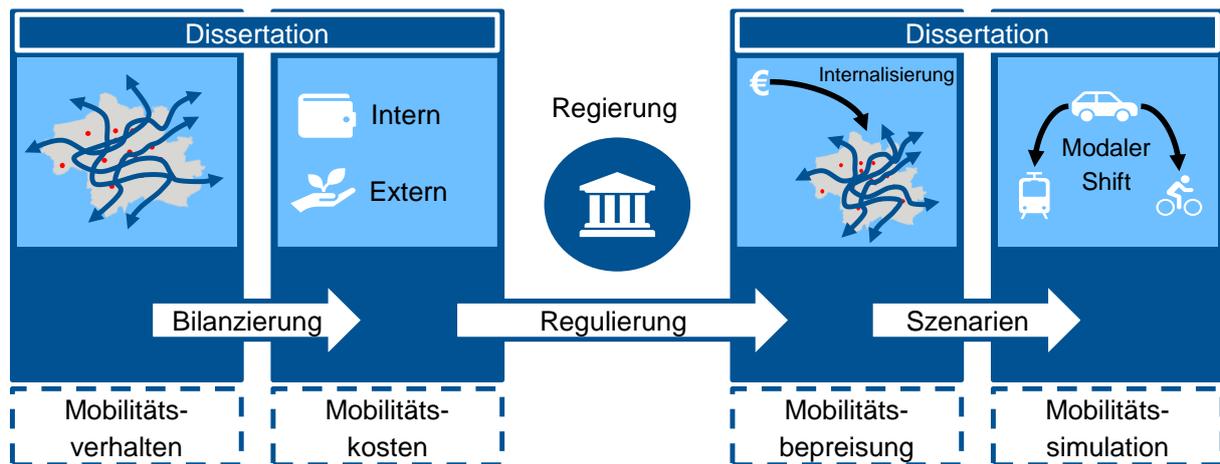


Abbildung 1.1: Aufbau der Inhalte dieser Dissertation

Dazu besteht der Inhalt der Dissertation aus vier Säulen (Abbildung 1.1):

- Mobilitätsverhalten
- Mobilitätskosten
- Mobilitätsbepreisung
- Mobilitätssimulation

Zunächst wird der Status Quo eines Mobilitätssystems analysiert. Dafür wird das aktuelle Mobilitätsverhalten einer Bevölkerung hinsichtlich ihrer Kosten bilanziert. Die Kosten werden in internen und externen Kosten dargestellt. Diese geben Aufschluss darüber, ob die Kosten eines Systems fair verteilt sind und ob im Sinne der Nachhaltigkeit alle Ziele erreicht werden. Entscheidungsträger einer Regierung können daraufhin über die Einführung von Regulierungen abstimmen. Im Zuge dieser Arbeit wird eine besondere Form der Regulierung untersucht: Die Bepreisung mit Hilfe der Vollkosten. In den folgenden Kapiteln werden verschiedene Szenarien für die unterschiedlichen Ausprägungen der Bepreisung ausgewählt und untersucht. Dies geschieht mit Hilfe eines Verkehrsmittelwahlmodells, in dem die Auswirkungen der Bepreisungen auf die Verkehrsmittelwahl der Bevölkerung simuliert werden. Insbesondere steht dabei die Änderung des modalen Splits im Fokus. Dieser hat wiederum Einfluss auf die Gesamtkostenbilanz des Systems. Ziel ist es, eine möglichst hohe Reduktion der Gesamtkosten zu erreichen.

Die Inhalte dieser Arbeit sind in enger Zusammenarbeit mit dem MCube Forschungsprojekt SASIM [9] entstanden und damit Teil der gesamten Mission von MCube. Der Forschungscluster „MCube – Münchner Cluster für die Zukunft der Mobilität in Metropolregionen“ [10] ist ein vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderter Cluster und verfolgt drei Missionen: die Verbesserung von Zeit, Raum und Luft.

2 Stand der Technik

Im Stand der Technik werden die Grundlagen und das nötige Hintergrundwissen für die hier verwendete Methodik vermittelt. Dabei werden die Inhalte der aktuellen Literatur und Forschung zu den in der Einleitung erwähnten Säulen der Arbeit zusammengefasst. In diesem Zuge wird zu Beginn ein Grundverständnis für das Mobilitätsverhalten einer urbanen Bevölkerung geschaffen, indem Definitionen und Methoden zur Messung und Bewertung des Verhaltens vorgestellt werden. Im Anschluss gibt es eine Zusammenfassung zu der aktuellen Literatur im Bereich der Mobilitätskosten sowie Mobilitätsbepreisung. Zum besseren Verständnis der in dieser Arbeit verwendeten Hilfsmittel und Methoden werden zusätzlich die Grundlagen und aktuelle Literatur zur Verhaltensmodellierung erläutert. Zum Schluss wird aus den Zielen dieser Arbeit und dem Stand der Technik die Forschungslücke hergeleitet.

2.1 Mobilitätsverhalten

In diesem Unterkapitel werden zunächst die gängigen Definitionen der datenbasierten Mobilitätsforschung genannt und gezeigt, wie wichtig Mobilitätsdaten und deren Aufnahme für die Analyse des Mobilitätsverhaltens einer Bevölkerung sind. Danach werden die politischen Ziele und Strategien im Verkehrssektor erläutert.

2.1.1 Definitionen

Was ist Mobilität? Dazu gibt es verschiedene Auslegungen des Wortes. In der Soziologie beschreibt es die Bewegung zwischen verschiedenen sozialen Stellungen, die sich nach Einkommen, Gesundheit oder Bildung unterscheiden [11]. In dieser Arbeit liegt der Fokus jedoch auf der räumlichen Mobilität. Diese beschreibt die physische Bewegung von Menschen oder Gütern zwischen verschiedenen Standorten [11]. Für den Zweck dieser Arbeit liegt der Fokus auf einer Form der räumlichen Mobilität, der zirkulären Mobilität: Bewegungen die zu ihrem Startpunkt nach einer relativ kurzen Zeit wieder zurückkehren (Alltagsmobilität, Pendelmobilität, Reisen) [12]. Räumliche Mobilität im Sinne der langfristigen Verlagerung des Wohnorts gehört nicht dazu.

Ein anschauliches Beispiel dafür ist der Weg zur Arbeit und wieder zurück. Um diese Bewegung einer Person zu beschreiben, gibt es viele Untersuchungsgrößen. Diese dienen dazu eine möglichst genaue Darstellung unseres Mobilitätsverhaltens herzustellen. Für unser Beispiel lassen sich folgende Zusatzinformationen ermitteln: „Wer bewegt sich, wann, warum, von wo nach wo und wie?“ Diese Frage beinhaltet mehrere Eigenschaften einer Bewegung. Zum einen fragt sie nach personenbezogenen Informationen (wer?) aber auch nach dem genutzten Verkehrsmittel (wie?), dem Zeitpunkt (wann?), dem Zweck (warum?) und der genauen örtlichen Abfolge der Wegpunkte (von wo nach wo?) [13]. Die großen bekannten deutschen Mobilitätsbefragungen

„Mobilität in Deutschland (MiD)“ [14] und „Mobilitätspanel“ [15] befassen sich in ihren Befragungen genau mit diesen Untersuchungsgrößen.

Neben der direkten Beschreibung der sich bewegenden Personen und der Bewegung gibt es Daten, die direkt oder indirekt von dem Mobilitätsverhalten abhängen. Diese zeigen meist die Wirkung und das Zusammenspiel vieler verschiedener mobiler Menschen. Dazu gehören zum Beispiel Unfallstatistiken, Abgasmessungen, und viele mehr. Diese adressieren direkt die Herausforderungen des Mobilitätssektors wie Klimawandel, Stau oder Unfälle. Diese Daten stellen somit die Verknüpfung des menschlichen Verhaltens und den daraus folgenden Problemen her. Abbildung 2.1 stellt diesen kausalen Zusammenhang beispielhaft und schematisch dar.



Abbildung 2.1: Schematische Darstellung Zusammenhang zwischen Mobilitätsverhalten und Herausforderungen

Im Zuge dieser Arbeit werden die kausalen Zusammenhänge zwischen Mobilitätsverhalten und Auswirkungen auf die Umwelt und Gesellschaft mit Hilfe der Vollkosten tiefergehend beleuchtet. Dafür werden viele verschiedene Mobilitätsdaten benötigt. Um diese zu ermitteln, gibt es verschiedene Methoden [13]:

- Befragungen
- Verkehrszählungen
- Smartphone App
- Mobilfunkdaten

Befragungen von Haushalten sind dabei eine beliebte Form der Aufnahme von Mobilitätsdaten. Der große Vorteil dabei ist, detaillierte Informationen über die Personen des Haushalts und den Zweck der Mobilitätsaktivität zu bekommen. Auf der anderen Seite ist durch die Entwicklung von Fragebögen und die Akquirierung von Teilnehmern ein hoher Aufwand mit dieser Methode zu erwarten. Mit weniger Aufwand sind Verkehrszählungen verbunden, hierbei besteht jedoch keine Möglichkeit, Informationen über die Personen zu erhalten. Außerdem ist der genaue Start- und Endpunkt der Mobilitätsaktivität nicht zu ermitteln [13].

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, einer repräsentativen Menge an Menschen eine spezielle Smartphone Applikation zur Verfügung zu stellen. Dort kann die Methodik der Befragungen mit direkt aufgenommenen Bewegungsprofilen über GPS-Daten verbunden werden. Ein Anbieter von Software für die messtechnische Erfassung solcher Daten ist MotionTag [16]. Die große Menge an GPS-basierten Bewegungsdaten mit automatischer Zuordnung des verwendeten Verkehrsmittels ermöglicht genauere Aussagen zum Mobilitätsverhalten der teilnehmenden Person. Der Nachteil liegt hier in der Aufnahme von sensiblen Daten. Diese dürfen nur unter hohen Auflagen des Datenschutzes verwendet werden und die Teilnehmer müssen der Verwendung der Daten zustimmen.

Mobilfunkanbieter können ebenfalls Informationen über die Standorte ihrer Kunden erheben. Dabei liegen große Mengen an Bewegungsdaten vor, die sowohl für personengebundene Auswertungen als auch für makroskopische Analysen verwendet werden können. Das Statistische Bundesamt hat diese Art der Daten beispielsweise für Mobilitätsindikatoren während der COVID Pandemie für ganz Deutschland angewendet [17].

2.1.2 Ziele und Strategien

Ein Ziel dieser Arbeit ist die Weitergabe von Empfehlungen an Politik und weiteren Entscheidungsträgern. Dazu werden in diesem Kapitel politische Ziele und Strategien im Verkehrssektor vorgestellt. Im Vordergrund stehen dabei die Ziele zur Verbesserung der Nachhaltigkeit. Diese werden sowohl auf globaler, nationaler und regionaler Ebene festgelegt. Im Jahr 2015 haben die United Nations (UN) dazu 17 globale Nachhaltigkeitsziele in der Agenda 2030 definiert [18]. Die Ziele sind sektorübergreifend aufgestellt, sodass dort keine konkreten Vorgaben für die Mobilität der Menschen gestellt werden. Das Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ) definiert Nachhaltigkeit folgendermaßen:

„Nachhaltigkeit oder nachhaltige Entwicklung bedeutet, die Bedürfnisse der Gegenwart so zu befriedigen, dass die Möglichkeiten zukünftiger Generationen nicht eingeschränkt werden. Dabei ist es wichtig, die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit – wirtschaftlich effizient, sozial gerecht, ökologisch tragfähig – gleichberechtigt zu betrachten.“ [1]

Sowohl die Nachhaltigkeitsziele der UN als auch die Definition des BMZ beschreiben Nachhaltigkeit mit vielen weiteren Aspekten, die über den Klimaschutz hinaus gehen. Dies ist ebenfalls bedeutend für die Strategien zur Erreichung der Nachhaltigkeitsziele im Verkehrssektor. Die Bundesregierung setzt dennoch den Fokus auf Klimaschutz in ihrer Strategie. Dazu werden konkrete Maßnahmen und Zahlen genannt. Bis 2030 sollen 15 Millionen Elektroautos auf deutschen Straßen fahren und eine Million öffentliche Ladepunkte dafür zugänglich sein [19]. Das Umweltbundesamt erweitert diese Ziele um 8 konkrete Bausteine für einen klimaverträglichen Verkehr (Abbildung 2.2) [20].

Auf regionaler Ebene ist der Fokus breiter. Die Landeshauptstadt München (LHM) hat 2021 eine umfassende Mobilitätsstrategie für das Jahr 2035 vorgelegt [21]. Dort sind zum einen Umweltziele wie 80% emissionsfreier Verkehr bis 2025 und klimaneutraler Verkehr bis 2035 erwähnt. Auf der anderen Seite sind auch weitere Ziele genannt, die zum Beispiel die Verkehrssicherheit betreffen. Dort ist das Ziel bis 2035 die Anzahl der Verkehrstoten auf null zu reduzieren.

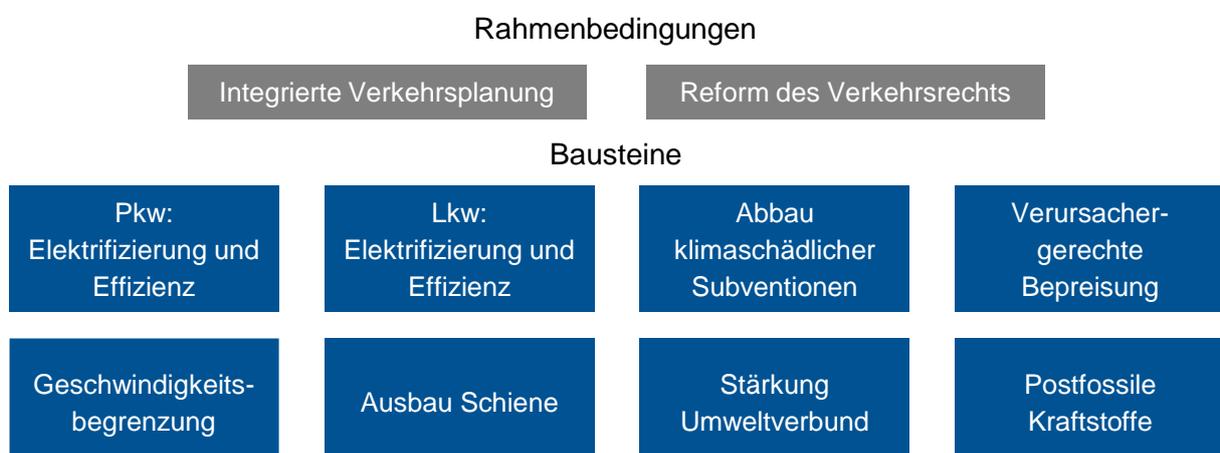


Abbildung 2.2: Bausteine für einen klimaverträglichen Verkehr nach Umweltbundesamt [20]

Für das Erreichen der Ziele nennt die LHM auch Maßnahmen. Diese beinhalten die Erhöhung des Anteils von ÖPNV an Wegen in München, Bereitstellung von 2500 Sharing-Stellplätzen und das Errichten von 200 Mobilitätspunkten [21]. Aus der Strategie geht somit hervor, dass sich der Modal Split verändern soll. Der Anteil von Wegen mit dem ÖPNV und aktiver Mobilität soll erhöht werden. Um dies zu erreichen, werden viele Teilstrategien vorgestellt, die Investitionen in Infrastruktur berücksichtigen und Alternativen zum privaten Autobesitz anbieten sollen [21]. Insgesamt wird der Bevölkerung eine enorme Verhaltensveränderung abverlangt. Wie so etwas durch Regulierung erreicht werden kann, wird in Kapitel 2.3.1 erläutert. Bevor jedoch Regulierung eingeführt werden kann, muss der Status Quo hinreichend bewertet werden. Ein Hilfsmittel zur Messung und Bewertung des Status Quo kann die Bilanzierung der Vollkosten der Mobilität sein. Diese Methodik berücksichtigt eine umfangreiche Menge an Faktoren, die über den Klimaschutz hinaus alle Aspekte der Nachhaltigkeit widerspiegeln. Der Stand der Technik dazu wird im nächsten Kapitel weiter erläutert.

2.2 Mobilitätskosten

Abbildung 2.3 zeigt die Definition der volkswirtschaftlichen Kosten, auch Vollkosten genannt, nach Ecoplan und Infracas [3]. Dabei wird zwischen internen und externen Kosten unterschieden, die sich zu den Vollkosten aufsummieren lassen.

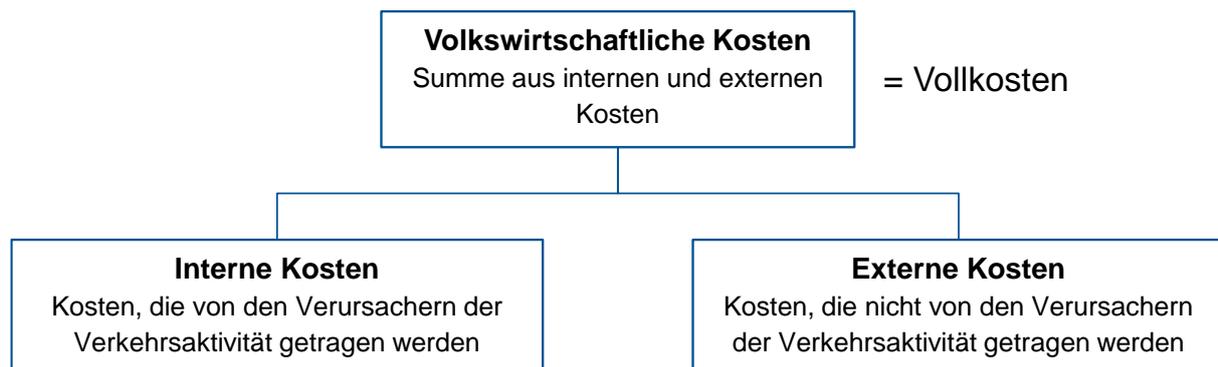


Abbildung 2.3: Aufteilung der volkswirtschaftlichen Kosten (Vollkosten) in interne und externe Kosten, eigene Darstellung nach [3]

Die Effekte der internen und externen Kosten können sowohl in positiver (Nutzen) als auch negativer Form (Kosten) auftreten. Da in dieser Arbeit jedoch aus der Sicht der Kosten argumentiert wird, ist das Vorzeichen der Kostenwerte jedoch umgekehrt: Kosten haben positive Werte, Nutzen haben negative Werte.

Zu den internen Effekten gehören die Kosten, die von der Person, die die Verkehrsaktivität durchführt, getragen werden. Sie werden deshalb in der Literatur auch private Kosten genannt [2, 22, 23]. Weiterführend wird dies in Kapitel 2.2.1 erläutert.

Externe Kosten, auch Externalitäten genannt, entstehen immer dann, wenn die Produktion oder der Konsum eines Produkts Kosten bei anderen verursachen, die allerdings nicht im Preis mit enthalten sind [24]. Im städtischen Verkehr trägt somit der Verkehrsteilnehmende die verursachten Kosten bei anderen nicht selbst. In Kapitel 2.2.2 werden die externen Kosten im Detail erklärt.

2.2.1 Interne Kosten

Interne Kosten berücksichtigen materielle und immaterielle Effekte. Der immaterielle Anteil der Kosten wird durch beispielsweise die nervliche Belastung beim Fahren oder das Risiko von persönlichen Unfallfolgen verursacht [25–27]. Dabei ist entscheidend, dass diese Belastungen erwartbar sind und nicht durch unerwartete Ereignisse wie Verspätung oder Stau hervorgerufen werden. Der materielle Anteil der Kosten ist deutlich verbreiteter in der Literatur und wird oftmals als „Total-Cost-of-Ownership“ (TCO) oder Verbraucherkosten bezeichnet. Die TCO beziehen sich auf den Besitz eines Fahrzeugs und die damit verbundenen Kosten. Verbraucherkosten sind allgemeiner gehalten und können auch Kosten durch die Inanspruchnahme von Services beinhalten. Im Folgenden wird die TCO-Methode anhand von weiterer Literatur im Bereich Mobilität erläutert.

Grundsätzlich basieren viele der zugrunde liegenden Kostenmodelle auf einem TCO-Ansatz, der die Kosten in die folgenden drei Komponenten unterteilt [28]:

- Anschaffung
- Betrieb
- Entsorgung oder Wiederverkaufswert

Pomykala [29] untersuchte die Effizienz der heutigen Verkehrsträger im Hinblick auf ihre Gesamtpassagierkapazität, Energieverbrauch, CO₂-Emissionen und Kosten. In der Studie werden die Kosten in Abhängigkeit von den verschiedenen Antriebsarten für Autos, Motorroller, Motorräder, Busse, Straßenbahnen, U-Bahnen und schwere Schienenfahrzeuge berechnet. Die Kostenberechnung bezieht sich auf die Kosten pro Personenkilometer, die von den Verkehrsmitteln verursacht werden. Pomykala [29] weist auf die starke Abhängigkeit der Kosten pro Personenkilometer von der Tageszeit (Hauptverkehrszeit vs. Nebenverkehrszeit) hin aufgrund der Abweichungen im Betrieb bei Stau und fließendem Verkehr.

Kochhan et al. [28] untersuchten 2013 die Verbraucherkosten von "Mittelklasse"-Elektrofahrzeugen im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen in Singapur. Die spezifischen Kostenkomponenten der TCO-Analyse beruhen auf Literaturwerten oder Expertenannahmen, wobei keine Differenzierung zwischen variablen Faktoren wie Jahresfahrleistung oder Fahrzeugsegmenten vorgenommen wurde [28]. Das Modell ergibt für den Verbraucher deutlich höhere TCO für Battery Electric Vehicle (BEV) im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen aufgrund der nachteiligen Auswirkungen der singapurischen Kfz-Steuer auf die höheren Anschaffungskosten für BEV [28]. Unter diesen Bedingungen können die niedrigeren Betriebskosten von BEV den höheren Anschaffungspreis nicht annähernd ausgleichen. Die endgültigen Ergebnisse der Studie sind jedoch nicht vollständig auf diese Arbeit übertragbar, weil der Stadtstaat Singapur erhebliche Steuern auf Fahrzeuge erhebt, die im Vergleich zum europäischen Markt zu einem etwa dreifachen Kaufpreis führen [28]. Ähnlich wie Kochhan et al. führten Propfe et al. [30] eine TCO-Analyse für elektrifizierte Fahrzeuge wie BEV mit und ohne Range Extender, Hybrid Electric Vehicle (HEV) sowie Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV) durch und verglichen die TCO dieser elektrifizierten Fahrzeuge mit konventionellen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor (ICEV) in Deutschland. Die Kostenanalyse wurde im Jahr 2012 für das Jahr 2020 erstellt. Im Gegensatz zu anderen Studien wurden in dieser Studie auch die Auswirkungen von unterschiedlichen Jahresfahrleistungen berücksichtigt. Das Modell ergab einen TCO-Vorteil für BEV mit einem Range Extender für Verbraucher, die 20.000 km oder mehr pro Jahr fahren [30]. Dasselbe Modell prognostizierte jedoch, dass die TCO für reguläre BEV um 3% und für Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV) um 27% höher sein würden als für reguläre ICEV bei einer jährlichen

Fahrleistung von 20.000 km im Jahr 2020 [30]. Eine weitere wichtige Quelle zur Elektrifizierung von Fahrzeugen, die in dieser Studie verwendet wird, ist eine Studie des International Council on Clean Transportation (ICCT) [31], in dem der Anschaffungspreis sowie die TCO-Entwicklung für Elektrofahrzeuge von 2019 bis 2030 anhand der Entwicklung der Batteriekosten untersucht wird. Der Schwerpunkt der Studie [31] lag auf der Sammlung von Daten für die Kostenentwicklung bis 2030 von Lithium-Ionen-Batterien und anderen elektrischen Komponenten auf der Grundlage von technischen Forschungsarbeiten und Angaben der Automobilhersteller.

Compostella et al. [32] führten eine weitere TCO-Analyse für Personenkraftwagen durch und untersuchten ICEV, HEV, PHEV und BEV in den beiden Nutzungsszenarien: Privatverkehr und Fahrdienst. Es werden kurzfristige (2020) und langfristige (2035) TCO-Kosten betrachtet, wobei im kurzfristigen Szenario davon ausgegangen wird, dass alle Fahrzeuge mit Fahrer betrieben werden und im langfristigen Szenario, dass alle Fahrzeuge autonom betrieben werden. Ähnlich wie bei anderen Studien ergab die Analyse eine drastische Reduzierung der TCO für autonom betriebene Ride-Sourcing-Dienste im langfristigen Szenario, hauptsächlich aufgrund des Wegfalls des Fahrers [32]. Die derzeitige Situation, dass Ride-Sourcing-Dienste deutlich teurer sind, könnte sich dahingehend wandeln, dass Ride-Sourcing-Dienste langfristig für den Verbraucher billiger werden als private Fahrzeuge [32].

Bösch et al. [33] untersuchten in einer kostenbasierten Analyse die Auswirkungen von autonomer Technologie auf Mobilitätsdienstleistungen wie Taxis im Vergleich zu öffentlichen Bahnen und Bussen im Stadt- und Regionalgebiet Zürich. Dabei werden verschiedene Szenarien für die Nutzung eines Autos definiert und die Kosten in alle Arten von Kosten wie Betriebskosten, Fahrerkosten für den Taxibetrieb und Gemeinkosten aufgeteilt [33]. Das Forschungsergebnis unterscheidet die Kosten für Fahrzeuge mit den folgenden Faktoren:

- Einsatzgebiet: regional oder städtisch
- Betriebsart: privat, gebündelt (Ridepooling) oder nicht gebündelt (traditionelles Taxi)
- Fahrer: mit oder ohne
- Antrieb: konventionell oder elektrisch

Abschließend werden die verschiedenen Nutzungsszenarien hinsichtlich der Kosten pro Fahrzeugkilometer, Kosten pro Fahrgastkilometer und Kosten pro Sitzplatzkilometer verglichen [33]. Der Autor kommt zu dem Ergebnis, dass die Technologie des autonomen Fahrens wenig bis gar keinen Einfluss auf den Individualverkehr haben wird, aber einen signifikanten Einfluss auf die Kosten von Ride-Hailing-Diensten und Taxis haben wird [33]. In ähnlicher Weise analysierten Lim und Tawfik [34] die TCO-Entwicklung für private autonome Fahrzeuge und gemeinsam genutzte autonome Fahrzeuge für den Zeitraum zwischen 2020 und 2070. Ongel et al. [35] untersuchten in einer umfassenden TCO-Analyse das wirtschaftliche Potenzial eines autonomen Elektro-Microtransit-Fahrzeugs für 30 Fahrgäste für den Stadtstaat Singapur. Die TCO-Analyse vergleicht die Kosten eines autonomen Elektrofahrzeugs mit bestehenden Bussystemen und berücksichtigt dabei zukünftige Kostenentwicklungen für Elektrifizierung und Automatisierung [35].

Frank et al. [36] analysierten die Gesamtbetriebskosten für öffentliche Busse unter Berücksichtigung umfassender Vereinfachungen für Faktoren wie Reifenverschleiß, Gemeinkosten und verschiedene andere Kosten. Das Modell ist ohne weitere Komplikationen auf die Berechnung der Buskosten einer bestimmten Stadt übertragbar, wenn Parameter wie das Gehalt des Fahrers und des Wartungspersonals, die Flottengröße, der Energieverbrauch, die jährliche Fahrleistung

pro Bus und einige andere Parameter bekannt sind. In der vorliegenden Arbeit wird die TCO Betrachtung von ÖPNV nicht weiter berücksichtigt, weil die Fahrpreise für öffentliche Verkehrsmittel in München nicht je nach Verkehrsmittel (Bus, U-Bahn, Tram usw.) variieren. Dennoch soll die Studie an dieser Stelle erwähnt werden, weil sie eine nützliche Grundlage für die Berechnung der TCO von Bussen für zukünftige Untersuchungen darstellt.

Tabelle 2.1: Übersicht der TCO-Studien zu Kostenform und berücksichtigte Verkehrsmittel

Quelle	Kosten pro Fahrzeugkilometer ¹⁾	Kosten pro Sitzplatzkilometer ¹⁾	Kosten pro Personenkilometer ¹⁾	Kosten pro Zeiteinheit	Berücksichtigte Verkehrsmittel
Bösch et al. [33]	x	x	x		AV-Shuttle, Pkw, Bus, Zug
Compostella et al. [32]	x		x		AV-Shuttle, Pkw
Lim und Tawfik [34]			x		AV-Shuttle, Pkw
Kochhan et al. [28]	x			x	AV-Shuttle, Pkw
Propfe et al. [30]	x			x	Pkw
Lutsey und Nicholas [31]				x	Pkw (Batterie)
Pomykala [29]	x	x	x		Pkw, Motorrad, Moped, Bus, Zug
Ongel et al. [35]			x	x	AV-Shuttle, Bus
Frank et al. [36]				x	Bus
Bubeck et al. [37]	x			x	Pkw

1) inklusive Ergebnisse in Meilen

Tabelle 2.1 zeigt eine Übersicht der TCO-Studien und vergleicht diese anhand ihrer Kostendarstellungsform und berücksichtigter Verkehrsmittel. Sie zeigt einen repräsentativen Querschnitt der TCO-Literatur und hat keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Trotzdem wird dabei deutlich, dass ein Großteil der Studien den Fokus auf die Berechnung der Kosten pro Fahrzeugkilometer oder Kosten pro Zeiteinheit legen. Die Kosten pro Personenkilometer werden jedoch seltener berechnet. Die meisten Studien führen die TCO-Analyse für Pkw und autonome Shuttles durch. Zwischen diesen beiden Verkehrsmitteln war in der aktuellen Literatur der Kostenvergleich am aufschlussreichsten. Einen Kostenvergleich zwischen allen urbanen Verkehrsmitteln gibt es in der aktuellen Literatur nicht und soll daher im Zuge dieser Dissertation mit aktuellen Daten und für Deutschland am Beispiel München erarbeitet werden.

2.2.2 Externe Kosten

Im Folgenden wird zunächst die Theorie der externen Kosten näher beleuchtet. Anschließend werden aktuelle Studien zu externen Kosten im Verkehr untersucht. Daraus lassen sich die gängigsten Kostenkategorien und Methoden zur Monetarisierung der Externalitäten ableiten.

Theorie

Wie bereits am Anfang von Kapitel 2.2 erklärt, treten Externalitäten immer dann auf, wenn die Aktivitäten einer Person Wirkung auf unbeteiligte Dritte verursachen [38]. Diese Wirkung kann sowohl positiv (Nutzen) als auch negativ (Kosten) sein. Externe Kosten stellen in diesem Zusammenhang die quantifizierte Form von Externalitäten dar. Die Volkswirtschaftslehre unterscheidet bei den Externalitäten weitergehend zwischen technologischen und pekuniären

Externalitäten [3]. Der Unterschied dieser beiden Formen besteht darin, dass die technologischen Externalitäten keine Veränderung der Marktlage verursachen, pekuniäre Externalitäten hingegen schon. Das Bundesamt für Raumentwicklung und das Bundesamt für Straßen nennt für die Unterscheidung dieser beiden Externalitäten folgendes Beispiel [39]: „Ein Bauer produziert mit dem Einsatz von Saatgut, Boden, Kapital und Arbeit eine bestimmte Menge an Getreide. Auf dem Nachbarboden siedelt sich ein neues Unternehmen an, das mit dem Einsatz von Kapital, Arbeit und chemischen Vorprodukten ein bestimmtes chemisches Endprodukt herstellt. Wir nehmen an, dass zwei Externalitäten zu beobachten sind:

- Bei der Herstellung des chemischen Endprodukts stößt das Unternehmen Schadstoffe in die Umwelt aus, die den Ernteertrag des Bauern schmälern
- Durch die zusätzliche Nachfrage des Unternehmens nach Arbeitskräften steigen die Löhne“

Bei der ersten Externalität handelt es sich um die technologische Form. Diese hat keinen direkten Einfluss auf die Preise des Marktes. Der Bauer muss diese Beeinträchtigung hinnehmen und das Unternehmen hat kein ökonomisches Interesse den Schadstoffausstoß zu reduzieren. In diesem Fall kommt es zu einem Wohlfahrtsverlust und ein Internalisierungsbedarf entsteht [23]. In Kapitel 2.3.2 geht es im Detail um die Mechanismen der Internalisierung und Bepreisung.

Bei der zweiten Externalität handelt es sich um die pekuniäre Form, weil die gestiegenen Löhne eine Reaktion der veränderten Marktlage sind. Dies führt zu einer neuen Allokation der Ressourcen (Arbeitskräfte) und die Entscheidungen von Bauern und Chemiefabrik führen zum optimalen Einsatz der Ressourcen. In diesem Fall ist kein regulatorisches Eingreifen mit Internalisierung gefordert [39]. Im Zuge dieser Arbeit liegt der Fokus auf den technologischen Externalitäten, weil diese Regulierung fordern, um Fairness auf dem Markt herzustellen. Regulierung ist der zweite große Bestandteil dieser Arbeit (Kapitel 1).

Aktuelle Studien

Externe Kosten spielen im Verkehrssektor eine besondere Rolle. Dies liegt zum einen an der hohen Dichte an Verkehrsaktivitäten und zum anderen an der Vielfalt an verschiedenen Mobilitätsoptionen im urbanen Raum. Das Auftreten der Externalitäten in der urbanen Mobilität führt aus diesen Gründen zu einer Verzerrung des Wettbewerbs, sodass besonders dort eine Regulierung der Aktivitäten zu einem vollkosteneffizienteren und gerechteren System führt [40]. Für die Literaturrecherche wurden die relevantesten Werke hinsichtlich wissenschaftlicher Popularität (Häufigkeit der Zitationen), räumlicher Nähe zu dem Untersuchungsraum der Arbeit (München) und politischer Relevanz (Studien von Ministerien und weiteren politische Einrichtungen). Die hier erwähnten Studien lassen sich in drei Kategorien aufteilen. Zunächst werden Studien, die von politischen Institutionen in Auftrag gegeben wurden, betrachtet. Anschließend werden Hochschulschriften und danach internationale Studien in dem Themenbereich analysiert. Tabelle 2.2 fasst alle untersuchten Studien zusammen.

Van Essen et al. [41] erstellten im Auftrag der Europäischen Kommission das „Handbook on the External Costs of Transport“. Dieses Handbuch stellt eine umfangreiche Analyse der externen Kosten von Verkehr in der EU dar. Die Methodik berücksichtigt dabei verschiedene Kostenkategorien, Verkehrsmittel, Länder und Kostenformen. Die Studie berechnet die Kosten in den Kategorien Unfälle, Luftverschmutzung, Klima, Lärm, Stau, vorgelagerte Prozesse und Lebensraumschäden für die Verkehrsmittel Auto, Bus, Motorrad, Lkw, Schiene, Flugzeuge und Schiffe. Die Verkehrsmittel werden dann wiederum in Personen- und Gütertransport aufgeteilt. Die Ergebnisse werden sowohl in absoluten Zahlen für die einzelnen EU-Länder als auch als

durchschnittliche, spezifische Werte angegeben. Für Deutschland beispielsweise belaufen sich die externen Kosten im Verkehr für das Jahr 2016 auf 172,3 Mrd. €, das entspricht 5,8% des deutschen Bruttoinlandsprodukts [41]. Eine Aussage zu den externen Kosten auf räumlich kleinerer Ebene wie einzelnen Städten liefert die Studie nicht.

Die Forschungs- und Beratungsinstitutionen Ecoplan und Infrac [3] erarbeiten eine Studie, die im Auftrag des Schweizer Bundesamts für Raumentwicklung im Jahr 2014 erschienen ist. Diese Studie berücksichtigt eine Vielfalt an verschiedenen Verkehrsmitteln. Dabei wird zunächst zwischen Verkehrsträger (Straßen-, Schienen-, Luft-, Schiffsverkehr), dann zwischen Personen und Güterverkehr und zuletzt zwischen insgesamt 22 verschiedenen Fahrzeugkategorien unterschieden. Der Fokus der Einflussfaktoren liegt hier auf Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten. Für den Verkehr im Jahr 2010 innerhalb Schweizer Grenzen werden in der Studie ca. 9,4 Mrd. CHF (11,8 Mrd. €₂₀₁₀) an externen Kosten ermittelt [3].

Die Studie der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) in Deutschland von Baum et al. [42] behandelt einen wichtigen Teilaspekt der externen Kosten im Detail. Sie untersucht die volkswirtschaftlichen Kosten durch Straßenverkehrsunfälle. Dabei werden vor allem die Details und verschiedenen Vorgehensweisen in der Methodik deutlich. Ob für die Berechnung der Unfallkosten der Schadenskostenansatz oder der Vermeidungskostenansatz gewählt werden sollte, obliegt einer weiteren politischen Diskussion. Diese und weitere Quantifizierungsmethoden werden am Ende dieses Unterkapitels vorgestellt. Die Studie gibt volkswirtschaftliche Kosten durch Straßenverkehrsunfälle in Höhe von 31,5 Mrd. € für das Jahr 2005 in Deutschland an [42].

Das Umweltbundesamt (UBA) veröffentlicht regelmäßig Studien zur Ermittlung der Umweltkosten [43, 44]. Dabei liegt der Fokus auf der Berechnung von Kosten anhand der Art und Höhe der ausgestoßenen Schadstoffe. Dies betrifft nicht nur den Verkehrssektor, sondern alle Sektoren, die lokale Luftschadstoffe oder klimaschädliche Gase emittieren. Die Studie besteht aus zwei Teilen, der Methodik zum standardisierten Vorgehen zur ökonomischen Bewertung von Umweltschäden [43] und den Ergebnissen beziehungsweise Kostensätzen [44], die sich daraus ergeben.

Saighani [27] hat im Zuge seiner Dissertation ein Tool zur Berechnung der externen Kosten der urbanen Mobilität entwickelt. In der Dissertation hat er die Methodik für die Städte Bremen, Kassel und Kiel angewendet. Die Arbeit fokussiert sich dabei auf die allokatonsrelevanten externen Effekte im städtischen Verkehrsbetrieb und berücksichtigt damit die Kostenkategorien Unfall-, Luftverschmutzungs-, Klima- und Lärmbelastungskosten für die Verkehrsmittel Lkw, Pkw, ÖPNV, Fußgänger und Fahrrad. So konnte ermittelt werden, dass der Pkw-Verkehr in Bremen 57%, in Kassel 74% und in Kiel 70% der externen Kosten des Verkehrs verursacht [27].

Sowohl Neumann [26] als auch Becker et al. [45] sind Arbeiten zur Ermittlung der Externalitäten des Verkehrs in Sachsen. Neumann stellt dabei den Vergleich zwischen den Ergebnissen seiner Studie und der von Becker et al. her. Becker berechnet für Sachsen ca. 8,7 Mrd. € (ca. 2000 € pro Einwohner) externe Gesamtkosten im Jahr 2002. Neumann stellt eine Reduktion der Kosten auf 7,2 Mrd. € (ca. 1800 € pro Einwohner) durch seine Methodik im Jahr 2014 fest. Die größten Reduktionen sind bei den Luftverschmutzungs- und Lärmkosten zu erkennen.

Gössling veröffentlicht mit seinem Team gleich zwei Studien zu den externen Kosten von verschiedenen Verkehrsmitteln. In den Studien werden sie soziale Kosten genannt, weil es die Kosten sind, die Auswirkungen auf die gesamte Gesellschaft haben. Im Jahr 2019 vergleichen Gössling et al. [46] die sozialen Kosten von Autos, Fußgängern und Fahrradfahrern. Dabei werden die Kosten in durchschnittliche spezifische Kostenwerte für die Region der Europäischen Union (EU) berechnet. Die Ergebnisse zeigen, dass ein Auto 0,11 € pro Fahrzeugkilometer (Fkm)

an sozialen Kosten verursacht, während der Fahrradfahrer 0,18 €/Fkm und der Fußgänger 0,37 €/Fkm einspart. Die zweite Studie von Gössling et al. [47] berücksichtigt die internen Kosten verschiedener Autovarianten und stellt diese ins Verhältnis mit den externen Kosten. Die Ergebnisse werden auf den Zeitraum einer Lebenszeit im Autobesitz (50 Jahre) berechnet. Dabei ergeben sich Vollkosten in Höhe von ca. 600.000 € für einen Opel Corsa und fast 1.000.000 für einen Mercedes GLC [47]. Mizutani et al. [48] und Glazebrook [49] sind internationale Studien, die externe Kosten Berechnungen für Japan beziehungsweise Sydney durchführen. Mizutani et al. [48] konnten dabei feststellen, dass Staus für ca. 45% aller externen Kosten verantwortlich sind.

Tabelle 2.2: Übersicht zu den externe Kosten Studien mit berücksichtigten Kostenkategorien und Verkehrsmitteln

Quelle	Bezugsjahr	Region	Berücksichtigte Kostenkategorien	Berücksichtigte Verkehrsmittel
Van Essen et al. [41]	2016	EU	Unfälle, Luftverschmutzung, Klima, Lärm, Stau, vorgelagerte Prozesse und Lebensraumschäden	Auto, Bus, Motorrad, Lkw, Schiene, Flugzeuge und Schiffe
Ecoplan und Infrac [3]	2010	Schweiz	Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten	Straßen-, Schienen-, Luft-, Schiffsverkehr
Baum et al. / BAST [42]	2005	Deutschland	Unfallkosten	Straßenverkehr
Matthey et al. / UBA [44]	2018	Deutschland	Umweltkosten	Alle Sektoren
Saighani [27]	2010	Bremen, Kassel, Kiel	Unfall-, Luftverschmutzungs-, Klima- und Lärmbelastigungskosten	Lkw, Pkw, ÖPNV, Fußgänger und Fahrrad
Neumann [26]	2010-2012	Sachsen	Unfälle, Klima, Luftverschmutzung, vor- und nachgelagerte Prozesse, Natur und Landschaft, Lärm	Straßen-, Schienen- und Flugverkehr
Becker et al. [45]	1999	Sachsen	s.o. (Neumann)	s.o. (Neumann)
Gössling et al. [46]	2019	EU	Klima, Luftverschmutzung, Lärm, Boden- und Wasserqualität, Flächenverbrauch, Infrastruktur Instandhaltung, Ressourcenverbrauch, Fahrzeugbetrieb, Stau, Fahrzeit, Barriere Effekte, Gesundheitsnutzen, Unfälle, Sicherheit, Lebensqualität	Auto, Fahrrad, Fußgänger
Gössling et al. [47]	2020	Deutschland	Unkompensierte Unfallschäden, Luftverschmutzung, Lärm, Flächenverbrauch, Infrastruktur Instandhaltung, Barriere Effekte, Parken, Ressourcenverbrauch, Subventionen, Klima	Auto
Mizutani et al. [48]	2005	Japan	Klima, Luftverschmutzung, Lärm, Unfälle, Stau	Pkw, Bus, Lkw
Glazebrook [49]	2005	Sydney	Klima, Luftverschmutzung, Unfälle, Stau	Pkw, Bus, Zug

Kostenkategorien

Tabelle 2.3 zeigt eine Übersicht über alle Kostenkategorien, die in der hier analysierten Literatur vorkommen. Im Folgenden werden die in der Literatur am häufigsten erwähnten Kostenkategorien genauer erläutert.

Luftschadstoffe sind Gase und Partikel in der Luft, die Umweltschäden verursachen und negative Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit haben können [50]. Der Verkehrs- und Transportsektor gehört zu den Hauptemittenten von Luftschadstoffen, die durch den Betrieb von Straßen- und Schienenfahrzeugen freigesetzt werden. Dies umfasst Reifenabrieb und Abgase aus Treibstoffverbrennung, die Feinstaubpartikel (PM₁₀ und PM_{2.5}), Stickoxide (NO_x), flüchtige Kohlenwasserstoffverbindungen, Schwefeldioxid (SO₂), Ammoniak (NH₃) und flüchtige organische Verbindungen ohne Methan (NMVOCs) beinhalten [44]. Luftschadstoffkosten lassen sich in Gesundheitsschäden, Ernteauffälle, Schäden an Gebäuden und Biodiversitätsverluste unterteilen [41]. Gesundheitsschäden resultieren aus Atemwegs- und kardiovaskulären Erkrankungen durch das Einatmen von Feinstaub und Stickoxiden. Laut der Weltgesundheitsorganisation (WHO) stellen Luftschadstoffe das größte umweltbedingte Gesundheitsrisiko weltweit dar [51]. Ernteauffälle, Korrosionsschäden, Gebäudeschäden und Biodiversitätsverluste werden durch saure Luftschadstoffe (SO₂ und NO_x) verursacht. Überdüngung von Ökosystemen durch NO_x und NH₃ kann zu einem Rückgang der Biodiversität führen [41]. Luftschadstoffe wirken besonders stark in städtischen Gebieten, wo sie in geringen Höhen emittiert werden, was zu erhöhten Gesundheitsrisiken führt [52].

Die Bekämpfung der globalen *Klimaveränderung*, ausgelöst durch Treibhausgasemissionen, steht im Zentrum der Herausforderungen für heutige und zukünftige Generationen. Dieser Wandel hat weitreichende Auswirkungen, darunter den Anstieg des Meeresspiegels und Ernteauffälle [41]. Die relevanten Treibhausgase, wie CO₂, Methan, Lachgas und fluoridierte Gase, sind im Kyoto-Protokoll definiert [53]. Ihre unterschiedlichen Auswirkungen auf den Treibhauseffekt werden über das Global Warming Potential (GWP) über einen Zeitraum von 100 Jahren normiert [41]. Im Jahr 2019 war der Verkehrssektor trotz insgesamt rückläufiger Emissionen der drittgrößte Emittent in Deutschland [53]. Die Bestimmung der Kosten für Klimaschäden gestaltet sich als anspruchsvoll, weil sie vor allem von zukünftigen Generationen getragen werden müssen und global ungleichmäßig auftreten. Entsprechend weisen die in der Literatur genannten Kostensätze hohe Unsicherheiten und eine beträchtliche Bandbreite auf [41]. Zwei Ansätze zur Bewertung sind der Schadenskostenansatz und der Vermeidungskostenansatz [41, 44]. Der Schadenskostenansatz schätzt die Schäden durch den Klimawandel ab, während der Vermeidungskostenansatz die Kosten betrachtet, die die Gesellschaft tragen muss, um bestimmte Klimaziele zu erreichen. Die Wahl zwischen den Ansätzen hängt vom Kontext und den Zielen der Untersuchung ab [44].

In Städten sind viele Menschen dem *Lärm* von Straßen-, Schienen- und Luftverkehr ausgesetzt, was sowohl die Lebensqualität als auch die Gesundheit beeinträchtigt [44]. Dieser Lärm führt zu Störungen von Aktivitäten, Kommunikation, Schlaf und eingeschränkter Ruhe [3]. In der Literatur wird die Bewertung oft anhand der Reduktion von Wohnungspreisen lärmexponierter Immobilien durchgeführt. Langfristige Lärmexposition kann zu physischen und psychischen Krankheiten wie kardiovaskulären Problemen, Konzentrationsstörungen, Schlafproblemen und Tinnitus führen [3]. Straßen- und Schienenverkehr sind die Hauptlärmquellen in städtischen Gebieten [27, 54]. Straßenlärm setzt sich aus Antriebsgeräuschen und Abrollgeräuschen zusammen, wobei die Lärmemissionen von Faktoren wie Geschwindigkeit, Straßensteigung und Lastzustand des Motors beeinflusst werden [55–57]. Schienenverkehrslärm wird von Rollgeräuschen und dem Lärm

der Antriebsaggregate dominiert [58]. Je nach Lärmpegelklasse werden unterschiedliche Gesundheitskostensätze in der Literatur angenommen [44]. Das Empfinden von Lärm als störend hängt stark von der subjektiven Einstellung der betroffenen Personen ab. Die Bewertung erfolgt auf Basis objektiver physikalischer Größen, wobei der logarithmisch skalierte Schalldruckpegel in Dezibel (dB) genutzt wird [27]. Zur einheitlichen Bewertung von Lärmimmissionen werden drei separat zu ermittelnde Lärmindizes nach Tages- bzw. Nachtzeit verwendet: LDay am Tag (06:00 bis 18:00 Uhr), LEvening am Abend (18:00 bis 23:00 Uhr) und LNight in der Nacht (23:00 bis 06:00 Uhr) [27]. Gemäß der EU-Richtlinie 2002/49/EG lässt sich aus diesen Indizes ein gemeinsamer Lärmindex LDEN berechnen, wobei Abend- und Nachtlärm stärker berücksichtigt werden [59].

Gerade in dichtbesiedelten urbanen Räumen teilen sich verschiedenste Verkehrsmittel einen begrenzten Verkehrsraum [60]. Der größte Faktor für die intensive Raumkonkurrenz ist der *Flächenverbrauch* durch Verkehrsinfrastruktur. Die Infrastrukturkosten für den städtischen Verkehr betreffen verschiedene Bereiche, die für die Mobilität in urbanen Gebieten entscheidend sind. Hierzu zählt insbesondere der Straßenbau und die -erweiterung, die Materialien, Arbeitskosten und Ingenieurleistungen umfasst [61]. Einen bedeutenden Anteil nehmen auch Investitionen in den öffentlichen Nahverkehr ein, darunter Busse, Straßenbahnen, U-Bahnen und Bahnhöfe. Damit verbunden sind Kosten für den Bau und die Instandhaltung von Haltestellen, Schienen und Busdepots. Die Errichtung von Brücken und Tunneln spielt ebenfalls eine essenzielle Rolle, um den Verkehrsfluss in urbanen Gebieten zu optimieren. Hierbei entstehen signifikante Ausgaben [61]. Ein weiterer zentraler Kostenpunkt ist das Parkraummanagement, inklusive der Entwicklung und Wartung von Parkmöglichkeiten, Parkhäusern und Parkleitsystemen [62]. Die Finanzierung dieser Infrastrukturkosten erfolgt durch eine Kombination aus öffentlichen Geldern, Gebühren, Steuern, staatlichen Zuschüssen [61]. Durch die Investitionen der öffentlichen Hand entstehen Kosten für die Gesellschaft, die wiederum als Externalitäten aufgefasst werden. Opportunitätskosten für die Nutzung der Flächen können ebenfalls unter die Kategorie Flächenverbrauch fallen. Dieser Punkt wird weitergehend in der Methodik zu dieser Arbeit erläutert.

Verspätungen können sowohl im Straßenverkehr als auch in öffentlichen Nahverkehr vorkommen. Beides erzeugt Externalitäten, weil es die Fahrzeit der Reisenden unerwartet erhöht. Über den Wert der Zeit entstehen dadurch externe Kosten [41]. Bei Stau handelt es sich um eine fremdbestimmte Reduktion der durchschnittlichen Fahrgeschwindigkeit im Straßenverkehr, die verschiedene Ursachen haben kann. Die steigende Verkehrsdichte, Baustellen, Verkehrsunfälle und insuffiziente Straßeninfrastruktur verschärfen das Staurisiko weiter, indem sie Engpässe und mangelnde Kapazitäten in den Verkehrsnetzen schaffen [41]. Neben den Externalitäten durch Zeitverlust, kann Stau im Straßenverkehr auch Quereinflüsse auf andere Kostenkategorien wie Klimakosten durch erhöhten Kraftstoffverbrauch haben [63]. Verspätungen in Bussen, Bahnen und anderen öffentlichen Verkehrsmitteln können vielfältige Gründe haben, darunter Verkehrsüberlastungen, technische Störungen oder unvorhergesehene Ereignisse.

Unfallkosten infolge von Verkehrsunfällen mit Personenschaden umfassen verschiedene Aspekte wie medizinische Behandlungs- und Pflegekosten, Wiederherstellung der Arbeitsfähigkeit, Ausfallkosten bei Arbeitsunfähigkeit sowie Verwaltungskosten für Polizei und Rechtsprechung [27, 41, 42]. Die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) hat eine umfassende Methodik zur Berechnung der volkswirtschaftlichen Kosten von Verkehrsunfällen entwickelt, die in diesem Kontext als fortschrittlich gilt [26, 42, 45]. Im Gegensatz zur BASt-Methodik werden nur bestimmte Kosten für Unfälle mit Personenschäden als externe Kosten betrachtet, weil Sachschäden größtenteils von den Verursacher oder durch Versicherungsbeiträge internalisiert

werden [45]. Kosten, die von Kranken- oder Pflegeversicherungen getragen werden, gelten nicht als internalisiert, weil die gesamte Gesellschaft durch Beiträge beteiligt ist und nicht nur eine spezifische Gruppe von Nutzenden [26, 27, 45]. Immaterielle Kosten, wie Schmerz, Leid und Beeinträchtigungen, werden als Externalitäten betrachtet. Die ökonomische Bewertung erfolgt über den "Value of Statistical Life" (VSL), der den Wert eines vermiedenen Todesfall reflektiert [64]. Der VSL wird über die Zahlungsbereitschaftsmethode ermittelt, indem die Zahlungsbereitschaft für eine marginale Reduktion des vorzeitigen Todes in Relation zur aktuellen statistischen Lebenserwartung einer Person gesetzt wird [65]. Es ist wichtig zu betonen, dass der VSL nicht den Wert eines menschlichen Lebens repräsentiert, sondern die Summe monetärer Werte für viele kleine Risikoreduktionen im täglichen Leben [65]. Die VSL-Werte variieren stark von Land zu Land, basierend auf unterschiedlichen Studiendesigns und dem lokalen Bruttoinlandsprodukt (BIP) [64].

Der *Barriere Effekt* (auch als "Trennungseffekt" bezeichnet) bezieht sich auf die Verzögerungen, Unannehmlichkeiten und den eingeschränkten Zugang, die sich aus dem motorisierten Fahrzeugverkehr für aktive Verkehrsteilnehmer wie Fußgänger, Radfahrer und deren Varianten ergeben [66]. In der Regel konzentriert sich der Trennungseffekt auf die Auswirkungen von breiten Straßen, während der Barriere Effekt die Folgen des Autoverkehrs insgesamt einschließt. Dies führt zu einer Einschränkung des aktiven Verkehrs und veranlasst Reisende, auf weniger bevorzugte Verkehrsmittel umzusteigen. Die Studie zeigt, dass viele Menschen gerne mehr zu Fuß gehen und Rad fahren würden, jedoch durch den starken Straßenverkehr daran gehindert werden [66].

In vielen Teilen der Welt stellt Bewegungsmangel ein erhebliches Gesundheitsproblem dar. Die Förderung von aktiver Mobilität, sei es zu Fuß oder mit dem Fahrrad, bietet einen vielversprechenden Ansatz, um die physische Aktivität im täglichen Leben der Bevölkerung zu steigern [65]. Der körperliche Einsatz beim Radfahren und Gehen trägt *positiv zur Gesundheit* bei und mindert die Belastungen des Gesundheitssystems, was zu einer verminderten Sterblichkeit und kürzeren Arbeitsausfallzeiten führt [67]. Gemäß den Empfehlungen der WHO und den deutschen nationalen Bewegungsempfehlungen sollten Erwachsene wöchentlich mindestens 150 Minuten moderater oder 75 Minuten intensiver körperlicher Aktivität nachgehen [67, 68]. Dieses Bewegungsminimum entspricht laut WHO 100 Minuten Radfahren oder 170 Minuten Gehen pro Woche, wobei das Sterblichkeitsrisiko durch Radfahren um 10% und durch Gehen um 11% reduziert wird [65]. Aufgrund des gesundheitlichen Nutzens durch zusätzliche körperliche Aktivität im Rahmen aktiver Mobilität und der Tatsache, dass das "Value of Statistical Life" (VSL) die Zahlungsbereitschaft für eine Reduktion des jährlichen Sterblichkeitsrisikos widerspiegelt, wird eine Monetarisierung dieses Gesundheitsnutzens mithilfe dieses Werts empfohlen [65].

Alle weiteren Kostenkategorien spielen in dieser Arbeit eine untergeordnete Rolle, werden jedoch in Tabelle 2.3 erläutert.

Tabelle 2.3: Übersicht der externen Kostenkategorien mit Erläuterung und Literaturquellen

Kostenkategorie	Erläuterung	Literaturquellen
Luftschadstoffe	Inbegriffen sind Gesundheits-, Material- und Ernteschäden sowie Biodiversitätsverluste, die durch Schadstoffausstöße bei der Treibstoffverbrennung sowie durch Abrieb entstehen	[3, 26, 27, 41, 43, 45–49, 69–72]
Klima	Inbegriffen sind Kosten für Klimafolgeschäden durch den direkten Ausstoß von Treibhausgasen beim Fahrzeugbetrieb und Treibstoffproduktion (vorgelagerte Prozesse)	[3, 26, 27, 43, 45–49, 70, 72]
Lärm	Inbegriffen sind Gesundheitskosten sowie die Verminderung der Lebensqualität durch Verkehrslärmexposition	[3, 26, 27, 45–47, 69–71]
Flächenverbrauch und Infrastruktur	Öffentlich bezahlte Infrastrukturkosten (Bau und Instandhaltung), Kosten für Bau und Instandhaltung von Parkplätzen, Opportunitätskosten	[3, 26, 45–47]
Stau / Verspätungen	Entgangener Nutzen aufgrund von Zeitverlusten (die anderen auferlegt werden) durch Staus im Straßenverkehr und Verspätungen im öffentlichen Verkehr	[26, 27, 45–49, 69, 71]
Unfälle	Inbegriffen sind Kosten für Unfälle mit Personenschaden, dabei finden u.a. Behandlungs- und Reproduktionskosten, Ressourcenausfallkosten und immaterielle Kosten Beachtung (teilweise sind unkompenzierte Unfallschäden inkludiert)	[3, 26, 27, 41, 42, 46–49, 69, 71]
Barriere Effekte	Verzögerungen, die Straßen und Verkehr für den nichtmotorisierten Verkehr verursachen	[46, 47, 66]
Gesundheitsnutzen	Einsparungen für das Gesundheitssystem durch die Teilnahme am aktiven Verkehr; weniger Krankheitstage; längeres Leben	[3, 27, 41, 46, 47]
Vor- und nachgelagerte Prozesse / Ressourcenverbrauch	Lebenszyklusanalyse der Fahrzeuge inkludiert die Externalitäten und Ressourcen, die bei der Produktion und beim Recycling der Fahrzeuge entstehen und verbraucht werden	[3, 26, 41, 43, 46, 47, 70]
Lebensraumschäden / Natur und Landschaft	Flächenumwandlung beim Neubau und der Erweiterung von Infrastrukturbauten sowie den durch die Trennwirkung von Verkehrswegen einhergehenden Lebensraumverlust	[3, 41, 70, 72]
Boden- und Wasserqualität	Verschmutzung von Grundwasser und Böden durch verkehrsbedingte Schadstoffe (Schwermetalle, Kohlenwasserstoffe, Streusalz usw.)	[3, 44, 46]
Sicherheit und Lebensqualität	Wahrgenommene Unfallrisiken im Straßenverkehr aufgrund der Exposition gegenüber dem motorisierten Verkehr; Unbehagen aufgrund der Exposition gegenüber Abgasen; sowie Wert, der sich daraus ergibt, dass man als fortschrittliche Stadt mit hoher Lebensqualität gilt; Wert der Freiflächen für den Tourismus	[46]
Fahrzeugbetrieb und Fahrzeit	Kosten für den Besitz und den Betrieb eines bestimmten Verkehrsträgers, einschließlich Zöllen und Steuern, Versicherung, Kraftstoff und Fahrzeugabschreibung; sowie die mit der Nutzung eines bestimmten Verkehrsträgers verbundenen Kosten der Reisezeit	[46]
Subventionen	Bereits eingeführte regulierende Maßnahmen / Internalisierung von Externalitäten (positiv); sowie Subventionen, die das Ausstoßen weiterer Externalitäten verursachen (negativ)	[47]

Monetarisierungsmethoden

Um verschiedene Externalitäten vergleichbar und für unterschiedliche Verkehrsmittel bewertbar zu machen, erfolgt in der Literatur eine Monetarisierung der Effekte nach verschiedenen Prinzipien. Im einfachsten Fall kann dies durch eine direkte Bestimmung mittels Marktpreise geschehen, die beispielsweise Reparaturkosten oder Entschädigungsleistungen widerspiegeln [73]. Diese Monetarisierungsmethode sollte bevorzugt werden, weil sie am besten die "Knappheit für ein bestimmtes Gut (zum Beispiel Ruhe, saubere Luft oder unverschmutztes Trinkwasser)" reflektiert [74]. Eine Voraussetzung für eine solche direkte Bewertung ist jedoch, dass der entstandene Schaden reversibel ist und durch geeignete Maßnahmen vollständig behoben werden kann [73]. In vielen Fällen existieren jedoch keine Marktpreise, die eine angemessene Bewertung der Schäden ermöglichen, oder sie sind durch Externalitäten oder Subventionen verzerrt [43]. Bei der ökonomischen Bewertung unterscheiden Ecoplan und INF-RAS [75] zwischen Vermeidungs-, Schadens-, Ersatz- oder Reparaturkostenansätzen. Eine Übersicht über verschiedene Monetarisierungsansätze gibt Abbildung 2.4, während der folgende Abschnitt die Prinzipien näher erläutert.

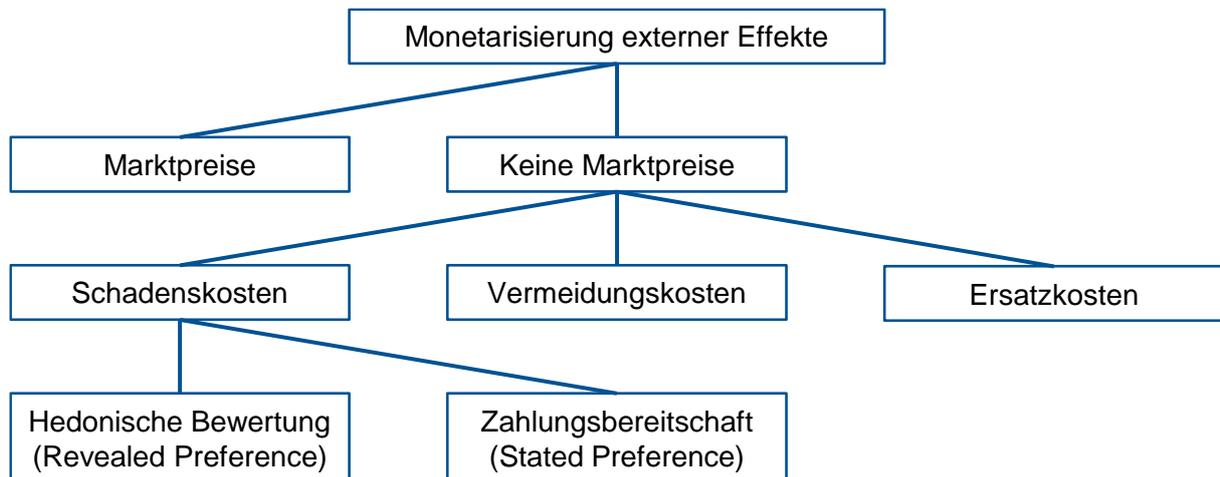


Abbildung 2.4: Methoden zur Monetarisierung externer Effekte [3]

Der *Schadenskostenansatz* zielt darauf ab, die durch Externalitäten verursachten Schäden zu schätzen. Dabei werden die Varianten der hedonischen Bewertung und der Zahlungsbereitschaft unterschieden. Die hedonische Bewertung basiert auf einer indirekten Bewertung von Marktpreisen. Durch statistische Mittel werden Preise für Änderungen bestimmter Eigenschaften geschätzt, indem der Marktpreis eines Gutes und seiner Eigenschaften analysiert wird. Ein Beispiel ist die Bewertung von Lärm, bei der über die Vergleichsmieten von Immobilien mit unterschiedlichem Lärmeinfluss Kosten geschätzt werden. Dieses Verfahren, auch als *Revealed Preference* bezeichnet, setzt voraus, dass signifikante statistische Zusammenhänge zwischen Preisentwicklung und Umweltbedingungen bestehen [27, 76]. Der Zahlungsbereitschaftsansatz befragt mittels *Stated-Preference*-Umfragen die Zahlungsbereitschaft zur Reduktion einer negativen Externalität. Zum Beispiel könnte für eine von Lärm betroffene Wohnung die Bereitschaft erfragt werden, für eine Lärmreduktion zu zahlen. Die Zahlungsbereitschaft wird auch als „Willingness to Pay“ oder „Willingness to Accept“ bezeichnet [73, 76].

Im Gegensatz zum Schadenskostenansatz werden im *Vermeidungskostenansatz* die Kosten für Maßnahmen ermittelt, die erforderlich sind, um eine Externalität zu vermeiden. Zum Beispiel

könnten die zusätzlichen Kosten für Flüsterasphalt zur Reduzierung von Straßenlärmemissionen geschätzt werden. Dieser Ansatz kann ein Bottom-Up-Verfahren verwenden, bei dem die Kosten und Effektivität von Technologien zur Schadensvermeidung ermittelt werden [77].

Der *Ersatzkostenansatz* schätzt die Kosten für Maßnahmen ab, die erforderlich sind, um bereits verursachte Schäden zu reparieren oder zu ersetzen. Ein Beispiel ist das Anlegen und Ersetzen eines Moores an neuer Stelle, wenn durch Straßenbau Moorflächen verloren gegangen sind [76].

Wenn die Bewertung von Externalitäten über Marktpreise nicht möglich ist, wird der Schadenskostenansatz als korrektes Vorgehen angesehen, weil er die tatsächlichen Wohlfahrtsverluste misst. Die hedonische Bewertung wird gegenüber dem Zahlungsbereitschaftsansatz bevorzugt. Falls auch der Schadenskostenansatz nicht anwendbar ist, ist der Vermeidungskostenansatz eine Alternative, insbesondere wenn ein breiter Konsens über das Umweltziel besteht. Wenn keiner dieser Ansätze anwendbar ist, könnte der Reparaturkostenansatz in Betracht gezogen werden, obwohl er in der Praxis selten anzutreffen ist [76, 77].

Viele der hier vorgestellten Methoden und Studien zielen schon bei der Bestimmung der technologischen Externalitäten und einer anschließenden Monetarisierung der Effekte auf eine Internalisierung ab. Diese Form der Bepreisung und viele weitere regulierende Maßnahmen in der Literatur und realen Umsetzung werden im nächsten Kapitel 2.3 vorgestellt.

2.3 Mobilitätsbepreisung

Im folgenden Kapitel werden die Grundlagen der Mobilitätsbepreisung erklärt. Dazu wird zunächst der Hintergrund zu Mobilitätsregulierung erläutert und ein Überblick über potenzielle Maßnahmen durch Entscheidungsträger gegeben. Anschließend werden die Mechanismen der Bepreisung und Internalisierung nähergebracht. Zum Schluss werden einige Beispiele zur Umsetzung von Bepreisung in der Praxis gegeben.

2.3.1 Regulierende Maßnahmen

Die folgenden Absätze basieren auf dem Kapitel 9.1 „The Nature of Transport Policy“ aus dem Werk „The Geography of Transport Systems“ von Rodrigue [4].

Die Regulierung des Verkehrs ist ein Mittel der Verkehrspolitik, um bestimmte Ziele in Bezug auf die sozialen, wirtschaftlichen und ökologischen Bedingungen zu erreichen sowie die Funktionsweise und Leistung des Verkehrssystems herzustellen. Die Verkehrspolitik gibt Ziele vor und die Verkehrsplanung befasst sich mit der Vorbereitung und Durchführung von Maßnahmen zur Lösung bestimmter Probleme. Grundsätzlich lassen sich die Maßnahmen dabei in drei Kategorien für Regulierung einteilen. *Ökonomische Regulierung* steuert Investitionen in die Verkehrsinfrastruktur, kontrolliert Transportwege über Einfahrtsregelungen oder -preise und nimmt Einfluss auf den Markt des Mobilitätssektors durch Anteilnahme und Subventionen von Unternehmen oder Dienstleistungen. *Operative Regulierung* ordnet die Sicherheit oder den Betrieb des Verkehrs auf Verkehrswegen an (zum Beispiel Geschwindigkeitsbegrenzung), reguliert Arbeitsstunden oder andere Sicherheitsvorgaben im Verkehr. *Ökologische Regulierung* bestimmt den Transport von Gefahrenstoffen oder den Ausstoß von Schadstoffen sowie Treibhausgasen [4].

Abbildung 2.5 fasst die potenziellen Maßnahmen der Verkehrspolitik zusammen. Die *öffentliche Beteiligung* spielt eine bedeutende Rolle als Maßnahme in der Verkehrspolitik. Der Staat kontrolliert häufig direkt Verkehrsmittel und die Verkehrsinfrastruktur. Dies umfasst die Bereitstellung von Straßen, Häfen, Flughäfen und Kanälen durch öffentliche Stellen. Zudem betreibt der Staat Verkehrsträger wie Fluggesellschaften, Eisenbahnen, Fähren und städtischen Nahverkehr über staatliche Unternehmen oder Agenturen [4].

Regierungen spielen eine Schlüsselrolle in der Förderung von *Forschung und Entwicklung* im Verkehrswesen. Staatliche Forschungslabors, durch staatliche Investitionen gestützt, sowie Forschung an Universitäten und in der Industrie, finanziert durch staatliche Verträge und Programme, sind bedeutende Quellen für Innovationen und neue Technologien. Die Ergebnisse dieser Forschung dienen als Testumgebung für technische und kommerzielle Machbarkeit. Öffentlich finanzierte Bildungseinrichtungen stellen zudem Fachkräfte für den privaten Verkehrssektor bereit. Angesichts der wachsenden Bedeutung von Informationstechnologien gewinnt die Beeinflussung von Forschungs- und Bildungsprogrammen weiter an Relevanz [4].

Die *Arbeitsregulierung* hinsichtlich Beschäftigung, Ausbildung und Zertifizierungsbedingungen verfolgen nicht unbedingt das Ziel, den Verkehr zu beeinflussen. Dennoch haben sie als politische Instrumente eine erhebliche Auswirkung auf die Branche, indem sie direkte Auswirkungen auf die Betriebskosten entfalten [4].

Die *regulatorische Kontrolle* ist ein verbreitetes Mittel zur Beeinflussung der Verkehrsgestaltung. Durch die Einrichtung von Überwachungsbehörden für bestimmte Verkehrsbereiche können Regierungen den Charakter und die Leistung des Sektors beeinflussen. Diese Behörden regulieren den Marktzugang, Preisfestlegungen und Märkte für Transportdienstleistungen. Umweltvorschriften beeinflussen zudem Bau, Wartung und Betrieb von Verkehrsinfrastrukturen (zum Beispiel TÜV). Obwohl private Unternehmen Dienstleistungen anbieten können, spielt die Regulierungsbehörde eine entscheidende Rolle [4].



Abbildung 2.5: Regulierende Maßnahmen in der Verkehrspolitik [4]

Sicherheits- und Betriebsstandards, darunter Geschwindigkeitsbegrenzungen, können ebenfalls starke Auswirkungen haben. Die Begrenzung der Arbeitsstunden für Lkw-Fahrer beeinflusst die Wirtschaftlichkeit des Lkw-Verkehrs erheblich. Gleichzeitig setzen Geschwindigkeitsbegrenzungen klare Grenzen für die täglichen Fahrstrecken eines Fahrers und beeinflussen somit die Tarifstruktur der Lkw-Branche [4].

Subventionen sind ebenfalls entscheidende Instrumente zur Umsetzung politischer Ziele, insbesondere in kapitalintensiven Verkehrsbereichen. Sie ermöglichen wirtschaftliche Rentabilität bei Dienstleistungen oder Infrastrukturen, die der Privatsektor möglicherweise nicht bereit oder in der Lage ist zu erbringen. Im 19. Jahrhundert erhielten private Eisenbahngesellschaften erhebliche Landzuweisungen und finanzielle Unterstützung von Regierungen, um den Eisenbahnverkehr zu fördern. Öffentliche Nahverkehrssysteme werden subventioniert, um Mobilität sicherzustellen, weil vollständige Kostendeckung die Fahrpreise für einkommens-

schwächere Bevölkerungsgruppen unerschwinglich machen würde. Auf der anderen Seite können Verkehrsmittel wie zum Beispiel der Lkw-Transport auf deutschen Autobahnen besteuert oder bepreist werden, um die Kosten für andere Subventionen oder Infrastrukturkosten wieder einzunehmen [4].

Neben den verschiedenen Möglichkeiten der Entscheidungsträger, ihre Ziele zu erreichen, wirken diese Maßnahmen unterschiedlich auf die betroffene Bevölkerung. Axsen et al. [78] teilen diese Mechanismen zwischen Maßnahme und Bevölkerung wiederum in drei Kategorien auf: hauptsächlich informativ, hauptsächlich ökonomisch und hauptsächlich regulativ. Die Studie stellt diese Mechanismen in die folgende Reihenfolge. Zunächst soll die Bevölkerung informiert werden, danach werden finanzielle Anreize gegeben und falls dies nicht wirkt, sollen stärkere regulative Eingriffe eingeführt werden. Schröder et al [79] stellen diese Mechanismen in den Zusammenhang mit Mobility-as-a-Service (MaaS) als Hilfsmittel zur Implementierung einer umfangreichen Mobilitätsbepreisung und Internalisierung externer Effekte. Dabei wird ebenfalls zunächst die Einführung eines Informationstool für die allgemeine Bevölkerung zur transparenten Darstellung und Erklärung von Externalitäten in der Mobilität empfohlen. Das Forschungsprojekt „Smart Advisor for Sustainable Integrated Mobility (SASIM)“ liefert eine solche Vollkostenperspektive auf den urbanen Verkehr. Das zugehörige Tool [80, 81] berechnet die internen und externen Kosten eines Weges für verschiedene Verkehrsmittel. Zusätzlich berechnet es eine Bewertung von „A“ bis „E“ für die Nachhaltigkeit der Verkehrsmittel, das in Form eines Ampelsystems (grün = gut, rot = schlecht) dargestellt ist. Die einfache und aggregierte Darstellung nimmt sich Marketing-Methoden zur Hilfe, um das Verhalten bei der Verkehrsmittelwahl der Menschen zusätzlich zu beeinflussen.

2.3.2 Bepreisungsmechanismen

Die technologischen Externalitäten haben keinen direkten Einfluss auf die Marktpreise. Dadurch kommt es zu Ineffizienzen im Marktergebnis [22]. In der Volkswirtschaftslehre ist hingegen immer ein optimales Kosten-Nutzen-Verhältnis, auch Maximierung der Wohlfahrt genannt, angestrebt. Ein Wohlfahrtsverlust entsteht immer dann, wenn Externalitäten vorkommen, die nicht in die Entscheidungsfindung auf dem Markt mit einfließen und somit zu Ineffizienzen führen. Diesen Verlust gilt es im Sinne der volkswirtschaftlichen Optimierung zu minimieren [2, 23].

Die Ursache für den Wohlfahrtsverlust ist in Abbildung 2.6 dargestellt. Auf der x-Achse ist die Angebotsmenge und auf der y-Achse der Preis pro angebotener Einheit aufgetragen. Die untere der beiden steigenden Geraden beschreibt die privaten oder internen Grenzkosten (IK) und die obere Gerade zeigt die Summe aus internen und externen Kosten, Vollkosten (VK). Die fallende Gerade stellt die Nachfragefunktion dar. Das volkswirtschaftlich optimale Angebot wird am Schnittpunkt von den Grenzkosten und des Nutzens erreicht. Am Schnittpunkt A werden lediglich die internen Grenzkosten in der Entscheidung berücksichtigt, dadurch entsteht Preis p_1 bei Angebotsmenge q_1 . Das volkswirtschaftliche Optimum ist jedoch am Schnittpunkt B erreicht, bei dem die verringerte Menge q_2 für den erhöhten Preis p_2 angeboten wird. Der Wohlfahrtsverlust wird durch die aufgespannte Fläche von Punkt A, B und C dargestellt [2, 23]. Um diesen Verlust zu vermeiden, führte Pigou [5] die Idee der Internalisierung von externen Kosten, die Pigou-Steuer, ein. Diese besagt, dass am Schnittpunkt C dem Preis p_0 bei Angebotsmenge q_2 und Berücksichtigung der internen Grenzkosten eine Steuer auf den Verursacher der Externalitäten in Höhe von Abstand zwischen B und C auferlegt wird, um das volkswirtschaftliche Optimum an Punkt B zu erreichen [5].

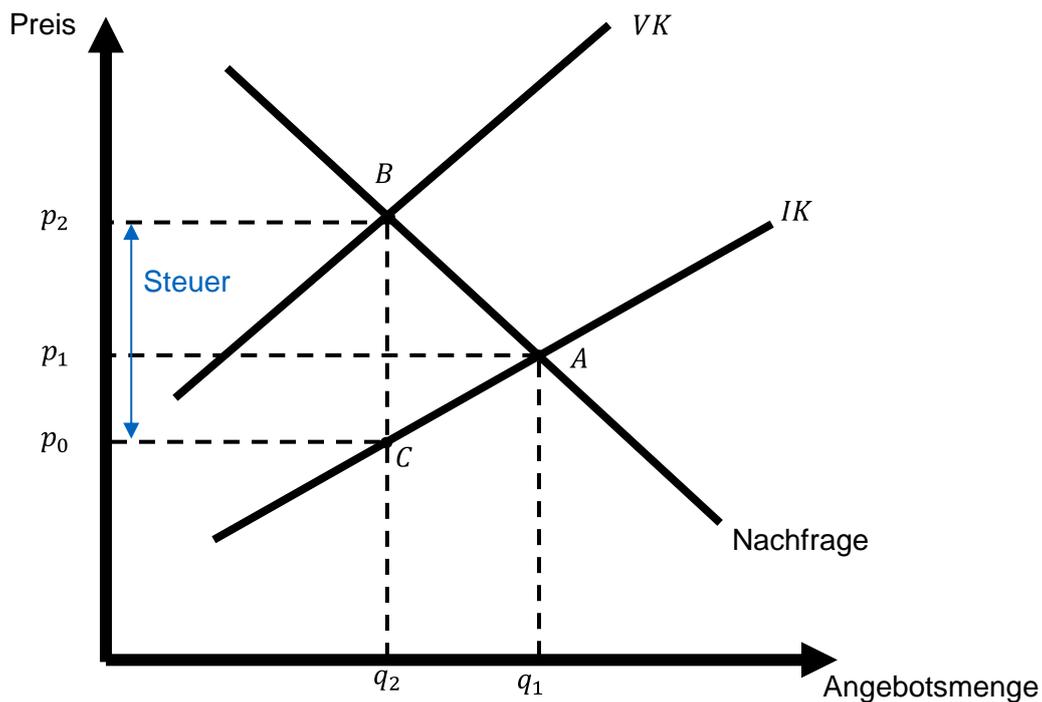


Abbildung 2.6: Wohlfahrtsverlust durch negative externe Effekte [2]

Mit Pigou wurde die erste Theorie zur Internalisierung der externen Kosten vorgestellt. Jedoch lassen sich diese marktbasierenden Regulierungsmechanismen zur Internalisierung der externen Kosten grundsätzlich in zwei Kategorien einteilen:

- Preiskontrolle (Pigou-Steuer) [5]
- Mengenkontrolle (Cap-and-Trade) [82]

Bei der Pigou-Steuer wird, wie oben beschrieben, eine Steuer in Höhe der externen Kosten auferlegt. Bei dieser Methode bleibt der Preis gleich, aber die Menge an Externalitäten ist variabel [5]. Dem entgegen steht die Begrenzung der Menge an Externalitäten, zum Beispiel CO₂-Emissionen. Dadurch besteht die Möglichkeit zum Handel von Rechten zum Ausstoß dieser Externalitäten, wodurch der Preis variabel, aber die Menge begrenzt ist. Die Rechte können in Form von Zertifikaten oder einer eigenen Währung ausgeteilt werden [82]. Ein Vorteil des Cap-and-Trade Systems sind die Auswirkungen auf die soziale Gerechtigkeit. Während dort alle Menschen oder Unternehmen die gleiche Maximalmenge Emissionen haben, wird bei der Pigou-Steuer ein höherer Preis entstehen, der finanziell schwächere Bevölkerungsgruppen mit geringerem Einkommen benachteiligen kann.

Chen et al. [83] vergleichen diese beiden Mechanismen hinsichtlich ihrer Effizienz und Wirkung auf Innovationen für den Umweltschutz. Die Studie besagt, dass zwar beide Methoden einen positiven Effekt auf die Innovationen im Umweltschutz haben, Cap-and-Trade jedoch effizienter ist. Dies liegt daran, dass es gleichzeitig mehr Emissionen reduziert und höhere Profite bei den Unternehmen erzeugt. Auf der anderen Seite ist die Umsetzung von Pigou-Steuern einfacher und die Wahl einer unpassenden Maximalgrenze kann die Effizienz des Cap-and-Trade Systems stark reduzieren [83].

Nachdem hier die Theorie zur Internalisierung von externen Kosten vorgestellt wurde, wird im nächsten Kapitel der Bezug zum Verkehrssektor hergestellt und erklärt, wie die Theorie in die Praxis umgesetzt werden kann.

2.3.3 Realisierung in der Praxis

Im folgenden Kapitel werden verschiedene Bepreisungstypen im Verkehr vorgestellt. Es wird gezeigt, wie die Theorie der Internalisierung von externen Kosten in der Praxis umgesetzt werden kann.

Generell berücksichtigen nicht alle Regulierungen des Verkehrs mit Hilfe von Bepreisung die externen Kosten. In den meisten Fällen werden den Verkehrsteilnehmern frei bestimmte Preise oder Preise, die zum Erreichen politischer oder wirtschaftlicher Ziele beitragen, auferlegt [84]. Die Bepreisung kann in verschiedenen Formen auftreten. Im Zuge dieser Arbeit wird deshalb ein Framework zur Gestaltung verschiedener Bepreisungsszenarien erstellt (Kapitel 3.2.3). In der aktuellen Literatur und Praxis sind die Ausprägungen in der Umsetzung jedoch limitierter. Daher werden hier die folgenden Bepreisungssysteme vorgestellt:

- Bepreisung des individuellen Straßenverkehrs („Road Pricing“)
- Preisgestaltung des ÖPNV
- Abonnements und Bündelung von Angeboten mit Hilfe von Mobility-as-a-Service

Im Straßenverkehr kann sowohl der fließende als auch der ruhende Verkehr bepreist werden. Beim stehenden Verkehr auf öffentlichen Straßen handelt es sich um die Parkkosten. Dabei gibt es unterschiedliche Ansätze und Höhen der Bepreisung. Am meisten verbreitet ist die Zweiteilung der Parkkosten in stündlicher Abrechnung für Besucher der Stadt und jährlicher Abrechnung für Anwohner der Stadt, die dafür einen Anwohnerparkausweis bekommen. Die Höhe der Preise weisen dabei in europäischen Städten eine enorme Spannweite auf. Während die Stunde Parken in London bis zu 10 €/h kosten kann, sind es in München nur 2 €/h. Ähnlich sieht es für die Anwohnerparkplätze aus, bei denen die Stadt Stockholm bis zu ca. 1300 € pro Jahr verlangt und München lediglich 30 € pro Jahr [85].

Im fließenden Verkehr gibt es verschiedene Formen der Bepreisung. Diese können sich je nach räumlichen und zeitlichen Begebenheiten sowie Fahrzeugtyp oder -antrieb unterscheiden [86]. Im Folgenden werden die gängigsten Formen der Bepreisung von fließendem Verkehr vorgestellt (Abbildung 2.7).

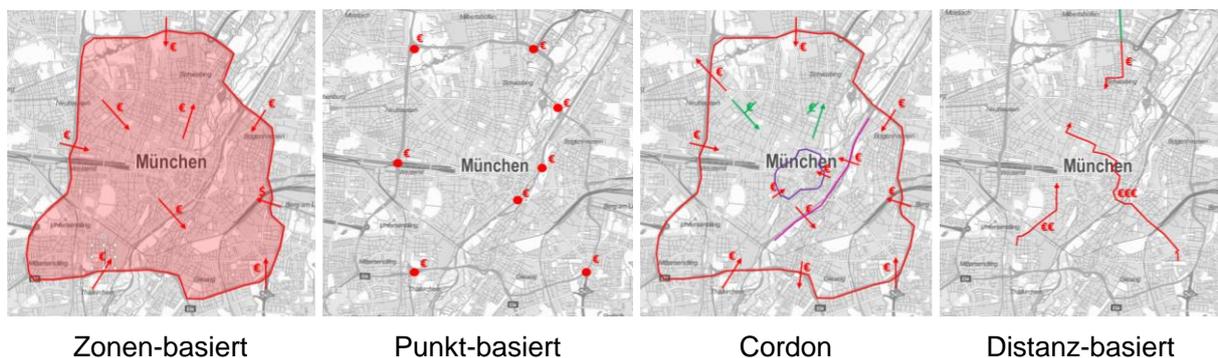


Abbildung 2.7: Formen der Bepreisung des Straßenverkehrs [86]

Die *Zonen-basierte* Bepreisung berechnet immer dann einen festen Preis, wenn die Zone betreten oder verlassen wird sowie bei Fahrten innerhalb der Zone. In vielen Fällen, wie zum Beispiel bei der „Congestion Charge“ in London, werden die Kosten für die betroffenen Personen in Form eines Tagestickets ausgestellt. Der Preis gilt dann für alle Fahrten an dem Tag [86]. *Punkt-basierte* Bepreisung bezieht sich auf individuelle Strukturen und Bauwerke, wie zum Beispiel Brücken oder Tunnel. Der Einfluss auf das Verkehrsgeschehen ist daher limitiert und lässt wenig

Spielraum für die Steuerung des Verkehrs oder Reduktion von Emissionen sowie Stau. Auf der Öresund Brücke zwischen Dänemark und Schweden werden beispielsweise 50 € für die Überfahrt mit einem Auto verlangt [86]. *Cordon* Bepreisung verlangt immer dann eine Bezahlung, wenn bestimmte Grenzen oder Standorte überfahren werden. Diese Grenzen sind meist ringförmig um das Stadtzentrum angeordnet. So kommt sie in Stockholm, Singapur und Göteborg vor. Die Gebühr wird bei jeder Überquerung, also sowohl beim Einfahren als auch Ausfahren der Zonen, bezahlt. Das Fahren innerhalb der Grenzen verursacht keine Kosten für die fahrende Person [86]. *Distanz-basierte* Bepreisung hängt von der gefahrenen Strecke in einem bepreisten Bereich ab. Bei dieser Methode bestehen Schwierigkeiten bei der Umsetzung, weil eine korrekte Messung der Fahrstrecke durch zum Beispiel GPS oder On-Board Unit (OBU) sichergestellt werden muss. In Italien wird dieses Verfahren beispielsweise mit Mautstationen an den Ein- und Ausfahrten der Schnellstraßen umgesetzt [86].

Preisgestaltung des ÖPNV wird in Deutschland über den sogenannten Tarif geregelt. Dieser obliegt dem Personenbeförderungsgesetz und muss von der entsprechenden Genehmigungsbehörde zugelassen werden. Die Verkehrsunternehmen, die den ÖPNV in den jeweiligen Städten bereitstellen, können sich in einem Verkehrs- und Tarifverbund zusammenschließen, um die Tarife und Preisgestaltung zu vereinheitlichen. In München ist dies beispielsweise der Münchner Verkehrs- und Tarifverbund (MVV). Dabei können die Preise im ÖPNV unterschiedlichen Systematiken, wie zum Beispiel Tarifzonenplänen, Tarifgrenzen und Tarifentfernungen unterliegen. Zudem gibt es verschiedene Angebote und Ermäßigungen für die entsprechende Kundengruppe. Für Stammkunden werden Zeitkartentarife angeboten, die für einen festen wöchentlichen, monatlichen oder jährlichen Preis freie Nutzung der ÖPNV Angebote in diesem Zeitraum gewähren [87].

Mobility-as-a-Service (MaaS) ist ein Begriff, der verwendet wird, um digitale Dienste, oft Smartphone-Apps, zu beschreiben, die Menschen nutzen, um auf eine Reihe von öffentlichen, Sharing und privaten Verkehrsmitteln zuzugreifen. Dabei wird ein System verwendet, das die Planung, Buchung und Bezahlung von Reisen integriert [88]. Diese Integration macht es möglich, eine neue Form der Bepreisung einzuführen, bei der mit einer regelmäßigen zum Beispiel monatlichen Zahlung auf ein bestimmtes Kontingent an Verkehrsmitteln zugegriffen werden kann. Die Ausgestaltung dieser Abonnements und Preispakete („Bundles“) spielt eine große Rolle für die Nutzungsbereitschaft der potenziellen Nutzer der Plattform. Dazu ist es essentiell, die Zahlungsbereitschaft der Nutzer abzufragen, um die Höhe der Angebote und Preise innerhalb der Pakete zu bestimmen [89]. Abbildung 2.8 zeigt ein Beispiel für die Ausgestaltung verschiedener Preispakete in MaaS. In diesem Fall sind ÖPNV, Car Sharing, Taxi und E-Bike-Sharing in dem Angebot inkludiert. Die kostenlose Variante der MaaS Plattform wird als Pay-as-you-Go bezeichnet, weil hier nur die Vorteile der Integration und einfachen Bezahlung der Verkehrsmittel auf einer Plattform genutzt werden. Kostenvorteile für Nutzer mit häufiger Nutzung der Plattform ergeben sich bei den Paketen B bis D. Die Menge an Verkehrsmitteln und Höhe der Preise kann je nach Stadt und Land stark variieren [90].

Eine vollständige Internalisierung von externen Kosten wurde bei allen vorgestellten Bepreisungsmethoden noch nicht umgesetzt, es gibt allerdings Theorien, wie dies sowohl für Pigou als auch Cap-and-Trade Systeme im urbanen Verkehr umgesetzt werden kann.

Schröder et al. [79] stellen eine Umsetzung der Internalisierung von externen Kosten für alle Verkehrsmittel mit MaaS vor. Diese Studie dient als Konzeptstudie für die hier vorgestellte Arbeit. Dabei wird die Idee von Pigou zur Besteuerung der Verursacher der Verkehrsaktivität berücksichtigt. Die Studie erweitert das bestehende Modell von Wong et al. [91], das MaaS unter die

Kontrolle der lokalen Regierung stellt, um die Verpflichtung zur Einhaltung von Nachhaltigkeitszielen umzusetzen. Dies wird erreicht, indem die externen Kosten zunächst durch eine unabhängige Einheit festgestellt werden und danach die Internalisierung mit Hilfe von Bepreisung auf der MaaS Plattform unter Kontrolle der Regierung umgesetzt wird [79].

Paket A	Paket B	Paket C	Paket D
0 €/Monat Pay-as-you-Go	49 €/Monat	99 €/Monat	399 €/Monat
ÖPNV, Car Sharing (CS) und Taxi: normaler Preis	ÖPNV: 20 % Rabatt CS: 10 % Rabatt Taxi: 10 % Rabatt	ÖPNV: 40 % Rabatt CS: 20 % Rabatt Taxi: 20 % Rabatt	ÖPNV: freie Nutzung CS: 30 % Rabatt Taxi: 30 % Rabatt
E-Bike Sharing (E-BS): bis zu 75% Rabatt	E-BS: freie Nutzung	E-BS: freie Nutzung	E-BS: freie Nutzung

Abbildung 2.8: Beispiel für die Ausgestaltung von MaaS Paketen [90]

Das MobilityCoin Konzept von Bogenberger et al [92] verfolgt eine Internalisierung von Externalitäten mit Hilfe der Cap-and-Trade Methode. Der MobilityCoin ist eine digitale Währung für das Management des multimodalen Stadtverkehrs. Mit dieser Währung lassen sich Verkehrsaktivitäten bezahlen. Die Höhe der Preise für einen MobilityCoin hängt von den externen und internen Kosten des Verkehrsmittels und dem Angebot und der Nachfrage auf der MobilityCoin Börse ab. Auf dem eigens geschaffenen Marktplatz für die MobilityCoins reguliert eine Agentur die Menge und Preise der Coins über Transaktionssteuern und Zu- bzw. Abführung von Coins. Durch „Crowdfunding“ und Unterstützung der MobilityCoin Agentur lassen sich zusätzliche Infrastrukturen für die Förderung von nachhaltiger Mobilität finanzieren. Dieses System verlegt den Verkehr durch Anreize anstatt Verbote von der Straße auf andere nachhaltigere Verkehrsmittel. Durch eine faire Verteilung der MobilityCoin Budgets wird die soziale Gerechtigkeit sichergestellt [92].

Noch nicht umgesetzte Konzepte und Theorien sollten hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf das Verkehrssystem vor einem Einsatz in der Praxis untersucht werden. Dafür kommt eine Modellierung des Verhaltens der Verkehrsteilnehmer bei gegebener Bepreisung in Frage. Die Grundlagen zu Verkehrssimulationen und im speziellen Verhaltensmodellierung und Verkehrsmittelwahl werden im nächsten Kapitel erläutert.

2.4 Verkehrsmodellierung

Dieses Kapitel gibt zunächst einen Überblick über die Grundlagen der Verkehrssimulation, um danach tiefer in die Verkehrsnachfragemodellierung zu gehen. Im Anschluss wird die generelle Funktionsweise von Verkehrsmittelwahlmodellen erklärt. Zum Schluss gibt es eine Einführung in die Grundlagen der Szenarioanalyse.

Grundsätzlich lassen sich Verkehrsmodelle nach Eigenschaften aus dem morphologischen Kasten in Tabelle 2.4 unterteilen [93]. Dabei wird zwischen dem Bewegungsumfang, dem Betrachtungsraum, dem Verkehrsmodus, dem Grad an Interaktion und der Art der Stakeholder unterschieden. Eine gängige Unterscheidung von Verkehrsmodellen findet dabei über den Grad

der Interaktion statt. Während makroskopische Modelle den Verkehr als eine Flüssigkeit mit den Eigenschaften Verkehrsfluss, Fahrzeugdichte und Geschwindigkeit darstellt, nehmen die mikroskopischen Modelle den Verkehr als eine Vielzahl eigenständiger Einheiten (Agenten) wahr [94]. Mit makroskopischen Modellen können somit große Räume mit hohem Verkehrsaufkommen beschrieben werden. Mikroskopische Modelle können auf der anderen Seite detailreichere Angaben zu den Eigenschaften und das einzelne Verhalten der Verkehrsteilnehmer geben. Eine Mischung dieser beiden Modellformen sind mesoskopische Modelle, die den Verkehr sowohl als Fluss als auch als Summe ihrer Einzeleinheiten sieht [94].

Tabelle 2.4: Eigenschaften von Verkehrsmodellen (morphologischer Kasten)

Bewegungsumfang	Betrachtungsraum	Verkehrsmodus	Grad an Interaktion	Art der Stakeholder
Wege	Ländlich, überregional, Autobahn	Uni modal	Makroskopisch	Nachfrage
Touren	Städtisch	Multimodal	Mesoskopisch	Angebot
Aktivitäten		Intermodal	Mikroskopisch	

Im Weiteren wird hier der Fokus auf das Verkehrsnachfragemodell nach dem 4-Stufen-Modell gelegt. Die verschiedenen Kombinationen aus dem morphologischen Kasten in Tabelle 2.4 stellen jeweils unterschiedliche Modelle dar. Es können mehrere Eigenschaften einer Kategorie ausgewählt werden. In dieser Arbeit wird beispielsweise ein wegebasiertes, multimodales, mesoskopisches Nachfragemodell im städtischen Bereich verwendet. Je mehr Eigenschaften in einem Modell zusammengefasst sind, desto genauer, aber auch komplexer und aufwendiger wird es [93].

2.4.1 Verkehrsnachfragemodellierung

Die hier vorgestellte Verkehrsnachfragemodellierung basiert auf dem 4-Schritte-Modell, auch Wege-basiertes Modell (WBM) genannt. Es ist das meist verwendete Verkehrsnachfragemodell seit der ersten Implementierung im Jahr 1955 [95]. Dabei wird das Verfahren in vier Schritte aufgeteilt: Verkehrserzeugung, Verkehrsverteilung, Modulwahl (Verkehrsmittelwahl), Umlegung (Routenwahl) (Abbildung 2.9).



Abbildung 2.9: 4-Stufen-Modell Ablauf

Im ersten Schritt wird die Summe der Wege für verschiedene Start- und Zielorte auf Basis von Bevölkerungs- und Flächennutzungsdaten sowie weiteren sozioökonomischen Daten ermittelt. Die Erzeugung definiert den gesamten Reiseverkehr in der Region. Der Umfang der gesamten täglichen Fahrten im Modell findet auf Haushalts- und Zonenebene für verschiedene Fahrtzwecke statt. Dazu wird die betrachtete Region in verschiedene Zonen eingeteilt, aus denen sich Menschen heraus und herein bewegen [96].

Als nächstes werden die Bewegungen aus und in die Zonen miteinander in Relation gebracht, sodass räumliche Interaktionen, also Wege von einer in die nächste Zone, entstehen. Dafür wird eine Start-Ziel Matrix erstellt und mit Hilfe der iterativen proportionalen Anpassung („Iterative Proportional Fitting (IPF)“) befüllt [93]. Das IPF ist ein Verfahren, mit dem eine Tabelle mit Datenzellen so angepasst werden kann, dass sie sich zu ausgewählten Gesamtsummen sowohl für die Spalten als auch für die Zeilen (im zweidimensionalen Fall) der Tabelle addieren [97].

Im dritten Schritt wird die Verkehrsmittelwahl durchgeführt. Die Funktionsweise des Verkehrsmittelwahlmodells wird in Kapitel 2.4.2 im Detail erklärt, weil dieser Schritt eine gesonderte Rolle in der Methodik dieser Arbeit (Kapitel 3.2.2) spielt.

Nachdem das Verkehrsmittel für jeden Weg bestimmt wurde, werden diesen Wegen Routen zugewiesen. Häufig wird das Wardrop'sche Nutzergleichgewicht angewandt, bei dem jeder Fahrer den kürzesten Weg hinsichtlich Reisezeit wählt. Die Schwierigkeit besteht darin, dass die Reisezeiten eine Funktion der Nachfrage sind, während die Nachfrage eine Funktion der Reisezeit ist. Deshalb wird über das Wardrop'sche Prinzip zur Zuordnung der Verkehrsströme auf Routen eines Verkehrsnetzes ein eindeutiges und stabiles Nutzergleichgewicht ermittelt, in welchem die Reisezeiten aller befahrenen Routen gleich und minimal sind [98].

Ein Beispiel für das wege-basierte Nachfragemodell ist MITO [99], das genauer in Kapitel 3.2.1 erläutert wird. Es wird an der Professur für Verkehrsverhalten der Technischen Universität München (TUM) von Prof. Moeckel und seinem Team entwickelt und insbesondere dessen Verkehrsmittelwahlmodell (Kapitel 3.2.2) wird für die Zwecke dieser Arbeit verwendet.

Neben den wege-basierten Modellen finden aktivitäts-basierte Modelle vermehrt Anwendung in der Nachfragemodellierung. Aktivitätsbasierte Modelle (ABM) sind fortschrittlicher als WBM, weil sie explizit die Aktivitätsmuster und Zeitpläne von Einzelpersonen oder Haushalten sowie deren Interaktionen mit anderen Akteuren modellieren [100]. ABM erkennen an, dass sich die Reisenachfrage aus der Notwendigkeit ergibt, an einer Abfolge von Aktivitäten innerhalb eines bestimmten Zeitraums teilzunehmen und dass jede Reise von früheren und nachfolgenden Reisen derselben Person oder desselben Haushalts beeinflusst wird. Diese Modelle können mehr Verhaltensrealismus und Komplexität als WBM erfassen, wie zum Beispiel tageszeitliche Effekte, Verkehrsmittelverkettung, gemeinsame Reisen und die Teilnahme an Aktivitäten. Sie erfordern mehr Daten und Rechenressourcen als WBM, können aber detailliertere und genauere Ergebnisse für entscheidungsrelevante Analysen liefern [100].

Am TUM Lehrstuhl für Verkehrsverhalten wird ebenso ein aktivitäts-basiertes Modell namens ABIT entwickelt. Diese Form wird jedoch in der weiteren Folge dieser Arbeit nicht weiter berücksichtigt und deshalb nicht weiter ausgeführt.

2.4.2 Verkehrsmittelwahlmodell

Das Verkehrsmittelwahlmodell ermittelt ein Verkehrsmittel zu dem zugehörigen Weg und der zugehörigen Person. Dadurch, dass jede Person nur ein Verkehrsmittel zur gleichen Zeit benutzen kann, gibt es genau eine Wahl aus vielen und es handelt sich um ein diskretes Wahlproblem („Discrete Choice Problem“) [101]. Das individuelle Wahlverhalten findet dabei nach der Nutzenmaximierung statt. Dabei ist der Nutzen („utility“) abhängig von sozialen, ökonomischen, demographischen Eigenschaften des Individuums, aber auch von Charakteristika des Weges, wie Länge, Dauer und Zweck, sowie der Erreichbarkeit der jeweiligen Verkehrsinfrastruktur [102]. Der Nutzen für jeden Weg wird über die sogenannten Nutzenfunktionen berechnet, die alle oben genannten Faktoren mit Hilfe von Parametern miteinander aufsummiert. So wird ein Nutzenwert

für jedes Verkehrsmittel und jeden Weg errechnet. Die Parameter dieser Funktionen werden über Umfragen („Stated-Preference Surveys) zur Verkehrsmittelwahl oder zum generellen Verkehrsverhalten ermittelt. Das diskrete Wahlproblem wird in diesem Fall über eine logistische Regression dargestellt. Abbildung 2.10 zeigt, wie die Wahlwahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit von dem berechneten Nutzen am Beispiel einer binären Entscheidung bestimmt werden.

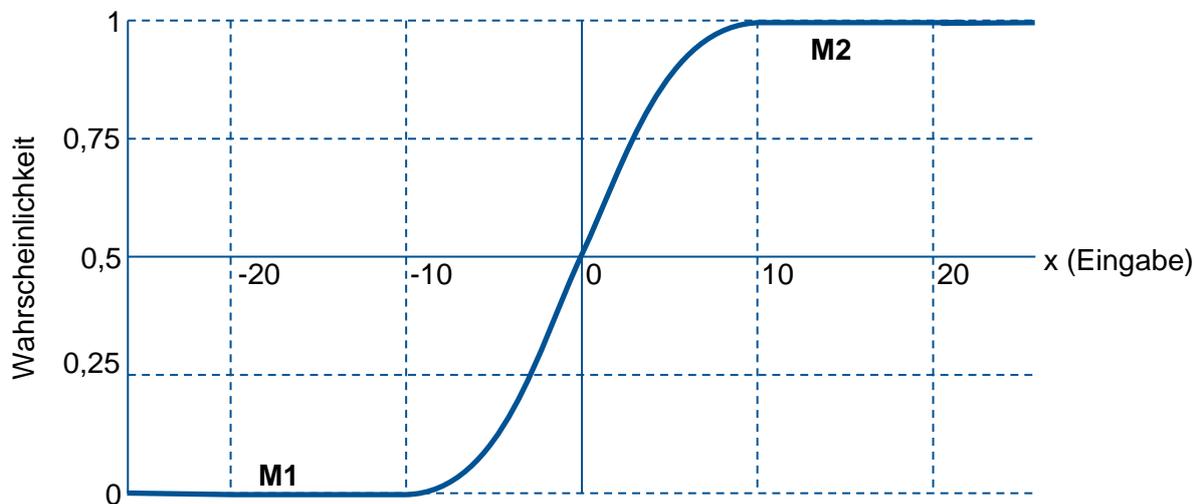


Abbildung 2.10: Logistische (Sigmoid) Funktion für Wahlwahrscheinlichkeit von Verkehrsmitteln

Die Funktion wird durch Gleichung 2.1 beschrieben. Dabei drückt P_{M1M2} die Wahlwahrscheinlichkeit zwischen Verkehrsmittel 1 (M1) und Verkehrsmittel 2 (M2) aus, die mit Hilfe des Nutzens von M1 U_{M1} und M2 U_{M2} berechnet wird [102].

$$P_{M1M2} = \frac{e^{U_{M1}}}{e^{U_{M1}} + e^{U_{M2}}} \quad (2.1)$$

Die x-Achse in Abbildung 2.10 stellt dabei die Differenz der Nutzen von M2 und M1 dar. So lassen sich über den Graphen direkt die Wahrscheinlichkeiten für die Wahl der Verkehrsmittel ablesen.

2.4.3 Szenarioanalyse

In diesem Kapitel sollen die Grundlagen der Szenarioanalyse erläutert werden, weil bei der Erstellung von Simulationen meist verschiedene Szenarien durchgespielt werden. In dieser Arbeit handelt es sich dabei um Bepreisungsszenarien, also die unterschiedliche Ausgestaltung der Bepreisung im Verkehr. Für die Beschreibung der unterschiedlichen Eigenschaften eines Szenarios werden häufig morphologische Kästen entwickelt. Am Ende dieses Kapitels werden diese weiter erklärt.

Grundsätzlich dient ein Szenario dazu, zukünftige Entwicklungen abzubilden. Hier liegt der Fokus auf den Szenarioanalysen von Auswirkungen der Bepreisung von urbaner Mobilität. Der Vorteil der Szenarioanalyse liegt einerseits in der Untersuchung und dem Vergleich von verschiedenen Alternativen. Andererseits schafft diese trotz hoher Komplexität eine klare Struktur für die Entwicklung moderner städtischer Verkehrssysteme [103]. Laut Kosow und Gassner ist die Szenarioanalyse „eine Beschreibung einer möglichen Zukunft, die Entwicklungsmöglichkeiten zum Erreichen der Zukunft enthält“ [103].

Generell findet die Szenarioanalyse in drei Schritten statt [104]:

1. Analyse
2. Prognose
3. Synthese

Die *Analyse* beginnt mit einer klaren Abgrenzung und Definition der Problemstellung. Dabei werden wichtige Einflussbereiche identifiziert und Informationen strukturiert. Der Zeithorizont des Szenarios wird dabei festgelegt, wobei darauf geachtet wird, dass er nicht zu weit in der Zukunft liegt, um Annahmen überzeugend zu begründen [105]. In der *Prognose*phase werden sinnvolle und konsistente Entwicklungen der Einflussbereiche zusammengefasst. Hierbei kommt ein morphologischer Kasten zum Einsatz. Störfaktoren werden bereits in der Prognose berücksichtigt. Die Analyse wird mit der *Synthese* abgeschlossen, in der die Bedeutung der Entwicklungen in den Einflussbereichen im Zusammenspiel bewertet wird. Zudem werden erste Schritte für die Umsetzung in diesem Schritt skizziert.

Nach Fink et al. [106] können Szenarien in vier Unterscheidungsformen unterteilt werden, wie in Tabelle 2.5 dargestellt.

Tabelle 2.5: Unterscheidungsformen der Szenarioentwicklung

Form der Entwicklung	Ausprägung		
Ausgangspunkt	Explorative Szenarien: Entwicklung aus der Gegenwart		Antizipative Szenarien: Entwicklung aus der Zukunft
Richtung	Induktiv: Verknüpfung von Trends	Deduktiv: Vorgabe eines Frameworks	Inkremental: Weiterentwicklung eines Zukunftsbildes
Zielgerichtetheit	Deskriptive Szenarien: Ursache-Wirkungs-Beziehungen		Präskriptive Szenarien: Ziel-Mittel-Beziehungen
Komplexität	Modellgestützte Entwicklung: mathematische Algorithmen		Intuitive Entwicklung: Logik & Expertenwissen

Fink et al. [106] sowie Mietzner [107] beschreiben die Unterscheidungsformen der Szenarioentwicklung folgendermaßen:

Antizipative Szenarien schließen von einer festen Zukunftsvorstellung auf die Gegenwart, während explorative Szenarien die Gegenwart fixieren und die Zukunft analysieren. Induktive Szenarien kombinieren Prognosen einzelner Zukunftsfaktoren, deduktive Szenarien verwenden ein Framework wie den morphologischen Kasten. Inkrementelle Szenarien entstehen durch stückweise Erweiterung eines Zukunftsbildes. Deskriptive Szenarien basieren auf kausalen Beziehungen und spiegeln mögliche Konsequenzen neutral aus der Gegenwart wider. Präskriptive Szenarien fokussieren sich auf Ziel-Mittel-Beziehungen, indem von einem definierten Zielszenario notwendige Schritte abgeleitet werden. Szenarien können unterschiedlich komplex erstellt werden. Modellgestützte Entwicklung nutzt mathematische Algorithmen zur Bewertung von Einflussfaktoren, während intuitive Methoden wie der morphologische Kasten alle möglichen Szenarien logisch plausibilisieren oder ausschließen können.

Morphologischer Kasten

Die morphologische Analyse, als systematisch-analytische Kreativitätstechnik, wird hauptsächlich mithilfe eines morphologischen Kastens durchgeführt [103]. Dieser ermöglicht es, die vorherigen Schritte der Szenarioanalyse nachvollziehbar und modular zu kombinieren. Ein morphologischer Kasten besteht aus verschiedenen Kategorien, die diskrete Alternativen enthalten. Diese Alternativen sollen gemeinsam alle sinnvollen Handlungsmöglichkeiten innerhalb einer Kategorie darstellen. Alle Kategorien zusammen sollen sämtliche relevanten Aspekte eines Szenarios beschreiben.

Die Verwendung eines morphologischen Kastens erlaubt die systematische Entwicklung und Bewertung einer Vielzahl von Lösungsansätzen, weil er einen Lösungsraum aus verschiedenen wählbaren Szenarien abbildet. N Kategorien spannen dabei einen n-dimensionalen Lösungsraum auf, wobei die Alternativen der jeweiligen Kategorien die Ausprägungen einer der n Dimensionen darstellen. Diese Eigenschaft ermöglicht es, ungewöhnliche und innovative Lösungen zu finden, die möglicherweise über traditionelle Ansätze hinausgehen [108]. Die morphologische Analyse dient als Grundlage zur Veranschaulichung besonders komplexer Wirkzusammenhänge [103]. Je nach Einzelfall sind nicht alle Kombinationen umsetzbar. In solchen Fällen kann die intuitive Szenarioentwicklung genutzt werden, um mittels Logik und Expertenwissen ungültige Lösungen auszuschließen.

2.4.4 Modellierung von Mobilitätsbepreisung

Im folgenden Kapitel wird der aktuelle Stand der Wissenschaft zur Mobilitätsbepreisung vorgestellt. Dabei handelt es sich um Studien, bei denen die Modellierung von Mobilitätsbepreisung in Experimenten oder innerhalb einer Simulationsumgebung getestet wird. Die Studien unterscheiden sich bei der Form der Bepreisung und den analysierten Auswirkungen.

Einen großen Beitrag zur Forschung im Bereich Mobilitätsbepreisung leistet das Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme der ETH Zürich unter Prof. Axhausen. Neben vielen Studien im Bereich der Simulation von Bepreisung werden dort ebenfalls empirische Auswertungen von Experimenten mit modellierter Mobilitätsbepreisung in der Schweiz durchgeführt. Eine große Studie im Auftrag des Schweizer Bundesamts für Straßen [109] untersucht beispielsweise die Auswirkungen der Pigou Steuer auf das Mobilitätsverhalten. In der Studie wird das Verhalten von drei Teilnehmergruppen ausgewertet. Das Mobilitätsverhalten der Teilnehmer wird über Tracking-Apps aufgezeichnet und durch Fragebögen ergänzt. Die erste Gruppe bekommt Informationen zu den verursachten Externalitäten, die zweite Gruppe wird in Höhe der externen Kosten bepreist und die dritte Gruppe ist eine Vergleichsgruppe, die nicht mit den externen Kosten konfrontiert werden. Die Bepreisung der zweiten Gruppe findet über ein Budget für jeden Teilnehmer statt, das in Höhe der verursachten externen Kosten des Teilnehmers reduziert wird. Der Restbetrag des Budgets darf am Ende der Studie behalten werden. Darüber wird ein Anreiz für die Reduktion der externen Kosten geschaffen. Die externen Kosten der Studie berücksichtigen gesundheits-, emissions- und stauabhängige externe Kosten des Verkehrs. Auto, ÖPNV, Fußgänger und Fahrradfahrer wurden in der Studie bepreist. Dabei wurde die räumliche und zeitliche Variabilität der Kosten inkludiert, jedoch gab es keine weitere Unterscheidung bei den Verkehrsmitteln hinsichtlich Antriebstyp oder ÖPNV-Fahrzeug. Die Auswirkungen der Bepreisung wurden hinsichtlich Verkehrsmittel-, Routenwahl und Veränderung der Abfahrtszeiten untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass durch Internalisierung eine Reduktion der externen Kosten um 5,1% möglich ist. Nur durch Information lassen sich die externen Kosten um ca. 2% reduzieren. Ursache für die Reduktion sind laut Studie die Verlagerung des Verkehrs

von Auto auf ÖPNV, Fahrrad und Fußverkehr sowie die Reduktion der täglichen Gesamtfahrdistanz mit Auto und die Reduktion der spezifischen Staukosten durch verringertes Verkehrsaufkommen [109].

Weitere Studien der Forschungsgruppe der ETH Zürich untersuchen Mobilitätsbepreisung mit der Verkehrssimulationssoftware MATSim. Während Meyer de Freitas et al. [7] sich dabei auf die Bepreisung und die Auswirkungen auf den Straßenverkehr fokussieren, berücksichtigt Chakirov [110] auch die Bepreisung des öffentlichen Nahverkehrs und untersucht dabei eine geeignete Kombination aus Stau-Bepreisung im Straßenverkehr und ÖPNV Ticket Preisen. Beide Studien richten die Höhe der Bepreisung nach den externen Kosten im Verkehr und streben damit eine Internalisierung an.

Kaddoura et al. [6] verwenden ebenfalls die MATSim Umgebung, um die Untersuchung von externe Kosten Bepreisung in einer Zukunft mit autonomen Fahrzeugen vorzunehmen. Die Studie zeigt, dass auch in diesem Fall die Internalisierung der externen Kosten zu einer Reduktion der bepreisten autonomen Services und einer Zunahme von aktiver Mobilität führt. Yin et al. [8] zeigen mit ihrer Studie, dass eine Stau-basierte Bepreisung nicht immer zur Reduktion von Emissionen im Verkehr führt und schlagen daher Entscheidungsträgern einen Kompromiss zwischen Stau- und Emissions-reduzierenden Maßnahmen vor. Vrtic et al. [111] diskutieren in ihrer Arbeit die Auswirkungen von Bepreisung im Straßenverkehr auf Verhaltensänderungen vor allem in Bezug auf Verkehrsmittel- und Routenwahl sowie Wahl der Abfahrtszeiten. Dabei wird untersucht, wie hoch die Zahlungsbereitschaft der Menschen für verkehrsgebundene Bepreisung ist und ob sich diese zwischen Auto und ÖPNV unterscheidet.

Durch die Analyse der Literatur im Stand der Wissenschaft können im nächsten Kapitel die Forschungslücke und die zugehörigen Forschungsfragen dieser Arbeit hergeleitet werden.

2.5 Forschungslücke

In den vorherigen Kapiteln wurde ein ausführlicher Überblick über den Stand der Technik gegeben, der sowohl Grundlagen erklärt als auch aktuelle Studien beleuchtet. Da diese Arbeit aus den beiden Teilen Vollkostenbilanzierung und Bepreisungsszenario besteht, sollen die Forschungslücke und die Forschungsfragen hier ebenfalls in zwei Schritten hergeleitet werden.

In der Literatur zu den Vollkosten der Mobilität wurden einige Lücken identifiziert. Bei den Studien zu den internen Kosten waren vor allem Schwächen bei der Anzahl der berücksichtigten Verkehrsmittel und dem Vergleich zwischen privaten Fahrzeugen und öffentlichen Verkehrsmitteln zu erkennen. Der Fokus im Stand der Technik lag hier vor allem bei der TCO-Analyse von Elektromobilität und autonomen Shuttle Services. Externe Kosten hingegen waren zwar Bestandteil von vielen verschiedenen Studien, ihr Fokus war allerdings mindestens genauso divers. Der Betrachtungsraum vieler Studien lag auf der Ebene von EU-Ländern oder Bundesländern. Die Literatur, die sich wiederum auf den städtischen Raum fokussierte, unterscheidet sich stark in den berücksichtigten Verkehrsmitteln und Kostenkategorien beziehungsweise Einflussfaktoren auf Externalitäten. In dieser Studie sollen die wichtigsten urbanen Verkehrsmittel und externen Kostenkategorien berücksichtigt werden. Aus den identifizierten Lücken lässt sich somit die erste Forschungsfrage formulieren:

1. Wie setzen sich die gesamten Vollkosten der urbanen Mobilität für jedes einzelne Verkehrsmittel des städtischen Raums (am Beispiel von München) zusammen?

Im zweiten Teil dieser Arbeit werden die internen und externen Kosten der urbanen Mobilität verwendet, um mit diesen eine Bepreisung der gesamten Mobilität im urbanen Verkehr zu untersuchen. Im Stand der Technik wurden dabei beobachtet, dass weder in der Realität noch in der Simulation eine vollständige vollkostenbasierte Bepreisung analysiert wurde. In dem Experiment der ETH Zürich wurden die Externalitäten von Auto, ÖPNV, Fußgängern und Fahrradfahrern internalisiert, jedoch keine Unterscheidung bei den Antriebstypen und Formen des ÖPNV vorgenommen. Die Externalitäten, die in der Studie berechnet und bepreist wurden, beinhalten zudem keine externen Kosten aus Lärm beim ÖPNV, Flächenverbrauch und Barriere Effekten. Weitere Bepreisungen, die in der Praxis umgesetzt wurden, basieren auf freien Werten, die dazu dienen politische und wirtschaftliche Ziele zu erreichen. Zwar gibt es Fälle, bei denen der Stauungsgrad der Straßen berücksichtigt wurde, jedoch ist dies lediglich eine von vielen Externalitäten. Wiederum andere Studien modellieren die Auswirkungen von der Bepreisung des Straßenverkehrs und berücksichtigen dabei teilweise die Internalisierung von Externalitäten wie Stau und CO₂-Emissionen. In dieser Arbeit ist es jedoch das Ziel, die wichtigsten urbanen Verkehrsmittel und deren interne sowie externe Kosten mit den größten Einflussfaktoren in die Bepreisung einfließen zu lassen. Zudem wird in dem Stand der Technik hauptsächlich der Einfluss von Internalisierung auf den Straßenverkehr und nicht den Modal Split und die Kosten des Gesamtsystems untersucht. Daher ergibt sich für den zweiten Teil dieser Arbeit folgende Forschungsfrage:

2. Wie verändert die vollkostenbasierte Bepreisung urbaner Verkehrsmittel den Modal Split und die gesamten Vollkosten des Verkehrssystems?

3 Methodik

Im folgenden Kapitel wird die Vorgehensweise bei der Ermittlung der internen und externen Kosten urbaner Mobilität sowie die Methodik zur Bestimmung des Einflusses einer vollkostenbasierten Bepreisung auf die Verkehrsmittelwahl erläutert. Das dritte Kapitel stellt somit das Mittelstück zwischen Stand der Technik und den Ergebnissen dar. Es baut auf den Methoden der aktuellen Literatur auf und führt bei Anwendung von den benötigten Daten zu den Ergebnissen, die in Kapitel 4 beschrieben werden.

Vor dem Einstieg in die Methodik werden hier wichtige Begriffe, die im Weiteren verwendet werden, für den Zweck dieser Arbeit definiert:

- **Personenkilometer** (Pkm) beschreibt einen Kilometer Fahrstrecke, den eine Person zurücklegt. Dies stellt eine Vergleichbarkeit für die Transportleistung von Verkehrsmitteln dar, die unterschiedliche Besetzungsgrade aufweisen (zum Beispiel U-Bahn vs. Auto).
- **Transportleistung** steht in dieser Arbeit für die Summe aller Personenkilometer eines Verkehrsmittels in einem Jahr, also die Summe der jährlichen Fahrstrecke aller Personen, die dieses Verkehrsmittel genutzt haben.
- **Spezifische Kosten** sind die Kosten (intern, extern, Vollkosten), die pro gefahrenem Personenkilometer auftreten und in €/Pkm ausgedrückt werden. Sie haben unterschiedliche Werte für die hier berücksichtigten Verkehrsmittel.
- **Berücksichtigte Verkehrsmittel** unterscheiden sich für die beiden Teile dieser Arbeit. Bei der Bilanzierung der Vollkosten wird ein Großteil der urbanen Verkehrsmittel (inklusive verschiedener Antriebstypen) zum Personentransport berücksichtigt: Diesel Bus, Elektrobus, Straßenbahn, U-Bahn, S-Bahn, Elektro Moped, Benziner Moped, Motorrad, Elektroauto, Plug-in Hybrid Auto, Diesel Auto, Benziner Auto, Elektro Car-Sharing, Benziner Car-Sharing, Moped Sharing, e-Scooter Sharing, Fußgänger, Fahrrad, Pedelec. Für die Simulation der Verkehrsmittelwahl durch Bepreisung musste die Anzahl berücksichtigter Verkehrsmittel deutlich reduziert werden (Kapitel 3.2.2): Elektroauto, Diesel Auto, Benziner Auto, Bus, S-Bahn, Straßenbahn / U-Bahn, Fahrrad, Fußgänger.
- **Gesamtkosten** stellen in dieser Arbeit die Summe der entstandenen internen und externen Kosten für ein Jahr im Raum München dar. Sie werden für ein Verkehrsmittel häufig aus dem Produkt von dessen spezifischen Kosten und der Transportleistung berechnet. Die Gesamtkosten sollten nicht mit den Vollkosten (Summe aus internen und externen Kosten) verwechselt werden.

Die Bedeutung von internen und externen Kosten, sowie Vollkosten, basiert auf den Definitionen, die in Kapitel 2.2 vorgestellt werden. Das Bezugsjahr für die Berechnung der Kosten ist 2020 und die Berechnungsmethodik beschränkt sich auf Personenverkehr im urbanen Raum.

3.1 Kostenbestimmung

Die Methodik zur Bestimmung der internen und externen Kosten basiert zum größten Teil auf Vorveröffentlichungen und Abschlussarbeiten, die durch den Autor der Arbeit betreut wurden. Dabei soll der Fokus zunächst bei den internen Kosten liegen. Danach wird die Methodik zu den räumlich und zeitlich konstanten externen Kosten vorgestellt. Im letzten Unterkapitel zu den räumlich und zeitlich variablen externen Kosten werden bereits veröffentlichte Methoden mit neuen Ansätzen erweitert.

3.1.1 Interne Kosten

Dieses Unterkapitel besteht aus zwei Teilen. Im ersten Teil werden die spezifischen internen Kosten mit Hilfe von der Berechnung von Service-Preisen und den Total-Cost-of-Ownership (TCO) ermittelt. Die Methodik dazu basiert auf der Vorveröffentlichung mit König et al. [112] und der Abschlussarbeit von Rausch [113]. Der Neuigkeitswert bei diesen Arbeiten liegt in der hohen Anzahl an verschiedenen Verkehrsmitteln, die miteinander verglichen werden.

Im zweiten Teil wird eine Methodik vorgestellt, die spezifische Kosten pro Luftliniendistanz und Fahrzeit angibt. Dadurch wird eine bessere Vergleichbarkeit der Verkehrsmittel und deren Kosten ermöglicht. Dafür wurde in der Vorveröffentlichung von Schröder und Gotzler [114] sowie der Abschlussarbeit von Gotzler [115] das Verhältnis zwischen gefahrener Distanz, Luftlinie und Fahrzeit hergestellt, und die Kosten pro Kilometer Luftlinie wurden dort miteinander verglichen.

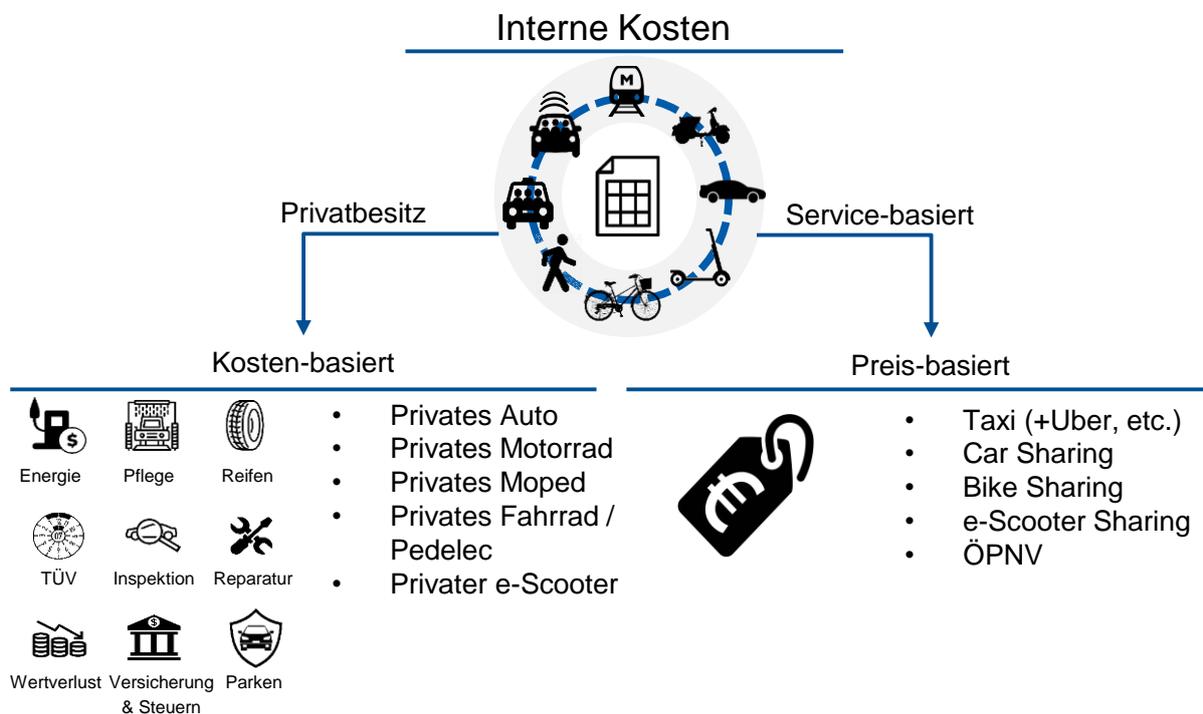


Abbildung 3.1: Schematische Darstellung zur Aufteilung der Methodik für die Bestimmung der spezifischen internen Kosten

Spezifische interne Kosten

Zur Ermittlung der spezifischen internen Kosten wird hier zwischen zwei verschiedenen Kategorien an Verkehrsmitteln unterschieden, bei der sich die Methodik zur Bestimmung der Kosten

deutlich voneinander unterscheiden. Auf der einen Seite sind die Fahrzeuge in Privatbesitz, bei denen die Kosten für den Nutzer mit Hilfe des TCO-Ansatzes bestimmt werden. Auf der anderen Seite befinden sich die service-basierten Verkehrsmittel, bei denen der Nutzer mit den Service Preisen der Dienstleistung konfrontiert ist. Dabei wird das Business Modell des Anbieters in dieser Arbeit außer Acht gelassen. Abbildung 3.1 zeigt die beiden Bedeutungen der internen Kosten.

Zunächst betrachten wir hier die TCO-Berechnung von privaten Fahrzeugen. Tabelle 3.1 zeigt die Kostenfaktoren, die für die einzelnen Verkehrsmittel berücksichtigt wurden. In den folgenden Abschnitten werden die Berechnungen der einzelnen Kostenfaktoren erläutert. Die Total-Cost-of-Ownership ergeben sich durch die Summe der einzelnen Kostenfaktoren, die jeweils in Kosten pro Jahr berechnet werden. Drei wichtige Annahmen, die Einfluss auf fast alle Kostenfaktoren in der TCO-Berechnung haben, sind die jährliche Fahrleistung, die Haltungs-dauer und der Besitzzeitraum des Fahrzeugs. Diese müssen bei der Analyse von Ergebnissen immer mit angegeben werden, weil sie einen großen Einfluss auf die Größe der Kostenwerte in €/Jahr und €/Pkm haben. Abbildung 3.2 zeigt den Zusammenhang zwischen Wertverlust eines Autos und Alter sowie Fahrleistung des Fahrzeugs am Beispiel eines VW Golfs [116]. Dabei wird deutlich, welchen Einfluss diese Annahmen auf diesen Bestandteil der TCO-Berechnung haben kann.

Wertverlust pro Jahr für einen VW Golf

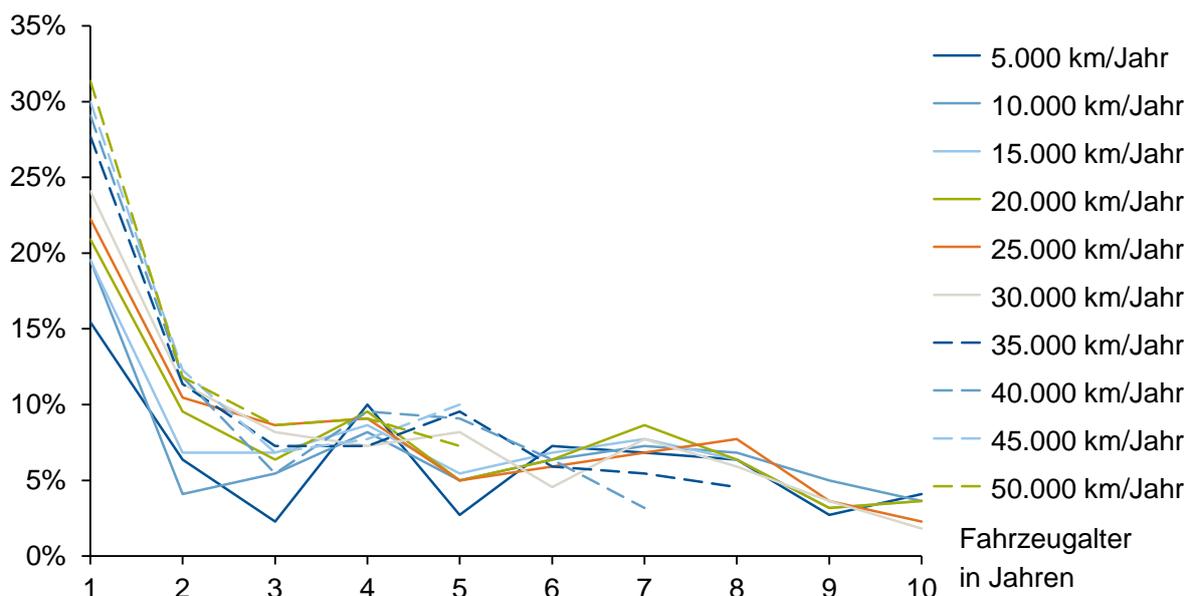


Abbildung 3.2: Zusammenhang Wertverlust und Fahrleistung sowie Fahrzeugalter am Beispiel VW Golf [116]

Wie in Abbildung 3.2 gezeigt, wird der **Wertverlust** in den vorhandenen Online-Datenbanken in % und abhängig von Alter des Fahrzeugs und Fahrleistung pro Jahr angegeben. In dieser Arbeit werden nur Neufahrzeuge berücksichtigt, deshalb ist das Alter des Fahrzeugs mit der Haltungs-dauer gleichzusetzen. Um den Wertverlust in € pro Jahr angeben zu können, wird somit der Anschaffungspreis benötigt. Dieser wurde in der zugrunde liegenden Studienarbeit [113] für verschiedene Antriebstypen und Fahrzeugklassen und mit Hilfe der ADAC und Statista Datenbank [117, 118] gemittelt. Für die Anschaffungs- und Wertverlustwerte von Fahrrädern, Pedelecs sowie e-Scootern wurden Werte aus verschiedenen Datenquellen entnommen. Alle Daten und ihre Quellen dazu sind im Anhang in den Tabellen A.1 bis A.4 oder in der Veröffentlichung von König et al. zu finden [112]. Wenn alle entsprechenden Daten zur Verfügung stehen, kann der Wertverlust in €/Pkm in folgender Weise berechnet werden:

$$\text{Wertverlust} \left[\frac{\text{€}}{\text{Pkm}} \right] = \frac{\text{Anschaffungspreis} [\text{€}] \cdot \left(1 - \prod_{i=1}^{\text{Haltedauer}} (1 - \text{Wertverlust} [\%]_i) \right)}{\text{Haltedauer} [\text{Jahren}] \cdot \text{Fahrleistung} \left[\frac{\text{Fkm}}{\text{Jahr}} \right] \cdot \text{Besetzungsgrad} \left[\frac{\text{Pkm}}{\text{Fkm}} \right]} \quad (3.1)$$

Die jährlichen **Versicherungskosten** werden in Online-Datenbanken und Vergleichsportalen direkt angegeben [119]. Diese unterscheiden sich stark nach Fahrzeugklasse und Antriebstyp sowie jährlicher Fahrleistung. Die Werte wurden gesammelt und ebenfalls in den Tabellen A.1 bis A.4 im Anhang gesammelt. Wird dieser Wert durch die jährliche Fahrleistung und den durchschnittlichen Besetzungsgrad geteilt, erhält man die Versicherungskosten in €/Pkm.

Die **Steuern** für Kraftfahrzeuge lassen sich aus den Tabellen der offiziellen Bekanntmachung zum Kraftfahrzeugsteuergesetz auslesen [120, 121] (Tabellen A.1 bis A.4 im Anhang). Hier wird vor allem zwischen Antriebstyp und Größe des Fahrzeugs unterschieden. Die Kosten sind ebenfalls in € pro Jahr angegeben und können mit der jährlichen Fahrleistung und dem durchschnittlichen Besetzungsgrad in €/Pkm umgerechnet werden.

Tabelle 3.1: Übersicht der Kostenfaktoren für die TCO-Berechnung von privaten Fahrzeugen

Kostenfaktor	Autos	Mopeds / Motor- räder	Fahrrad / Pede- lecs	e-Scooter
Anschaffung / Wertverlust	x	x	x	x
Versicherung	x	x	x	x
Steuern	x	x	x	x
TÜV	x	x		
Energie	x	x	x	x
Inspektion / Service	x			
Reparatur	x	x (inkl. Service und Reifen)	x (inkl. Service und Reifen)	x (inkl. Service und Reifen)
Reifen	x			
Parken	x			
Pflege	x			

Die Untersuchungen durch den **TÜV** und die damit verbundenen Kosten sind nur für Autos, Mopeds und Motorräder notwendig. Die Kosten wurden in dieser Arbeit pauschal in Höhe von 110,54 € angenommen, was dem Preis für eine Untersuchung in Bayern im Jahr 2020 entspricht [122]. Die Untersuchung findet bei Neufahrzeugen nach 3 Jahren (bei Motorrädern nach 2 Jahren) und gebrauchten Fahrzeugen nach 2 Jahren statt. Mit der Information über die Länge der Haltungsdauer lassen sich somit die durchschnittlichen jährlichen TÜV-Kosten berechnen.

Die jährlichen Kosten für **Inspektionen** und **Reparaturen** wurden ebenfalls der Online-Datenbank des ADAC entnommen [123]. Dieser gibt die jährlichen Kosten für verschiedene Antriebstypen und Fahrzeugklassen an (Tabellen A.1 bis A.4 im Anhang).

Die Kosten für **Reifen** inkludieren sowohl das jährlich zweimalige Wechseln der Reifen als auch die Abnutzung der Reifen und der damit verbundene Kauf und die Montage von neuen Reifen. Die Deutsche Automobil Treuhand (DAT) hat dazu einen umfangreichen Report veröffentlicht. Daraus wurde die durchschnittliche Laufzeit der Reifen abhängig von der Fahrzeugklasse und dem Antriebstyp ermittelt [124]. Die Kosten für neue Reifen wurden einer Online-Plattform zum Verkauf von Reifen entnommen [125]. Für die Montage von Reifen wurde ein pauschaler Betrag von 50 € angenommen. Mit den oben beschriebenen Informationen lassen sich die spezifischen Kosten je nach jährlicher Fahrleistung bestimmen. Die Daten für die Reparatur- und Reifenkosten von Fahrrädern und Pedelecs wurden aus branchenüblichen Quellen entnommen (Tabellen A.1 bis A.4 im Anhang).

Die direkten **Parkkosten** betreffen in dieser Studie nur Autos. Die jährlichen Kosten dafür wurden einer INRIX-Studie entnommen. Für München werden dafür 805 € pro Jahr angegeben [126]. Für die **Fahrzeugpflege** wurde ebenfalls ein konstanter jährlicher Wert in Höhe von 250 € angenommen, der der ADAC Datenbank entstammt [123]. Alle Daten und ihre zugrundeliegenden Quellen sind im Anhang in den Tabellen A.1 bis A.4 zusammengefasst.

Verhältnis Reisedistanz, Luftlinie und Fahrzeit

Bisher wurde eine Methodik vorgestellt, die die spezifischen Kosten in €/Pkm berechnet. Für eine bessere Vergleichbarkeit der Verkehrsmittel und deren Kosten sollen diese Ergebnisse zusätzlich hinsichtlich der Luftliniendistanz und Fahrzeit angegeben werden. Dafür muss das Verhältnis zwischen Reisedistanz, Luftlinie und Fahrzeit hergestellt werden. Die Methodik dafür wurde bereits in der Vorveröffentlichung Schröder und Gotzler [114], sowie der Studienarbeit von Gotzler [115] entwickelt. Der Neuigkeitswert besteht darin, dass die oben genannten Verhältnisse durch intermodales Routing für Sharing-Fahrzeuge bestimmt wurden. Die berechneten Werte erhalten dadurch eine Abhängigkeit von der Systemgestaltung des Betreibers. Stau wurde in der Berechnung für das Verhältnis zwischen Reisedistanz, Luftlinie und Fahrzeit nicht berücksichtigt. Abbildung 3.3 zeigt die gesamte Methodik der Arbeit in einem vierschriftigen Vorgehen.



Abbildung 3.3: Schematische Darstellung des Ablaufs der Methodik zur Berechnung des Zusammenhangs zwischen Reisedistanz, Luftliniendistanz und Fahrzeit

Im ersten Schritt werden zufällige Koordinatenpaare im Raum München erzeugt. Diese liegen sowohl im Stadtgebiet München als auch im Umkreis von 25 km um den Stadtkern von München herum. So können Wege innerhalb des Stadtkerns, des Stadtgebiets und der Region berücksichtigt werden. Im zweiten Schritt wird für jedes Verkehrsmittel und jedes Koordinatenpaar ein Routing durchgeführt. Dabei wird das Open-Source Tool, OpenTripPlanner (OTP) zur Hilfe gezogen. Um die Standorte der Sharing-Fahrzeuge (e-Scooter, Moped, Auto) zu bestimmen, wurde auch eine Verbindung zum Application Programming Interface (API) der Service-Anbieter hergestellt. So konnten die Standorte der nächsten Fahrzeuge der Dienstleister ermittelt werden, damit auch für diese Verkehrsmittel ein Routing durchgeführt werden kann. Dabei wurde von einem Fußweg zum nächsten Sharing-Fahrzeug ausgegangen. Durch die Einbindung der Google-API konnten auch Auslastungen der Verkehrswege bei der Fahrzeitberechnung berücksichtigt werden. Das Routing gibt somit die Ergebnisse für die Fahrzeit und -distanz aus. Die Luftliniendistanz kann direkt über euklidische Distanz der Koordinaten berechnet werden. Im

dritten Schritt können mit Hilfe der spezifischen Kosten und der Routingergebnisse die Kosten-ergebnisse berechnet werden. Im letzten Schritt werden die Ergebnisse visualisiert. Die Ergebnisse dazu werden in Kapitel 4.1 vorgestellt. Die Ergebnisse sind dabei in drei verschiedene Wegetypen eingeteilt, die sich jeweils in dem Abstand zum Stadtzentrum von München (Marienplatz) unterscheiden: Regional (Wege in Zone mit Radius 25 km), Stadt (Wege in Zone mit Radius 5 km), Stadtzentrum (Wege in Zone mit Radius 2,5 km).

3.1.2 Externe Kosten – räumlich und zeitlich konstant

Die Methodik zur Berechnung der räumlich und zeitlich konstanten spezifischen externen Kosten basieren auf der Vorveröffentlichung von Schröder et al. [127] und der Studienarbeit von Kirn [128].

Um die relevanten externen Kostenkategorien zu identifizieren, wurde eine Sichtung der aktuellen Literatur durchgeführt. Die Studien unterscheiden sich in ihrem Umfang an berücksichtigten Kostenkategorien erheblich, wobei diese weitgehend von den Zielen der Studie abhängen. So berechnet und untersucht Saighani [27] die externen Kosten vor dem Hintergrund einer möglichen Internalisierung durch die Kommunen. Demgegenüber berechnen und vergleichen van Essen et al. [41] die externen Kosten des Verkehrs in den einzelnen Ländern der Europäischen Union, während Ecoplan und INFRAS [3] die Situation in der Schweiz im Hinblick auf Kostendeckungsgrade im Straßen- und Schienenverkehr sowie für die Berechnung der leistungsabhängigen Schwerverkehrsabgabe betrachten. Die in dieser Arbeit berücksichtigten Kostenkategorien wurden entsprechend dem Zweck der Studie sowie anhand der aktuellen Literatur (Tabelle 2.3) ausgewählt und sind in Abbildung 3.4 zusammenfassend dargestellt.

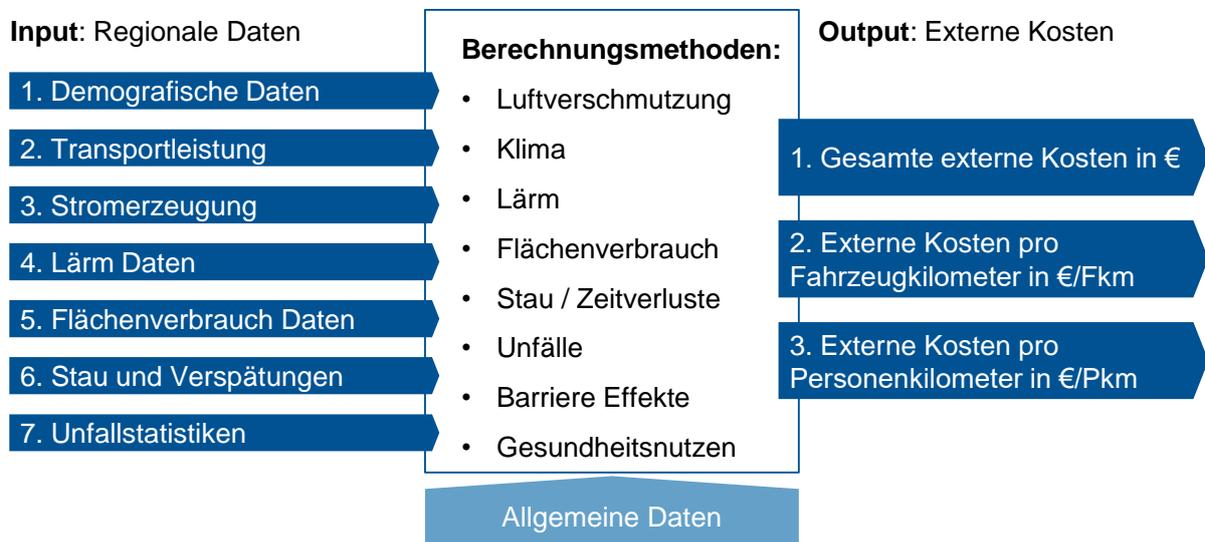


Abbildung 3.4: In- und Output der Berechnungsmethodik für räumlich und zeitlich konstante externe Kosten

Der Fokus liegt in dieser Arbeit auf dem Betrieb der Verkehrsmittel, weil dort der größte Stellhebel für den Nutzer bei der Verkehrsmittelwahl ist. Deshalb sind vor- und nachgelagerte Prozesse im Sinne der Lebenszyklusanalyse nicht in dieser Arbeit berücksichtigt.

Die Methodik zur Berechnung der räumlich und zeitlich konstanten externen Kosten für alle Verkehrsmittel und Kostenkategorien wird in diesem Kapitel vorgestellt. Es werden zwei Arten von Eingabedaten benötigt: (i) regionsspezifische Eingabedaten, die an die analysierte Region angepasst werden müssen, und (ii) allgemeine Eingabedaten (zum Beispiel Wert der Zeit, Kosten

für verschiedenen Verletzungsgrade in Unfällen, etc.), die im europäischen Kontext nicht geändert werden müssen, weil die meisten Eingabewerte auf europäischen Quellen beruhen. Mit den angepassten regionsspezifischen Daten berechnet die Methodik die gesamten externen Kosten, die externen Kosten pro Fahrzeugkilometer (Fkm) und die externen Kosten pro Personenkilometer (Pkm) (Abbildung 3.4). Zu den regionsspezifischen Daten gehören demografische Daten, Verkehrsleistungen, Daten zur Energieerzeugung, Lärmdaten, Flächennutzungsdaten, Staus und Verspätungen sowie Unfallstatistiken. Alle diese Daten werden in den Tabellen A.5 bis A.27 im Anhang näher erläutert und zusammengestellt. Der Unfalldatensatz der Polizeibehörde [129] ist nicht im Anhang enthalten.

In den folgenden Abschnitten wird die detaillierte Berechnungsmethodik für jede Kostenkategorie dargelegt.

Luftverschmutzung

Die Berechnung der Kosten der Luftverschmutzung umfasst mehrere Aspekte. Dazu gehören materielle Schäden, Ernteauffälle, Verlust der biologischen Vielfalt und Gesundheitsschäden. Aufgrund der besonderen Emissionssituation im Verkehr, wo Emissionen in geringer Entfernung vom Boden (0 - 3 m) auftreten, gibt das Umweltbundesamt (UBA) angepasste Kostensätze für verkehrsbedingte Emissionen in Abhängigkeit von der Bevölkerungsdichte im Jahr 2016 in €₂₀₂₀ an [130]. Tabelle A.11 gibt einen Überblick über die Kostensätze im Verkehr nach Luftschadstoffen und Emissionsumfeld. Für Luftschadstoffe im Verkehr fasst das UBA die nicht gesundheitlichen Schäden (Ernteverluste, materielle Schäden und Verluste an biologischer Vielfalt) in einer Kategorie zusammen. Die Kategorie Gesundheitsschäden umfasst sowohl materielle als auch immaterielle Schäden. Es ist davon auszugehen, dass der immaterielle Anteil an den Kosten der Luftverschmutzung leicht unterschätzt wird, weil nach Matthey und Bünger [130] die Zahlungsbereitschaft zur Vermeidung des immateriellen Anteils der Gesundheitsschäden, d.h. von Schmerzen und Leiden, mit steigendem Einkommen zunimmt. Die Berechnung der Kosten erfolgt nach Gleichung (3.2) und (3.3) in Abhängigkeit von der Antriebsart des Fahrzeugs:

$$\text{Verbrennungsmotoren: } PCV_{ijm} = \sum_k EF_{ik} \cdot APC_{mk} + PPC_j \cdot FC_i \cdot 10^{-2} \quad (3.2)$$

$$\text{Elektro-Antriebe: } PCV_i = PC_i \cdot 10^{-2} \cdot \sum_l SP_l \cdot EPPC_l \quad (3.3)$$

Dabei ist:

PCV_{ijm}	Kosten der Luftverschmutzung durch ein Fahrzeug der Klasse i mit Kraftstofftyp j auf einer Straße der Kategorie m in €/Fkm
EF_{ik}	Emissionsfaktor des Schadstoffs k und der Fahrzeugklasse i in g/Fkm (Berechnung mit Tabelle A.27)
APC_{mk}	Monetäre Kosten des Schadstoffs k für eine Straße der Kategorie m in €/g (Tabelle A.11)
PPC_j	Kosten der Verschmutzung bei der Kraftstoffherstellung für einen Kraftstofftyp j in €/l (Tabelle A.15)
FC_i	Kraftstoffverbrauch der Fahrzeugklasse i in l/100Fkm (Tabelle A.27)
SP_l	Anteil der Stromerzeugungsart l am Strommix ohne Einheit (Tabelle A.7)
$EPPC_l$	Luftverschmutzungskosten des Stromerzeugungstyps l im Strommix in €/kWh (Tabelle A.17)
PC_i	Stromverbrauch der Fahrzeugklasse i in kWh/100Fkm (Tabelle A.27)

Die Methode berücksichtigt die Kosten der Luftverschmutzung durch den Betrieb des Fahrzeugs sowie durch die Kraftstoff- und Stromerzeugung. Auf der Grundlage des Handbuchs für Emissionsfaktoren (HBEFA) und des entsprechenden Berechnungstools (TREMOT) hat das UBA durchschnittliche Kostensätze für Umweltkosten pro Fahrzeugkilometer für verschiedene Verkehrssituationen und Fahrzeugkategorien berechnet, die in Tabelle A.12 für den Stadtverkehr aufgeführt sind [130]. Die Berechnungsmethode aus der EU-Richtlinie 2011/76/EU [131], die in Gleichung (3.2) und (3.3) angegeben ist, wird verwendet. Für U-Bahnen, Regionalzüge und Straßenbahnen wurden die Emissionswerte von Nahverkehrszügen angenommen. Für Plug-in-Hybrid-Elektrofahrzeuge (PHEV) wurde ein proportionaler Kostensatz in Bezug auf den Kraftstoffverbrauch des Benzinfahrzeugs verwendet. Der Abrieb durch Fahrrad-, e-Scooter- und Fußgängerverkehr wird in dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

Klima

Für die ökonomische Bewertung der Klimakosten stehen zwei Methoden zur Verfügung, der Schadenskostenansatz und der Vermeidungskostenansatz. Der Schadenskostenansatz erfordert die Schätzung und Monetarisierung aller Schäden, die durch den Klimawandel heute und in Zukunft verursacht werden und mit Unsicherheiten verbunden sind [3]. Bisherige Studien greifen hauptsächlich auf den Vermeidungskostenansatz zurück, bei dem ein explizites Vermeidungsziel vorgegeben werden muss und die Kosten der Maßnahmen zur Erreichung dieses Ziels bewertet werden [3, 27]. Auch dieser Ansatz ist mit großen Unsicherheiten verbunden [3]. Das UBA empfiehlt die Verwendung des Schadenskostenansatzes, der auf neueren wissenschaftlichen Erkenntnissen zu den Schadenskosten des Klimawandels beruht und robustere Schadenskostenschätzungen enthält [130]. Auch die Berechnungen in dieser Arbeit folgen dieser Empfehlung. Die vom UBA angesetzten Klimaschadenskosten sind in Tabelle A.14 aufgeführt. Die Berechnung der Klimakosten erfolgt nach Gl. (3.4) und (3.5) in Abhängigkeit von der Antriebsart des Fahrzeugs. Auch hier werden die Klimakosten aus dem Betrieb des Fahrzeugs sowie aus der Kraftstoff- und Stromerzeugung berücksichtigt.

$$\text{Verbrennungsmotoren: } CCV_{ij} = FC_i \cdot GHGE_j \cdot GHGC \cdot 10^{-8} + CCP_j \cdot FC_i \cdot 10^{-2} \quad (3.4)$$

$$\text{Elektro-Antriebe: } CCV_i = PC_i \cdot 10^{-2} \cdot \sum_l SP_l \cdot EPCC_l \quad (3.5)$$

Dabei ist:

CCV_{ij}	Klimakosten nach Fahrzeugklasse i mit Kraftstofftyp j in €/Fkm
FC_i	Kraftstoffverbrauch der Fahrzeugklasse i in l/100Fkm (Tabelle A.27)
$GHGE_j$	Treibhausgasemissionen in CO ₂ -Äquivalenten pro Brennstoffart in g CO _{2eq} /l (Tabelle A.13)
$GHGC$	Kostensatz pro Einheit CO ₂ -Äquivalent in €/t CO _{2eq} (für 1% oder 0% Zeitpräferenzrate) (Tabelle A.14)
CCP_j	Klimakosten für die Produktion einer Brennstoffart j in €/l (Tabelle A.16 und A.14)
SP_l	Anteil der Stromerzeugungsart l am Strommix ohne Einheit (Tabelle A.7)
$EPCC_l$	Klimakosten des Stromerzeugungstyps l im Strommix in €/kWh (Tabelle A.17)
PC_i	Stromverbrauch der Fahrzeugklasse i in kWh/100Fkm (Tabelle A.27)

In den Wirtschaftswissenschaften wird die Präferenz der Verbraucher, ein Gut in der Gegenwart und nicht in der Zukunft zu konsumieren, durch das Konzept der Zeitpräferenz beschrieben. Dabei wird der Nutzen (oder die Wohlfahrt) zum jetzigen Zeitpunkt mit dem Nutzen oder der

Wohlfahrt zu einem zukünftigen Zeitpunkt über die sogenannte Zeitpräferenzrate verglichen [132]. Dieses Konzept lässt sich auch auf die Monetarisierung zukünftiger Schäden in der Gegenwart anwenden. Bei einer reinen Zeitpräferenzrate von 1% wird die Wohlfahrt heutiger Generationen höher gewichtet als die Wohlfahrt zukünftiger Generationen, bei einer Rate von 0% ist die Wohlfahrt gleich gewichtet. Der Kostensatz bei einer Zeitpräferenzrate von 1% wird zusammen mit einer Sensitivitätsanalyse bei dem höheren Kostensatz empfohlen. Die Kostensätze für die nicht in der Tabelle A.14 aufgeführten Jahre können durch lineare Interpolation berechnet werden [130]. Die Werte wurden mit einer Gleichgewichtung berechnet, weil die Folgen des Klimawandels weltweit Schäden verursachen, unabhängig davon, wo die Treibhausgase emittiert werden. Es wurden Berechnungen des österreichischen Umweltbundesamtes verwendet, in denen die direkten Emissionsfaktoren in CO₂-Äquivalenten für Diesel und Benzin ermittelt wurden. CO₂, CH₄, NO₂ und andere Treibhausgase wurden unter Berücksichtigung ihrer Klimawirkung einbezogen [133]. Die verwendeten Emissionsfaktoren sind in Tabelle A.13 aufgeführt. Die Berechnung der Klimakosten folgt im Wesentlichen den Berechnungen in Ecoplan und INFRAS [3], Saighani [27] und van Essen et al. [41]. Dazu werden zunächst die spezifischen Treibhausgasemissionen pro Fahrzeugkilometer für die verschiedenen Verkehrsmittel anhand ihres Treibstoffverbrauchs (Tabelle A.27) und der Emissionen der einzelnen Treibstoffarten berechnet und anschließend die Gesamtkosten und die durchschnittlichen Kosten pro Personenkilometer über die Transportleistung abgeleitet. Zusätzlich kann die Internalisierung von Klimakosten über Kfz- oder Energiesteuern auf Kraftstoffe in Betracht gezogen werden. Allerdings sind diese Steuern in Deutschland nicht zweckgebunden und machen einen eher geringen Anteil am Gesamtsteueraufkommen aus [134]. Bis 1988 wurden Energiesteuern sogar zur Subventionierung des Kohlebergbaus in Deutschland verwendet [135]. Aus diesem Grund wurden diese Steuern in dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Werden diese Steuern zur Minderung des Klimawandels in anderen Städten verwendet, muss der Betrag der Steuern von den gesamten externen Klimakosten abgezogen werden. Zum Beispiel wurde in Deutschland im Januar 2021 eine CO₂-Besteuerung für fossile Brennstoffe eingeführt. Sie wird in dieser Arbeit aufgrund der späten Einführung nach dem Bezugsjahr 2020 nicht berücksichtigt.

Lärm

Die Auswirkungen von Lärm sind in verschiedenen Lebensbereichen spürbar. So verursacht der Verkehrslärm in mehrfacher Hinsicht Kosten für eine Volkswirtschaft. Die Schwelle, ab der Lärm als schädlich anzusehen ist, ist in der Literatur umstritten, häufig werden die Grenzwerte 50 dB (A), 55 dB (A) und 60 dB (A) genannt [41]. Personen, die von mehr als 55 dB (A) Verkehrslärm betroffen sind, werden aufgrund der entsprechenden Datenlage der Betroffenheitsstatistik für München nach der EU-Umgebungslärmrichtlinie in die Monetarisierung für diese Studie einbezogen. Die Statistiken für den Schienen-, Straßen- und U-Bahn-/Straßenbahnverkehr sind in Tabelle A.8 zu finden. Das UBA schlägt die in Tabelle A.18 aufgeführten Kostensätze für bestimmte Verkehrslärmklassen in Abhängigkeit von der Lärmursache vor. Dazu gehören immaterielle Kosten, Kosten für das Gesundheitssystem und Kosten für Produktionsausfälle, die sich aus Belästigung, kognitiven und psychischen Beeinträchtigungen sowie körperlichen Gesundheitsfolgen ergeben [130].

Die Berechnung der Lärmkosten erfolgt in dieser Studie analog zu van Essen et al. [41]. Demnach werden die beiden oben genannten Faktoren, d.h. die Anzahl der betroffenen Personen und der Kostensatz pro Lärmpegelklasse miteinander multipliziert und aufsummiert, um die Gesamtkosten von Straßenverkehrs- bzw. Schienenverkehrslärm zu ermitteln. In einem nächsten Schritt müssen die errechneten Gesamtkosten auf die einzelnen Verkehrsträger umgelegt werden. Zu diesem Zweck werden in der Literatur sogenannte Lärmgewichtungsfaktoren (NWF)

und Laufleistungen verwendet [27, 41, 136]. NWFs werden verwendet, um die unterschiedlichen Lärmpegel der verschiedenen Verkehrsträger zu berücksichtigen. Eine Übersicht über die NWFs nach Verkehrssituation findet sich in Tabelle A.19. Die Daten von Bäumer et al. [137] für den Straßenverkehr und van Essen et al. [41] für den Schienenverkehr werden verwendet, um die Fahrleistung der Nicht-Personenverkehrsträger zu bestimmen. Die Berechnung erfolgt nach den Gleichungen (3.6) und (3.7) [27].

$$NCV_{ij} = \lambda NOIST_{ij} \cdot \frac{1}{FL_i} \sum_k RAN_{jk} \cdot CNL_{jk} \quad (3.6)$$

$$\text{Mit: } \lambda NOIST_{ij} = \frac{NWF_i \cdot FL_i}{\sum_i (NWF_{ij} \cdot FL_{ij})} \quad (3.7)$$

Dabei ist:

NCV_{ij}	Lärmkosten nach Fahrzeugklasse i und Infrastrukturart (Straße oder Schiene) j in €/Fkm
$\lambda NOIST_i$	Verteilungsschlüssel des Verkehrslärms pro Verkehrsmittel
RAN_{jk}	Von Lärmpegel k und Infrastrukturtyp j betroffene Einwohner in Anzahl der Einwohner (Tabelle A.8)
CNL_{jk}	Kostensatz pro Lärmpegel k und Infrastrukturart j in €/Einwohner (Tabelle A.18)
NWF_i	Lärmgewichtungsfaktor pro Fahrzeug i (ohne Einheit) (Tabelle A.19)
FL_i	Jährliche Fahrleistung pro Fahrzeug i in Fkm/a (Tabelle A.6)
NWF_{ij}	Lärmgewichtungsfaktor pro Fahrzeug i des Infrastrukturtyps j (keine Einheit) (Tabelle A.19)
FL_{ij}	Jährliche Fahrleistung pro Fahrzeug i der Infrastrukturart j in Fkm/a (Tabelle A.6)

Flächenverbrauch

Der Verkehr nutzt Landflächen in zwei verschiedenen Verkehrssituationen. Die Flächen werden einerseits für die Beförderung des Verkehrs über Straßen oder Schienensysteme genutzt. Andererseits werden Flächen für das Parken von Fahrzeugen, die nicht bewegt werden, in Anspruch genommen. Die Infrastruktur der Verkehrsmittel ist für den Hauptteil des Flächenverbrauchs verantwortlich. Deshalb ist die Verwendung von öffentlichen Mitteln für Verkehrsinfrastruktur Teil der externen Kosten des Flächenverbrauchs. Die Kosten für die Straßen-, Fahrrad- und ÖPNV-Infrastruktur [138] können anhand der Investitionen der zuständigen Kommune geschätzt und dann durch die verschiedenen Verkehrsarten, die diese Infrastruktur nutzen, geteilt werden. Parkplätze für Autos verursachen Kosten durch Bau, Instandhaltung, Betrieb [139] und Opportunitätskosten [140, 141] dieser Plätze. Opportunitätskosten im Zusammenhang mit Flächenverbrauch beim Parken ergeben sich durch die Höhe der Steuerausfälle, die dadurch entstehen, dass die Fläche nicht bewirtschaftet wird. Neben dem Parken von Autos verbrauchen auch andere private und gemeinschaftlich genutzte Fahrzeuge beim Parken Platz auf Gehwegen. Dies verursacht ebenfalls Opportunitätskosten. All diese Aspekte werden in den folgenden beiden Gleichungen (3.8) und (3.9) zusammengefasst.

$$LCV_{ijp} = INV_j \cdot \frac{SC_i}{\sum_i SC_{ij} \cdot FL_{ij}} \left(+PAC \cdot \frac{ST_i}{\sum_k ST_k \cdot FL_k} \right) + OC_p \cdot SC_i \cdot NV_i \cdot \frac{ST_i}{24h} \cdot \frac{1}{FL_i} \quad (3.8)$$

$$\text{Mit: } PAC = NP \cdot \left(\frac{CCP}{LTP} + OCP \cdot PSS + MCP - PP \right) \quad (3.9)$$

Dabei ist:

LCV_{ijp}	Landnutzungskosten nach Fahrzeugklasse i , Parkart p und Infrastrukturart (Straße, öffentlicher Verkehr oder Fahrrad) j in €/Fkm
INV_j	Jährliche Investitionen der Gemeinde für den Infrastrukturtyp j in €/a (Tabelle A.9)
PAC	Jährliche Gesamtkosten für das Parken von Autos in €
ST_i	Tägliche Standzeit pro Fahrzeugklasse i (Unterschied zwischen Sharing und Privat) in Stunden (Tabelle A.25)
SC_i	Flächenverbrauch pro Fahrzeug i in m^2 (nur für Straßenfahrzeuge) (Tabelle A.23 und A.25)
SC_{lj}	Flächenverbrauch pro Fahrzeug i des Infrastrukturtyps j in m^2 (nur für Straßenfahrzeuge) (Tabelle A.23 und A.25)
FL_{lj}	Jährliche Fahrleistung pro Fahrzeug i der Infrastrukturart j in Fkm/a (Tabelle A.6)
FL_k	Jährliche Fahrleistung pro Fahrzeugtyp k in Fkm/a (Tabelle A.6)
OC_p	Opportunitätskosten pro Parkart p (Stellplätze oder Gehweg) in €/m ² (Tabelle A.25)
NV_i	Anzahl der Fahrzeuge je Fahrzeugklasse i (Tabelle A.6)
NP	Anzahl der Stellplätze (Tabelle A.9)
CCP	Baukosten pro Stellplatz in € (Tabelle A.25)
LTP	Lebensdauer eines Stellplatzes in Jahren (Tabelle A.25)
OCP	Opportunitätskosten eines Stellplatzes in €/m ² (Tabelle A.25)
PSS	Größe eines Stellplatzes in m^2 (Tabelle A.25)
MCP	Jährliche Unterhaltskosten pro Stellplatz in €/a (Tabelle A.25)
PP	Jährlicher Gewinn pro Stellplatz in €/a (Tabelle A.9)

In Tabelle A.9 im Anhang sind alle regionalspezifischen Daten für die Berechnung zusammengestellt wie zum Beispiel die jährlichen Investitionen für die Infrastruktur, die Anzahl der öffentlichen Parkplätze und der Gewinn beim Betrieb dieser Plätze. In Tabelle A.25 sind alle konstanten Werte für das Parken zusammengefasst. Ähnlich wie im Abschnitt über die Klimakosten kann argumentiert werden, dass die Kfz-Steuer für den Straßenbau verwendet werden und somit ein Teil der Landnutzungskosten bereits internalisiert ist. Aus den gleichen Gründen wie zuvor werden sie in dieser Berechnung nicht berücksichtigt, weil der Zweck dieser Steuern in einigen Ländern nicht eindeutig festgelegt ist [134].

Stau / Zeitverluste

Staus entstehen hauptsächlich durch die Ansammlung von Autos und anderen Verkehrsteilnehmern auf Straßen. Es gibt jedoch auch viele überlastete öffentliche Verkehrsnetze, die zu Verspätungen führen. In beiden Fällen geht Zeit verloren und es entstehen Kosten. In der Verkehrswirtschaft ist der Wert der Zeit die Opportunitätskosten der Zeit, die ein Reisender für seine Reise aufwendet. Im Wesentlichen ist dies der Betrag, den ein Reisender bereit wäre zu zahlen, um Zeit zu sparen, oder der Betrag, den er als Entschädigung für verlorene Zeit akzeptieren würde [142]. Dieses Konzept wird von der INRIX Traffic Scorecard [143] angewendet, die die

Staukosten für viele Städte auf der ganzen Welt berechnet. Dieser Wert wird für die Stauberechnungsmethode dieser Studie übernommen und über den Flächenverbrauch und die Gewichtung der jährlichen Fahrleistung auf die verschiedenen Verkehrsteilnehmer verteilt (Gleichung 3.10). Für den öffentlichen Verkehr wird die durchschnittliche Verspätung einer Fahrt für verschiedene öffentliche Verkehrsmittel benötigt. Martin et al. [144] haben zum Beispiel Daten über den öffentlichen Verkehr in München gesammelt und die durchschnittliche Verspätung für jede Fahrt berechnet. Diese wird mit der Anzahl der Fahrten und dem Durchschnittswert für den Zeitwert multipliziert (Gleichung 3.11).

$$\text{Straßenverkehr: } COCV_i = CONC \cdot \frac{SC_i}{\sum_l SC_l \cdot FL_l} \quad (3.10)$$

$$\text{ÖPNV: } COCV_i = \frac{AD_i}{60} \cdot NT \cdot 365 \cdot SPT \cdot VT \cdot \frac{1}{FL_i} \cdot \frac{TP_i}{\sum_k TP_k} \quad (3.11)$$

Dabei ist:

$COCV_i$	Staukosten nach Fahrzeugklasse i in €/Fkm
$CONC$	Gesamte Staukosten in € (Tabelle A.10)
SC_i	Flächenverbrauch für Fahrzeugklasse i bei 30 km/h in m ² (Tabelle A.25)
FL_l	Jährliche Fahrleistung pro Fahrzeug i in Fkm/a (Tabelle A.6)
AD_i	Durchschnittliche Verspätung für Fahrzeugklasse i in min (Tabelle A.10)
NT	Anzahl der Fahrten pro Tag (Tabelle A.10)
SPT	Anteil des öffentlichen Verkehrs an diesen Fahrten (Tabelle A.10)
VT	Wert der Zeit in €/h (Tabelle A.10)
TP_i	Transportleistung der Fahrzeugklasse i in Pkm/a (Tabelle A.6)

Unfälle

Im folgenden Abschnitt wird die Methodik zur Ermittlung der externen Unfallkosten erläutert. Analog zu Becker et al. [145] werden in dieser Studie nur die Kosten für Personenschäden berücksichtigt, weil Sachschäden an Fahrzeugen und Infrastruktur überwiegend durch die Kfz-Versicherung abgedeckt sind oder von den Verursachern selbst getragen werden [146] und als interne Kosten gelten. Humanitäre Kosten des Verursachers werden ebenfalls als interne Kosten betrachtet und daher nicht zu den gesamten externen Unfallkosten addiert. Die Kostensätze für Personenschäden basieren auf Saighani [27], Neumann [147] und Becker et al. [145] und stimmen weitgehend mit den Berechnungsmethoden und Werten der Bundesanstalt für Straßenwesen überein. Tabelle A.22 gibt einen Überblick über die verwendeten Kostensätze. Alle Kostensätze wurden über den Verbraucherpreisindex des Statistischen Bundesamtes (Destatis) an das in dieser Arbeit verwendete Preisniveau von 2020 angepasst [148].

Für die Bewertung der externen Unfallkosten finden sich in der Literatur verschiedene Ansätze, nach denen die Unfallkosten den beteiligten Verkehrsträgern zugeordnet werden. In der Literatur werden häufig das Monitoring-Prinzip, das Verursacherprinzip und der Schadenspotenzialansatz genannt [27]. Beim Monitoring-Prinzip wird das Unfallereignis abgebildet, und die externen Unfallkosten werden der Fahrzeugklasse zugeordnet, in der das Opfer unterwegs war. Im Gegensatz dazu entscheidet das Verursacherprinzip, wem die Kosten nach der Schuldfrage des jeweiligen Verkehrsunfalls zuzuordnen sind. Dabei trägt die schuldige Partei die vollen Kosten

des Unfalls [3]. Der Schadenspotenzialansatz basiert auf der Überlegung, dass schwerere und größere Fahrzeuge ein größeres intrinsisches Risiko für schwere Unfallfolgen tragen, insbesondere bei Kollisionen mit schwächeren Verkehrsteilnehmern [149]. In dieser Arbeit werden die Unfallkosten nach dem Verursacherprinzip und dem Schadenspotenzialansatz berechnet.

Zur Berechnung der Kosten nach dem Verursacherprinzip wird die Zahl der Leicht- und Schwerverletzten sowie der Getöteten für jeden Unfall mit dem jeweiligen Kostensatz multipliziert und addiert. Die Gesamtkosten werden dann als Summe aller Einzelunfallkosten einer Fahrzeugklasse berechnet. Für die Klassifizierung wird nur die Fahrzeugklasse des Unfallverursachers herangezogen.

Die Berechnung der Unfallkosten nach dem Schadenspotenzialansatz ist je nach Studie unterschiedlich. Für die Zuordnung in dieser Studie wird eine Berechnung über die kinetische Energie beim Unfall vorgenommen [27]. Die kinetische Energie und damit die Fahrzeugmasse im Stadtverkehr mit seinen niedrigen Geschwindigkeiten hat einen großen Einfluss auf die Unfallschwere [150]. Da die Verteilung der Unfallkosten über die kinetische Energie das Schadenspotenzial eines Unfallbeteiligten am besten widerspiegelt, wurde dieser Ansatz für die vorliegende Arbeit gewählt. Eine Übersicht über die angenommenen Fahrzeugmassen und -geschwindigkeiten sowie die kinetischen Energien ist in Tabelle A.24 dargestellt. Die Gesamtmasse setzt sich aus der Fahrzeugmasse und der Masse der Insassen bei durchschnittlicher Belegung zusammen. Die Masse der Fußgänger wird anhand des Durchschnittsgewichts von Männern und Frauen in Deutschland berechnet. Für Bus und Straßenbahn wurden die Fahrzeugmassen anhand der verwendeten Fahrzeugtypen gewichtet. Die Berechnung erfolgt nach Gleichung (3.12), (3.13) und (3.14).

$$\text{Verursacherprinzip: } ACV_i = \frac{1}{FL_i} \cdot \sum_k AC_{ki} \quad (3.12)$$

$$\text{Schadenspotentialansatz: } ACV_i = \frac{1}{FL_i} \cdot \sum_p \frac{E_{kin i}}{\sum_l E_{kin l}} \cdot AC_{pi} \quad (3.13)$$

$$\text{Mit: } AC = \sum_j (n_j \cdot c_j) \quad (3.14)$$

Dabei ist:

ACV_i	Unfallkosten nach Fahrzeugklasse i in €/Fkm
FL_i	Jährliche Fahrleistung pro Fahrzeugklasse i in Fkm/a (Tabelle A.6)
AC	Unfallkosten für einen Unfall in €
AC_{ki}	Unfallkosten für Unfälle mit Fahrzeugklasse i als Verursacher in €/a
AC_{pi}	Unfallkosten für Unfälle, bei denen die Fahrzeugklasse i am Unfall beteiligt ist in €/a
n_j	Anzahl der verletzten Personen nach Verletzungsgrad j eines Unfallereignisses (ohne Einheit)
c_j	Spezifischer Kostensatz nach Grad der Schädigung j in €/Person (Tabelle A.22)
$E_{kin i}$	Kinetische Energie für die Fahrzeugklasse i in J (Tabelle A.24)
$E_{kin l}$	Kinetische Energie des an dem Unfall beteiligten Fahrzeugs l in J (Tabelle A.24)

Barriere Effekte

Der Barriere Effekt beschreibt die Zeitverzögerung, die der motorisierte Verkehr den aktiven Mobilitätsformen auferlegt [66]. Dies kann in Form von großen Straßen geschehen, die Fußgänger überqueren oder umgehen müssen, um ihr Ziel zu erreichen. Vorteile für aktive Mobilitätsformen können durch Infrastrukturverbesserungen für Fußgänger und Radfahrer oder eine Reduzierung des motorisierten Verkehrs im Allgemeinen erreicht werden. In dieser Studie wurden die Werte einer früheren Studie an den Währungskurs von 2020 angepasst [66]. Die verwendeten Werte sind in Tabelle A.20 im Anhang zusammengestellt.

Gesundheitsnutzen

Radfahrer und Fußgänger spielen als Mobilitätsformen aufgrund der kürzeren Distanzen eine entscheidende Rolle im städtischen Umfeld. Im Modal Split für die Anzahl der Wege in München nehmen sie zusammen 42% für das Jahr 2017 ein [14]. Der gesundheitliche Nutzen durch aktive Mobilität sollte daher in eine umfassende Betrachtung der externen Effekte der städtischen Mobilität einbezogen werden. Um diesen gesundheitlichen Nutzen zu ermitteln, hat die Weltgesundheitsorganisation (WHO) das "Health Economic Assessment Tool (HEAT) for Walking and Cycling" entwickelt, mit dem dieser Nutzen des Radfahrens und Gehens berechnet und monetarisiert werden kann [151]. Die Berechnungsmethodik von HEAT wird in dieser Studie verwendet und basiert auf einem Vergleich des Sterblichkeitsrisikos von Personen, die regelmäßig zu Fuß gehen oder Rad fahren, mit dem von Personen, die nicht regelmäßig aktive Formen der Mobilität nutzen. Es wird eine Verringerung des Sterberisikos von 10% für Radfahrer bei 87 Stunden Aktivität pro Jahr und 11% für Fußgänger bei 146 Stunden pro Jahr angenommen. Bei mehr (oder weniger) körperlicher Aktivität wird eine lineare Veränderung des Mortalitätsrisikos postuliert [65]. In HEAT basiert die Risikobewertung auf den kombinierten Ergebnissen von sieben Studien zum Radfahren und 14 Studien zum Gehen [65]. Die Berechnung erfolgt mit den in Tabelle A.26 aufgeführten Parametern gemäß Gleichung (3.15) und (3.16).

$$HB_{ij} = \frac{1}{FL_i} \cdot \Delta RISK_{Mort,i} \cdot MR_j \cdot NR_j \cdot VL \quad (3.15)$$

$$\text{Mit: } \Delta RISK_{Mort} = (1 - RR) \cdot \frac{t}{t_{ref}} \quad (3.16)$$

Dabei ist:

HB_{ij}	Gesundheitsnutzen nach Fahrzeugklasse i (nur Fahrrad und Fußgänger) in Abhängigkeit von der Altersgruppe j in €/Fkm
FL_i	Jährliche Fahrleistung pro Fahrzeugklasse i in Fkm/a (Tabelle A.6)
$\Delta RISK_{Mort,i}$	Verringertes Sterberisiko (ohne Einheit)
RR	Relatives Sterberisiko (ohne Einheit) (Tabelle A.26)
t	Tägliche Reisezeit pro Person in min/Woche (Tabelle A.6)
t_{ref}	Tägliche Reisezeit pro Person im Referenzszenario in min/Woche (Tabelle A.26)
MR_j	Sterblichkeitsrate in der Altersgruppe j (Tabelle A.5)
NR_j	Anzahl der Einwohner in der Altersgruppe j (Tabelle A.5)
VL	Statistischer Wert des Lebens in € (Tabelle A.26)

In der Gleichung wird die Zahl der Einwohner in jeder Altersgruppe (20 bis 64 Jahre für Radfahren, 20 bis 74 Jahre für Gehen) mit der Sterblichkeitsrate multipliziert, um die Sterblichkeit der Bevölkerungsgruppe zu berechnen. Die jährlichen Todesfälle in diesem Zeitraum werden dann mit dem verringerten Sterberisiko durch aktive Mobilität multipliziert, um die vermiedenen Todesfälle in dieser Gruppe zu berechnen. Die vermiedenen Todesfälle werden mit dem Wert des statistischen Lebens (VSL) monetarisiert. Für die Altersgruppe der 20- bis 64-Jährigen wird eine Sterblichkeitsrate von ca. 265 Sterbefällen pro 100.000 Einwohner und für die Altersgruppe der 20- bis 74-Jährigen eine Sterblichkeitsrate von ca. 483 Sterbefällen pro 100.000 Einwohner verwendet [151]. Mit der oben beschriebenen Methodik kann ein konstanter Wert für die spezifischen externen Kosten von ganz München berechnet werden. Im nächsten Unterkapitel werden räumliche und zeitliche Abhängigkeiten verschiedener hier verwendeter Kostenkategorien aufgezeigt. Und es wird eine Berechnungsmethodik für die Bilanzierung dieser räumlichen und zeitlichen Varianzen entwickelt.

3.1.3 Externe Kosten – räumlich und zeitlich variabel

Im vorherigen Unterkapitel wurden die spezifischen externen Kosten unter der Annahme berechnet, dass sie sich zwar zwischen den verschiedenen Verkehrsmitteln unterscheiden, aber keine räumlichen und zeitlichen Änderungen für ein Verkehrsmittel vorweisen. Dies ist allerdings in der Realität nicht der Fall. Mehrere Studien zeigen, dass die meisten Externalitäten raumzeitliche Varianzen im urbanen Raum besitzen [152]. Zum Beispiel verursachen Fahrzeuge mit höheren Geschwindigkeiten schwerere Unfälle oder Lärm und der Straßenverkehr wird am Abend oder in der Nacht als störender wahrgenommen als am Tag [153–158]. In Tabelle 3.2 werden die für diese Arbeit berücksichtigten Varianzen für die Verkehrsmittelkategorien ÖPNV, Autos und aktive Mobilität und die einzelnen externe Kostenkategorien zusammengefasst. Autos weisen dabei die meisten raum-zeitlichen Varianzen auf, die externen Kosten des ÖPNV bleiben konstant. Die Gründe dafür werden in Kapitel 5 diskutiert.

Tabelle 3.2: Übersicht der Einflussfaktoren auf räumliche und zeitliche Varianzen der spezifischen externen Kosten

Verkehrsmittel	Luftverschmutzung	Klima	Lärm	Flächenverbrauch	Stau	Unfälle	Barriere Effekte
ÖPNV	-	-	-	-	-	-	-
Autos	Geschwindigkeit Straßentyp	Geschwindigkeit Straßentyp	Geschwindigkeit Straßentyp Einwohnerdichte	Flächenpreise	Straßentyp	Geschwindigkeit Straßentyp Unfallstellen	-
	Stau	Stau	Stau Tageszeit		Tageszeit		
Aktive Mobilität	-	-	-	-	-	Unfallstellen	-
Legende	konstant		räumlicher Faktor		zeitlicher Faktor		

Die Methodik zur Berechnung der Varianzen basieren auf einer Vorveröffentlichung von Schröder und Kaspi [159] sowie noch nicht veröffentlichten Erweiterungen dieser Methodik. Allgemein besteht die Methodik aus der Berechnung der spezifischen externen Kosten für jede einzelne Netzwerkkante des Münchner Netzwerks. Dabei werden die bestehenden Informationen der einzelnen Kanten aus OpenStreetMaps (OSM) über Koordinatenlage, Straßentyp, Straßename, Maximalgeschwindigkeit mit zusätzlichen Informationen wie zeitlich variierendem Stauungsgrad, Mietspiegel, Einwohnerdichte und Unfallzahl angereichert. Aus den zusätzlichen Informationen lassen sich für jede Kante des Netzwerks abhängig von der Tageszeit variable spezifische externe Kosten berechnen. In dieser Arbeit wurde die zeitliche Varianz auf 5 Tageszeiten (Morgen, Mittag, Nachmittag, Abend, Nacht) limitiert. Der spezifische externe Kostenwert einer Kante ergibt sich aus der Summe der spezifischen Werte der einzelnen Kostenkategorien. In den nächsten Abschnitten werden die Berechnungen der einzelnen Kostenkategorien im Detail erläutert.

Luftverschmutzung und Klima

Die zeitliche und räumliche Varianz für Luftverschmutzungs- und Klimakosten hängt von dem Energieverbrauch des Fahrzeugs und der Abgasreinigung ab. Dieser hat Einfluss auf die externen Kosten sowohl im Betrieb des Fahrzeugs als auch bei der Treibstoff- und Stromproduktion. In dieser Arbeit wird diese Varianz für Elektro-, Benziner und Diesel Autos berechnet. Der Energieverbrauch eines Autos ist in erster Linie abhängig von den verschiedenen Fahrwiderständen während der Fahrt. Unter der Annahme einer stationären Fahrt bestehen die Fahrwiderstände aus Luft- und Rollwiderstand sowie Effizienzverlusten im Antriebsstrang [160]. In Gleichung 3.17 ist die Formel für die Energieverbrauch von Elektro-Fahrzeugen angegeben. Dieser ist abhängig von den fahrzeugspezifischen Parametern Antriebsstrangeffizienz η , Rollwiderstandskoeffizient f^k , Fahrzeugmasse m , Luftwiderstandskoeffizient w^k , Stirnfläche A^k sowie der Variable Fahrzeuggeschwindigkeit v . Die Gleichung 3.17 kann für die Berechnung der spezifischen externen Luftverschmutzungs- und Klimakosten von Elektroautos in Gleichung 3.3 beziehungsweise 3.5 eingesetzt werden. Für die Auswahl der fahrzeugspezifischen Parameter wurden Referenzfahrzeuge für jeden Antriebstyp (Elektro, Benziner und Diesel) ausgewählt. Die Daten dazu sind in Tabelle A.29 im Anhang gesammelt. Die Fahrzeuggeschwindigkeit entspricht der Maximalgeschwindigkeit der Netzwerkkante. Sie wird daher im weiteren nominelle Netzwerkgeschwindigkeit genannt. Darüber ergibt sich eine räumliche Varianz der spezifischen externen Kosten. Jedoch führt Stau auf den Straßen zu einer Änderung des Energieverbrauchs. Dies liegt sowohl an der veränderten Geschwindigkeit als auch an dem vermehrten Beschleunigen und Bremsen. Eine vierfache Fahrzeiterhöhung durch Stau kann dabei zu einer Erhöhung des Energieverbrauchs um 80% führen [63]. Diese Korrelationen zwischen Stauung und Energieverbrauch wurde in einen zeitlich variierenden Faktor umgerechnet und mit dem Energieverbrauch multipliziert. Für die zeitliche Änderung des Stauungsgrads wurde ein beispielhafter Pendelzyklus aus Afandizadeh Zargari et al. [161] entnommen und für Highways sowie primäre und sekundäre Straßen in München angewendet. Zhang et al. [162] haben ein räumliches Clustering des Verkehrs für München vorgenommen, dabei haben sie unterschiedliche Verhältnisse zwischen Auslastung und Fließgeschwindigkeit des Verkehrs in den Clustern festgestellt. Dies stellt eine deutlich genauere räumliche Auflösung des Stauverhaltens dar, was wiederum zu genaueren Ergebnissen führt als die hier verwendeten stündlich und nach Straßentyp aufgelösten Staudaten. Alle für die Arbeit verwendeten Stau-Parameter werden in Tabelle A.30 im Anhang gesammelt.

$$PC^k(v) = \frac{1}{\eta} \cdot \left(f^k \cdot g \cdot m^k + w^k \cdot A^k \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \right) \cdot p_{con_{pc}} \quad (3.17)$$

$$FC^k(v) = FC_{ref} \cdot \frac{PC^k(v)}{PC_{ref}} \quad (3.18)$$

Dabei ist:

$PC^k(v)$	Energieverbrauch des Fahrzeugs k bei Geschwindigkeit v in $\frac{kWh}{100Fkm}$
PC_{ref}	Energieverbrauch des Referenzfahrzeugs in $\frac{kWh}{100Fkm}$
$FC^k(v)$	Kraftstoffverbrauch des Fahrzeugs k bei Geschwindigkeit v in $\frac{l}{100Fkm}$
FC_{ref}	Kraftstoffverbrauch des Referenzfahrzeugs in $\frac{l}{100Fkm}$
$p_{con_{pc}}$	Staufaktor für Energieverbrauch
η	Antriebsstrangeffizienz
f^k	Rollwiderstandskoeffizient für Fahrzeug k
g	Erdbeschleunigung in m/s^2
m^k	Masse von Fahrzeug k in kg
w^k	Luftwiderstandskoeffizient von Fahrzeug k
A^k	Stirnfläche von Fahrzeug k in m^2
ρ	Luftdichte in kg/m^3
v	Nominelle Netzwerkgeschwindigkeit in m/s

Gleichung 3.18 gibt die Berechnung des Kraftstoffverbrauchs für Diesel und Benziner Autos an. Dabei wird der Energieverbrauch aus Gleichung 3.17 mit den durchschnittlichen Verbrauchswerten der Referenzfahrzeuge des jeweiligen Antriebstyps linear skaliert. Die Gleichung 3.18 kann für die Berechnung der spezifischen externen Luftverschmutzungs- und Klimakosten von Diesel und Benziner Autos in Gleichung 3.2 beziehungsweise 3.4 eingesetzt werden.

Lärm

Die Lärmkosten hängen von der Fahrzeuggeschwindigkeit, dem Staulevel, der Einwohnerdichte und dem Straßentyp ab, der Erkenntnis darüber gibt, in welchem Gebiet das Fahrzeug fährt (Wohngbiet, etc.). In früheren Studien wurde eine Korrelation zwischen dem Reifengeräusch und der Fahrzeuggeschwindigkeit festgestellt [156–158]. Die Lärm-Geschwindigkeits-Korrelation (Gleichung 3.21) wurde für niedrigere und höhere Geschwindigkeitsbereiche extrapoliert, um den Geschwindigkeiten auf städtischen Straßen zu entsprechen [156]. Gleichzeitig hat die Europäische Union Kostenwerte für bestimmte Lärmpegel festgelegt [41] (Gleichung 3.20). In dem beide Korrelationen kombiniert werden, werden die spezifischen Lärmkosten in Gleichung 3.19 quantifiziert. Die Gleichung wird ergänzt durch den Stau-Faktor (Tabelle A.30 im Anhang), der durch die Studie von Radam and Heriyatna [163] errechnet wurde. Die Studie gibt einen 5% höheren Lärmpegel bei einem Verkehrszuwachs von 20% an. Eine weitere Ergänzung wird durch den Einbezug der Einwohnerdichte erreicht, welche die räumlichen Varianzen in der Menge der von dem Lärm betroffenen Menschen berücksichtigt. Der Kostenfaktor ergibt sich durch das Verhältnis der Einwohnerdichte des Viertels, in dem sich die Kante befindet, und der

durchschnittlichen Einwohnerdichte von München. Die Daten dafür entstammen einem Immobilien Portal [164] (Tabelle A.31 im Anhang). Als Referenzlärnkosten werden die konstanten spezifischen Lärnkosten aus Kapitel 3.1.2 verwendet.

$$NC(v) = NC_{ref} \cdot NP_{street} \cdot \frac{C(v)}{C_{ref}} \cdot p_{connoise} \cdot \frac{PD}{PD_{av}} \quad (3.19)$$

$$\text{Mit: } C(v) = a \cdot (N(v))^2 - b \cdot N(v) + c \quad (3.20)$$

$$\text{Und: } N(v) = x \cdot v^y \quad (3.21)$$

Dabei ist:

$NC(v)$	Spezifische Lärnkosten des Fahrzeugs mit Geschwindigkeit v in €/Fkm
NC_{ref}	Referenzwert der spezifischen Lärnkosten in €/Fkm
NP_{street}	Parameter für die Lärmwahrnehmung (abhängig von Straßentyp)
$p_{connoise}$	Staufaktor für Lärm
PD	Einwohnerdichte in Einwohner/km ²
PD_{av}	Durchschnittliche Einwohnerdichte in Einwohner/km ² für München
C_{ref}	Referenzwert für gesamte Lärnkosten
$C(v)$	Kosten-Lärm Korrelation aus [41]
$N(v)$	Lärm-Geschwindigkeit Korrelation aus [156]
a	Kostenkorrelationsparameter in €/dB ²
b	Kostenkorrelationsparameter in €/dB
c	Kostenkorrelationsparameter in €
x	Lärmkorrelationsparameter in dB/(km/h) ^y
y	Lärmkorrelationsparameter
v	Nominelle Netzwerkgeschwindigkeit in m/s

Die Korrelation aus Berge et al. [156] ergibt eine Wurzelfunktion zwischen Geschwindigkeit und Reifengeräusch ohne Berücksichtigung der Motorengeräusche für Elektroautos. Für Diesel- und Benziner-Autos werden die Motorengeräusche berücksichtigt, daher unterscheiden sich die Koeffizienten von Gleichung 3.21 zwischen Elektro- und Verbrennerfahrzeugen (Tabelle A.28 im Anhang). In der Abend- und Nachtzeit ist die Wahrnehmung von Lärm deutlich erhöht, daher wird für den Abend +5 dB und für die Nacht +10 dB zu dem Ergebnis von Gleichung 3.21 addiert [165]. Diese Gleichung wird in die quadratische Funktion zwischen Lärm und Kosten eingesetzt (Gleichung 3.20). Die endgültigen spezifischen Lärnkosten der Verbindung werden durch Multiplikation des konstanten Referenzwerts NC_{ref} mit dem Koeffizienten der Lärnkosten $C(v)$ und dem Parameter für die Lärmwahrnehmung abhängig vom Straßentyp (Tabelle A.28 im Anhang) und den restlichen oben beschriebenen Faktoren berechnet.

Flächenverbrauch

Die räumlichen Varianzen in den Flächenverbrauchs-kosten werden in dieser Arbeit durch das Verhältnis der Flächenpreise für Immobilien in verschiedenen Münchner Stadtvierteln dargestellt. Das Verhältnis aus Immobilienpreis pro m² in dem Viertel, in dem sich die Kante des Netzwerks befindet, geteilt durch den durchschnittlichen Immobilienpreis für München wird mit Referenzkostenwert aus 3.1.2 multipliziert, um den räumlichen variablen spezifische Kostenwerten für Flächenverbrauch zu erhalten (Gleichung 3.22). Der Durchschnitt für München wurde nach Flächengröße der Stadtviertel gewichtet berechnet.

$$LUC = LUC_{ref} \cdot \frac{RC_i}{RC_{av}} \quad (3.22)$$

Dabei ist:

LUC	Spezifische Flächenverbrauchs-kosten in €/Fkm
LUC_{ref}	Referenzwert der spezifischen Flächenverbrauchs-kosten in €/Fkm
RC_i	Immobilienpreis für das Stadtviertel der Kante i in €/m ²
RC_{av}	Durchschnittlicher Immobilienpreis für München in €/m ²

Die Daten entstammen wiederum einem Immobilien Portal [166] (Tabelle A.31 im Anhang)

Stau

Über den Einfluss von Stauungslevel auf Zeitverluste aus Afandizadeh Zargari et al. [161] wurden Kostenfaktoren ermittelt (Tabelle A.30 im Anhang). Ein Zeitverlust von 20% führt dabei zum Beispiel zu einem Kostenfaktor von 1,2 (20% Erhöhung der Kosten). Die Faktoren variieren so wie alle Staufaktoren aus Tabelle A.30 für die verschiedenen Tageszeiten und werden mit dem Referenzwert aus Kapitel 3.1.2 multipliziert (Gleichung 3.23).

$$CC = CC_{ref} \cdot p_{contime} \quad (3.23)$$

Dabei ist:

CC	Spezifische Staukosten in €/Fkm
CC_{ref}	Referenzwert der spezifischen Staukosten in €/Fkm
$p_{contime}$	Staufaktor für Stau

Unfälle

Unfallkosten sind die einzigen externen Kosten, die sowohl für Autos als auch aktive Mobilität variabel sind. Die Unfallkosten bei Autos hängen von der Fahrzeuggeschwindigkeit, der Fahrzeugmasse, dem Straßentyp und der Unfallhäufigkeit ab, bei der aktiven Mobilität nur von der Unfallhäufigkeit. Eine Korrelation zwischen der Unfallschwere und der Fahrzeuggeschwindigkeit wurde in mehreren früheren Studien festgestellt [153–155]. In dieser Studie werden alle Arten von Unfällen auf städtischen Straßen berücksichtigt, aber die Korrelation der Unfallschwere wird von Unfällen zwischen Autos und aktiver Mobilität, d. h. Fahrrädern abgeleitet [155] und an alle Arten von Unfällen angepasst. Gleichzeitig wurde bereits in Kapitel 3.1.2 ein linearer Zusammenhang zwischen den Unfallkosten und der kinetischen Energie des Fahrzeugs (einschließlich

Masse und Geschwindigkeit) für den Schadenspotenzialansatz verwendet. Durch Kombination beider Korrelationen wurde Gleichung 3.24 für raumvariable Unfallkosten abgeleitet. Die Genauigkeit dieser Methode wird in Kapitel 5 diskutiert.

$$AC^k(v) = AC_{ref} \cdot AP_{street} \cdot \frac{C_{fat} \cdot p_{fat}(v) + C_{ser} \cdot p_{ser}(v) + C_{min} \cdot p_{min}(v)}{C_{fat} \cdot p_{fat_{ref}} + C_{ser} \cdot p_{ser_{ref}} + C_{min} \cdot p_{min_{ref}}} \cdot \frac{E_{kin}^k(v)}{E_{kin,ref}} \cdot p_{acc} \quad (3.24)$$

$$\text{Mit: } p_{fat}(v) = \alpha \cdot v^2 + \beta \cdot v + \gamma \quad (3.25)$$

$$\text{Und: } p_{ser}(v) = \varepsilon \cdot v + \zeta \quad (3.26)$$

$$\text{Und: } p_{min}(v) = \kappa \cdot v^2 + \lambda \cdot v + \mu \quad (3.27)$$

$$\text{Und: } E_{kin}^k(v) = 0.5 \cdot m^k \cdot v^2 \quad (3.28)$$

Dabei ist:

$AC^k(v)$	Spezifische Unfallkosten für das Fahrzeug k, das mit der Geschwindigkeit v fährt, in €/Fkm
AC_{ref}	Referenzwert für Unfallkosten in €/Fkm
AP_{street}	Parameter für die Unfallwahrscheinlichkeit
p_{acc}	Kostenfaktor für die Berücksichtigung der Unfallhäufigkeit
$p_{fat}(v)$	Wahrscheinlichkeit für einen Todesfall in % bei Fahrzeuggeschwindigkeit v
$p_{ser}(v)$	Wahrscheinlichkeit für eine schwere Verletzung in % bei Fahrzeuggeschwindigkeit v
$p_{min}(v)$	Wahrscheinlichkeit für eine leichte Verletzung in % bei Fahrzeuggeschwindigkeit v
$E_{kin}(v)$	Kinetische Energie in Abhängigkeit von der Fahrzeuggeschwindigkeit v in J
C_{fat}	Kostenwert für einen Todesfall in €
C_{ser}	Kostenwert für eine schwere Verletzung in €
C_{min}	Kostenwert für eine leichte Verletzung in €
$p_{fat_{ref}}$	Referenzwahrscheinlichkeit für einen Todesfall in %
$p_{ser_{ref}}$	Referenzwahrscheinlichkeit für eine schwere Verletzung in %
$p_{min_{ref}}$	Referenzwahrscheinlichkeit für eine leichte Verletzung in %
$E_{kin,ref}$	Referenzwert für die kinetische Energie in J
α	Wahrscheinlichkeits-Korrelationsparameter in %/(km/h) ²
β	Wahrscheinlichkeits-Korrelationsparameter in %/(km/h)
γ	Wahrscheinlichkeits-Korrelationsparameter in %
ε	Wahrscheinlichkeits-Korrelationsparameter in %/(km/h)
ζ	Wahrscheinlichkeits-Korrelationsparameter in %
κ	Wahrscheinlichkeits-Korrelationsparameter in %/(km/h) ²
λ	Wahrscheinlichkeits-Korrelationsparameter in %/(km/h)
μ	Wahrscheinlichkeits-Korrelationsparameter in %

v Nominelle Netzwerkgeschwindigkeit in m/s

Der Kostenfaktor für die Berücksichtigung der Unfallhäufigkeit p_{acc} wurde mit Hilfe der polizeilichen Unfallstatistik ermittelt. Dabei wurde zunächst wiederum ein Unfallhäufigkeitskoeffizient berechnet. Dieser errechnet sich aus der Anzahl Unfälle pro Meter auf der Straße der Kante geteilt durch die durchschnittliche Anzahl Unfälle pro Meter auf allen Unfallstraßen in München. Dabei ist jedoch aufgefallen, dass wenige Kanten viele Unfälle pro Meter aufweisen und viele Kanten wenige Unfälle pro Meter. Die Standardabweichung war hoch und hat deshalb nicht die Möglichkeit geboten, einen Faktor über die durchschnittliche Anzahl von Unfällen pro Meter zu bilden. Deshalb wurden die Straßenabschnitte (Kanten) mit Hilfe des Histogramms der Unfallhäufigkeitskoeffizienten (Abbildung 3.5) in verschiedene Gefährlichkeitsklassen eingeordnet. Die Einteilung und die zugehörigen Kostenfaktoren p_{acc} sind in Tabelle 3.3 abzulesen. Die neuen Kostenfaktoren wurden durch mehrfache Iteration so verteilt, dass die Gesamtsumme der Unfallkosten unverändert bleibt und eine relative Unterscheidung der Unfallkosten auf räumlicher Ebene sichtbar wird.

Tabelle 3.3: Einordnung der Unfallhäufigkeitskoeffizienten und Kostenfaktoren in Gefährlichkeitsstufen

Gefährlichkeitsstufe	Unfallhäufigkeitskoeffizient	p_{acc}
Extrem gefährlich	> 10	2
Sehr gefährlich	< 10 & > 2,5	1,5
Gefährlich	< 2,5 & > 1	1,25
Nicht gefährlich	< 1 & > 0,25	1
Sicher	< 0,25 & > 0,1	0,9
Sehr sicher	< 0,1	0,8
Kein Unfall	0	0,7

Damit wurde die gesamte Methodik zur Kostenberechnung und -bilanzierung dieser Arbeit vorgestellt. Im nächsten Kapitel wird die Methodik zur Simulation der Bepreisungsszenarien im Detail erläutert.

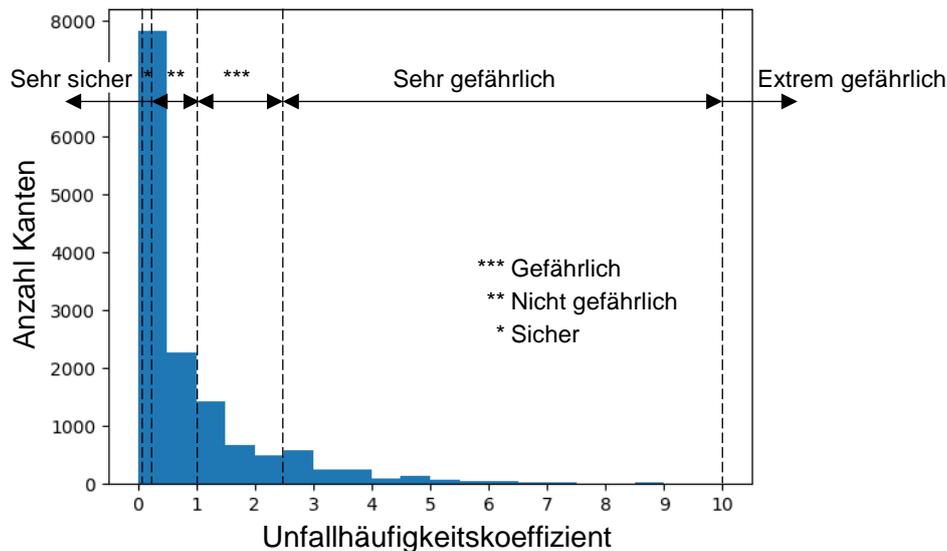


Abbildung 3.5: Histogramm zum Unfallhäufigkeitskoeffizienten und Einteilung der Gefährlichkeitsstufen von Straßenabschnitten (Kanten)

3.2 Simulation der Bepreisung

In dem folgenden Kapitel wird erörtert, mit welcher Methodik die Auswirkungen einer vollkostenbasierten Bepreisung auf die Verkehrsmittelwahl der Bevölkerung ermittelt werden kann. Dazu wird zunächst der generelle Ablauf der Simulation mit allen vor- und nachgelagerten Prozessen vorgestellt. Danach wird vertieft das verwendete Verkehrsmittelwahlmodell der Simulation erklärt. Am Ende findet die Auswahl der für die Ergebnisse verwendeten Bepreisungsszenarien statt, weil die Szenarien große Abhängigkeiten von den Randbedingungen der Simulation aufweisen.

3.2.1 Ablauf der Simulation

Abbildung 3.6 zeigt schematisch den Ablauf der Simulation. Zweck der Simulation ist es, den Einfluss der vollkostenbasierten Bepreisung auf den Modal Split zu bestimmen. Am Ende des Ablaufs steht dafür das Verkehrsmittelwahlmodell. Für die vollkostenbasierte Bepreisung der Wege muss jedoch zunächst ermittelt werden, wie hoch die internen und externen Kosten (Vollkosten) der einzelnen Wege für jedes Verkehrsmittel sind. Dazu werden zwei Informationen benötigt. Einerseits werden alle Wege im urbanen Raum Münchens mit Zeitstempel und Start- und Endkoordinaten verwendet. Andererseits werden die internen und externen Kosten für jedes hier berücksichtigte Verkehrsmittel im Münchner Netzwerk benötigt. Die Berechnung zu den Kosten wurde in Kapitel 3.1 ausführlich erläutert. Das Ergebnis daraus sind Vollkosten Netzwerke, die in Form von Heat Maps die Höhe der Kosten jeder einzelnen Kante des Netzwerks anzeigen. Diese Vollkosten Netzwerke werden für fünf verschiedenen Tageszeiten und jedes Verkehrsmittel angefertigt, das räumliche Variationen der Vollkosten aufweist (Kapitel 4.1).

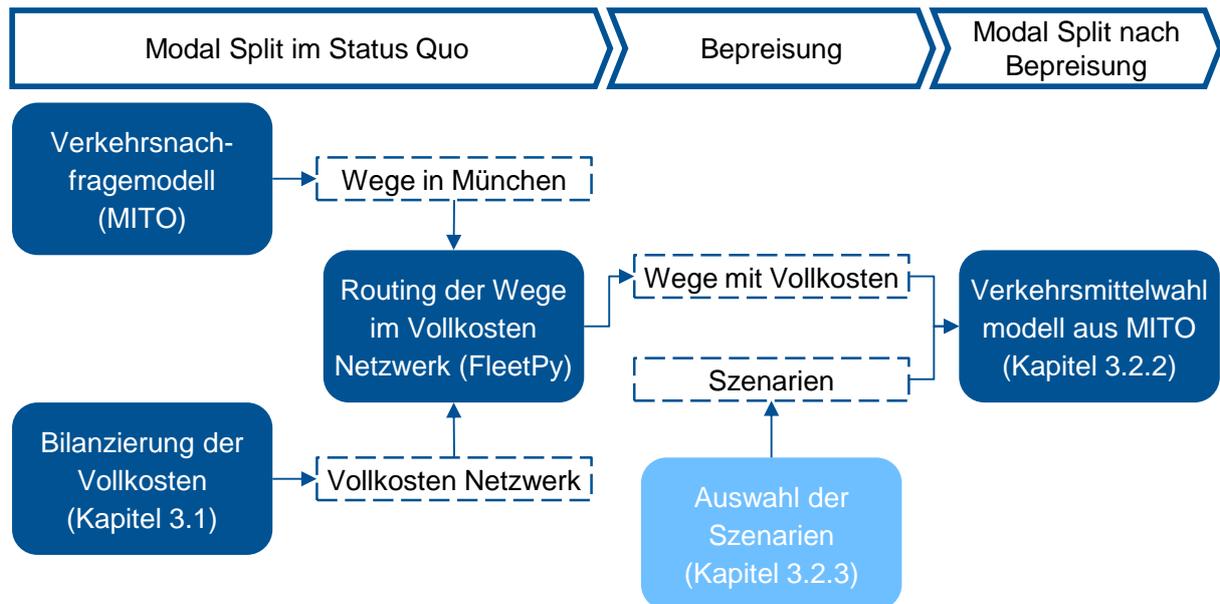


Abbildung 3.6: Schematische Darstellung des Ablaufs der Simulation zur Bestimmung des Modal Splits nach Bepreisung

MITO

Für das aktuelle Mobilitätsverhalten der Bevölkerung in München wird ein Verkehrsnachfragemodell benötigt. Dieses kann auf Basis einer synthetischen Bevölkerung Wege für jede einzelne Person auf Tages- oder Wochenbasis berechnen. Grundlage für die Berechnung der synthetischen Bevölkerung und des Mobilitätsverhaltens sind Daten aus dem deutschen Zensus [167] und aus den Wegetagebüchern der Studie „Mobilität in Deutschland“ für den Raum München [168]. Die Ergebnisse aus dem Verkehrsnachfragemodell Microscopic Transport Orchestrator (MITO) [99] werden in dieser Arbeit genutzt. Das Modell gibt die Verkehrsnachfrage für die gesamte Metropolregion München aus. In dieser Arbeit werden nur die Wege innerhalb des urbanen Raums von München (Abbildung 3.7) berücksichtigt. Wege, die den urbanen Raum Münchens verlassen, sind nicht Teil des Betrachtungsrahmens dieser Arbeit, weil für den Teil des Weges, der außerhalb des urbanen Raums liegt, keine Kostenwerte vorliegen.

MITO ist eine Form der Mikrosimulation, welche die Verkehrsnachfrage auf Haushaltsebene mittels einer synthetischen Bevölkerung generiert, die wiederum durch Anwendung des Flächennutzungsmodells Simple Integrated Land-Use Orchestrator (SILO) [169] erschaffen wird. Die Ableitung der Verkehrsnachfrage unterliegt einem systematischen Prozess, der in fünf aufeinanderfolgenden Schritten erfolgt [95, 170, 171]:

1. Initial erfolgt die mikroskopische Auswahl der Anzahl der Fahrten für einen gegebenen Haushalt mittels des Monte-Carlo-Samplings, eine Methodologie, die in der Fachliteratur von Moeckel et al. [172] erörtert wurde.
2. Die Schätzung der Reisezeitbudgets pro Haushalt basiert auf diversen Haushaltsmerkmalen, darunter die Anzahl der Reisen nach Zweck, Haushaltsgröße, Einkommen und weiteren reisebezogenen Faktoren. Dieser Schätzansatz wurde von Moreno und Moeckel [173] erarbeitet.
3. Im Rahmen der Zielwahl werden Arbeits- und Schulstandorte in der synthetischen Bevölkerung festgelegt, während alle anderen Ziele durch eine logistische Regression ausgewählt werden, welches das verfügbare Reisezeitbudget berücksichtigt.

4. Das Verkehrsmittelwahlmodell (vgl. Kapitel 3.2.2) determiniert das bevorzugte Verkehrsmittel anhand von Angebotscharakteristika, Reisecharakteristika sowie individuellen Attributen des Reisenden.
5. Die Bestimmung der bevorzugten Ankunftszeit für Arbeits- und Bildungswege basiert auf einer Verteilung der Ankunftszeiten, wie sie durch umfassende Umfragen erhoben wurde. Bei nicht zwingend notwendigen Fahrten wird stattdessen die präferierte Abfahrtszeit ermittelt.

Die Resultate von MITO manifestieren sich in einer detaillierten Liste individueller Fahrten, welche die Reisenachfrage in einem spezifischen Untersuchungsgebiet adäquat beschreiben. Die mikroskopische Natur von MITO ermöglicht es, individuelle Eigenschaften wie Autobesitz, Zugang zu Carsharing, Behinderungen, Einkommen oder die Präsenz von Smartphones als Einflussfaktoren sämtlicher Reiseentscheidungen zu berücksichtigen.

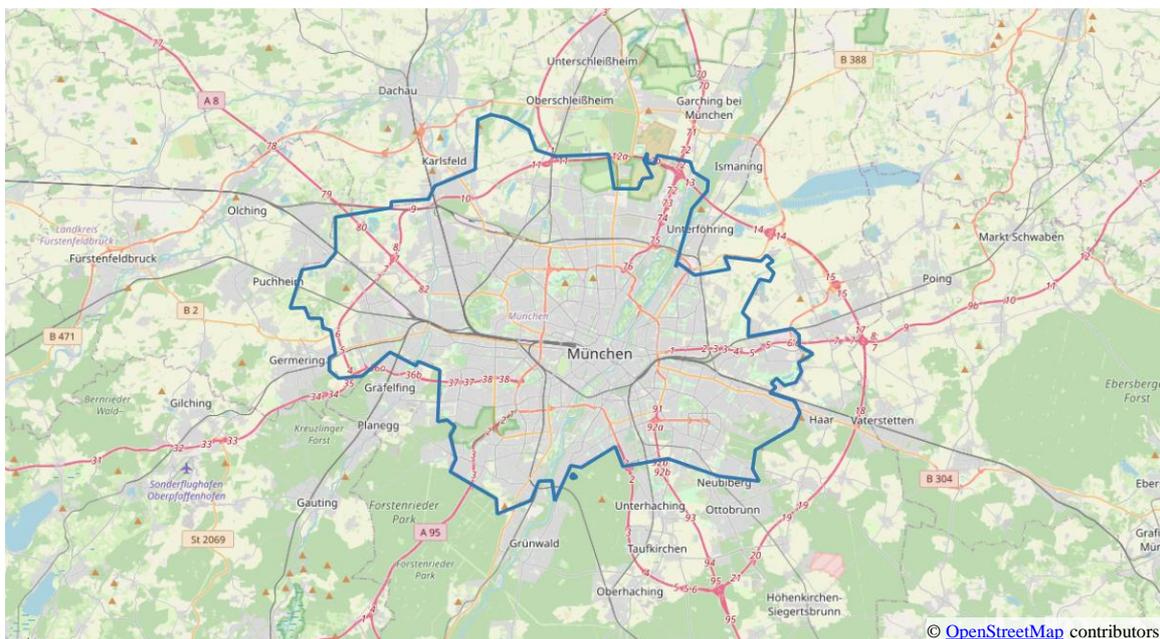


Abbildung 3.7: Betrachtungsraum, urbanes München, für die Simulation der Bepreisung (umrandet in blau)

Routing mit FleetPy

Sobald die Verkehrsnachfrage, die die Start- und Endpositionen sowie -zeiten für alle Bewohner Münchens beinhalten, mit MITO ermittelt wurde, können diese Informationen genutzt werden, um die Vollkosten für jeden einzelnen Weg und jedes Verkehrsmittel zu berechnen. Das Vollkostennetzwerk (Methodik in Kapitel 3.1 oder Ergebnisse in Kapitel 4.1) beinhaltet für jede Kante des Netzwerks sowohl interne als auch externe Kosten jedes Verkehrsmittels, sodass die Summe der Kantenkostenwerte einer Route die Gesamtkosten dieses Weges ergeben. Um zu ermitteln welche Route und somit welche Kanten für jedes Start-Ziel-Paar gewählt wird, muss ein Routing durchgeführt werden.

Die Funktionsweise des Routings stammt aus der Vorveröffentlichung von Schröder und Kaspri [159] und wurde ebenfalls als Open-Source-Software veröffentlicht [174]. Grundsätzlich wurde hier der Routing-Algorithmus des FleetPy-Modells [175] genutzt. Dieser besteht aus einer Standard-Routing-Engine, die die Routen eines Fahrzeugs (Agenten) nach verschiedenen Zielen wie Zeit oder Entfernung optimieren kann. Hierfür wird ein bekannter bidirektionaler Dijkstra-Algorithmus verwendet [176]. Neben der zeitoptimierten Route aus FleetPy, wurde die

Kostenfunktion der Routing-Engine dahingehend geändert, dass externe Kosten einbezogen werden. Das heißt, der Dijkstra-Algorithmus wurde auf ein Netz angewandt, das interne und externe Kosten kombiniert, statt auf die üblichen Netze, die Reisekosten oder Reisezeiten darstellen [159]. Insgesamt erhält die Methodik damit zwei Routing-Optimierungsziele: Zeit und externe Kosten. In diesem Fall wurden nur die externen Kosten in dem Routing berücksichtigt, weil die spezifischen internen Kosten innerhalb dieser Arbeit räumlich konstant sind und damit keinen Einfluss auf das Routing haben. Der Einfluss der verschiedenen Routingarten ist in den Ergebnissen aus Kapitel 4.2 zu erkennen.

Nachdem das Routing für beide Methoden vollzogen wurde, ergibt sich eine Liste mit ca. 1,42 Millionen Wegen mit den internen und externen Kosten jedes einzelnen Verkehrsmittels. Diese Liste ist ein wichtiger Input für das Verkehrsmittelwahlmodell, das auf Basis der internen und externen Kosten der Verkehrsmittel auf jedem einzelnen Weg die Bepreisung implementiert. Die genaue Funktionsweise wird in Kapitel 3.2.2 erläutert.

Aufbereitung der Ergebnisse und Visualisierungen

Als Output des Verkehrsmittelwahlmodells ergibt sich eine Liste mit allen Wegen und dem gewählten Verkehrsmittel beim jeweiligen Bepreisungsszenario. Die Auswahl der Szenarien findet in Kapitel 3.2.3 statt. Mit der neuen Liste lassen sich die Ergebnisse auswerten und visualisieren. Für die Ergebnisse sind fünf verschiedene Auswertungsgrößen geplant:

- *Modal Split Änderung der Szenarien:* Hier werden die gewählten Verkehrsmittel je nach Szenario aufsummiert und die Anteile an der Gesamtmenge der Wege verglichen.
- *Summe der internen, externen und Vollkosten für einzelne Szenarien:* Hier werden die Wegekostenwerte für das Verkehrsmittel, das im jeweiligen Szenario gewählt wurde, aufsummiert. Die Kostensummen der einzelnen Verkehrsmittel werden im Anschluss miteinander verglichen.
- *Summe der Fahrtzeit für einzelne Szenarien:* Analog zu den Kosten, werden hier die Fahrdauern der Verkehrsmittel aufsummiert, die im jeweiligen Szenario gewählt wurden.
- *Änderung der räumlichen Verteilung der externen Kosten:* Hierbei werden für jede Kanten-ID des Netzwerks die Anzahl der Überquerungen für jedes einzelne Verkehrsmittel ermittelt (in den Ergebnissen in Kapitel 4.2 kumuliert für alle Antriebsformen des Autos gezeigt). Mit Hilfe des Kostenwerts des jeweiligen Verkehrsmittels lässt sich die Gesamtsumme der Kosten ermitteln, die auf der jeweiligen Kante des Netzwerks verursacht wurden. Dies kann für die Ergebnisse von jedem Szenario und jeder Routing Methode durchgeführt werden. Die Kostenwerte der Kanten werden in Form einer Heat-Map dargestellt und die Szenarien werden so miteinander verglichen.
- *Aufteilung der Autofahrer nach ökonomischen Status der Bevölkerung:* Zu jedem Weg in der Ergebnisliste des Verkehrsmittelwahlmodells sind Personen und deren sozio-demografischen Eigenschaften zugeordnet. Dazu gehört auch die Information über den ökonomischen Status der Person, der Einkommen, Haushaltsgröße und Anzahl Kinder berücksichtigt. Durch das Filtern nach Autofahrten lassen sich somit die ökonomischen Status aufsummieren und für die verschiedenen Szenarien miteinander vergleichen.

3.2.2 Verkehrsmittelwahlmodell

Die grundsätzliche Funktionsweise eines Verkehrsmittelwahlmodells wurde bereits im Stand der Technik (Kapitel 2.4.2) erklärt. Hier wird Bezug auf die Rolle des Modells im Gesamtsimulationsablauf und die Eigenschaften und Abänderungen des hier verwendeten Modells genommen.

Die Aufgabe des Verkehrsmittelwahlmodells im Gesamtablauf der Simulation ist es, allen Wegen je nach Bepreisungsszenario das ausgewählte Verkehrsmittel zuzuordnen. Die Auswahl des Verkehrsmittels ist dabei nicht nur abhängig von der Bepreisung, sondern auch von der sich bewegenden Person und vielen weiteren Eigenschaften des Weges und des Verkehrsmittels, die zusammenfassend Nutzen (*eng. utilities*) genannt werden. Im Folgenden wird die Berechnung der Verkehrsmittelwahl im Detail erläutert.

Zu Beginn werden die generalisierten Kosten $GC_{i,t,m}$ in Minuten für jedes Verkehrsmittel i bei jedem Weg t berechnet (Gleichung 3.29). Diese sind abhängig von der Fahrzeit $TT_{i,t}$, der Fahrdistanz $TD_{i,t}$, den Standardkosten SC_i , der Bepreisung $P_{i,t}$ und dem Wert der Zeit VOT_m für die jeweilige Einkommensgruppe m der sich bewegenden Person. Dabei sind die Standardkosten die kalibrierten internen Kosten des jeweiligen Verkehrsmittels, die den Status Quo des Modal Splits einstellen. Für die Bepreisung kommen je nach Szenario die internen und / oder externen Kosten des jeweiligen Verkehrsmittels auf dem Weg ins Spiel, die über das Routing (Kapitel 3.2.1) berechnet wurden. Bei der Sensitivitätsanalysen werden keine absoluten Wegekosten, sondern spezifische Kosten in €/Pkm bepreist, sodass diese analog zu den Standardkosten mit der Fahrstrecke multipliziert werden müssen. Die verschiedenen Bepreisungsszenarien sowie das Vorgehen bei der Sensitivitätsanalyse werden im nächsten Kapitel 3.2.3 erklärt.

$$GC_{i,t,m} = TT_{i,t} + \frac{(TD_{i,t} \cdot SC_i + P_{i,t})}{VOT_m} \quad (3.29)$$

Nachdem die generalisierten Kosten berechnet wurden, werden diese zur Berechnung des Nutzens jedes einzelnen Verkehrsmittels herangezogen. Die Berechnung des Nutzens erfolgt in zwei Schritten. Zunächst werden alle Koeffizienten der modalen Attribute aufsummiert. Die Koeffizienten der Attribute unterscheiden sich je nach Reisezweck und wurden über Biogeme, ein open source Tool für Maximum-Likelihood-Schätzungen von diskreten Wahlmodellen [177], bestimmt. Tabelle 3.4 zeigt die Attribute und Reisezwecke, die für die Berechnung des Nutzens berücksichtigt sind. Alle verwendeten Attribut-Koeffizienten des jeweiligen Reisezwecks sowie Wert der Zeit Koeffizienten sind bei den Urhebern des MITO Modells von der Professur für Verkehrsverhalten der TU München anzufragen und können hier nicht veröffentlicht werden. Nachdem alle Koeffizienten $\sum C_A$ aufsummiert sind, werden diese mit den generalisierten Kosten $GC_{i,t}$ und weiteren Kalibrierungsparametern C_T , C_C und α verrechnet (Gleichung 3.30), um den Gesamtnutzen $U_{i,t}$ des Verkehrsmittels i auf dem Weg t zu erhalten [99].

$$U_{i,t} = \sum C_A + C_T \cdot e^{\alpha \cdot GC_{i,t}} + C_C \quad (3.30)$$

Nachdem der Nutzen berechnet wurde, wird die Wahrscheinlichkeit für die Auswahl der Verkehrsmittel bestimmt. Diese findet nach dem Verfahren der multinomialen logistischen Regression statt. Dabei ist die Eintrittswahrscheinlichkeit $Pr_t(i)$ des Weges t für jedes Verkehrsmittel i und allen anderen Verkehrsmitteln j nach Koppelman und Bhat [178] durch Gleichung 3.31 beschrieben.

$$\Pr_t(i) = \frac{e^{U_{i,t}}}{\sum_{j=1}^J e^{U_{j,t}}} \quad (3.31)$$

Da es sich hierbei um eine verschachtelte logistische Regression handelt, wird der Nutzen durch weitere Verschachtelungskoeffizienten ergänzt.

Tabelle 3.4: Übersicht der berücksichtigten Reisezwecke und Attribute zur Berechnung des Nutzens [179]

Reisezwecke	Personenattribute	Haushaltattribute	Wegeattribute
HBW: Home-Based-Work	Alter	Haushaltgröße	Generalisierte Kosten
HBE: Home-Based-Education	Geschlecht	Anzahl Autos	Weglänge
HBS: Home-Based-Shop	Führerscheinbesitz	Anzahl Kinder	
HBO: Home-Based-Other		Anzahl Arbeiter	
NHBW: Non-Home-Based-Work		Distanz zur nächsten ÖPNV-Station	
NHBO: Non-Home-Based-Other		Regionstyp	

Im letzten Schritt wird die Wahl des genutzten Verkehrsmittels aus den Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Verkehrsmittel durchgeführt. Dabei kommt eine Zufallskomponente hinzu, indem eine zufällige Zahl zwischen 0 und 1 bestimmt wird. Alle Wahrscheinlichkeiten der Verkehrsmittel werden in einer bestimmten Reihenfolge aufsummiert. Das Verkehrsmittel des Summanden, bei dem der Zufallswert überschritten ist, ist am Ende das ausgewählte Verkehrsmittel [99].

Die Verkehrsmittel im Verkehrsmittelwahlmodell aus MITO wurden um die Autoantriebstypen Elektro, Benzin und Diesel erweitert. Dies wurde umgesetzt, indem den Haushalten der synthetischen Bevölkerung im Modell jeweils zufällig ein Antriebstyp zugeordnet wurde, sodass die Gesamtverteilung den Daten aus dem Jahr 2020 entspricht (Tabelle A.6). Für die Wahl des Autos wurden dann je nach Antriebstyp des Haushaltes die Kosten für Elektro, Benzin oder Diesel Auto in der Berechnung der generalisierten Kosten (Gleichung 3.29) berücksichtigt.

3.2.3 Auswahl der Szenarien

In diesem Kapitel wird das systematische Vorgehen bei der Auswahl der Bepreisungsszenarien vorgestellt. Dabei wurde zunächst ein morphologischer Kasten entwickelt, der einen großen Raum für die Menge an verschiedenen Szenarien aufspannt. Im Anschluss wird dieser Raum deutlich durch die Randbedingungen der Simulation verkleinert. Die Methodik hinter der Szenarienauswahl basiert auf der Studienarbeit von Frenzer [180] und weiteren Entwicklungen im Zuge dieser Arbeit.

Den Kriterien zur Entwicklung von Szenarien (Kapitel 2.4.3, Tabelle 2.5) entsprechend wurden hier die Szenarien explorativ, deduktiv, präskriptiv und intuitiv entwickelt:

- Explorativ, weil der Modal Split aus der Gegenwart genutzt wird

- Deduktiv, weil mit dem Framework des Polluter-Pays-Prinzip gearbeitet wird
- Präskriptiv, weil hier geeignete Mittel zur Internalisierung von Vollkosten gesucht werden
- Intuitiv, weil ein morphologischer Kasten systematisch entwickelt und auf logische Konsistenz geprüft wurde

Um alle denkbaren Szenarien abzudecken, wurden Eigenschaften herausgestellt, die diese Szenarien oder Bepreisungsmethoden beschreiben. Dabei wurden verschiedene Bepreisungen in der Literatur und in Realanwendung untersucht und festgestellt, dass sich diese Bepreisungsmethoden hauptsächlich in vier Charakteristika unterscheiden:

- Bilanzgrundlage: Wie wird bepreist?
- Dynamik: Wann und wo wird bepreist?
- Verkehrsmittel: Was oder welches Verkehrsmittel wird bepreist?
- Strategie: Wie hoch oder mit wie viel wird bepreist?

In Tabelle 3.5 wurden diesen Eigenschaften mögliche Attribute zugefügt, sodass sich daraus ein morphologischer Kasten entwickelt, mit dem sich durch Kombination von Attributen theoretisch bis zu 132.000 verschiedene Szenarien zusammenstellen lassen. Dabei ist die Auswahl mehrerer Attribute einer Kategorie bei „Dynamik“ und „Verkehrsmittel“ möglich.

Tabelle 3.5: Morphologischer Kasten für die Szenarienauswahl (ausgewählte Attribute grau hinterlegt)

Bilanzgrundlage	Dynamik	Verkehrsmittel	Strategie
Pro Personenkilometer	Zeitlich konstant	Elektroauto	Internalisierung der externen Kosten
Pro Fahrzeugkilometer	Zeitlich veränderlich (feste Uhrzeiten)	Verbrenner Auto	Realisierung der internen Kosten (nur in Simulation)
Pro Zeiteinheit	Räumlich konstant	ÖPNV	Vielfaches der internen oder externen Kosten
Pro Weg	Räumlich veränderlich (feste Orte)	Sharing Services	Freie Werte
Pro Abo	Dynamisch nach Auslastung	On-Demand Services	Regelung über Auslastung
Pro Zone		Fahrrad	
		Fußgänger	

Die Attribute für die Kategorie „Bilanzgrundlage“ stammen aus in der Realität umgesetzten Beispielen (Kapitel 2.3.3). In der Kategorie „Dynamik“ bedeutet zeitlich oder räumlich konstant, dass in dem gesamten Bepreisungsraum zu jeder Zeit der gleiche Preis vorliegt. Zeitlich und räumlich veränderlich drückt aus, dass die Preise an unterschiedlichen Orten und zu verschiedenen Zeitpunkten variieren. Die Orte und Zeitpunkte bleiben dabei allerdings gleich. Bei der dynamischen

Bepreisung verändern sich die Orte und Zeitpunkte der Bepreisung je nach Auslastung des Verkehrs. Mit der Kategorie „Verkehrsmittel“ können unterschiedliche Verkehrsmittelkombinationen je nach Szenario-Ziel bepreist werden. Die Höhe der Bepreisung kann entweder dynamisch über die Auslastung der Verkehrswege ausgewählt werden oder feste Preise in Abhängigkeit der internen oder externen Kosten werden internalisiert. Eine dritte Möglichkeit besteht durch die Wahl von frei ausgewählten Preisen.

Das Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung der Einführung einer vollkostenbasierten Bepreisung, daher richtet sich die Auswahl der Szenarien stark nach der Methodik der Kostenberechnung. Die Kosten wurden in spezifischer Form in €/Pkm berechnet, um die beste Vergleichbarkeit zwischen den Verkehrsmitteln herzustellen. Aus diesem Grund fokussieren sich die Szenarien auf eine Bepreisung pro Personenkilometer. Dieselbe Argumentation gilt für die Auswahl der Bepreisungsorte und -zeitpunkte. In den Szenarien wird eine Mischung aus zeitlich-räumlich konstanter und veränderlicher Bepreisung vorgenommen, je nach Datenlage der Kostenwerte. Für interne Kosten ist die theoretische Bepreisung (Realisierung) beispielsweise zeitlich-räumlich konstant. Die Bepreisung der externen Kosten für Autos ist hingegen zeitlich und räumlich veränderlich. Das Verkehrsmittelwahlmodell aus MITO [99] begrenzt die Auswahl der Verkehrsmittel auf Autos, ÖPNV (Bus, Tram / U-Bahn, S-Bahn), Fahrräder und Fußgänger. In der Höhe der Bepreisung liegt der Fokus wiederum auf der Berücksichtigung der internen und externen Kosten. Eine Bepreisung von externen Kosten wird Internalisierung genannt, weil dort die Verkehrsmittelnutzer mit den externen Kosten konfrontiert sind, die sie sonst nicht zahlen müssen. Eine Bepreisung von internen Kosten wird in dieser Arbeit Realisierung genannt, weil im bestehenden Verkehrsmittelwahlmodell für den Status Quo nur die laufenden Energiekosten für Treibstoff oder Strom beim Auto berücksichtigt sind. Diese machen jedoch beim Auto nur einen Bruchteil der gesamten internen Kosten aus (Kapitel 4.1), sodass eine theoretische Bepreisung der gesamten internen Kosten im Modell einer Realisierung der gesamten internen Kosten in der Realität gleichgesetzt werden kann. Für die Sensitivitätsanalyse werden freie Werte bepreist. In Tabelle 3.5 sind die ausgewählten Attribute grau hinterlegt.

Durch Berücksichtigung der oben genannten Auswahlkriterien wurden 5 Szenarien für die Simulation und Ergebniserzeugung ausgewählt:

- **Szenario 1:** Internalisierung der externen Kosten (ohne Gesundheitsnutzen)
- **Szenario 2:** Internalisierung der externen Kosten außer bei aktiver Mobilität (mit Gesundheitsnutzen)
- **Szenario 3:** Internalisierung der externen Kosten nur bei Autos
- **Szenario 4:** Realisierung der internen Kosten (nur bei privaten VKM)
- **Szenario 5:** Internalisierung und Realisierung der Vollkosten

In Szenario 1 bis 3 werden die Verkehrsmittelkombinationen variiert und in Szenario 4 und 5 die Höhe der Bepreisung. Für die Simulation wurden lediglich 5 verschiedene Szenarien ausgewählt, um den zeitlichen Rechenaufwand zu minimieren. Die Ergebnisse dazu werden in Kapitel 4.2 analysiert.

In der Sensitivitätsanalyse (Kapitel 4.3) soll der Einfluss der Eingangsvariable Autopreis in €/Pkm auf die Ausgangsvariable Modal Split untersucht werden, um die Plausibilität und Robustheit der Simulation zu testen. Dabei wird der Preis von 0 bis 5 €/Pkm variiert. Diese Variation findet zwischen 1 und 5 €/Pkm inkrementell in 1 €/Pkm Schritten statt. Zwischen 0 und 1 €/Pkm werden zusätzlich die Schritte 0,25 und 0,5 €/Pkm untersucht. Jeder dieser Preisschritte stellt ein

eigenes Szenario dar, das den gleichen Simulationsablauf wie oben beschrieben durchläuft. Die Ergebnisse dazu werden in Kapitel 4.3 analysiert.

4 Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Vollkostenbilanzierung und Bepreisungsszenarien vorgestellt und erläutert. Zunächst werden dabei die internen und externen Kosten mit Hilfe der in Kapitel 3.1 beschriebenen Methode für den urbanen Raum München bilanziert. Im Gegensatz zu den internen Kosten werden die externen Kosten mit zeit-räumlicher Variabilität auf einem Netzwerkgraph für München dargestellt. Anschließend werden die Ergebnisse der Bepreisungsszenarien durch Darstellung der Änderung des Modal Splits und gesamten Vollkosten erläutert. Die durch die Verkehrsmittelwahl der Menschen entstandenen externen Kosten in München können ebenfalls mit zeit-räumlicher Variabilität in einem Netzwerkgraph dargestellt werden. Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Bepreisungsszenarien werden dabei hervorgehoben.

4.1 Bilanzierung der Vollkosten

Die Ergebnisse zu den Vollkosten setzen sich aus vier Teilen zusammen:

- Durchschnittliche spezifische **interne** Kosten für verschiedene Verkehrsmittel in €/Pkm und Summe der internen Gesamtkosten in € für ein Jahr im urbanen Raum München
- Durchschnittliche spezifische **externe** Kosten für verschiedene Verkehrsmittel in €/Pkm und Summe der externen Gesamtkosten in € für ein Jahr im urbanen Raum München
- Summe aus internen und externen Kosten (**Vollkosten**)
- **Zeit-räumliche Verteilung** der spezifischen externen Kosten in €/Pkm im urbanen Raum München

Grundlage zur Berechnung der Gesamtkosten in € ist die Verkehrsleistung der berücksichtigten Verkehrsmittel in einem Jahr für den urbanen Raum München. Diese lassen sich in Tabelle A.6 im Anhang ablesen. Die Bilanzierung der Kosten beschränkt sich lediglich auf den Personentransport, also der Verkehr, auf den die Bürgerinnen und Bürger Einfluss bei ihrer Verkehrsmittelwahl haben.

Interne Kosten

Die Ergebnisse zu den internen Kosten basieren auf der Studienarbeit von Rausch [113] und wurden zum Teil bereits in einer Studie zusammen mit König et al. [112] veröffentlicht. Abbildung 4.1 zeigt die spezifischen internen Kosten für die berücksichtigten Verkehrsmittel. Für die Berechnung der hier gezeigten Ergebnisse wurde eine Haltedauer von 5 Jahren bei privaten Verkehrsmitteln angenommen und die jährliche Fahrleistung wurde auf 15.000 km für Autos, Motorrad und ÖPNV gesetzt. Für alle weiteren Verkehrsmittel wie zum Beispiel Fahrrad liegt dieser Wert nur bei 2.000 km pro Jahr. Die Berechnungsmethodik ermöglicht eine einfache Anpassung der Haltedauer und jährlichen Fahrleistung. Daten zu den TCO- und Service-Kosten, sowie der durchschnittlichen Fahrgeschwindigkeit wurden König et al. [112] entnommen. Die

verwendeten Energiekosten stammen aus dem Jahr 2020 und wurden in Rausch [113] festgehalten. Für den durchschnittlichen Besetzungsgrad wurde Schröder et al. [127] zur Hilfe gezogen. Alle verwendeten Daten für die Berechnung der internen Kosten sind in den Tabellen A.1 bis A.4 im Anhang zu finden.

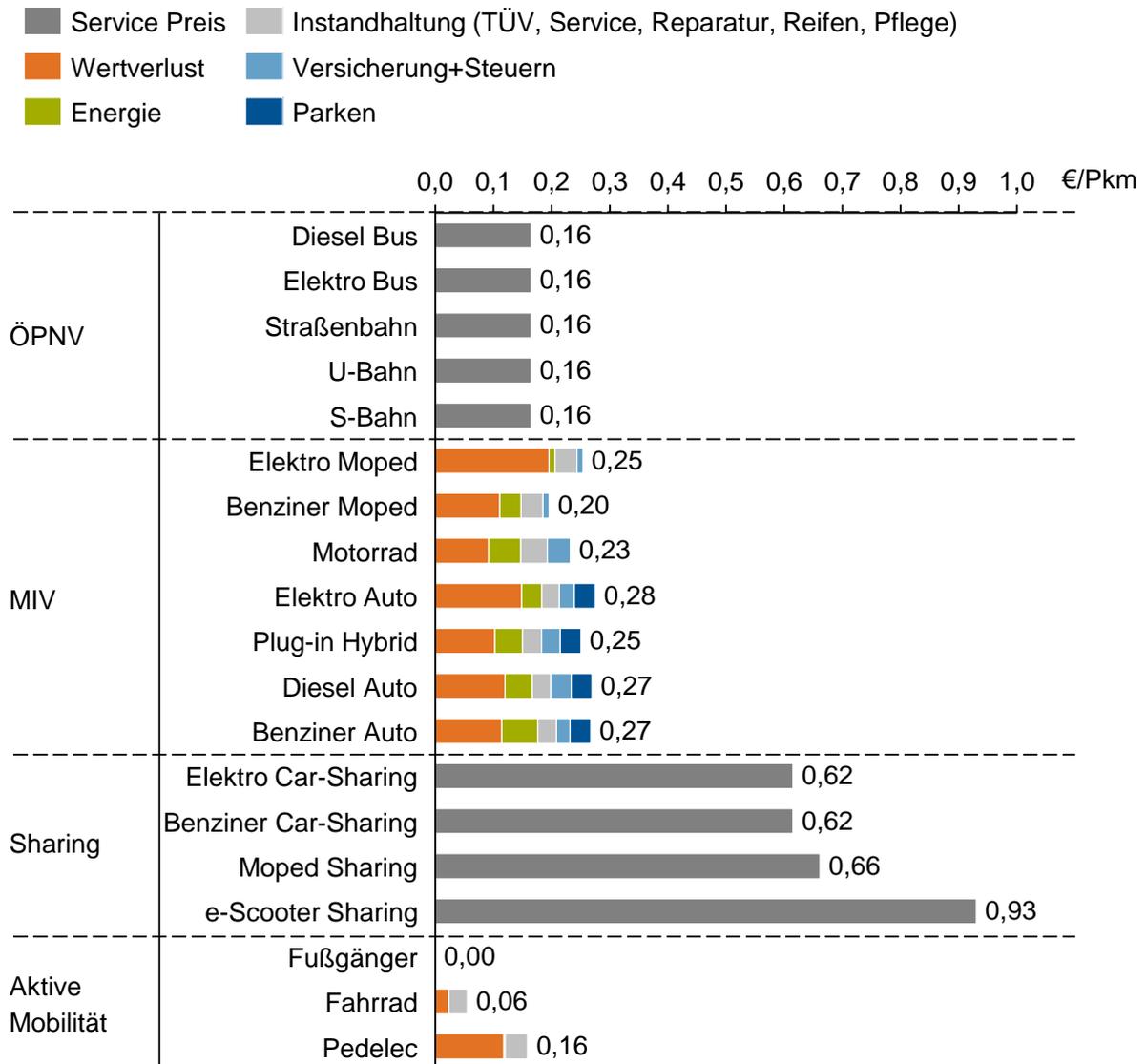


Abbildung 4.1: Durchschnittliche spezifische interne Kosten für den urbanen Raum München

Im Vergleich der Verkehrsmittel zeigt sich, dass die Sharing Services die höchsten internen Kosten besitzen, wohingegen die internen Kosten der aktiven Mobilität und des ÖPNV unter den gegebenen Bedingungen am geringsten sind. Bei den privat besessenen Verkehrsmitteln des motorisierten Individualverkehrs ist die Kostenspannbreite mit 20 bis 28 cent pro Pkm nicht groß. Der größte Anteil der TCO ist der Wertverlust, der die jährliche Differenz zwischen Anschaffungspreis und Wiederverkaufswert darstellt.

Wenn die in Tabelle A.6 gesammelten jährlichen Verkehrsleistungen der Verkehrsmittel in Pkm für München mit den durchschnittlichen spezifischen internen Kosten in €/Pkm verrechnet werden, entsteht Abbildung 4.2. Die Summe aller internen Kosten für München in einem Jahr liegt bei ca. 3,8 Mrd €.

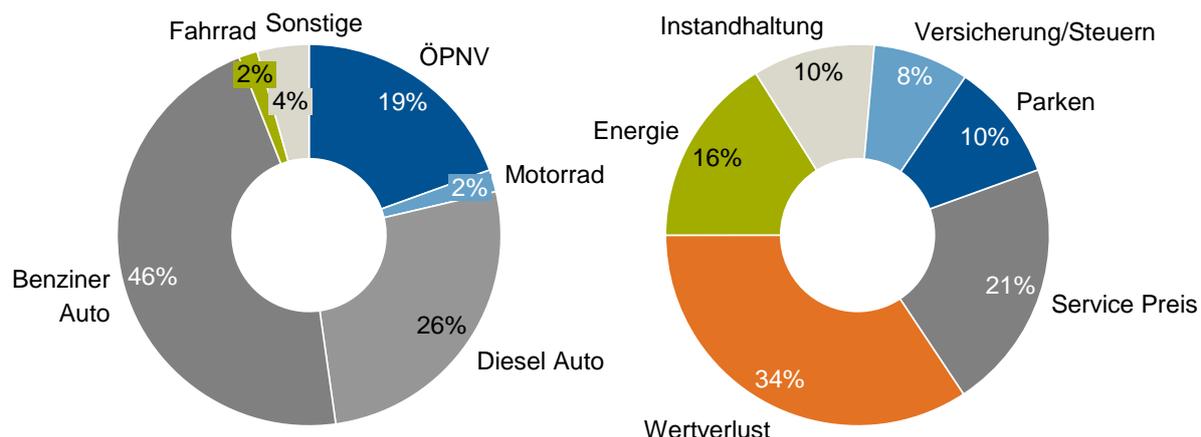


Abbildung 4.2: Aufteilung der Summe aller internen Kosten für München nach Verkehrsmittel (links) und Kostenkategorie (rechts)

Abbildung 4.2 zeigt, dass knapp dreiviertel aller internen Kosten in München durch Diesel und Benziner Autos entstehen. Dabei machen Wertverlust und Energiekosten den größten Anteil der internen Kosten aus. Der hohe Anteil der Service Preise ist auf den ÖPNV und die Sharing Services zurückzuführen.

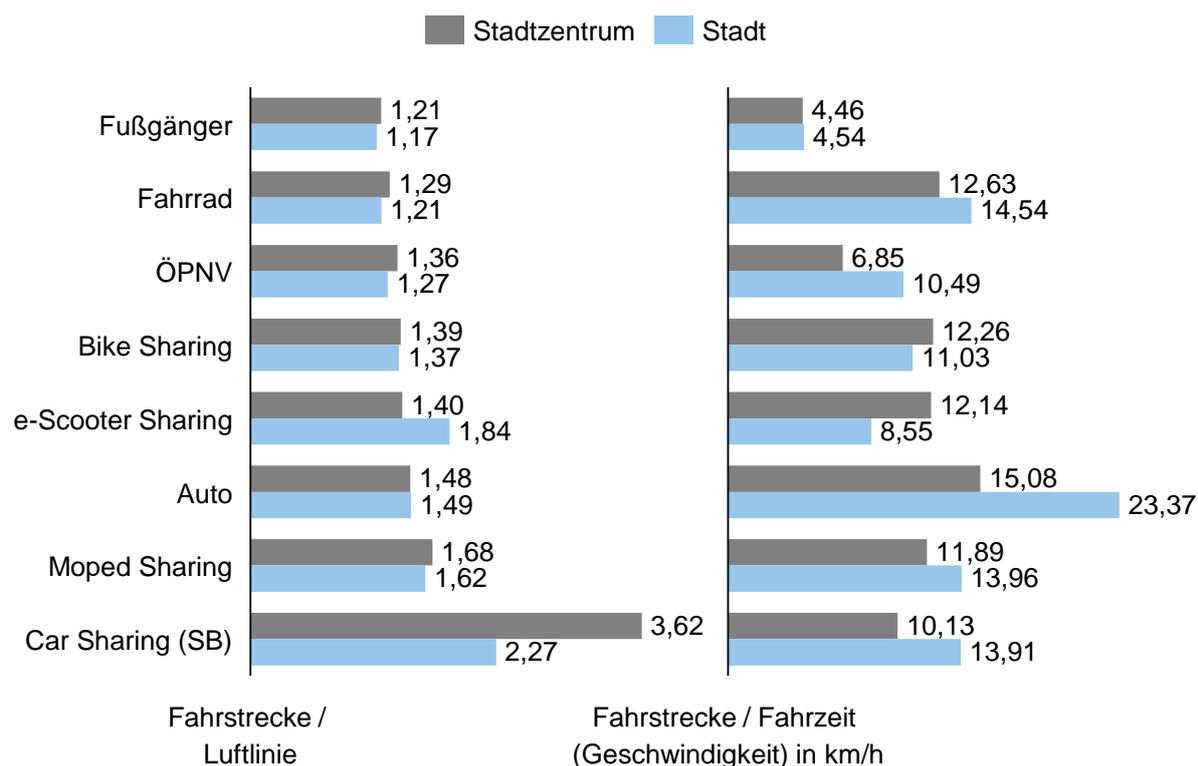


Abbildung 4.3: Durchschnittliches Verhältnis zwischen Fahrstrecke und Luftlinie sowie Fahrstrecke und Fahrzeit für München

Um die Vergleichbarkeit der Verkehrsmittel zu verbessern, wurden in der Vorveröffentlichung von Schröder und Gotzler [114] Koeffizienten zwischen Fahrstrecke, Luftlinie und Fahrdauer für München ermittelt. Damit lassen sich die Ergebnisse der Kosten in €/Pkm auch in €/km-Luftlinie und €/h-Fahrdauer anzeigen. Abbildung 4.3 zeigt die Ergebnisse der verschiedenen Verhältnisse. Dabei wird deutlich, dass vor allem mit service-basierten Sharing Diensten ein größerer Umweg verbunden ist. Am größten ist dieser beim stations-basiertem (SB) Car Sharing, dort ist

die Fahrstrecke im Stadtzentrum im Schnitt 3,6-mal größer als die Luftlinie. Dies wirkt sich auch auf die durchschnittliche Geschwindigkeit aus, die dadurch stark reduziert wird. Die direktesten Wege können als Fußgänger und mit dem Fahrrad zurückgelegt werden. Das Fahrrad kann dadurch im Stadtzentrum eine ähnlich große Durchschnittsgeschwindigkeit wie das Auto vorweisen (~13 km/h für Fahrrad vs. ~15 km/h für Autos). Werden diese Faktoren mit den Kosten in €/Pkm multipliziert, erhält man die Kosten in €/km-Luftlinie und €/h-Fahrdauer. Dabei schneiden die Sharing-Dienste noch schlechter ab, obwohl sie ohne diese Faktoren schon die höchsten spezifischen internen Kosten aufweisen. Auf der anderen Seite schneiden Autofahrten noch schlechter ab als die aktiven Verkehrsmittel, weil diese direkte Wege fahren und auch relativ hohe Durchschnittsgeschwindigkeiten für das Stadtzentrum zeigen.

Externe Kosten

Im Folgenden sollen die gleichen Betrachtungen wie bei den internen Kosten auch für die externen Kosten vorgenommen werden. Danach werden beide Kostenarten miteinander verglichen. Die Ergebnisse der durchschnittlichen spezifischen externen Kosten basieren auf den in Kapitel 3.1.2 vorgestellten Methoden und wurden bereits in der eigenen Studie Schröder et al. [127] veröffentlicht. Abbildung 4.4 zeigt den Vergleich der durchschnittlichen spezifischen externen Kosten zwischen den berücksichtigten Verkehrsmitteln. Dabei wurden für die Klimakosten eine 1-prozentige Zeitpräferenzrate und für die Unfallkosten der Schadenspotentialansatz gewählt. Alle verwendeten Daten für die Berechnung der konstanten externen Kosten sind in den Tabellen A.5 bis A.27 im Anhang zu finden.

Die spezifischen externen Kosten des motorisierten Individualverkehrs sind im Schnitt am höchsten. Die spezifischen externen Kosten des ÖPNVs und der aktiven Mobilität sind dabei deutlich geringer. Jedoch weisen die einzelnen Verkehrsmittel der Kategorien deutliche Unterschiede auf. Mit ungefähr 1 Cent/Pkm ist hier der Fußgänger das externe kostengünstigste Verkehrsmittel, während das Fahrrad als Teil der aktiven Mobilität das Siebenfache an externen Kosten verursacht. Dies liegt vor allem an den Unfallkosten, die trotz der Anwendung des Schadenspotentialansatzes den höchsten Anteil der externen Kosten bei der aktiven Mobilität ausmachen. Dies liegt sowohl an dem großen Anteil der selbstverschuldeten Unfälle (17%) oder Unfällen mit Fußgängern und anderen Fahrradfahrern (20%) (Abbildung 4.5) als auch an der hohen Anzahl Unfälle pro Pkm. Bei Fahrrädern liegt der Wert bei ca. einem Unfall alle 450.000 Pkm, bei Autofahrern liegt dieser Wert bei einem Unfall alle 2.800.000 Pkm. Hinzu kommt, dass der Gesundheitsnutzen in Abbildung 4.4 nicht berücksichtigt wurde. Abbildung 4.6 zeigt eine Aufrechnung des Gesundheitsnutzen für das Fahrrad. Dabei wird deutlich, wie viel höher der Gesundheitsnutzen als der tatsächlich entstandene Schaden durch potenzielle Unfälle ist. Die generelle Vergleichbarkeit von Kosten und Nutzen wird in diesem Fall weitergehend in Kapitel 5 diskutiert.

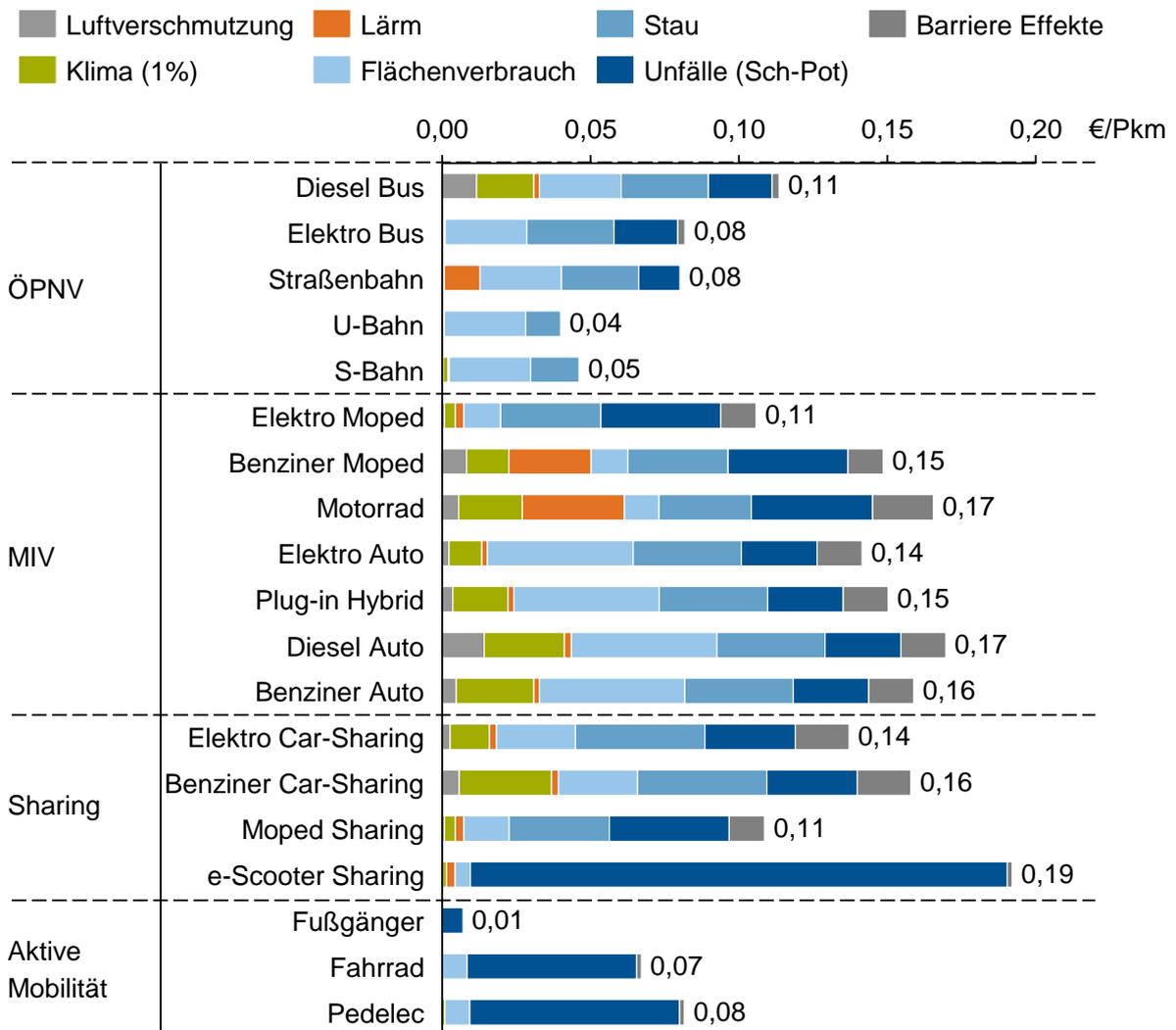


Abbildung 4.4: Durchschnittliche spezifische externe Kosten für den urbanen Raum München

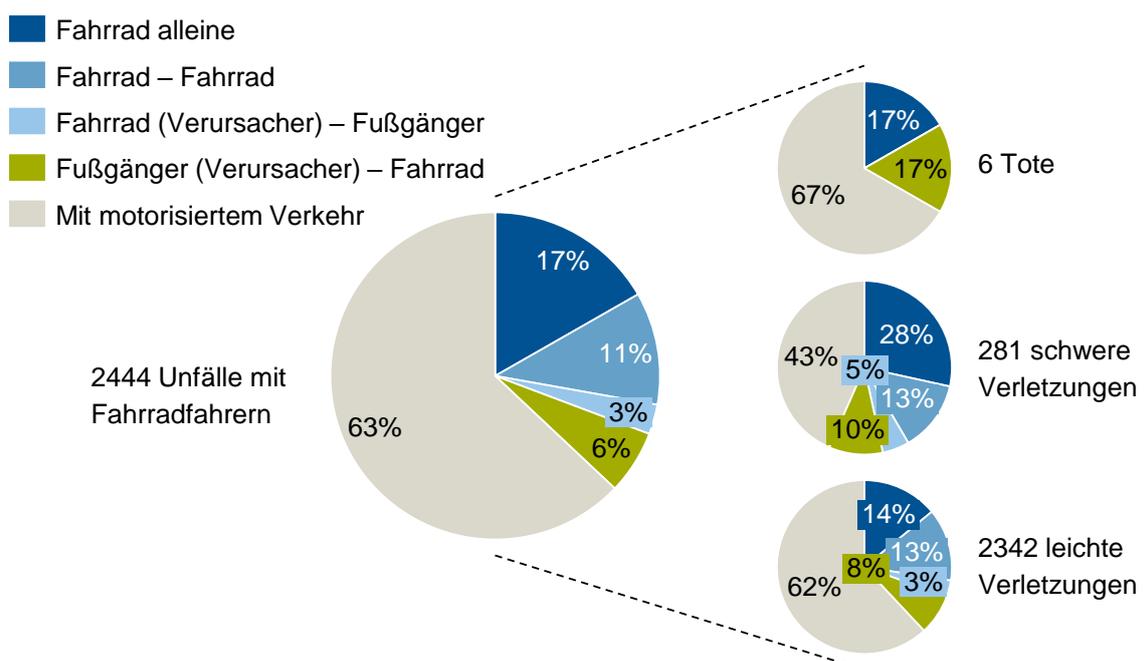


Abbildung 4.5: Unfallstatistik für Fahrräder in München im Jahr 2019 auf Basis von Polizeidaten [129]

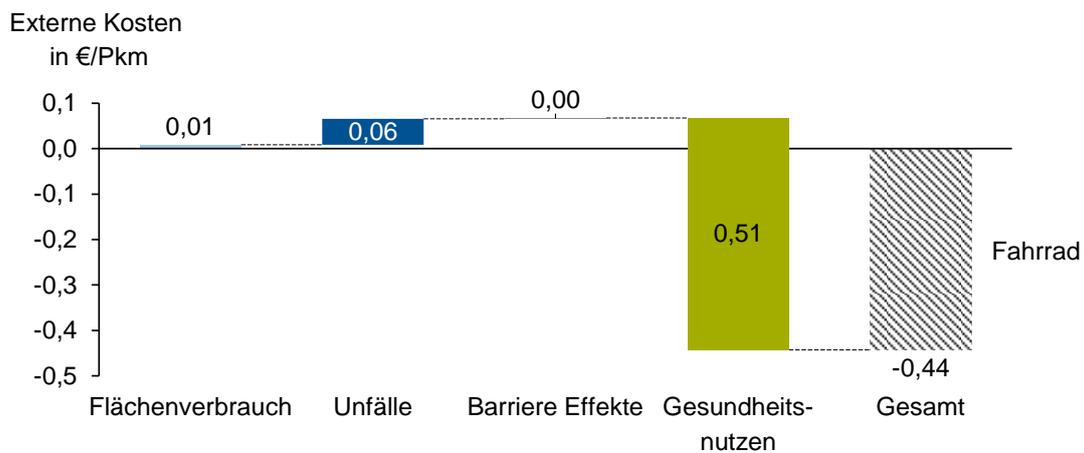


Abbildung 4.6: Aufstellung der spezifischen externen Kosten von Fahrrädern inklusive Gesundheitsnutzen [127]

Die e-Scooter Sharing-Dienste verursachen die höchsten externen Kosten, wobei der Hauptanteil auf Unfallkosten entfällt. Dies liegt daran, dass die Zusammenhänge, die in Abbildung 4.5 für Fahrradfahrer dargestellt werden, für e-Scooter-Fahrer noch stärker ins Gewicht fallen. Im ÖPNV sind die U-Bahn und die S-Bahn die kostengünstigste Alternative hinsichtlich der externen Kosten. Hier tragen hauptsächlich hohe Infrastrukturkosten und Verspätungen zu den Kosten bei. Diese werden jedoch auf eine hohe Anzahl an Passieren und Fahrleistung aufgeteilt, sodass der spezifische Kostenwert für die Einzelperson gering ausfällt. Beim motorisierten Individualverkehr ist die Zusammensetzung der externen Kosten vielfältiger. Hier ist jedoch zu sehen, dass elektrifizierte Alternativen die geringsten spezifischen externen Kosten aufweisen.

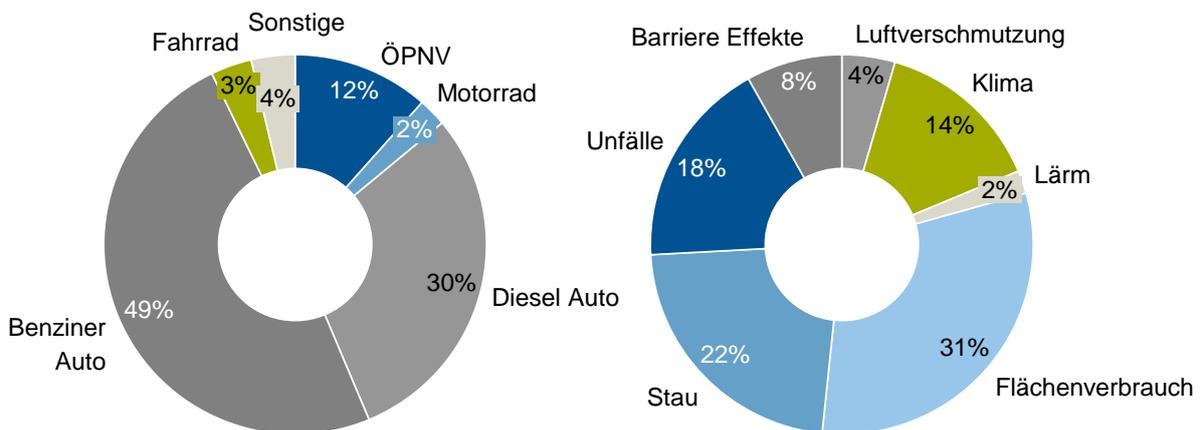


Abbildung 4.7: Aufteilung der Summe aller externen Kosten für München nach Verkehrsmittel (links) und Kostenkategorie (rechts)

Abbildung 4.7 zeigt die kumulierten externen Kosten für ganz München. Dabei wird wie bei den internen Kosten deutlich, dass Autofahrer den größten Anteil an den externen Kosten verursachen. Hier sind es fast 80% aller externen Kosten, die durch Benziner und Diesel Autos verursacht werden. Bei den Kostenfaktoren zeigt sich, dass vor allem Flächenverbrauch, Stau und Unfälle den größten Anteil haben. Klimakosten, die hauptsächlich durch CO₂-Emissionen entstehen, machen lediglich 14% der externen Kosten im urbanen Verkehr von München aus.

Vollkosten

Im Folgenden werden Verhältnis und Summe (Vollkosten) von internen und externen Kosten für die einzelnen Verkehrsmittel beleuchtet. In Abbildung 4.8 sind die durchschnittlichen spezifischen internen und externen Kosten in €/Pkm für München aufsummiert. Der Anteil der internen Kosten ist bei fast allen Verkehrsmitteln größer als die externen Kosten. Die Größenordnung des Anteils variiert allerdings. Während der Anteil der internen Kosten bei Service-gebundenen Verkehrsmitteln wie ÖPNV und Sharing bis zu 80% erreicht, liegt der Anteil beim motorisierten Individualverkehr bei ca. 60%. Der Anteil an versteckten Kosten ist somit beim MIV größer als bei ÖPNV und Sharing. Die Vollkosten der Sharing-Services sind jedoch insgesamt deutlich höher als alle anderen Verkehrsmittel. Bei der aktiven Mobilität ist der Anteil der externen Kosten (zum Beispiel beim Fahrrad) noch höher als beim MIV. Dies liegt vor allem an den insgesamt geringeren internen Kosten.

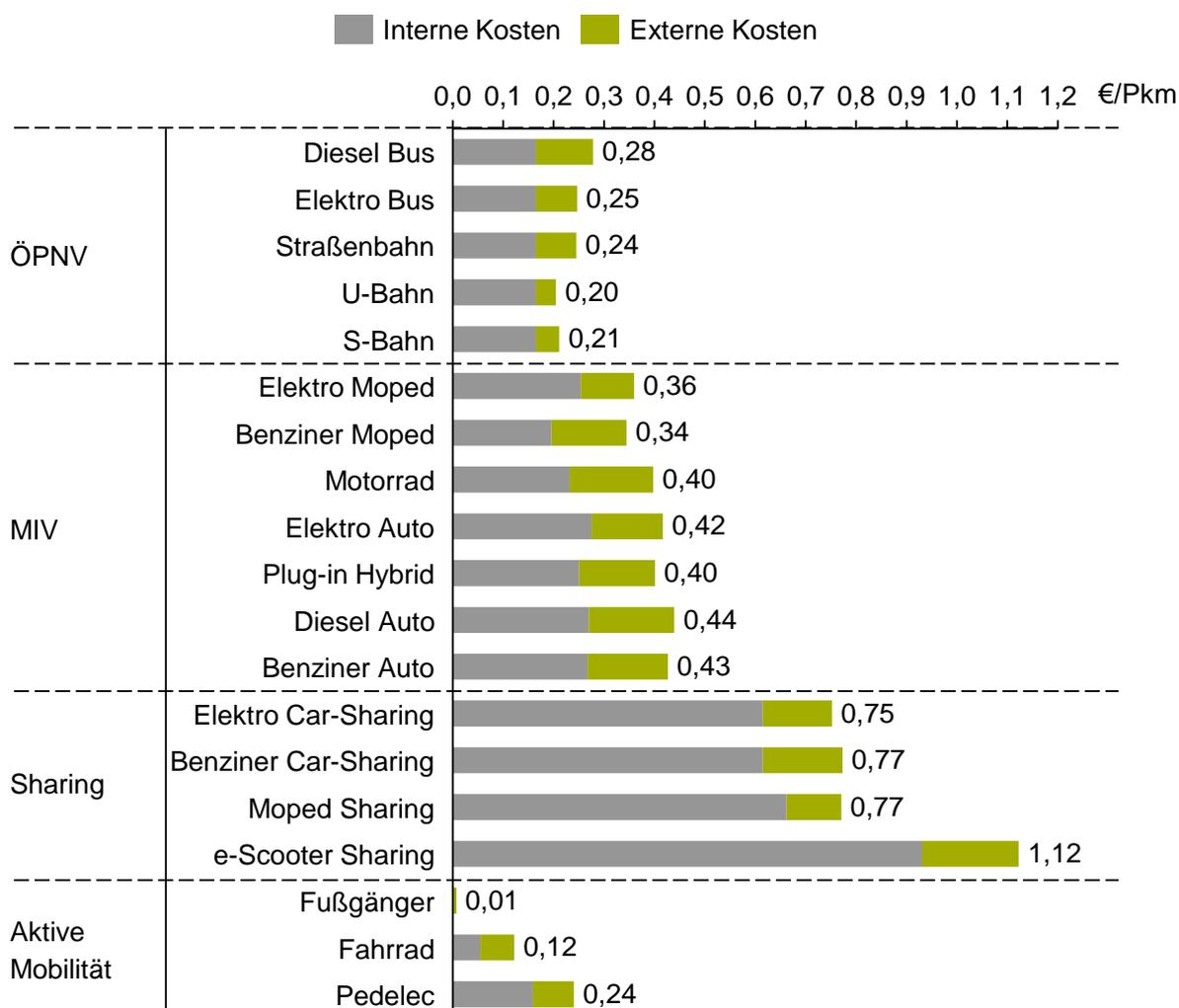


Abbildung 4.8: Durchschnittliche spezifische Vollkosten für den urbanen Raum München

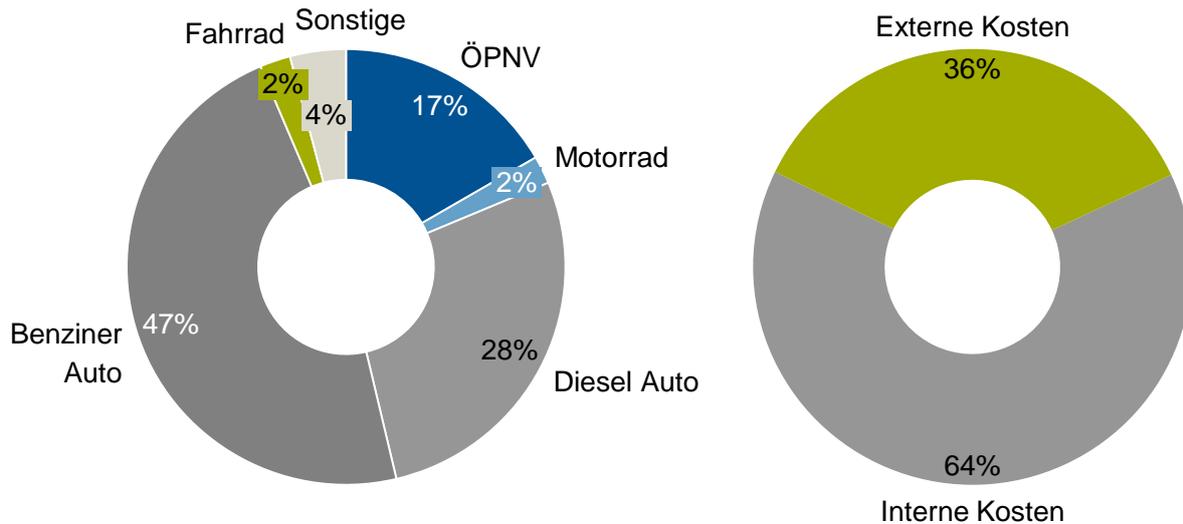


Abbildung 4.9: Aufteilung der Summe aller Vollkosten für München nach Verkehrsmittel (links) und Kostenkategorie (rechts)

Der oben beschriebene höhere Anteil an internen Kosten wird auch bei der kumulierten Analyse für ganz München sichtbar. Rund ein Drittel der Vollkosten in München sind auf die externen Kosten zurückzuführen. Die internen Kosten für München betragen ca. 3,8 Mrd. €, für externe Kosten sind es ca. 2,1 Mrd. €. Der Verkehr in München verursacht in Summe in einem Jahr ca. 6 Mrd. € an Vollkosten. Dabei zeigt auch hier Abbildung 4.9, dass zum größten Teil Autos mit Verbrennungsmotor dafür verantwortlich sind. Bei nur etwa 40% der gesamten Transportleistung im urbanen München verursachen Benziner und Diesel Autos ungefähr dreiviertel aller Kosten.

Zeit-räumlich variable externe Kosten

Auf Basis der in Kapitel 3.1.3 vorgestellten Methodik wurden die externen Kosten nicht nur mit einem über Raum und Zeit konstanten Wert für München berechnet, sondern dieser Wert wurde noch genauer für die verschiedenen Straßen des Münchner Straßennetzwerks berechnet. Diese räumliche Varianz wurde zudem auf fünf verschiedene Tageszeiten aufgeschlüsselt. Alle berücksichtigten Faktoren und Parameter, die diese Varianzen auslösen, wurden in den Tabellen A.28 bis A.31 gesammelt und in Kapitel 3.1.3 erläutert.

Im Weiteren soll der Fokus auf den zeit-räumlich variablen Kosten von verschiedenen Antriebstypen für Autos und aktiver Mobilität liegen. Diese weisen den höchsten Grad an Varianz auf (Tabelle 3.2 in Kapitel 3.1.3). Die Varianz von externen Kosten der schienengebundenen Verkehrsmittel des öffentlichen Nahverkehrs wurde in dieser Arbeit nicht berechnet. Eine weiterführende Diskussion dazu findet in Kapitel 5 statt. Die Darstellungen in Abbildung 4.10 sollen als exemplarisches Beispiel der Ergebnisse für räumlich variable externe Kosten dienen. Dort sind die spezifischen externen Kosten für Elektroautos in Form einer Heat-Map auf das Straßennetz von München aufgetragen. Jede Straßenkante des Netzwerks besitzt einen eigens berechneten Wert für die externen Kosten des Verkehrsmittels Elektroauto. Sie sind nur für eine Tageszeit (Morgen) gezeigt, daher sind hier keine zeitlichen, sondern nur räumliche Varianzen der externen Kosten wahrzunehmen. Durch die Heat-Map wird deutlich, dass die Kosten für Straßen mit höheren Geschwindigkeiten steigen. Dies liegt an dem erhöhten Energieverbrauch und der größeren Wahrscheinlichkeit für schwere Unfälle bei höheren Geschwindigkeiten. Zudem zeigt sich, wie die spezifischen externen Kosten auf Straßen Richtung Zentrum der Stadt steigen. Dies begründet sich zum einen mit den höheren Flächenpreisen im Stadtzentrum und

zum anderen mit der höheren Einwohnerdichte, wodurch mehr Menschen durch den Lärm beeinträchtigt sind. Insgesamt liegt die Spanne der spezifischen externen Kosten für Elektroautos im urbanen Raum von München ca. zwischen 0,12 und 0,22 €/Pkm.

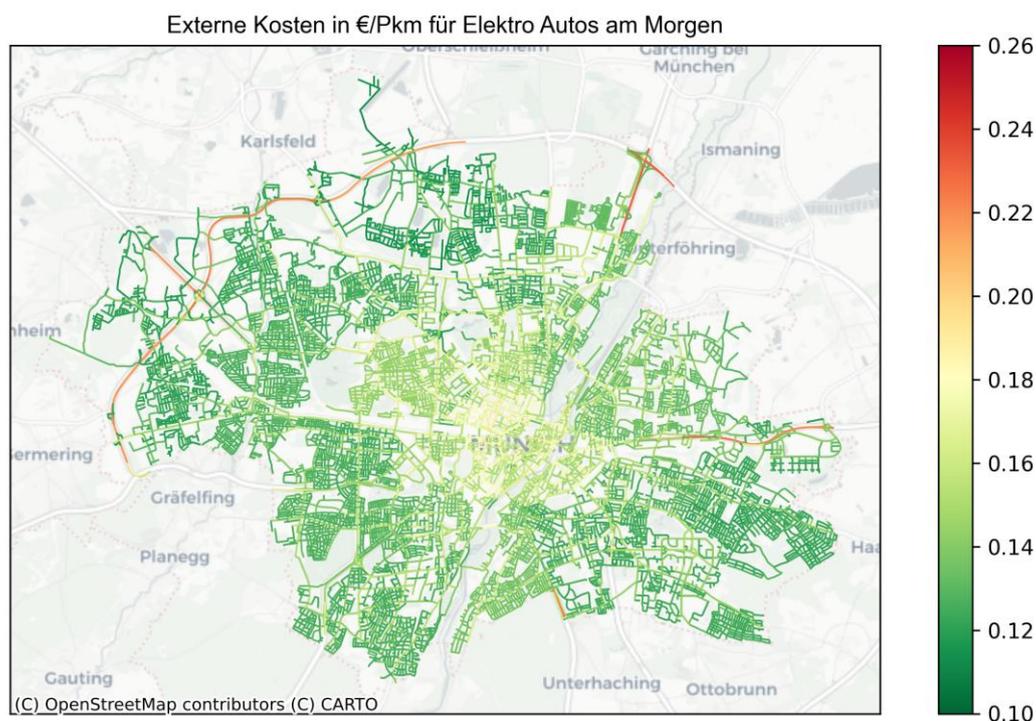


Abbildung 4.10: Verteilung der räumlich variablen spezifischen externen Kosten für Elektroautos am Morgen in München

Abbildung 4.11 zeigt die gleiche Darstellung wie Abbildung 4.10 für Benziner und Diesel Autos. Die räumliche Verteilung der spezifischen Kosten von Verbrennern verdeutlicht die erhöhten Lärmkosten, die die Hauptstraßen im Stadtzentrum besonders hervorheben. Insgesamt ist das Kostenniveau bei Verbrennern etwas höher als bei Elektroautos und bewegt sich zwischen ca. 0,14 und 0,24 €/Pkm für Benziner und ca. 0,16 bis 0,26 €/Pkm für Diesel Autos. Dies liegt vor allem an der zusätzlichen Umweltbelastung durch Lärm und direkten Emissionen der Verbrennungsmotoren.

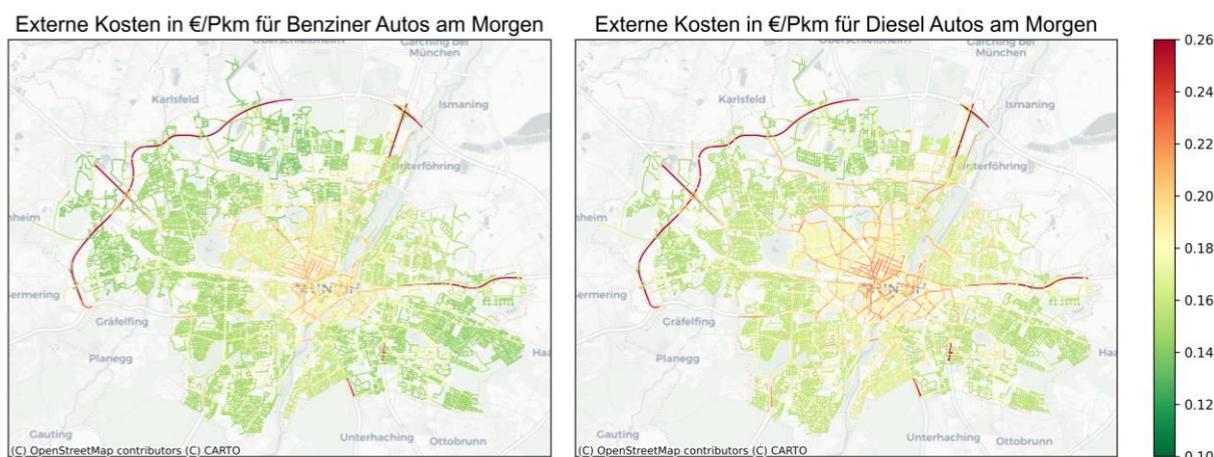


Abbildung 4.11: Verteilung der räumlich variablen spezifischen externen Kosten für Benziner (links) und Diesel (rechts) Autos am Morgen in München

Im Gegensatz zu den externen Kosten der Autos sind die externen Kosten der aktiven Mobilität auf den Hauptkostenfaktor Unfälle zurückzuführen. Dieser Faktor sorgt für die räumlichen Varianzen der spezifischen externen Kosten von aktiver Mobilität. Dies ist hier exemplarisch für Fahrradfahrer in Abbildung 4.12 dargestellt. Die räumliche Aufschlüsselung der Kosten wurde mit Hilfe der Straßennamen der Unfallorte aus den polizeilichen Unfalldaten [129] vorgenommen. Verteilt über ganz München ergeben sich somit die Straßen und Stellen, an denen es besonders viele Fahrrad-Unfälle pro Straßenlänge gibt. Diese Aussage lässt sich auf zwei Arten interpretieren. Einerseits gibt sie Aufschluss über die Gefahrensituation auf den Straßen Münchens. Andererseits stellt sich die Frage, ob Fahrradfahrer deshalb diese Straßen meiden sollten oder ob es einen Bedarf gibt, die Fahrradinfrastruktur zu verbessern. Dies ist Gegenstand einer politischen Diskussion, die im Kapitel 5 weitergeführt wird.

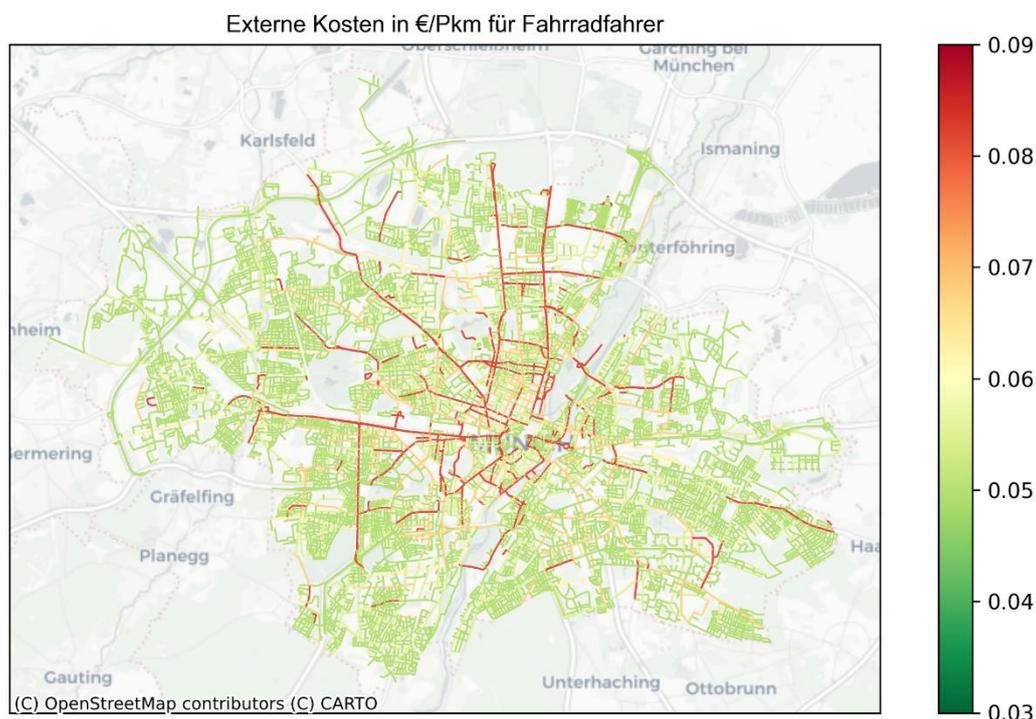


Abbildung 4.12: Verteilung der räumlich variablen spezifischen externen Kosten für Fahrradfahrer in München

Zuletzt zeigt Abbildung 4.13 die zeitlichen Varianzen für spezifische externe Kosten in München. Diese wurden anhand von Differenzen zu den spezifischen externen Kosten am Morgen dargestellt. Der Vergleich zwischen Mittag und Morgen zeigt, dass sich vor allem die Staus auf größeren Straßen beruhigt hat, wodurch auch die externen Kosten auf diesen Straßen im Vergleich sinken (in grün dargestellt). Am Nachmittag erhöht sich der Staulevel wieder und verursacht leicht höhere spezifische externe Kosten auf den größeren Straßen (in Rot dargestellt). Gegen Abend sind die Straßen ähnlich bis etwas geringer belastet als am Morgen, sodass sich dort ähnlich hohe Kosten zeigen. Jedoch sind die Lärmkosten am Abend höher als tagsüber. Dadurch ergeben sich erhöhte spezifische externe Kosten für dicht besiedelte Stadtgebiete und das Stadtzentrum. In der Nacht ist dieser Effekt am stärksten, sodass dort die höchsten Kosten im Stadtzentrum entstehen, während die größeren Straßen am Stadtrand verringerte spezifische externe Kosten aufweisen. Insgesamt sind die zeitlichen Änderungen der spezifischen externen Kosten über die Tageszeiten hinweg jedoch marginal. Dort ergeben sich lediglich Unterschiede von -0,01 bis 0,01 €/Pkm.

Durch die Analyse der Vollkosten ist die Grundlage für die vollkostenbasierte Bepreisung der vorgestellten Verkehrsmittel geschaffen. Die Ergebnisse dazu werden im nächsten Kapitel beleuchtet und tiefgehend erläutert.

Externe Kosten Differenz in €/Pkm für Elektro Autos

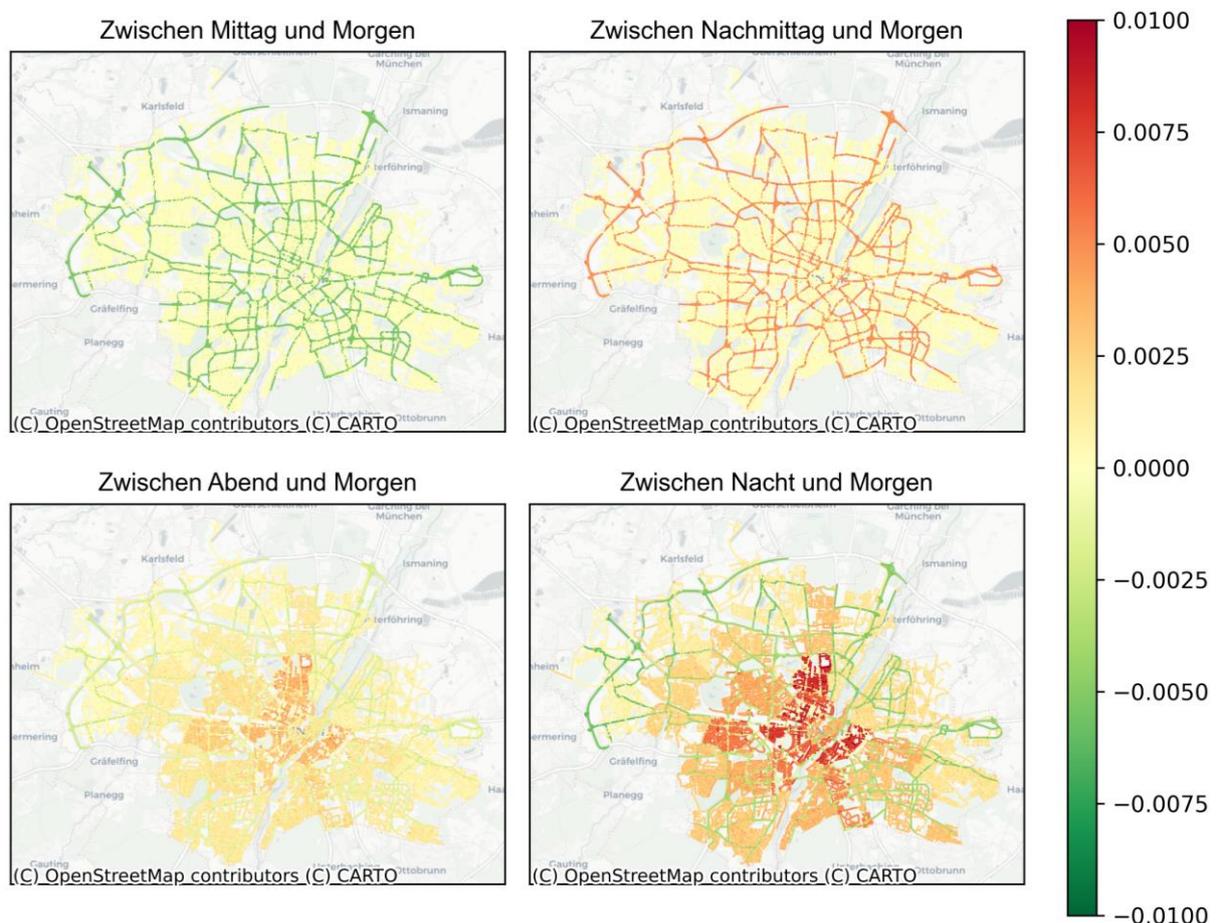


Abbildung 4.13: Zeitliche Varianz der räumlich variablen spezifischen externen Kosten für Elektroautos durch Differenz zwischen verschiedenen Tageszeiten und der Tageszeit Morgen

4.2 Simulationsergebnisse der Bepreisung

Für die Bepreisung der Verkehrsmittel wurden in Kapitel 3.2.3 verschiedene Szenarien entwickelt. Diese liegen den folgenden Ergebnissen zu Grunde und lauten wie folgt:

- **Szenario 1:** Internalisierung der externen Kosten (ohne Gesundheitsnutzen)
- **Szenario 2:** Internalisierung der externen Kosten außer bei aktiver Mobilität (mit Gesundheitsnutzen)
- **Szenario 3:** Internalisierung der externen Kosten nur bei Autos
- **Szenario 4:** Realisierung der internen Kosten (nur bei privaten VKM)
- **Szenario 5:** Internalisierung und Realisierung der Vollkosten

Die Randbedingungen der Simulationsumgebung wurden ebenfalls in Kapitel 3.2 erläutert. Diese haben zur Folge, dass lediglich zwischen den Verkehrsmitteln Auto (mit Antriebstypen BEV, Diesel und Benzin), Bus, S-Bahn, Straßenbahn/ U-Bahn, Fahrrad und Fußgänger unterschieden werden kann. Sharing-Services oder motorisierte Zweiräder sind in der Analyse von Auswirkungen der vollkostenbasierten Bepreisung nicht berücksichtigt.

Basis der vollkostenbasierten Bepreisung sind die in Kapitel 4.1 vorgestellten Kosten. Bei den externen Kosten sind es die zeitlich und räumlich variablen Kosten, die für die Internalisierung gewählt wurden. Bei den internen Kosten wurden im Vergleich zu den in Kapitel 4.1 vorgestellten Kosten für Autos leicht erhöhte Kosten gewählt. Dies liegt an den geringen angenommenen jährlichen Fahrleistungen im inneren Stadtbereich für die Verwendung der internen Kosten in der Simulation. Bei weniger Pkm pro Jahr erhöht sich dementsprechend der Kostenwert in €/Pkm bei teilweise gleichbleibenden jährlichen Kosten für Wertverlust, Instandhaltung, etc. Die exakt gewählten Preiswerte wurden in Tabelle B.1 im Anhang zusammengefasst.

Durch die Verwendung verschiedener Routing-Zielfunktionen wurde eine zusätzliche Vielfalt in der Auswahl der Szenarien geschaffen. In der Standardausführung der Szenario-Simulation bewegen sich die Menschen stets zeitoptimiert von ihrem Standort zum Zielort. Hierbei werden zunächst die Kosten für die gewählte Route berechnet, indem die Kostenwerte der einzelnen Kanten innerhalb der Route aufsummiert werden (zeitlich und räumlich variable externe Kosten in Kapitel 4.1). Anschließend wählt das Verkehrsmittelwahlmodell basierend auf den Routenkosten das entsprechende Verkehrsmittel aus. In einer alternativen Variante der Szenario-Simulation werden die Routen hingegen auf Basis der externen Kosten optimiert. Dies führt zu neuen Kosten für die Route und potenziell zu einer abweichenden Verkehrsmittelwahl im Vergleich zur Standardausführung der Szenario-Simulation. Eine detaillierte Erläuterung zum Aufbau der Simulation findet sich in Kapitel 3.2.

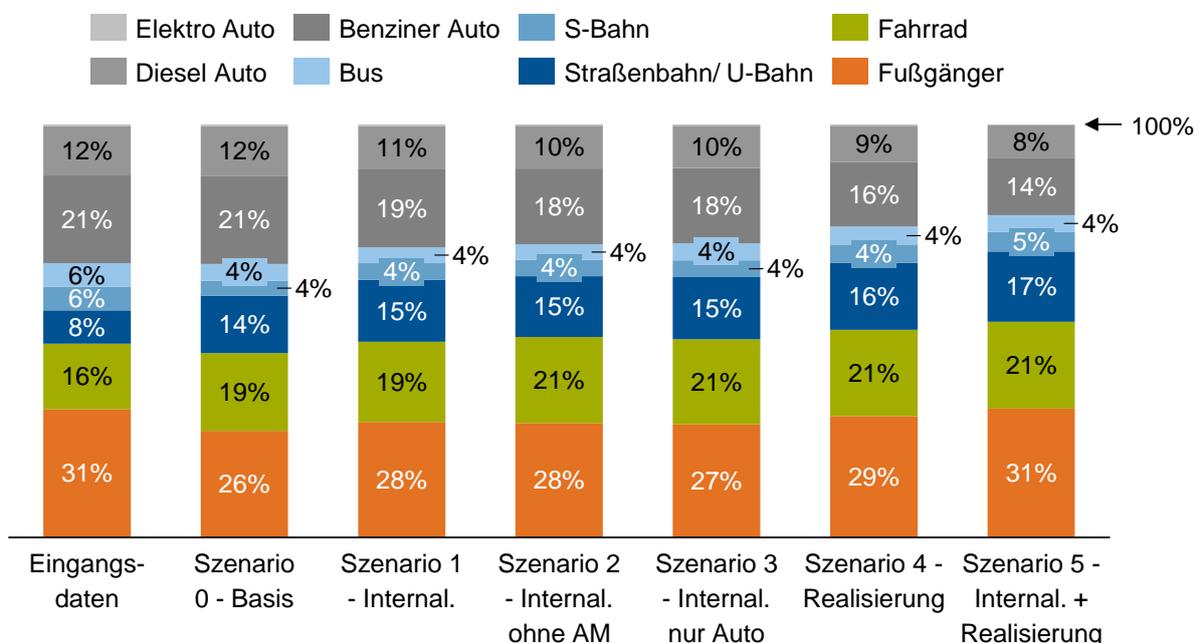


Abbildung 4.14: Änderung des Modal-Splits nach Wegen für die verschiedenen Bepreisungsszenarien

Der Fokus der Ergebnisse liegt in der Änderung des Verkehrsmittels und der daraus resultierenden Gesamtkosten durch die Bepreisung. Aus diesem Grund werden die Ergebnisse im Folgenden nach den Verkehrsmitteln aufgeteilt dargestellt. Den direktesten Einfluss hat die Verkehrsmittelwahl auf den Modal Split. Dieser ist für die verschiedenen Bepreisungsszenarien in

Abbildung 4.14 abgebildet. Auf der linken Seite ist der Modal Split für die Eingangsdaten gezeigt. Die Eingangsdaten sind die Daten, die als Bewegungsdaten für die Menschen im urbanen Raum von München genutzt wurden. Diese sind wiederum Ausgangsdaten des in Kapitel 3.2.1 beschriebenen Modell MITO. Das hier verwendete Simulationsframework verwendet ein angepasstes Verkehrsmittelwahlmodell aus MITO (Kapitel 3.2.2). Daher sollte das hier verwendete Modell die gleichen Modal Split Ergebnisse ergeben, wie die Eingangsdaten aus MITO. Hier sind jedoch Abweichungen in den Ergebnissen zu erkennen, wenn der Modal Split für die Eingangsdaten mit dem Modal Split von Szenario 0, der Basis für die restlichen Szenarien, verglichen wird. Abweichungen kommen dadurch zu Stande, dass das hier entwickelte Modell andere Randbedingungen hat als MITO (nur Wege innerhalb des urbanen Raums München, etc.). Durch Fokussierung auf den städtischen Raum sind die Werte aus Basis-Szenario näher an den MiD-Daten als die ursprünglichen Eingangsdaten des Modells. Der Modal-Split aus MiD für das urbane München weist 24% Fußgänger, 18% Fahrrad, 34% Autos und 24% ÖPNV auf [168].

Von Szenario 1 bis 5 kann eine stetige Abnahme des Anteils der Pkm von Autofahrern und eine Zunahme des Anteils von ÖPNV insgesamt und aktiver Mobilität beobachtet werden. Dabei ist zu erkennen, dass die Zunahme bei aktiver Mobilität stärker ist als beim ÖPNV. Eine vollständig vollkostenbasierte Bepreisung (Szenario 5) führt zu einer Reduktion des Autoverkehrs um 11%. Der Anteil der aktiven Mobilität steigt von 45% auf 52% und der Anteil des ÖPNV von 22% auf 26%. Die Realisierung der internen Kosten (Szenario 4) führen zu einer stärkeren Reduktion des Autoverkehrs als die Internalisierung der externen Kosten (Szenario 1). Dies liegt an den ca. doppelt so hohen internen Kosten im Vergleich zu den externen Kosten (Kapitel 4.1).

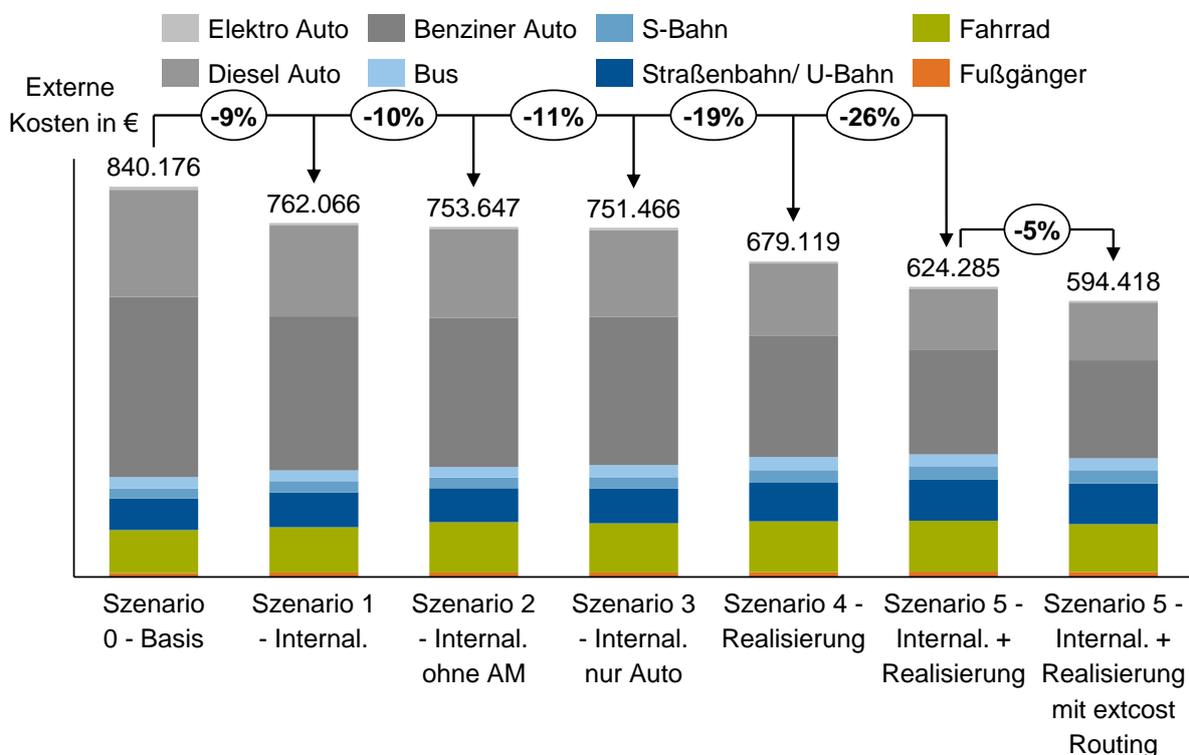


Abbildung 4.15: Änderung der externen Kosten durch die verschiedenen Bepreisungsszenarien für den Verkehr eines Tages im urbanen München

Abbildung 4.15 veranschaulicht die Veränderung der externen Kosten durch Einführung der verschiedenen Bepreisungsszenarien. Die oben beschriebene Reduktion des Autoverkehrs durch

die Bepreisung führt folgerichtig zu einer Reduktion der externen Kosten. In der vollständig vollkostenbasierten Bepreisung verringern sich die externen Kosten um 26%, was pro Tag eine Ersparnis von ca. 215.000 € an externen Kosten ergibt. Die reine Internalisierung der externen Kosten (Szenario 1) führt zu einer Reduktion von ca. 10%. Dabei unterscheiden sich die Ergebnisse nicht sonderlich, wenn der Gesundheitsnutzen berücksichtigt ist (Szenario 2) oder nur das Auto mit seinen externen Kosten bepreist wird (Szenario 3). Ein zusätzlicher Einsparungsgewinn an externen Kosten lässt sich erzeugen, wenn anstatt der zeitoptimierte das externe-Kosten-optimierte Routing verwendet wird. Dadurch werden zusätzliche 5% reduziert.

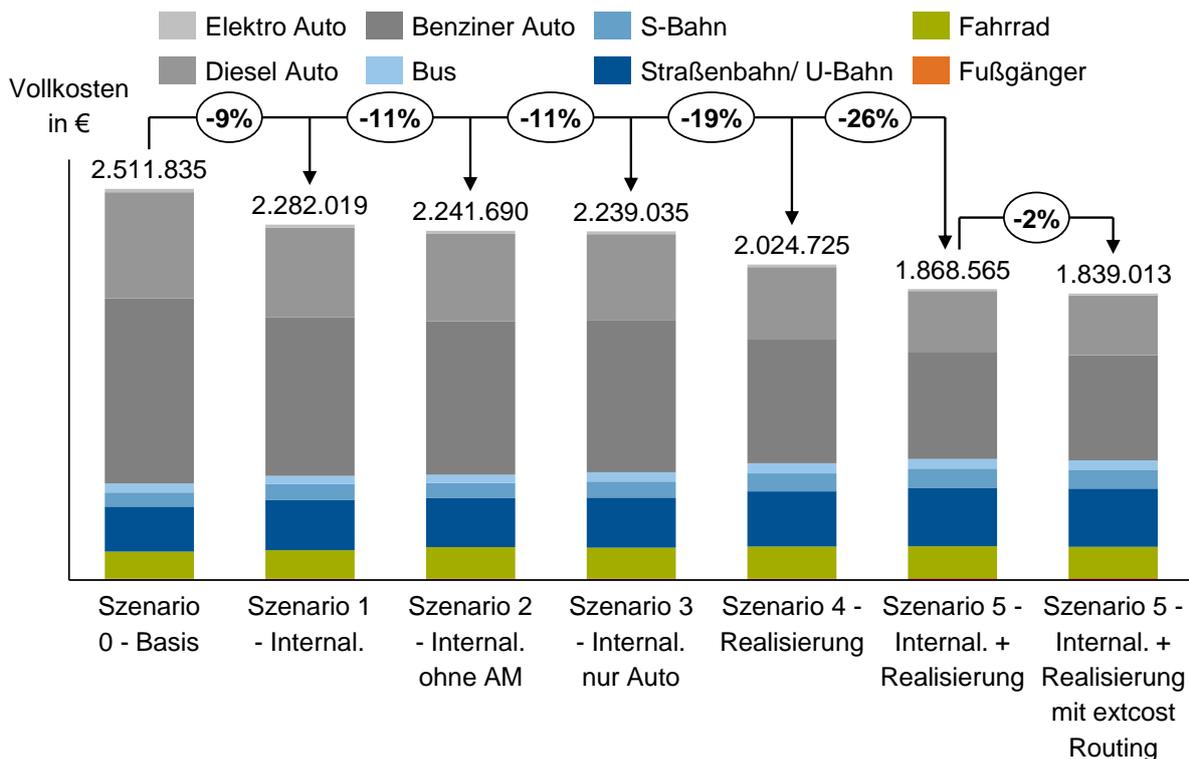


Abbildung 4.16: Änderung der Vollkosten durch die verschiedenen Bepreisungsszenarien für den Verkehr eines Tages im urbanen München

Bei der Betrachtung der Vollkosten in Abbildung 4.16 ist ein ähnliches Bild wie bei den externen Kosten in Abbildung 4.15 zu erkennen. Die Reduktionen der Kosten durch die Bepreisung nehmen eine ähnliche Größenordnung an. Lediglich bei dem externe-Kosten-optimierten Routing von Szenario 5 ist eine Reduktion der Vollkosten von 2% zu erreichen. Dies liegt an der geringeren Sensitivität des Routings gegenüber internen Kosten. Die Reduktionen durch das externe-Kosten-optimierte Routing beinhalten einen trade-off mit der Fahrzeit. Diese ist in Abbildung 4.17 dargestellt. Dabei wird deutlich, dass eine Reduktion der Kosten auch mit einem Anstieg der Reisezeit einhergeht. Dies liegt vor allem an den geringeren Geschwindigkeiten der aktiven Mobilität, deren Anteil in den Bepreisungsszenarien deutlich ansteigt. In der Realität ist jedoch eine alternative Zielwahl für die gewählte Aktivität und somit eine verringerte Streckenlänge und Fahrzeit für den Umstieg auf aktive Mobilität möglich. Ein weiterer Faktor ist das erwähnte Routing. Wenn langsamere, aber dafür externe-Kosten-ärmere Routen gewählt werden, steigt auch hier die insgesamt Reisezeit. Da es eine dem Menschen bewusste und kalkulierbare Zunahme der Reisezeit ist, wird sie hier nicht als zusätzliche externe Kosten verrechnet (Definition in Kapitel 2.2). Die im weiteren Verlauf beschriebene räumliche Verteilung der Kosten limitiert sich auf die externen Kosten der Autos, weil zum einen interne Kosten in dieser Arbeit keine räumliche

Varianz aufweisen und zum anderen Autos in dieser Arbeit die größten zeit-räumlichen Varianzen in den externen Kosten aufweisen.

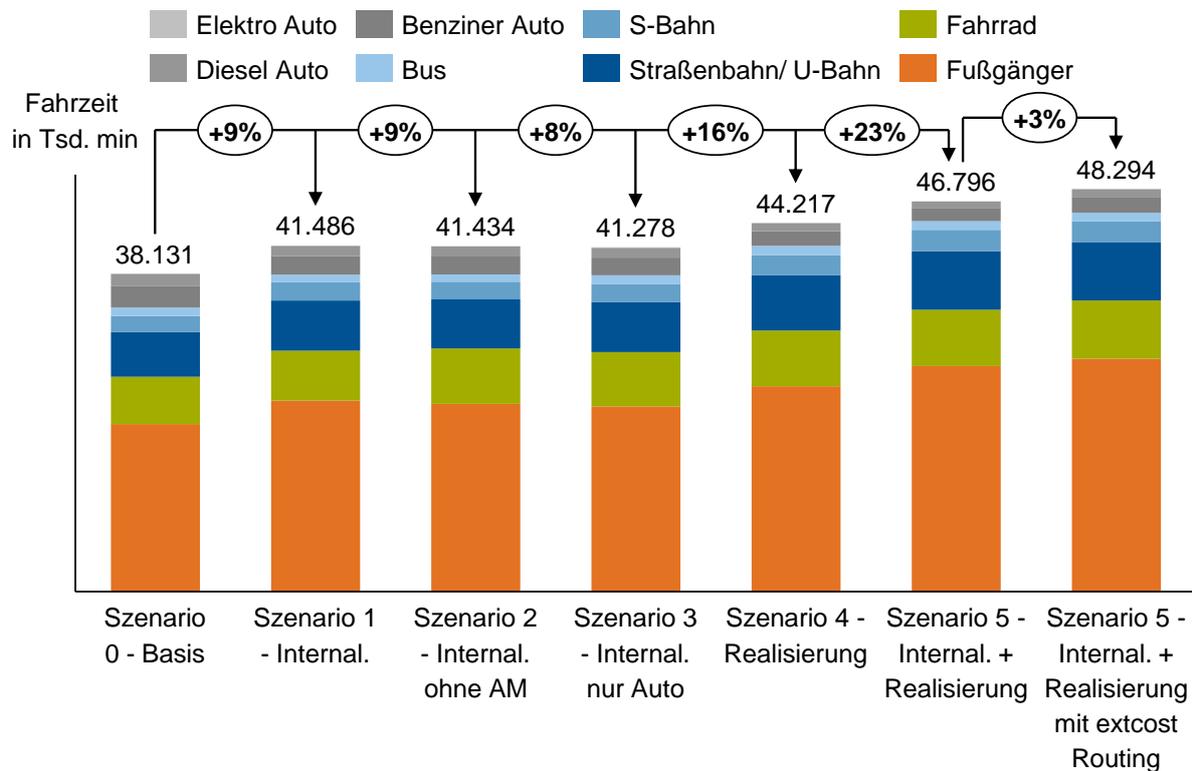


Abbildung 4.17: Änderung der Fahrzeit durch die verschiedenen Bepreisungsszenarien für den Verkehr eines Tages im urbanen München

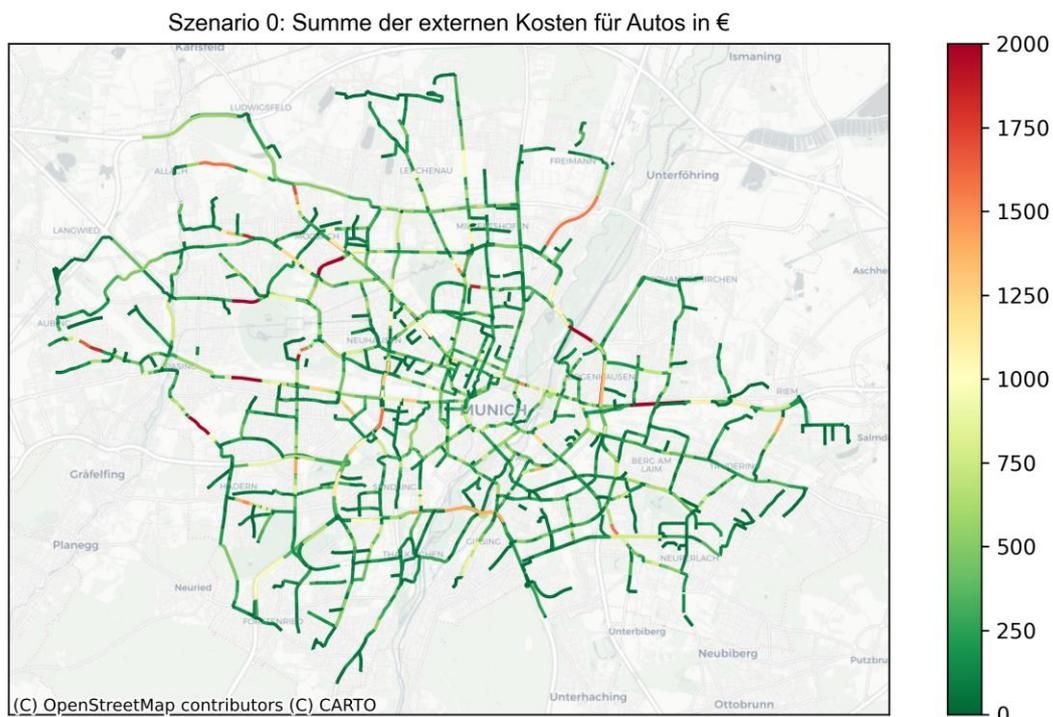


Abbildung 4.18: Räumliche Verteilung der Summe der externen Kosten für Autos bei Szenario 0 (Basis) an einem Tag in München

Abbildung 4.18 zeigt die räumliche Verteilung der externen Kosten für den Autoverkehr eines Tages im Basis-Szenario. Im Vergleich zu den Netzwerk-Graphen aus Kapitel 4.1, die die potenziellen spezifischen externen Kosten für eine Autofahrt über die Straßen des Netzwerks visualisiert, werden hier die tatsächlich erzeugten externen Kosten angezeigt, die durch das Fahren mit dem Auto über die hervorgehobenen Straßen entstehen. Für München zeigt sich, dass der Großteil des Verkehrs über die großen Hauptstraßen stattfindet und sich an manchen Stellen oder Engpässen (zum Beispiel Brücken, Tunnel, etc.) hohe Summen an externen Kosten ansammeln. Dabei entstehen Straßenstücke, auf denen bis zu 2.000 € externe Kosten an einem Tag durch Autofahrten erzeugt werden. Abbildung 4.19 zeigt die räumliche Verteilung der erzeugten externen Kosten von Szenario 1 mit Internalisierung der externen Kosten. Die rot umkreisten Stellen sollen besonders auffällige Änderungen im Vergleich zu Szenario 0 ohne Internalisierung hervorheben. Dabei ist zu beobachten, wie einige Straßenteile keine externen Kosten mehr vorweisen, weil sie nicht mehr von den Autofahrern verwendet werden. Viele weitere Straßenstücke besitzen im Szenario mit Bepreisung reduzierte externe Kosten.

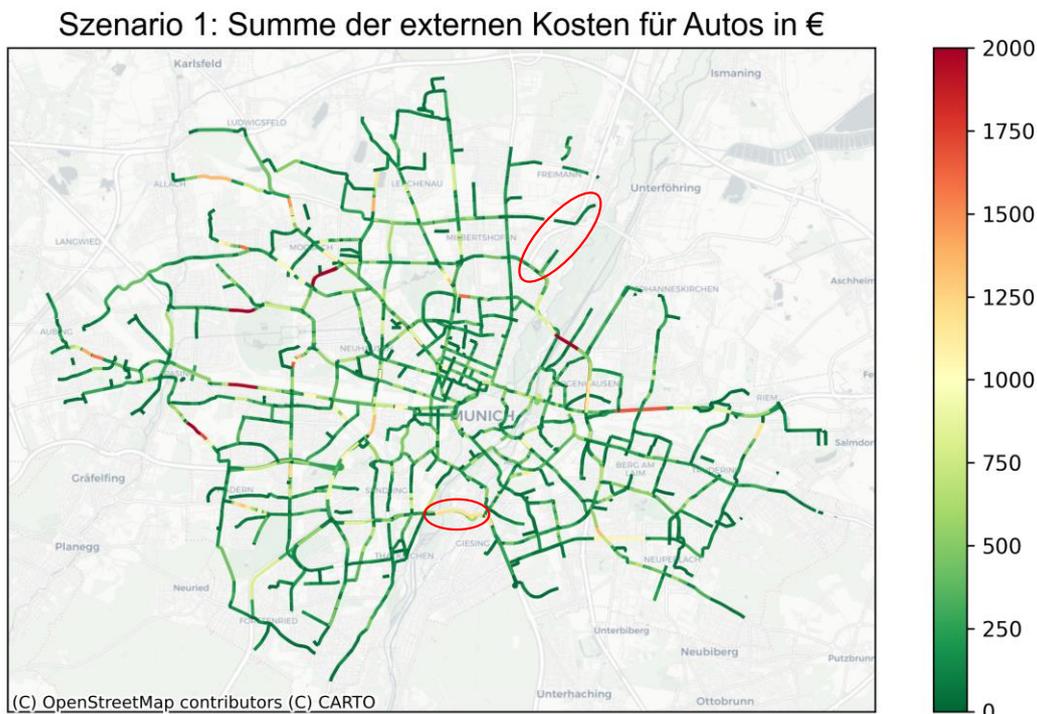


Abbildung 4.19: Verteilung der Summe der externen Kosten für Autos in Szenario 1 (Internalisierung)

Abbildung 4.20 zeigt das vorhin beschriebene Szenario mit Bepreisung und externe-Kosten-optimiertem Routing. Hier wird deutlich, wie das Routing nach externen Kosten weniger die großen Hauptstraßen des Netzwerks bevorzugt, sondern auf kleinere, langsamere Straßen mit weniger Stau ausweicht. Dabei entspannen sich zusätzliche Straßenstücke im Netzwerk, die zuvor in Szenario 1 noch mit hohen externen Kosten belastet waren (mit roten Kreisen hervorgehoben). Das externe-Kosten-optimierte Routing reduziert nicht nur die gesamten externen Kosten um ca. 5% (Abbildung 4.15), sondern verteilt diese auch räumlich besser, damit sich keine hohen Kosten an einem Straßenstück ansammeln und die Anwohner dort besonders stark belasten.

Szenario 1 (mit extcost Routing): Summe der externen Kosten für Autos in €

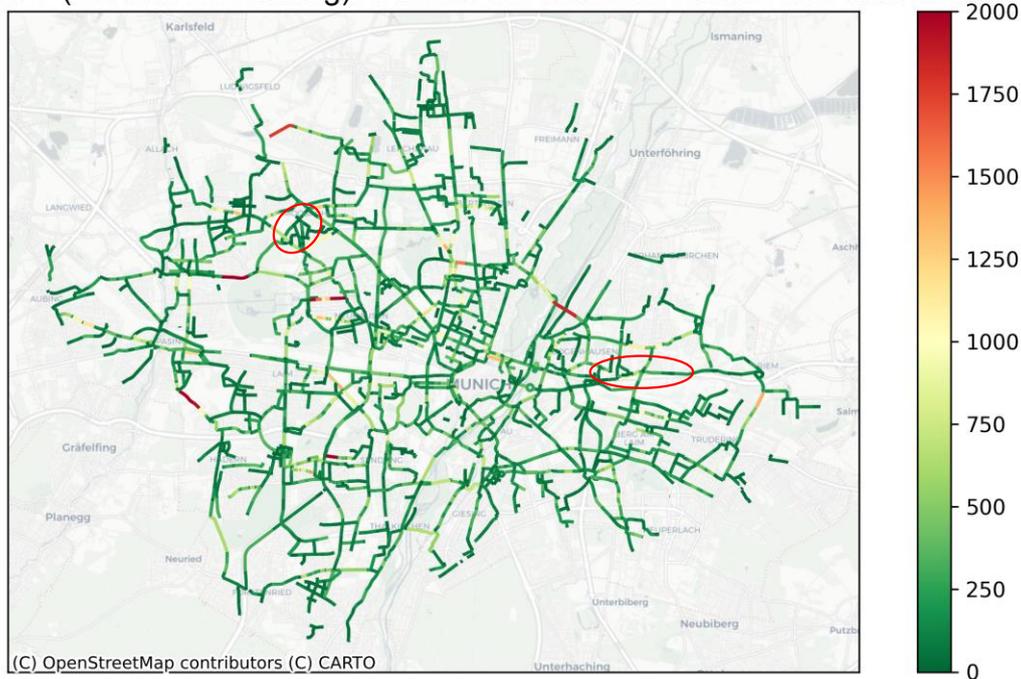


Abbildung 4.20: Verteilung der Summe der externen Kosten für Autos in Szenario 1 mit externe-Kosten-optimiertem Routing

Die in diesem Kapitel gezeigten Ergebnisse basieren auf den Annahmen und dem Vorgehen, das in Kapitel 3.2 erläutert wurde. Diese sind zwar plausibel hergeleitet, jedoch bedarf es einer weiteren Überprüfung über die Validität der Ergebnisse. Eine klassische Validierung mit Experimenten und realen Versuchsergebnissen waren im Zeitraum dieser Arbeit nicht möglich. Es wurde jedoch eine Plausibilisierung durchgeführt, die sowohl eine Sensitivitätsanalyse als auch einen Abgleich mit ähnlichen Umsetzungen in anderen Städten beinhaltet.

4.3 Plausibilisierung der Ergebnisse

Die Plausibilisierung soll sowohl für die Ergebnisse aus der Kostenbilanzierung als auch für die Simulationsergebnisse der Bepreisungsszenarien erfolgen.

Kostenergebnisse

Um die Ergebnisse zu den Vollkosten dieser Arbeit zu plausibilisieren, wurden diese mit einer der meist zitierten Studien in dem Forschungsgebiet (Gössling et al. [46]) verglichen. Abbildung 4.21 zeigt den Unterschied zwischen den beiden Studien für die Verkehrsmittel Benziner Auto, Fahrrad und Fußgänger. Bei den internen Kosten von Gössling et al. wurden lediglich die operativen Kosten berücksichtigt, weil sie mit den Total-Cost-of-Ownership (TCO) als Definition für interne Kosten privater Fahrzeuge in dieser Arbeit übereinstimmen. Bei den externen Kosten wurden in beiden Arbeiten jeweils die Werte ohne Gesundheitsnutzen verwendet.

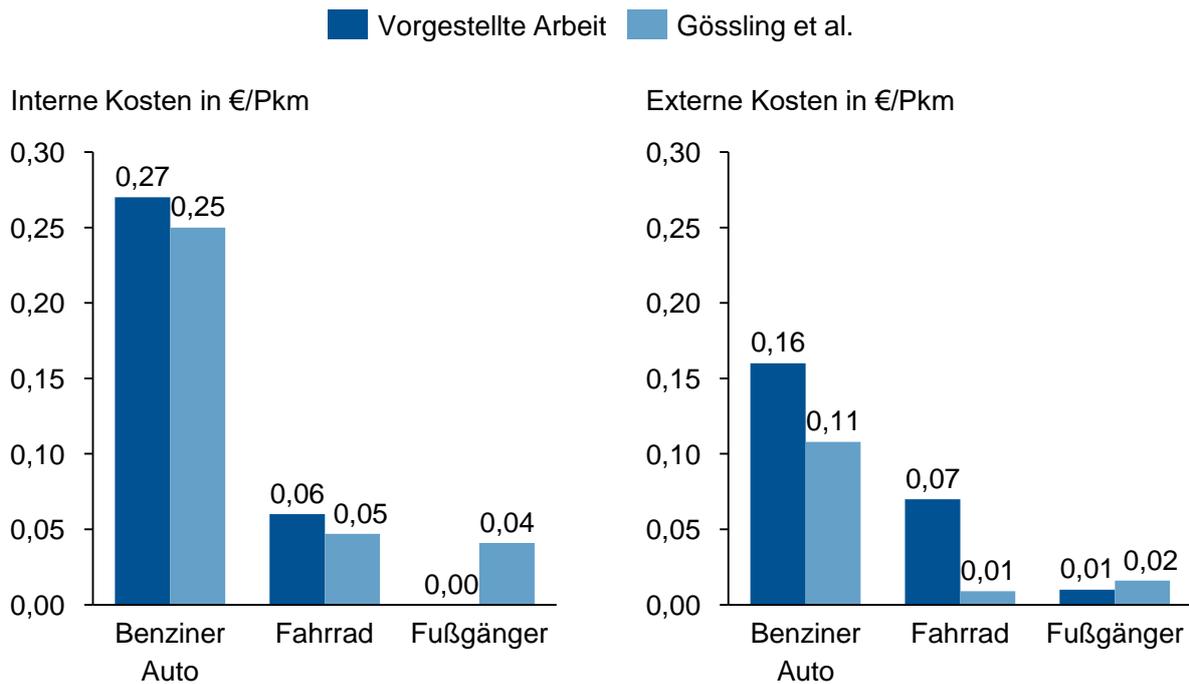


Abbildung 4.21: Vergleich der internen (links) und externen (rechts) Kosten dieser Arbeit mit Gössling et al. [46]

In der Grafik wird deutlich, dass sich die Arbeiten in ihrer Größenordnung der Ergebnisse überschneiden. Größere Unterschiede ergeben sich bei den internen Kosten für Fußgänger und den externen Kosten für Fahrräder. Bei den internen Kosten für Fußgänger in dieser Arbeit wurde keine Berechnungsmethodik verwendet, sondern der Wert Null angenommen. In der Arbeit von Gössling et al. ergeben sich dennoch operative Kosten, die durch die Arbeit leider nicht weiter ausgeführt wurden. Bei den externen Kosten für Fahrräder liegt der Unterschied vor allem in den Unfallkosten, die in dieser Arbeit höher sind. Wie in Kapitel 4.1 erläutert, liegt dies an dem großen Anteil der Unfälle ohne Beteiligung motorisierter Verkehrsteilnehmer. Die Methodik von Gössling et al. berücksichtigt bei der Berechnung der Unfallkosten hauptsächlich das Risiko eines tödlichen Unfalls und vernachlässigt alle Kosten, die durch Versicherungen getragen werden. Die hier angewandte Methodik nach Saighani [27] berücksichtigt auch die durch die Krankenversicherung getragenen Kosten von den nicht verschuldenden Unfallparteien. Dadurch ergibt sich der Unterschied in den externen Kosten bei Fahrrad und Auto.

Simulationsergebnisse

Für die Plausibilisierung der Simulationsergebnisse wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, dessen Ergebnisse mit Realbeispielen internationaler Städte mit Mobilitätsbepreisung verglichen werden. Bei der Sensitivitätsanalyse des Simulationsmodells wurde die Bepreisung auf das Auto beschränkt, weil diese Form der Bepreisung am besten mit Realbeispielen vergleichbar ist. Zwischen den Antriebstypen wurde dabei nicht unterschieden. Der Preis variierte in der Sensitivitätsanalyse von 0 bis 5 €/Pkm. Abbildung 4.22 zeigt die Ergebnisse des Modal Splits bei Variation der Bepreisung von Autoverkehr. Dabei ist deutlich zu erkennen, wie der Anteil des Autoverkehrs mit zunehmender Bepreisung sinkt. Bis zu 1 €/Pkm fällt der Anteil stark ab, danach ist die Krümmung der Kurve deutlich geringer. Sowohl der Anteil von ÖPNV als auch von aktiver Mobilität steigt bei Erhöhung der Bepreisung, wohingegen die Steigung der aktiven Mobilität im Anteil des Modalen Splits deutlich stärker ausfällt. ÖPNV erreicht einen maximalen Modal Split Wert von ca. 30% bei 5 €/Pkm, die aktive Mobilität erreicht einen Wert von über 65% bei gleicher Bepreisung. Der Autoverkehr sinkt dabei auf unter 5% im urbanen München. Hervorgehoben ist

zudem der Preis für die Halbierung des Autoverkehrs. Dies ist ungefähr bei einem Wert von 0,75 €/Pkm erreicht.

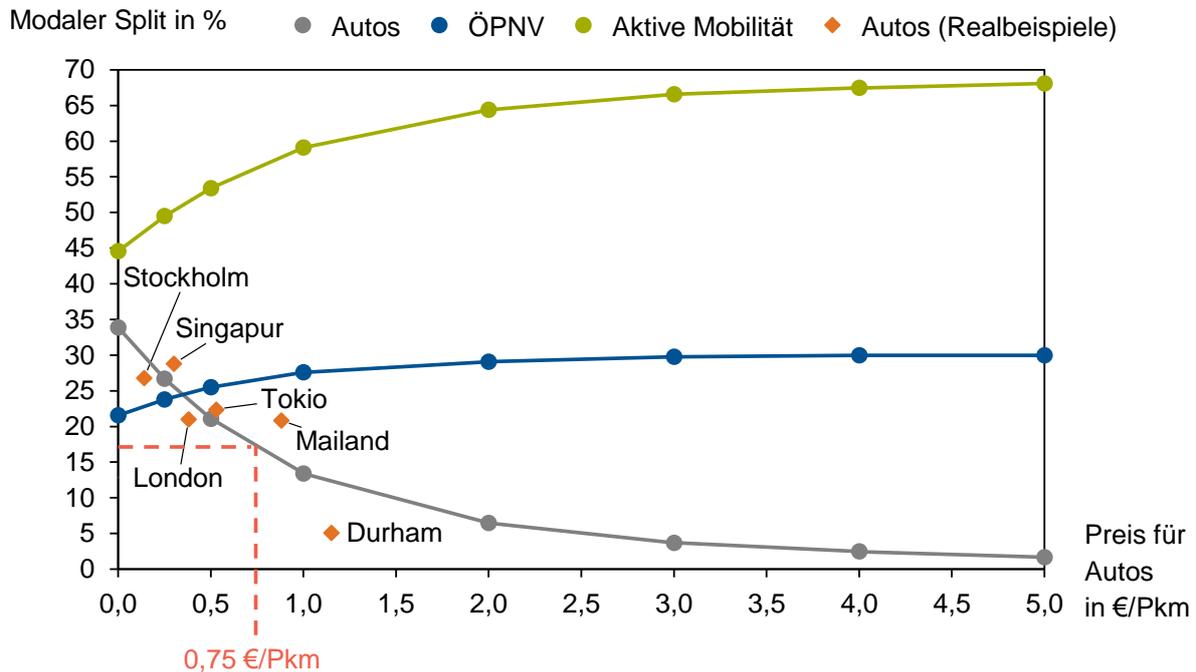


Abbildung 4.22: Änderung des Modal Splits bei Variation der Autobepreisung von 0 bis 5 €/Pkm und Vergleich zu Realbeispielen internationaler Städte mit Bepreisung des Straßenverkehrs

Für den Abgleich mit Realbeispielen von internationalen Städten, wie in Abbildung 4.22 angezeigt, müssen die Daten dieser Städte in das gleiche Format gebracht werden. Dabei braucht es zum einen den Wert für den neuen Modal-Split durch Reduktion des Autoverkehrs bei Bepreisung, aufgetragen auf der y-Achse der Abbildung. Dieser Wert ist aus der gängigen Literatur und dem Analyseberichten der Maßnahmen zur Bepreisung des Verkehrs zu entnehmen. Schwieriger wird es bei dem Wert der x-Achse. Die meisten Bepreisungen werden nicht nach Fahrtlänge oder Personenkilometern (Pkm) abgerechnet, sondern entweder als Tagespreis oder beim Durchfahren bestimmter Mautstationen / Straßenpunkten abgebucht. Dadurch ist es schwierig eine Relation zu der gefahrenen Strecke herzustellen. Im Folgenden wird das Vorgehen bei der Abschätzung von Preisen in €/Pkm für die einzelnen betrachteten Städte genauer erläutert. Vorab ist darauf hinzuweisen, dass es sich dabei um eine grobe Abschätzung mit Hilfe frei vorhandener Daten handelt, die eine Aussage ermöglichen soll, ob es sich bei den Simulationsergebnissen aus Kapitel 4.2 um plausible und belastbare Aussagen handelt. In Tabelle 4.1 sind die Abschätzungen der Preise in €/Pkm und weitere Informationen zur Mobilitätsbepreisung der Städte festgehalten.

London

Nach einer kurzen Testphase ist die „Congestion Charge Zone (CCZ)“ in London im Februar 2003 gestartet. Der Preis wird einmal am Tag in Höhe von 5 Pfund (5,76 €) für Straßenfahrzeuge, die in die Zone einfahren oder innerhalb der Zone fahren, erhoben. Die Verkehrsreduktion liegt bei 14% nach Einführung der Bepreisung [181]. Anwohner erhalten einen Rabatt von 90%, sodass nur ca. 30% aller Fahrten den vollen Preis zahlen [182]. Unter der Annahme, dass die Verkehrsreduktion nur von den Vollzahlern hervorgerufen wird, liegt die Verkehrsreduktion unter den Vollzahlern bei ca. 38%. Laut einer Studie liegt die durchschnittliche tägliche Autofahrdistanz im Londoner Stadtzentrum bei ca. 15 km pro Person pro Tag [183]. So lässt sich der Wert von

5,76€ pro Tag in ungefähr 0,38 €/Pkm umrechnen und zusammen mit der Reduktion des Verkehrs (Annahme Reduktion Autoverkehr gleich Reduktion Straßenverkehr) von 38% in die Abbildung 4.22 eintragen.

Tabelle 4.1: Übersicht der Bepreisungsarten und Auswirkungen auf den Autoverkehr internationaler Städte

Stadt	Art der Bepreisung	Betrachtungsjahr	Höhe des Preises	Umrechnung in €/Pkm	Verkehrsreduktion (Auto)	Quellen
London	Tagesticket innerhalb Zone	2003	5 Pfund (5,76 €)	~0,38 €/Pkm	38% für Vollzahler	[181–183]
Stockholm	Ein- und Ausfahrt der Zone	2006	20 SEK (1,68 €)	~0,14 €/Pkm	21%	[181, 184]
Mailand	Tagesticket innerhalb Zone	2012	5 €	~0,88 €/Pkm	38,5%	[181]
Durham	Tagesticket innerhalb Zone	2002	2 Pfund (2,29 €)	~1,15 €/Pkm	85%	[185]
Singapur	Maut-Stationen, Preis abhängig von Verkehr	1998	0 bis 2 US\$ (1,87€) pro Durchfahrt / 5 € pro Tag	~0,30 €/Pkm	15%	[182, 186–188]
Tokio	Ein- und Ausfahrt der Zone	Simulation aus 2003	400-600 Yen (ca. 3 €) pro Durchfahrt	~0,53 €/Pkm	34%	[189]

Stockholm

Mit einer 7-monatigen Testphase ist die Bepreisung in Stockholm im Januar 2006 gestartet und läuft noch heute weiter. Der Preis für eine Autofahrt fällt immer dann an, wenn die Zonengrenzen der „Charging Zone“ überschritten werden. Abhängig von der Tageszeit werden dabei bis zu 20 SEK (1,68 €) pro Ein- oder Ausfahrt abgerechnet, maximal sind es 60 SEK (5,05€) pro Tag bei der Einführung im Jahr 2006. Zur Einführung hat sich der Straßenverkehr um 21% reduziert [181]. In einer Studie wurde die durchschnittliche Autofahrtlänge eines Weges für ganz Stockholm in Höhe von ca. 12 km ermittelt [184]. Wenn bei einer Autofahrt die Zone zur Peak-Zeit durchfahren wird, ergibt sich ein spezifischer Kostenwert von ca. 0,14 €/Pkm.

Mailand

In Mailand handelt es sich auch um ein Tagesticket in Höhe von 5 €, das Autofahrten innerhalb der „area C“ ermöglicht. Diese Maßnahme wurde im Jahr 2012 eingeführt und hat zu einer Verkehrsreduktion innerhalb der „area C“ in Höhe von 38,5% geführt [181]. Daten für die durchschnittlichen Tagesfahrlängen von Autos in Mailand konnten leider nicht ermittelt werden. Deshalb wurde hier die Tagesstrecke von London und der Vergleich der beiden Zonengrößen zur Hilfe gezogen. Die „Congestion Charge Zone“ in London hat eine Größe von 21 km² und die Größe der „area C“ in Mailand ist 8 km². Aus dem Verhältnis lässt sich aus 15 km Tagesstrecke in der Zone von London 5,7 km Tagesstrecke in „area C“ von Mailand errechnen. So ergeben sich spezifische Kosten für Mailand in Höhe von 0,88 €/Pkm.

Durham

Durham ist eine kleine Stadt mit 42.000 Einwohnern im Norden Englands. Die bepreiste Zone liegt innerhalb des Stadtkerns auf einer Halbinsel und ist lediglich über eine Straße zu erreichen [185]. Die Länge der Straße beträgt ca. 900 m und macht zusammen mit ein paar kleineren Abzweigungen die gesamte Länge des Straßennetzes innerhalb der Bepreisungszone aus. Daher wurde hier von einer täglichen Fahrstrecke innerhalb der Zone von ca. 2 km gerechnet (einmal ein- und ausfahren). Der Tagespreis für das Befahren der Zone liegt bei 2 Pfund (2,29 €). Nach Einführung der Bepreisung hat dies zu einer Reduktion des Straßenverkehrs um 85% geführt [185]. Aus den oben genannten Annahmen lässt sich eine spezifische Bepreisung von 1,15 €/Pkm berechnen.

Singapur

Das ERP (Electronic Road Pricing) in Singapur ist weltbekannt und schon seit 1998 in Betrieb. Die Preise werden dynamisch nach Auslastung und Verkehr an Stationen auf den stadtnahen Schnellstraßen erhoben. Dabei lagen die Preise zu Beginn zwischen 0 und 2 US\$ bei Durchfahrt der Stationen [186]. Für Ausländer ist der Tagespreis auf 5 US\$ (4,68€) gedeckelt [188]. Dieser Wert soll auch Grundlage für die weitere Berechnung hier sein. In einer Studie für Singapur wird von 15,5 km durchschnittliche Autofahrstrecke pro Tag ausgegangen [187]. Dieser Wert wird hier verwendet, um die spezifischen Kosten in Höhe von 0,30 €/Pkm zu berechnen. Die Verkehrsreduktion nach Einführung des ERP lag bei 15% [182].

Tokio

Die Daten für Tokio basieren nicht auf Messdaten einer tatsächlichen Umsetzung der Bepreisung, sondern auf einer Simulation und Survey-Daten aus dem Jahr 2003 vor der tatsächlichen Einführung. Hier wird für „pricing zone 1“ mit ca. 500 Yen (ca. 3€) pro Durchfahrt der Zonengrenzen gerechnet. Für Hin- und Rückfahrt sind das ca. 6 € pro Tag. Über die Skalierung der Zonengrößen von London und Tokio, ergibt sich eine tägliche Fahrstrecke von 11,4 km für das Tokio Beispiel. Daraus errechnet sich die spezifischen Kosten in Höhe von 0,53 €/Pkm. Umfragedaten der Studie ergeben eine Verkehrsreduktion von 34%.

Nachdem alle Werte der Beispielstädte berechnet und in Abbildung 4.22 eingetragen wurden, zeigt sich, dass die Realbeispiele nur geringe Abweichungen zum Ergebnisgraphen der Simulation für die Änderung des Autoverkehrs aufweisen. Dies zeugt für eine Plausibilität der Ergebnisse. Die Limitationen in der Vergleichbarkeit von realen Bepreisungen und der Bepreisung in €/Pkm aus dieser Arbeit wird in Kapitel 5 weitergehend diskutiert.

Eine letzte Auswertung der Sensitivitätsanalyse wurde hinsichtlich des ökonomischen Status der Autofahrer durchgeführt. Hier wurde die Hypothese „Bei hohen Preisen fahren nur noch die reichen Menschen Auto“ überprüft. In Abbildung 4.23 ist zu erkennen, wie bei niedrigen Preisen zunächst die Autofahrer mit niedrigem oder sehr niedrigem ökonomischem Status abspringen und auf alternative Verkehrsmittel umsteigen. Ab ca. 1 €/Pkm findet die Reduktion in allen Klassen gleichermaßen statt. Dies bedeutet, dass bis zu einem bestimmten Level in der Tat die Hypothese zutrifft. Ab höheren Preisniveaus fahren allerdings nur noch die Menschen die tatsächlich auf das Auto angewiesen sind und das in allen ökonomischen Klassen gleichermaßen.

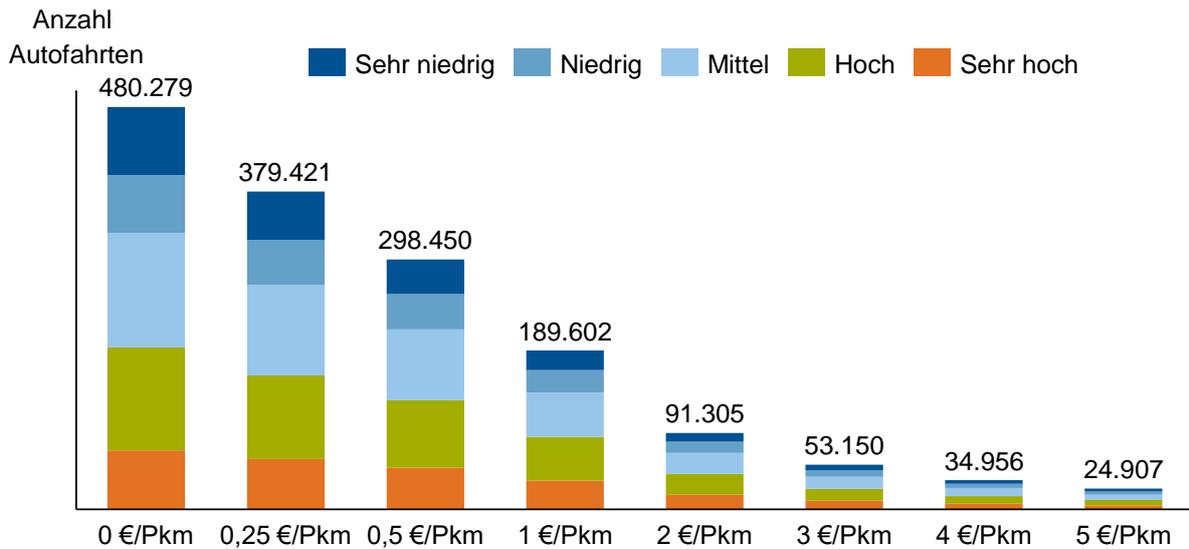


Abbildung 4.23: Ökonomischer Status der Autofahrer bei unterschiedlichen Autobepreisungsniveaus

Zusätzlich zu der Sensitivitätsanalyse sollen die Größenordnungen der Simulationsergebnisse durch Vergleich mit der MiD Studie sowie den Kostenergebnissen aus Kapitel 4.1 plausibilisiert werden. Tabelle 4.2 zeigt eine Übersicht der Transportleistungen und Kosten, die für die Kostenergebnisse in Kapitel 4.1 und für die Simulationsergebnisse in Kapitel 4.2 verwendet wurden. Dabei wird deutlich, dass die Kostenwerte aus Kapitel 4.1 deutlich höher sind als die Inputs und Simulationsergebnisse aus Kapitel 4.2. Die externen Kosten der Kostenergebnisse aus Kapitel 4.1 sind beispielsweise knapp siebenmal größer als die externen Kosten aus den Simulationsergebnissen für Szenario 0. Dies kann allerdings mit der geringen Transportleistung in der Simulation begründet werden. Sowohl der MITO-Input als auch das Basis Szenario weisen eine knapp sechsmal kleinere Transportleistung auf. Dies liegt vor allem an der Filterung der Wege des urbanen Münchens, die für die Simulation verwendet werden. Dabei werden nur Wege berücksichtigt, die innerhalb des städtischen Gebiets von München beginnen und auch enden. Durch den Abgleich der Größenordnungen wird jedoch deutlich, dass die absoluten Zahlen der Simulationsergebnisse weniger Aussagekraft als die relativen Verhältnisse zwischen Verkehrsmitteln und Bepreisungsszenarien haben.

Tabelle 4.2: Vergleich der Transportleistung und Kosten von MiD, Kostenergebnissen aus Kapitel 4.1 und Simulationsergebnissen aus Kapitel 4.2

Parameter	MiD in München [168]	Daten für Kostenergebnisse aus Kapitel 4.1 (Tabelle A.6)	Input aus MITO (Kosten sind Ergebnis der Simulation)	Simulationsergebnisse für das Basis Szenario
Anzahl Wege pro Jahr (gesamt)	4,80 Mio. x 365 Tage = 1,75 Mrd.	-	1,42 Mio. x 365 Tage = 0,52 Mrd.	1,42 Mio. x 365 Tage = 0,52 Mrd.
Personenkilometer pro Jahr (gesamt)	60 Mio. x 365 Tage = 21,90 Mrd.	17,40 Mrd.	8,46 Mio. x 365 Tage = 3,09 Mrd.	8,42 Mio. x 365 Tage = 3,07 Mrd.
Externe Kosten pro Jahr (gesamt) in €	-	2,1 Mrd.	0,94 Mio. x 365 Tage = 0,34 Mrd.	0,84 Mio. x 365 Tage = 0,31 Mrd.
Interne Kosten pro Jahr (gesamt) in €	-	3,8 Mrd.	1,85 Mio. x 365 Tage = 0,68 Mrd.	1,67 Mio. x 365 Tage = 0,61 Mrd.

Im folgenden Kapitel 5 wird die Methodik tiefergehend diskutiert und auf ihre Stärken und Schwächen untersucht. Außerdem werden die Ergebnisse aus Kapitel 4 im Gesamtzusammenhang der wissenschaftlichen Literatur, der politischen Situation und der potenziellen industriellen Anwendung weitergehend interpretiert und ausgewertet.

5 Diskussion

Im Folgenden werden die Schwächen und Stärken der Methodik diskutiert. Dabei wird festgestellt, wie aussagekräftig die Ergebnisse der Arbeit sind. Anschließend wird erörtert, inwiefern die Ergebnisse die in Kapitel 2.5 gestellten Forschungsfragen beantworten. Zum Schluss werden finale Schlussfolgerungen und Empfehlungen für Entscheidungsträger aus Politik und Wirtschaft sowie für die allgemeine Gesellschaft abgeleitet. Teile der folgenden Diskussion basieren auf bereits veröffentlichten Studien des Autors [127].

5.1 Limitationen

In diesem Kapitel werden die Grenzen dieser Arbeit erklärt und zudem begründet, welches Vorgehen verwendet wurde. Früh wurde sich dabei festgelegt, dass von den zwei Möglichkeiten der Internalisierung die Wahl auf die Besteuerung nach Pigou anstelle von Cap-and-Trade Systemen fiel. Dies liegt in dem Umfang der Arbeit begründet. Das Ziel dieser Arbeit, wie in Kapitel 1 erläutert, besteht darin, den gesamten Prozess von der Kostenbilanz im aktuellen Zustand bis zur Internalisierung und den resultierenden Veränderungen im Modal Split zu analysieren. Die Implementierung einer simplen Preisanpassung nach dem Pigou-Ansatz erwies sich dabei als weitaus unkomplizierter als die Einführung eines Cap-and-Trade-Systems. Letzteres erfordert eine detailliertere Darstellung komplexer Zusammenhänge, weil eigene Marktmechanismen und dynamische Preisstrukturen berücksichtigt werden müssen. In dieser Studie lag der Schwerpunkt auf einer festen Preisanpassung, wobei darauf hingewiesen wird, dass andere Untersuchungen, wie beispielsweise die von Servatius et al. [190, 191], diesen Ansatz auf ein Cap-and-Trade-System übertragen haben. Im Folgenden werden weitere Limitationen diskutiert:

Grundannahmen

Aufgrund der verfügbaren Daten liegt der Fokus dieser Arbeit ausschließlich auf dem Personenverkehr und konzentriert sich auf politische Empfehlungen zur Beeinflussung des Reiseverhaltens. Es ist jedoch wichtig zu betonen, dass der Güterverkehr einen erheblichen Beitrag zu den internen und externen Effekten im Verkehrssektor leistet. Die hier entwickelte Methode, könnte als Ergänzung zu anderen Datengrundlagen für den Güterverkehr genutzt werden, um die externen Kosten des gewerblichen Verkehrs zu quantifizieren. Es wäre möglich, die Auswirkungen von Logistikknotenpunkten, Lastenfahrrädern usw. anhand der internen und externen Kosten zu bewerten. Obwohl der Trend in städtischen Gebieten dahin geht, bei der letzten Meile vermehrt auf elektrifizierte Fahrzeuge und Fahrräder zu setzen, dominiert der Güterverkehr in diesen Gebieten immer noch durch Lkw und kleinere Nutzfahrzeuge mit niedrigen Elektrifizierungsraten. Daher verursacht der Güterverkehr pro Fahrzeugkilometer wesentlich höhere externe Kosten als der Pkw-Verkehr.

Der urbane Verkehr steht in starker Wechselwirkung mit der umliegenden Region aufgrund von beispielsweise Pendlerbewegungen und Verkehr, der durch Tagesausflüge ins Umland verursacht wird. Dennoch wurde in dieser Arbeit der Fokus auf den Verkehr und die Mobilität, die innerhalb der Stadtgrenzen von München entsteht, gelegt. Dies liegt einerseits an der Verfügbarkeit der Daten, die im Stadtgebiet deutlich höher ist. Andererseits unterscheidet sich die Nutzung von Verkehrsmitteln enorm zwischen Stadt und Land. Innerhalb des urbanen Raums besteht die Möglichkeit Sharing-Angebote von e-Scootern, Fahrrädern oder Autos wahrzunehmen, während auf dem Land nicht die Nachfragedichte besteht, um diese Services profitabel zu gestalten. Aufgrund der Wichtigkeit der ländlichen Mobilität haben Horlemann et al. [192] aufbauend auf den Methoden und Ergebnissen dieser Arbeit im Zuge des Forschungsprojekts SASIM (Kapitel 2.3.1) Weiterentwicklungen vorgenommen, die die externen Kosten und die Wirkung bestimmter Maßnahmen in verschiedenen ländlichen Regionstypen analysieren.

Als Referenzjahr für die Bestimmung aller Kosten und die Simulation der Bepreisung wurde das Jahr 2020 festgelegt. Jedoch unterscheiden sich die Bezugsjahre der Quellen in diesem Zusammenhang enorm. Dies liegt wiederum an der fehlenden Verfügbarkeit der zeitlich genau aufgeschlüsselten Daten für jedes Jahr. Die Studie Mobilität in Deutschland (MiD) [14] wird in unregelmäßigen und großen Abständen durchgeführt, sodass für diese Arbeit auf die neusten Daten aus dem Jahr 2017 zurückgegriffen werden muss. Dies ist der Fall für viele weitere Datenquellen. Aufgrund dieser Tatsache können Ungenauigkeiten in den Ergebnissen dieser Arbeit, die für das Jahr 2020 gelten, entstehen. Die Interpretation sollte daher als grobe Abschätzung für einen größeren Zeitraum um das Jahr 2020 herum stattfinden.

Es ist wichtig zu beachten, dass aufgrund der Makroebene des Kostenmodells und zahlreicher Vereinfachungen in der Modellierung diese Ergebnisse nicht für äußerst detaillierte Untersuchungen auf räumlicher Ebene herangezogen werden sollten. Zum Beispiel sollten Kreuzungen oder Straßenabschnitte nicht ohne den Gesamtzusammenhang der Vollkosten für sich betrachtet werden. Eine kritische Diskussion zum Vorgehen bei der Ermittlung der Vollkosten folgt im Weiteren.

Vorgehen interne Kosten

Die Bestimmung der internen Kosten mit dem TCO-Ansatz ist stark von Marktdaten abhängig, die häufig zeitliche Schwankungen aufweisen. Die Marktdaten stammen entweder von Anbietern eines Produkts (zum Beispiel Reifen) oder einer Dienstleistung (Reparatur, TÜV, etc.). Die Anbieter können ihre Preise frei wählen und die Preise schwanken stark zwischen den Orten und Zeitpunkten der angebotenen Dienstleistungen. Aus diesem Grund wurden in dieser Arbeit beispielhafte Werte gewählt, die das Mittel der Preise grob abdecken. Hinzu kommen Daten von unabhängigen Verbänden und Vereinen (ADAC, DAT, etc.), die zum Zwecke der Aufklärung der allgemeinen Gesellschaft und Industrie Daten sammeln und in Datenbanken veröffentlichen. Der ADAC veröffentlicht jährlich aktualisierte Werte zu den TCO verschiedener Fahrzeughersteller und Modelle. Andere Studien berücksichtigen ebenfalls nicht monetäre Faktoren in den internen (privaten) Kosten der Menschen. Gössling et al. [46] inkludieren so beispielsweise die erwartbare Reisezeit und den entstehenden Stress im Verkehr in den internen Kosten und quantifizieren diesen über den Wert der Zeit und anderen Methoden. In dieser Arbeit liegt der Fokus jedoch auf den rein operativen Kosten in der Nutzung der Verkehrsmittel. So wird quantifiziert mit welchen tatsächlichen Kosten der Nutzer des Verkehrsmittels konfrontiert ist. Erwartbare Reisezeit und Stress sind Faktoren, die die reisende Person in Kauf nehmen muss

und in der Entscheidung zur Wege- und Verkehrsmittelwahl zusätzlich zu den Kosten zu berücksichtigen sind.

Vorgehen externe Kosten

Im vorliegenden Abschnitt erfolgt eine kritische Auseinandersetzung mit der Methodik zur Bestimmung der externen Kosten, wobei potenzielle Ungenauigkeiten sorgfältig betrachtet werden. Bei der Quantifizierung der externen Kosten für die Stadt München ergeben sich Unsicherheiten durch verschiedene Vereinfachungen und Annahmen:

Die Werte für die Luftverschmutzung basieren auf Durchschnittsdaten und Berechnungen des Umweltbundesamts (UBA) und repräsentieren daher nicht exakt die tatsächliche Fahrzeugzusammensetzung in München. In Bezug auf die Klimakosten stützen sie sich auf durchschnittliche Verbrauchsdaten, wobei für den motorisierten Individualverkehr eine detailliertere Analyse empfohlen wird. Die Lärmkosten sind stark vom gesamten Verkehrsaufkommen abhängig, erfordern jedoch genaue Kenntnisse der Fahrleistung pro Verkehrsträger für eine präzise Berechnung. Die Flächennutzungskosten basieren auf Parkkostendaten aus einer Schweizer Studie, wodurch mögliche Unterschiede zu deutschen Kosten auftreten können. Die Berechnungen der Staukosten stützen sich auf Ergebnisse von INRIX, die möglicherweise nicht für alle Städte verfügbar sind. Die Unfallkosten hingegen basieren auf genauen Daten für den Münchner Verkehr und ermöglichen eine präzise Aufschlüsselung der Kosten. Jedoch könnten die Handlungsempfehlungen im Vergleich zum Verursacherprinzip variieren. Die Kosten der Barrierewirkungen beruhen auf einer amerikanischen Studie, was als starke Vereinfachung betrachtet wird.

Diskrepanzen zwischen der angewandten Methode und den erwarteten Ergebnissen sind möglich. Zahlreiche Studien weisen darauf hin, dass höhere Kosten für externe Effekte geschätzt werden, wenn das Ausmaß der Unsicherheiten in der Methode steigt [193–195]. Eine weitere Unsicherheit betrifft die ökonomische Bewertung externer Effekte, wobei verschiedene Methoden wie Schätzungen von Schäden, Vermeidungs- oder Ersatzkosten in der Literatur hervorgehoben werden [196, 197]. Sensitivitätsanalysen wurden vorherigen Studien durchgeführt, um mögliche Schwankungen der Ergebnisse aufzuzeigen [127]. Eine weitere Unsicherheit ergibt sich aus möglichen Diskrepanzen zwischen politischen Maßnahmen und den erzielten Ergebnissen. Studien weisen darauf hin, dass eine Politik, die das Verursacherprinzip umsetzt, zu unerwarteten oder unerwünschten Konsequenzen führen können, wie soziale Ungerechtigkeit oder erhöhte Externalitäten [198, 199]. Daher sollten die Ergebnisse als grober Fahrplan für langfristige Strategien interpretiert werden, wobei Städte wie München vorsichtig vorgehen und zusätzliche Studien sowie Empfehlungen in Betracht ziehen sollten.

Bei der zeit-räumlichen Varianz der externen Kosten wurden diese hauptsächlich für Autos aufgeschlüsselt. Grundsätzlich sollen die Varianzen für die Kostenkategorien mit dem größten Kostenanteil bei den einzelnen Verkehrsmitteln bestimmt werden. Bei den öffentlichen Verkehrsmitteln wurden diese Varianzen für die Flächenkosten nicht berücksichtigt, weil diese Varianzen eine deutlich höhere Komplexität aufweisen, die im Umfang dieser Arbeit nicht ausreichend behandelt werden konnten. Dazu gehören die Infrastrukturkosten und weitere damit verbundenen öffentlichen Investitionen, die über das Verfahren der Standardisierten Bewertung [200] ermittelt und bewertet werden. Die räumlichen und zeitlichen Abhängigkeiten sind in diesem Fall deutlich individueller und lassen sich nicht vereinfacht über Immobilienpreise in den verschiedenen Stadtteilen berechnen. Ein weiterer großer Kostenfaktor der öffentlichen Verkehrsmittel sind die Verspätungskosten, die unter die Kategorie Stau fallen. Hier sind die zugrundeliegenden Daten nicht örtlich und zeitlich aufgelöst, sodass hier keine Varianz bestimmt

werden kann. Für die aktive Mobilität wurde die zeitlich und räumliche Varianz lediglich für die Unfallkosten bestimmt, weil diese den mit Abstand größten Kostenanteil aufweisen. Die räumlich und zeitlich variablen externen Kosten wurden für die Anwendung in den Bepreisungsszenarien entwickelt. In der Simulation der Szenarien besteht nicht die Möglichkeit, Sharing Services zu bepreisen, daher wurden die zeitlich-räumlichen variablen externen Kosten für diese Dienstleistungen nicht berechnet.

Externe Kosten von Autos weisen in dieser Arbeit die meisten räumlichen und zeitlichen Varianzen auf. Jedoch sind auch hier Limitationen in der Methodik festzustellen. Besonders bei der Berücksichtigung von Staus und Kapazitäten von Straßen wurden im Vergleich zu anderen Studien (Zhang et al. [162]) deutliche Vereinfachungen getroffen. Dies ist mit dem bereits umfassenden Umfang der Arbeit begründet. Zukünftige Arbeiten sollten das hier verwendete Modell, mit räumlichen Varianzen auf Straßentypenebene und zeitlichen Varianzen mit fünf verschiedenen Tageszeiten, weiterentwickeln und detailreicher ausgestalten. Die räumlichen Varianzen für Flächenkosten sind auf Ebene der Stadtviertel aufgeschlüsselt. Auch hier kann eine detailliertere Datenlage zu genaueren Ergebnissen führen. Allgemein ist die Datenlage und Verfügbarkeit von Daten ein limitierender Faktor, der zu vielen Vereinfachungen führt. So wurde beispielsweise der Zusammenhang von Unfallschwere und Geschwindigkeit zwischen Auto und Fahrrädern in Schweden im Jahr 2015 (Kröyer [155]) auf alle Unfälle von Autos in München im Jahr 2020 übertragen. Grundsätzlich bietet die hier vorgestellte Methodik jedoch die einfache Einbindung von genaueren und aktuelleren Parametern für die aufgestellten Formeln. Die hier verwendeten Parameter sind in den Tabellen im Anhang aufgelistet.

Vorgehen Simulation und Bepreisung

Bei der Auswahl der Simulationsumgebung wurden einige Vereinfachungen getroffen. Die Simulation der Auswirkungen einer vollkostenbasierten Bepreisung limitiert sich in dieser Arbeit rein auf die Verkehrsmittelwahl. In der Realität hat eine Mobilitätsbepreisung jedoch ebenfalls Einfluss auf die gewählte Route, den Abfahrtszeitpunkt, sowie die Auslastung der Straßen. Diese Faktoren bleiben in dieser Arbeit konstant und weitere dynamische Zusammenhänge, wie die gegenseitige Beeinflussung der Verkehrsteilnehmer, bleiben unberücksichtigt, sodass der Fokus auf der Veränderung des Modal Split liegt. Weiterhin sind dynamische Effekte auf die Höhe der externen Kosten und somit Preise nicht berücksichtigt. In der Realität reduzieren sich die Staukosten bei geringerer Auslastung der Straßen durch die Bepreisung und dadurch müsste sich der Preis ebenfalls verringern. Vrtic et al [111] sowie Chakirov [110] aus der Gruppe von Prof. Axhausen der ETH Zürich berücksichtigen neben der Verkehrsmittelwahl auch die Auswirkungen einer Mobilitätsbepreisung auf den Abfahrtszeitpunkt und die Routenwahl. Dazu nutzen sie unter anderem agentenbasierte, mesoskopische Verkehrsmodelle wie MATSim, die deutlich höhere Komplexitäten und Rechenzeiten aufweisen als das hier verwendete Verkehrsmittelwahlmodell. Ebenfalls vernachlässigen die genannten Studien die Preisbestimmung anhand von internen und externen Kosten. Eine weitere Limitation des hier verwendeten Verkehrsmittelwahlmodells sind die Parametrierungsdaten. Diese basieren auf der Studie „Mobilität in Deutschland (MiD)“ [14] aus dem Jahr 2017 und berücksichtigen weder Bepreisung noch Vollkosten. Für diese Arbeit wurde die Annahme getroffen, dass das Verhalten der Menschen bei einer vollkostenbasierten Bepreisung in etwa einer Erhöhung der Treibstoffkosten entspricht. Zukünftige Arbeiten sollten einen Stated-Preference Survey mit Berücksichtigung von vollkostenbasierter Bepreisung durchführen und die Ergebnisse zu Parametrierung des Verkehrsmittelwahlmodells nutzen.

In Kapitel 3.2.3 wurde ein großer Raum an Möglichkeiten für die Auswahl der Bepreisungsszenarien vorgestellt. Jedoch wurde die Auswahl durch das Simulationsframework und der Verfügbarkeit auf fünf Szenarien limitiert. Die Variation in den Szenarien basiert schlussendlich lediglich auf der Auswahl der bepreisten Verkehrsmittel und der Höhe der Bepreisung unter Berücksichtigung von internen und beziehungsweise oder externen Kosten. Die präsentierten Szenarien können in der Realität zu erheblichen Veränderungen im Verkehrssystem führen, die noch viele weitere Aspekte im urbanen Verkehr wie zum Beispiel soziale Ungleichheit und vieles mehr hervorrufen. Daher dient die Szenarioanalyse hier als theoretische Abschätzung der Entwicklung des Modal Split und empfiehlt eine strategische Ausrichtung der Verkehrsplanung zur Einführung einer Bepreisung.

Ergebnisse Kosten

Die Ergebnisse zu den internen und externen Kosten der urbanen Mobilität müssen unter den Randbedingungen und Limitationen der Methodik betrachtet werden. Bei den internen Kosten bedeutet dies, dass TCO-Kosten für private Fahrzeuge und Service-Preise von öffentlichen Transportdiensten bedingte Vergleichbarkeit aufweisen. Dies liegt vor allem an der starken Abhängigkeit von den Annahmen zur durchschnittlichen Reiseentfernung pro Fahrt. Außerdem werden Abonnements und weitere Vergünstigungen im Service nicht berücksichtigt. Die aktuelle Ausgabe des ADAC Berichts für 2024 [201] gibt deutlich höhere als die in dieser Arbeit ermittelten Werte für die internen Kosten des Autos an. Die Werte dieser Arbeit beziehen sich auf das Referenzjahr 2020. Seitdem haben die Inflation und die erhöhten Betriebskosten für Strom und Kraftstoff die TCO deutlich gesteigert.

Bei den externen Kosten liegt eine bedingte Vergleichbarkeit von den Kostenkategorien, die Kosten verursachen und dem Nutzen, der Kosten einspart, vor. Für den Nutzen aktiver Mobilität wurde die Methodik der WHO [65] verwendet. Dabei wurde ein Nutzen (negative Kosten) berechnet, der weit über die negativen Einflüsse (Kosten) hinaus geht (Kapitel 4.1). Die Werte liegen auf unterschiedlichen Größenskalen, sodass eine Verrechnung der beiden Werte mit Vorsicht betrachtet werden sollte. Die Werte von anderen Studien (zum Beispiel Gössling et al. [46]) zum Gesundheitsnutzen weichen ebenfalls von den hier berechneten Werten ab. Dies kann in diesem Fall daran liegen, dass die gewonnene relative Lebenszeit durch aktive Mobilität oder der statistische Wert eines Lebens als zu hoch angenommen sind.

Insgesamt dienen die Ergebnisse in € pro Personenkilometern zum relativen Abgleich der Kosten von verschiedenen Verkehrsoptionen. Die Aufstellung der gesamten Kosten soll aufzeigen, welche Transportmittel und Kostenfaktoren den größten Einfluss auf die Verursachung der Kosten im urbanen Verkehr haben. In Kapitel 5.3 werden daraus allgemeine Schlussfolgerungen und Empfehlungen abgeleitet.

Ergebnisse Simulation

Für die Darstellung der Ergebnisse der Simulation liegt der Fokus auf der Veränderung des Modalen Splits, der Kostenreduzierung und der Fahrzeitänderung. Alle Ergebnisse von Kosten, Fahrzeit, etc. ändern sich jedoch lediglich aufgrund der Änderung der Verkehrsmittelwahl in den verschiedenen Szenarien. Dies bedeutet, dass sich die Summe der gesamten Fahrzeit über die Szenarien erhöht, weil langsamere Verkehrsmittel wie Fußgänger oder Fahrrad gewählt wurden. Eine Ausnahme betrifft das alternative Routing, das in den Ergebnissen als letztes Szenario vorgestellt wird. Hier sind Kosten und Fahrzeit durch die Auswahl kostengünstigerer Routen verändert. Deutliche Abweichungen sind im Modal Split zwischen dem Input und dem Basis-Szenario zu erkennen. Dies ist in erster Linie in der Beschränkung auf Wege mit Start- und Endpunkt innerhalb des urbanen Raums Münchens begründet. Dadurch wurde ein Großteil des

urbanen Verkehrs in München herausgefiltert. Wegeketten werden gegebenenfalls dadurch aufgebrochen. Bei der neuen Verteilung der Verkehrsmittel im Basis-Szenario kann daher die bessere ÖPNV-Anbindung für Wege innerhalb der Stadtgrenzen den Modal Split für ÖPNV im Vergleich zum Input erhöhen. Ein Abgleich mit den MiD-Daten für den Stadtraum München dokumentiert jedoch, dass der Modal Split des Basis-Szenarios bessere Übereinstimmungen mit der Studie zeigen als der Input Modal Split (Kapitel 4.2).

Die Darstellungen für die räumlichen Veränderungen der Kosten als Heatmap waren lediglich für Szenario 0 und 1 möglich. Die hohen Anforderungen an die Rechenkapazität verhinderten die Berechnung weiterer Szenarien. Der Mehrwert der Darstellung liegt in der Verdeutlichung der Reduzierung der Kosten an bestimmten Knotenpunkten, an denen sich die Kostenerzeugung besonders ansammelt. So wird deutlich, dass die Bepreisung nicht räumlich gleichmäßig verteilt die Kostenerzeugung abbaut, sondern dies vor allem an kostenintensiven Stellen tut.

Plausibilisierung

Durch die Sensitivitätsanalyse konnte die Verkehrsmittelwahl für verschiedene feste Preise von 0 bis 5 €/Pkm bestimmt werden. Dadurch war ein Abgleich mit Beispielen aus der Realität bedingt möglich. Jedoch gibt es hier ebenfalls vielfältige Limitationen, die die Vergleichbarkeit der Simulationsergebnisse und Bepreisungen in realen Städten einschränken. Zum einen gibt es kein Realbeispiel, das in €/Pkm bepreist, sodass hier mit mittleren Fahrstrecken von Autos umgerechnet werden musste. Dies kann zu Ungenauigkeiten führen, weil die Datenlage zu den Fahrstrecken nicht ausreichend war, und Abschätzungen über die räumliche Größe der bepreisten Zone vorgenommen werden mussten. Zum anderen verzerren die unterschiedlichen Topografien und Größen der Städte aus den Realbeispielen die Vergleichbarkeit zusätzlich. Durch unterschiedlichen Wohlstand und ökonomische Zahlungsbereitschaft der Bevölkerungen in den Beispielstädten ist die Vergleichbarkeit zusätzlich beeinträchtigt. Dennoch wurde ein einheitliches Vorgehen im Abgleich der Städte mit den Simulationsergebnissen gewählt. Unter Berücksichtigung von gewissen Abweichungen kann somit trotzdem ein Trend im Rückgang des Autoverkehrs bei Erhöhung der Bepreisung in realen Städten festgestellt werden, der mit dem Trend der Simulationsergebnisse übereinstimmt.

Eine weitere Plausibilisierung wurde durch den Vergleich von Transportleistung und Kosten aus der MiD Studie, der Kostenberechnung und den Simulationsergebnissen vorgenommen. Dabei wird deutlich, dass die Transportleistung der Simulation deutlich geringer ist als in der Kostenberechnung und in der MiD Studie. Dies liegt an der mehrfach erwähnten Filterung der Wege nach Wegen mit Start- und Zielpunkt innerhalb des urbanen Raum Münchens. Die berechneten Kosten in der Simulation sind im ungefähr gleichen Maße reduziert, wie die Kosten bei der Vollkostenberechnung. Dies zeugt für eine gute relative Aussagekraft der Ergebnisse. Jedoch sind die absoluten Kostenergebnisse der Simulation lediglich mit den genannten Einschränkungen zu verwenden.

5.2 Beantwortung der Forschungsfragen

1. Wie setzen sich die gesamten Vollkosten der urbanen Mobilität für jedes einzelne Verkehrsmittel des städtischen Raums zusammen?

In der Methodik wurde der Begriff Vollkosten als Summe der internen und externen Kosten definiert. Die Zusammensetzung der internen und externen Kosten wurde über die jeweiligen Kostenkategorien vorgenommen. Die internen Kosten für private Fahrzeuge setzen sich aus

Kosten für Wertverlust, Energie, Instandhaltung, Versicherung, Steuern und Parken zusammen. Die internen Kosten für öffentliche Transportservices bestehen lediglich aus den Service-Preisen, die der Nutzer zahlen muss. Die externen Kosten setzen sich für alle Verkehrsmittel aus Kosten für Luftverschmutzung, Klima, Lärm, Flächenverbrauch, Stau, Unfälle und Barriere Effekte zusammen. Neben Kosten können aktive Verkehrsmittel auch Nutzen (negative Kosten) erzeugen, wodurch Kosten im Gesundheitssystem gespart werden können.

In der ersten Forschungsfrage verbirgt sich ebenfalls die Frage nach der Höhe der einzelnen internen und externen Kostenkategorien. Diese sind in den Abbildungen aus Kapitel 4.1 für jedes einzelne urbane Verkehrsmittel dargestellt. Bei den internen Kosten ist dabei festzustellen, dass die Service Preise der Sharing Angebote die Kosten aller anderen Verkehrsmittel weit überragen. Fahrrad und Fußgänger bewegen sich am kostengünstigsten. Bei den externen Kosten sind die höchsten Kosten von e-Scooter Sharing, Verbrennerautos und Motorrädern zu erwarten. Die günstigsten Verkehrsmittel für die Gesellschaft sind U- und S-Bahn sowie Fußgänger. Wenn die gesamten Vollkosten für ganz München betrachtet werden, sind Diesel und Benziner Autos mit zusammen rund 75% die größten Kostenverursacher. Bei den externen Kosten sind Flächenverbrauch (31%), Stau (22%) und Unfälle (18%) die größten Kostenpunkte.

Die erste Forschungsfrage konnte somit größtenteils beantwortet werden. Ob mit dieser Analyse langfristig alle urbanen Verkehrsmittel abgedeckt sind, ist jedoch zu hinterfragen. Angebote wie Fahrrad-Sharing und on-demand Shuttles sind heute schon auf dem Markt und nicht in der Analyse inbegriffen. Neue Technologien wie Automatisierung der Verkehrsservices können sowohl die internen als auch die externen Kosten im urbanen Verkehr stark beeinflussen.

2. Wie verändert die vollkostenbasierte Bepreisung urbaner Verkehrsmittel den Modal Split und die gesamten Vollkosten des Verkehrssystems?

Die vollkostenbasierte Bepreisung wurde in fünf verschiedenen Szenarien simuliert. Dabei wurden die externen, internen und Vollkosten in den verschiedenen Szenarien als zusätzlicher Preis auf die Standardkosten der Verkehrsmittel addiert. Die Preise für die Routen waren dabei abhängig von den raum-zeitlich variierenden externen Kosten. Zwei verschiedene Routing Optimierungsziele wurden untersucht. In Szenario 5 wurde die Summe aus internen und externen Kosten (Vollkosten) bepreist. Dabei wurden mit zeitoptimiertem Routing 26% der Vollkosten eingespart. Der Modal Split von Autos hat sich von 33% auf 22% reduziert, ÖPNV hat sich von 22% auf 26% erhöht. Den größten Zuwachs haben Fahrradfahrer und Fußgänger bekommen. Ihr Anteil ist zusammen von 45% auf 52% gestiegen. Der Modal Split wird in diesem Fall in Anteil Wege dargestellt.

Die zweite Forschungsfrage ist durch die hier verwendete Methodik und die gezeigten Ergebnisse vollständig beantwortet, jedoch wird die Anwendung einer vollkostenbasierten Bepreisung in der Realität noch weitere Folgen auf das Mobilitätsverhalten der Menschen haben. Diese sollten in weiteren Analysen und bei Empfehlungen für Politik und anderen Entscheidungsträgern berücksichtigt und analysiert werden. Im nächsten Kapitel werden Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen dieser Arbeit gezogen und Empfehlungen werden vorsichtig formuliert und diskutiert.

5.3 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Im folgenden Kapitel soll der Nutzen dieser Arbeit diskutiert werden. Dabei werden Schlussfolgerungen und Empfehlungen aus den Ergebnissen abgeleitet.

Zum einen bieten Informationen über Mobilitätskosten und transparente Einblicke den Nutzern von Verkehrsmitteln eine verbesserte Grundlage für Mobilitätsentscheidungen. Der Wechsel von individuellem Autoverkehr zu Fahrrad oder öffentlichem Personennahverkehr resultiert nicht nur in unmittelbaren finanziellen Einsparungen für den Einzelnen, sondern reduziert auch den CO₂-Ausstoß, minimiert den Flächenverbrauch, verringert die Gesundheitskosten und vieles mehr. Diese Faktoren sind nicht nur abstrakte gesellschaftliche Aspekte, sondern manifestieren sich als real existierende Kosten für jeden einzelnen Bürger (Kapitel 4.1). Auf Basis solcher Informationen könnte die Politik beispielsweise eine Transparenzkampagne durchführen und mithilfe von Marketinginstrumenten nachhaltige Mobilität fördern.

Zum anderen unterstützt die transparente Darstellung der Vollkosten die politische Entscheidungsfindung im Hinblick auf Investitionen. Der Ausbau von Schienennetz-, Fahrradwegen oder Straßen führt häufig zu Kontroversen. Durch die räumliche Auflösung von zum Beispiel Unfallkosten können Gefahrenstellen identifiziert und gezielte Investitionen in die Fahrradinfrastruktur vorgenommen werden. Ein Blick auf die tatsächlichen Kosten trägt zu mehr Objektivität in der Diskussion in der Verkehrswende bei. Es wird deutlich, dass jedes Mobilitätsverhalten höhere Kosten verursacht, als bisher bekannt war – Kosten, die dem Steuerzahler unbewusst auferlegt werden. Durch die Steuersätze für Energieerzeugnisse (früher Mineralölsteuer und nicht zweckgebunden) ist heute nur ein Bruchteil der externen Kosten internalisiert. Bei 65,45 cent pro Liter Benzin [202] zahlt ein Autofahrer ca. 3 cent/Pkm für den Steuersatz (Annahme: 6,5 l/100km Verbrauch und Besetzungsgrad von 1,5). Bei 16 cent/Pkm externe Kosten für Benziner Autos sind das gerade 19%. Zudem zeigen sich erhebliche Unterschiede in den tatsächlichen Kosten zwischen den verschiedenen Mobilitätsoptionen. Der motorisierte Individualverkehr vor allem durch Verbrennerautos verursacht den größten Kostenanteil. Aktive Mobilität und der ÖPNV sind dagegen nur für einen Bruchteil der Kosten verantwortlich. Hinzu kommt, dass innerhalb der Stadtgrenzen die Zeitverluste beim Umstieg von Auto auf ÖPNV oder Fahrrad gering sind. Diese Ergebnisse und Zusammenhänge bieten der Politik und anderen Entscheidungsträgern eine begründete Entscheidungsgrundlage für den Abbau von Subventionen für Autoverkehr innerhalb der Stadt und den Ausbau von Initiativen zur Förderung des Radverkehrs.

Der Neuigkeitswert dieser Arbeit im Vergleich zur bestehenden Literatur (Kapitel 2.2) liegt in der Aussagekraft der Vollkostenauswertungen auf urbaner Ebene. Der Vergleich der spezifischen Kosten zwischen motorisiertem Individualverkehr inklusiver verschiedener Antriebstypen, ÖPNV-Optionen, Sharing Dienstleistungen und aktiver Mobilität ist einmalig in der Literatur. Die Darstellung in Abbildung 4.4 (Kapitel 4.1) beispielsweise verdeutlicht die externen Kosten der urbanen Verkehrsoptionen und deren Ursachen wie keine Studie zuvor. Auf einen Blick werden die Problempunkte des urbanen Verkehrssystems deutlich: e-Scooter verursachen zu viele Kosten durch Unfälle, Fahrräder sind in zu viele selbstverschuldete Unfälle involviert, die Kosten der Verbrennerautos kumulieren aus verschiedensten Ursachen, Benziner Mopeds verursachen zu viel Lärm. Gleichzeitig zeigt es damit ebenfalls Lösungen auf: Der ÖPNV verursacht die geringsten externen Kosten, aktive Mobilität weist trotz der hohen Unfallkosten vergleichsweise niedrige externe Kosten auf. Aus der Ableitung der Erkenntnisse aus den Kostengraphen lassen sich weitere Schlussfolgerungen ziehen: Die Sicherheit der e-Scooter Fahrten und aktiven Mobilität muss erhöht werden, motorisierter Individualverkehr muss im urbanen Raum teilweise durch alternative Verkehrsmittel ersetzt werden.

Die Wahl von Verkehrsmittelalternativen wird in dieser Arbeit mit der vollkostenbasierten Bepreisung untersucht (Kapitel 4.2). Durch die Bepreisung soll in der Theorie die Internalisierung der wahren Kosten umgesetzt werden. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass sich der Verkehr von kostenintensiven Verkehrsmitteln wie das Auto reduziert. Im Vergleich zur Literatur ist dies

zunächst keine neue Erkenntnis. Auch in der Realität zeigt sich, dass sich der Autoverkehr reduziert, wenn dieser bepreist wird. Der Neuigkeitswert der Ergebnisse aus Kapitel 4.2 liegt einerseits in dem relativen Verhältnis der Auswirkungen verschiedener Bepreisungsszenarien, in denen neben Autos auch ÖPNV und aktive Mobilität bepreist wurde. Dadurch ergibt sich ein Trade-off aus Bepreisungshöhe, Kostenreduktion und Fahrtzeit. Das Szenario mit den höchsten Preisen für Autos zeigt die höchste Reduktion an Vollkosten, aber auch die höchste Zunahme an Fahrdauer. Dies liegt an der Präferenz von Autofahrern eher auf aktive Mobilität als auf den ÖPNV umzusteigen. Daraus kann eine fehlende Attraktivität oder Erreichbarkeit des ÖPNV abgeleitet werden. Ein weiteres Novum dieser Studie im Vergleich zur bestehenden Literatur ist die Berücksichtigung von externe-Kosten-optimiertes Routing und zeit-räumlichen Varianzen der externen Kosten. In den Simulationsergebnissen der Bepreisung wird in diesem Zusammenhang deutlich, dass einzelne Straßenabschnitte des Münchner Netzwerks besonders durch Externalitäten belastet sind. Aus den Ergebnissen der Bepreisungsszenarien mit externe-Kosten-optimiertem Routing folgt die Empfehlung, den Verkehr über kostengünstigere Routen umzuleiten, um die Externalitäten der belasteten Straßenstücke zu senken und die Gesamtkosten zu reduzieren.

Im EU-Dokument "State of play of Internalisation in the European Transport Sector" [203] werden für die Internalisierung externer Kosten drei Ziele genannt: Verhaltensbeeinflussung, Gewinnerzielung und Erhöhung der Fairness. Insbesondere die Fairness kann gesteigert werden, wenn die verursachten Kosten den Verursachern zugerechnet werden. Die Ergebnisse der Simulation zeigen, dass dies durch die Einführung einer flächendeckenden vollkostenbasierten Mobilitätsbepreisung möglich ist. Der Autoverkehr wird reduziert und aktive Mobilität gefördert. Insgesamt führt dies zu einer deutlichen Reduktion der Kosten für Privatpersonen und der gesamten Gesellschaft. Digitale Produkte wie Mobility-as-a-Service (MaaS)-Plattformen können bei der konkreten Umsetzung der Bepreisung aller Verkehrsmittel helfen, indem sie für ein einheitliches Ticketing-System sorgen. In diesem System werden die Ticketpreise dynamisch an den verursachten Vollkosten (interne und externe Kosten) der Verkehrsmittel angepasst. Weitere Bepreisungsansätze verfolgen das Konzept von Cap-and-Trade-Systemen. Ein Vorschlag der TU München beinhaltet das Konzept von Mobility Coins [92], die je nach Nachhaltigkeit des Verkehrsmittels für deren Nutzung ausgegeben werden. Am Ende eines Monats können die Mobility Coins je nach Mobilitätsverhalten und Verbrauch auf einem eigenen Marktplatz ge- oder verkauft werden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Politik und Gesellschaft haben den Anspruch, die urbane Mobilität nachhaltiger und lebenswerter zu gestalten. Dazu müssen Ineffizienzen, Emissionen und Gefahrenstellen im Verkehr reduziert und systematisch abgebaut werden. Die Theorie der Vollkosten bietet ein Mittel an, um den Status Quo der Nachhaltigkeit zu quantifizieren. Dadurch lässt sich feststellen, welche Stellhebel und Maßnahmen sinnvoll sind, um die Nachhaltigkeit im urbanen Verkehr zu verbessern.

Ein Ziel dieser Arbeit ist es, die Vollkosten und damit die internen und externen Kosten der urbanen Verkehrsmittel zu bestimmen. Dazu wird zunächst eine Methodik entwickelt, die es ermöglicht, mit existierenden Daten die internen und externen Kosten zu berechnen. Die neu entwickelten Formeln ermöglichen die Errechnung von durchschnittlichen internen und externen Kosten in €/Pkm für ein gesamtes Stadtgebiet. Die Methodik ermöglicht es hierbei erstmals, private Fahrzeuge mit öffentlichem Transport wie ÖPNV oder Sharing-Angeboten in einer Kosteneinheit miteinander zu vergleichen. Die internen Kosten setzen sich für private Fahrzeuge aus den TCO-Kostenkategorien Wertverlust, Energie, Instandhaltung, Versicherung, Steuern und Parken zusammen. Die internen Kosten des ÖPNV und der Sharing Anbieter werden über die abgerufenen Service Preise definiert. Für die Berechnung der externen Kosten wurden für alle Verkehrsmittel die gleichen Kostenkategorien ermittelt. Dabei waren Luftverschmutzung, Klima, Lärm, Flächenverbrauch, Stau, Unfälle und Barriere Effekte die signifikantesten Einflussfaktoren auf die Höhe der Externalitäten im urbanen Verkehr und wurden somit in diesem Maße für diese Arbeit berücksichtigt. Zudem wurde die Methodik der durchschnittlichen und konstanten externen Kosten um zeitlich und räumlich variable Faktoren erweitert. Durch Berücksichtigung von zeitlich und räumlich variablen Stauänderungen, Geschwindigkeiten, Straßentypen, Einwohnerdichten, Flächenpreisen und Unfallorten konnten die externen Kosten für jedes Straßensegment des Netzwerks und jede Tageszeit individuell berechnet werden.

Die Ergebnisse wurden anhand des Fallbeispiels München erzeugt. Dabei zeigte sich, dass unter den Verkehrsmitteln die Sharing-Dienste die höchsten internen Kosten mit bis zu 0,93 €/Pkm aufweisen. Bei den externen Kosten werden die höchsten Kosten durch e-Scooter (0,19 €/Pkm), Diesel Auto (0,17 €/Pkm) und Motorrädern (0,17 €/Pkm) erzielt. Insgesamt weisen Fahrrad (0,12 €/Pkm) und Fußgänger (0,01 €/Pkm) sowie U- (0,20 €/Pkm) und S-Bahn (0,21 €/Pkm) die geringsten Vollkosten auf. Durch Multiplikation dieser spezifischen Kostenwerte mit der jährlichen Transportleistung in Personenkilometern dieser Verkehrsmittel erhält man die Gesamtkosten in Euro. Dabei ist festzustellen, dass Verbrennerautos mit bis zu 80% den größten Anteil in allen Kostenarten aufweisen. Dies liegt sowohl an den hohen spezifischen Kosten als auch an der hohen Transportleistung. Die aktive Mobilität verursacht die geringsten Kosten im urbanen Verkehr. Bei den externen Kosten sind diese von Kosten durch Flächenverbrauch, Stau und Unfällen dominiert. Insgesamt nehmen die externen Kosten ca. ein Drittel und die internen Kosten ca. zwei Drittel der Vollkosten ein. Durch die Kostenanalyse lassen sich Empfehlungen für die Gestaltung einer nachhaltigen und kostengünstigen urbanen Mobilität ableiten. Zum einen zeigen die Ergebnisse auf, welche Kosten reduziert werden können. Dazu gehört die Reduktion

der Unfallkosten bei e-Scootern und aktiver Mobilität durch Verbesserung der Sicherheit dieser Verkehrsmittel. Andererseits folgt aus den Ergebnissen auch, dass der Wechsel von kostenintensiven Verkehrsmitteln wie motorisierter Individualverkehr auf günstigere Verkehrsmittel wie den ÖPNV empfohlen ist.

Um die alternative Verkehrsmittelwahl zu untersuchen, sollten als zweites Ziel dieser Arbeit die ermittelten Vollkosten in Bepreisungsszenarien umgewandelt und die Auswirkungen dieser auf den Modal Split untersucht werden. Mit Hilfe der Szenariotechnik und einem morphologischen Kasten wurde die Menge der Bepreisungsszenarien erst stark vergrößert. Im Anschluss reduzierten sich die möglichen Szenarien durch Randbedingungen der Simulationsumgebung und durch Abgleich mit Realbeispielen deutlich. Am Ende wurden fünf verschiedene Szenarien untersucht, die sich in der Höhe der Preise und den berücksichtigten Verkehrsmitteln unterscheiden. Die Auswirkungen der Bepreisung auf den Modal Split wurden mit Hilfe eines Verkehrsmittelwahlmodells des Verkehrsnachfragemodells MITO (Kapitel 3.2.1 und 3.2.2) simuliert. Dazu wurden allen Wegen der Menschen innerhalb des betrachteten Stadtgebiets neue Verkehrsmittel auf Basis der Höhe des zusätzlichen Preises zugeordnet. Start- und Zielort sowie Startzeitpunkt der Wege blieb dabei konstant und wurde nicht durch die Simulation verändert.

Den größten Einfluss auf den Modal Split hatte Szenario 5, das sowohl interne als auch externe Kosten als Preis addiert. Der Autoverkehr reduzierte sich dadurch um 11%, aktive Mobilität erhöhte sich um 7% und ÖPNV um 4%. Die Gesamtkosten des Verkehrssystems konnten um ca. 26% reduziert werden. Unter Berücksichtigung eines externe-Kosten-optimierten Routings konnten in diesem Szenario weitere 5% an externen Kosten (2% an Vollkosten) eingespart werden. Durch den Wechsel auf aktive Mobilität und ÖPNV erhöht sich die Reisezeit um maximal 26%. Es besteht ein trade off zwischen Preisen, Kostenersparnis und Fahrzeit. Höhere Autopreise führen zu größeren Kosteneinsparungen, aber auch zu längeren Fahrzeiten, weil Autofahrer eher auf aktive Mobilität umsteigen. Die Studie berücksichtigt externe Kosten und zeit-räumliche Variationen in der Routenplanung und empfiehlt, Verkehr auf kostengünstigere Routen umzuleiten, um Belastungen zu verringern und Kosten zu senken.

Zur Plausibilisierung der Simulationsergebnisse wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, die den Preis für Autos von 0 bis 5 €/Pkm variiert. Die Ergebnisse der Modal Splits wurden mit Beispielen aus realen Umsetzungen in Städten weltweit verglichen. Die Ergebnisse der Simulation weisen dabei einen plausiblen Trend der Autoverkehrsreduktion durch Bepreisung auf. Die Ergebnisse zeigen außerdem, dass sich der Autoverkehr auf Wegebasis bei einer Bepreisung von ca. 0,75 €/Pkm halbiert.

Langfristig sollte die Methodik dieser Arbeit weiterentwickelt werden, sodass die Ergebnisse perspektivisch genauer und umfangreicher werden. In dem Forschungsprojekt SASIM [9] wird die Methodik bereits auf den ländlichen Raum erweitert und weitere Dynamiken in der Berechnung der Externalitäten werden berücksichtigt. Zusätzlich wird in dem Projekt ein spezieller stated preference survey erstellt und durchgeführt, der das Verkehrsmittelwahlmodell zur Berechnung der Auswirkungen einer vollkostenbasierten Bepreisung verbessern wird. Außerdem wird das Vorgehen und die Ergebnisse in zukünftigen Projekten verwertet, in denen Pilotstudien mit Testgruppen zur vollkostenbasierten Bepreisung des Mobilitätsverhaltens durchgeführt werden. So können die Reaktion von realen Menschen untersucht und mit den Ergebnissen dieser Arbeit abgeglichen werden. Eine weitere zukünftige Anwendung der Vollkosten ist die Darstellung dieser Kosten in einer leichter verständlichen Form, die das Verhalten der Konsumenten ähnlich wie ein Nutri-Score bei Lebensmitteln beeinflussen kann. Dafür wird ebenfalls im Projekt SASIM

ein Mobi-Score entwickelt, der die Nachhaltigkeit der verschiedenen Verkehrsmittel in Ampelform bewertet.

Langfristig sollen die Ergebnisse dieser Arbeit der Politik dienen, um objektiv und quantifiziert begründete Entscheidungen für neue Maßnahmen und Investitionen zu treffen. Dabei ist wichtig, dass die Ergebnisse dieser Arbeit stets unter den in Kapitel 5 beschriebenen Limitationen betrachtet werden. Bei einflussreichen Entscheidungen, wie beispielsweise der Einführung einer City-Maut oder einer großen Investition in Infrastruktur, können strategische Richtungen dieser Arbeit entnommen werden. Bei der genauen Konzeptionierung sollten jedoch vorher tiefergehende Analysen beauftragt werden. Insgesamt tragen die Erkenntnisse dieser Dissertation dazu bei, das Verständnis für die Vollkostentheorie der urbanen Mobilität zu vertiefen und zu veranschaulichen, sodass die breite Bevölkerung ein Verständnis über die wahren Kosten der Mobilität gewinnt. Außerdem soll sie wichtige Impulse für zukünftige Bepreisungsmaßnahmen und politische Entscheidungen auf diesem Gebiet bieten.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Aufbau der Inhalte dieser Dissertation.....	2
Abbildung 2.1: Schematische Darstellung Zusammenhang zwischen Mobilitätsverhalten und Herausforderungen	4
Abbildung 2.2: Bausteine für einen klimaverträglichen Verkehr nach Umweltbundesamt [20]... 5	
Abbildung 2.3: Aufteilung der volkswirtschaftlichen Kosten (Vollkosten) in interne und externe Kosten, eigene Darstellung nach [3].....	6
Abbildung 2.4: Methoden zur Monetarisierung externer Effekte [3].....	17
Abbildung 2.5: Regulierende Maßnahmen in der Verkehrspolitik [4].....	19
Abbildung 2.6: Wohlfahrtsverlust durch negative externe Effekte [2]	21
Abbildung 2.7: Formen der Bepreisung des Straßenverkehrs [86].....	22
Abbildung 2.8: Beispiel für die Ausgestaltung von MaaS Paketen [90]	24
Abbildung 2.9: 4-Stufen-Modell Ablauf	25
Abbildung 2.10: Logistische (Sigmoid) Funktion für Wahlwahrscheinlichkeit von Verkehrsmitteln	27
Abbildung 3.1: Schematische Darstellung zur Aufteilung der Methodik für die Bestimmung der spezifischen internen Kosten.....	34
Abbildung 3.2: Zusammenhang Wertverlust und Fahrleistung sowie Fahrzeugalter am Beispiel VW Golf [116]	35
Abbildung 3.3: Schematische Darstellung des Ablaufs der Methodik zur Berechnung des Zusammenhangs zwischen Reisedistanz, Luftliniendistanz und Fahrzeit....	37
Abbildung 3.4: In- und Output der Berechnungsmethodik für räumlich und zeitlich konstante externe Kosten	38
Abbildung 3.5: Histogramm zum Unfallhäufigkeitskoeffizienten und Einteilung der Gefährlichkeitsstufen von Straßenabschnitten (Kanten)	54
Abbildung 3.6: Schematische Darstellung des Ablaufs der Simulation zur Bestimmung des Modal Splits nach Bepreisung	55
Abbildung 3.7: Betrachtungsraum, urbanes München, für die Simulation der Bepreisung (umrandet in blau)	56
Abbildung 4.1: Durchschnittliche spezifische interne Kosten für den urbanen Raum München	64
Abbildung 4.2: Aufteilung der Summe aller internen Kosten für München nach Verkehrsmittel (links) und Kostenkategorie (rechts).....	65

Abbildung 4.3: Durchschnittliches Verhältnis zwischen Fahrstrecke und Luftlinie sowie Fahrstrecke und Fahrzeit für München.....	65
Abbildung 4.4: Durchschnittliche spezifische externe Kosten für den urbanen Raum München	67
Abbildung 4.5: Unfallstatistik für Fahrräder in München im Jahr 2019 auf Basis von Polizeidaten [129].....	67
Abbildung 4.6: Aufstellung der spezifischen externen Kosten von Fahrrädern inklusive Gesundheitsnutzen [127].....	68
Abbildung 4.7: Aufteilung der Summe aller externen Kosten für München nach Verkehrsmittel (links) und Kostenkategorie (rechts).....	68
Abbildung 4.8: Durchschnittliche spezifische Vollkosten für den urbanen Raum München	69
Abbildung 4.9: Aufteilung der Summe aller Vollkosten für München nach Verkehrsmittel (links) und Kostenkategorie (rechts)	70
Abbildung 4.10: Verteilung der räumlich variablen spezifischen externen Kosten für Elektroautos am Morgen in München.....	71
Abbildung 4.11: Verteilung der räumlich variablen spezifischen externen Kosten für Benziner (links) und Diesel (rechts) Autos am Morgen in München.....	71
Abbildung 4.12: Verteilung der räumlich variablen spezifischen externen Kosten für Fahrradfahrer in München	72
Abbildung 4.13: Zeitliche Varianz der räumlich variablen spezifischen externen Kosten für Elektroautos durch Differenz zwischen verschiedenen Tageszeiten und der Tageszeit Morgen.....	73
Abbildung 4.14: Änderung des Modal-Splits nach Wegen für die verschiedenen Bepreisungsszenarien	74
Abbildung 4.15: Änderung der externen Kosten durch die verschiedenen Bepreisungsszenarien für den Verkehr eines Tages im urbanen München	75
Abbildung 4.16: Änderung der Vollkosten durch die verschiedenen Bepreisungsszenarien für den Verkehr eines Tages im urbanen München	76
Abbildung 4.17: Änderung der Fahrzeit durch die verschiedenen Bepreisungsszenarien für den Verkehr eines Tages im urbanen München	77
Abbildung 4.18: Räumliche Verteilung der Summe der externen Kosten für Autos bei Szenario 0 (Basis) an einem Tag in München.....	77
Abbildung 4.19: Verteilung der Summe der externen Kosten für Autos in Szenario 1 (Internalisierung).....	78
Abbildung 4.20: Verteilung der Summe der externen Kosten für Autos in Szenario 1 mit externe-Kosten-optimiertem Routing.....	79
Abbildung 4.21: Vergleich der internen (links) und externen (rechts) Kosten dieser Arbeit mit Gössling et al. [46].....	80

Abbildung 4.22: Änderung des Modal Splits bei Variation der Autobepreisung von 0 bis 5 €/Pkm und Vergleich zu Realbeispielen internationaler Städte mit Bepreisung des Straßenverkehrs 81

Abbildung 4.23: Ökonomischer Status der Autofahrer bei unterschiedlichen Autobepreisungsniveaus 84

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Übersicht der TCO-Studien zu Kostenform und berücksichtigte Verkehrsmittel.....	9
Tabelle 2.2: Übersicht zu den externe Kosten Studien mit berücksichtigten Kostenkategorien und Verkehrsmitteln.....	12
Tabelle 2.3: Übersicht der externen Kostenkategorien mit Erläuterung und Literaturquellen...	16
Tabelle 2.4: Eigenschaften von Verkehrsmodellen (morphologischer Kasten)	25
Tabelle 2.5: Unterscheidungsformen der Szenarioentwicklung.....	28
Tabelle 3.1: Übersicht der Kostenfaktoren für die TCO-Berechnung von privaten Fahrzeugen	36
Tabelle 3.2: Übersicht der Einflussfaktoren auf räumliche und zeitliche Varianzen der spezifischen externen Kosten.....	47
Tabelle 3.3: Einordnung der Unfallhäufigkeitskoeffizienten und Kostenfaktoren in Gefährlichkeitsstufen	53
Tabelle 3.4: Übersicht der berücksichtigten Reisezwecke und Attribute zur Berechnung des Nutzens [179]	59
Tabelle 3.5: Morphologischer Kasten für die Szenarienauswahl (ausgewählte Attribute grau hinterlegt).....	60
Tabelle 4.1: Übersicht der Bepreisungsarten und Auswirkungen auf den Autoverkehr internationaler Städte	82
Tabelle 4.2: Vergleich der Transportleistung und Kosten von MiD, Kostenergebnissen aus Kapitel 4.1 und Simulationsergebnissen aus Kapitel 4.2.....	84

7 Literatur

- [1] Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung, *Nachhaltigkeit (nachhaltige Entwicklung)*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bmz.de/de/service/lexikon/nachhaltigkeit-nachhaltige-entwicklung-14700> (Zugriff am: 27. November 2023).
- [2] P. Engelkamp und F. L. Sell, *Einführung in die Volkswirtschaftslehre*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017.
- [3] Ecoplan und INFRAS, "Externe Effekte des Verkehrs 2010: Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten", Bundesamt für Raumentwicklung, Bern, Zürich und Altdorf, 2014.
- [4] J.-P. Rodrigue, *The Geography of Transport Systems*. Fifth edition. | Abingdon, Oxon, New York, NY : Routledge, 2020.: Routledge, 2020.
- [5] A. C. Pigou, "The economics of welfare", *London: Macmillan*, 1920.
- [6] I. Kaddoura, J. Bischoff und K. Nagel, *Towards welfare optimal operation of innovative mobility concepts: External cost pricing in a world of shared autonomous vehicles*. [Online]. Verfügbar unter: <https://svn.vsp.tu-berlin.de/repos/public-svn/publications/vspwp/2018/18-01/KaddouraEtAl2018SAVpricing.pdf> (Zugriff am: 5. Februar 2024).
- [7] L. Meyer de Freitas, O. Schümperlin und M. Balać, "Road pricing: An analysis of equity effects with MATSim", 2016.
- [8] Y. Yin und S. Lawphongpanich, "Internalizing emission externality on road networks", *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Jg. 11, Nr. 4, S. 292–301, 2006, doi: 10.1016/j.trd.2006.05.003.
- [9] MCube - Münchner Cluster für die Zukunft der Mobilität in Metropolregionen, *Smart Advisor for Sustainable Integrated Mobility (SASIM) - Eine Vollkostenperspektive auf den Urbanen Verkehr*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.mcube-cluster.de/projekt/sasim/> (Zugriff am: 3. Januar 2024).
- [10] MCube - Münchner Cluster für die Zukunft der Mobilität in Metropolregionen, *Innovationen für den Mobilitätswandel*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.mcube-cluster.de/> (Zugriff am: 3. Januar 2024).
- [11] Duden, *Mobilität, die*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.duden.de/rechtschreibung/Mobilitaet> (Zugriff am: 23. November 2023).
- [12] C. J. Tully und D. Baier, *Mobiler Alltag*. VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2006.
- [13] F. Marterer und M. Gomez, *Mastering Mobility: Data types and data collection methods for an urban mobility diagnosis*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.mobiliseyourcity.net/sites/default/files/2021-11/Fundamentals_of_data_collection_complete.pdf (Zugriff am: 23. November 2023).

- [14] C. Nobis und T. Kuhnimhof, "Mobilität in Deutschland - MiD Ergebnisbericht", Bonn, Berlin, 2018. [Online]. Verfügbar unter: https://www.mobilitaet-in-deutschland.de/archive/pdf/MiD2017_Ergebnisbericht.pdf. Zugriff am: 23. November 2023.
- [15] J. Vallee, L. Ecke, B. Chlond und P. Vortisch, *Deutsches Mobilitätspanel (MOP) – Wissenschaftliche Begleitung und Auswertungen Bericht 2021/2022: Alltagsmobilität und Fahrleistung*. [Online]. Verfügbar unter: https://mobilitaetspanel.ifv.kit.edu/downloads/Bericht_MOP_21_22.pdf (Zugriff am: 23. November 2023).
- [16] Motiontag, *Transport Analytics*. [Online]. Verfügbar unter: <https://motiontag.com/transport-analytics/> (Zugriff am: 23. November 2023).
- [17] Statistisches Bundesamt, *Mobilitätsindikatoren auf Basis von Mobilfunkdaten*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.destatis.de/DE/Service/EXSTAT/Datensaetze/mobilitaetsindikatoren-mobilfunkdaten.html> (Zugriff am: 23. November 2023).
- [18] United Nations General Assembly, *Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015: Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.un.org/en/development/desa/population/migration/generalassembly/docs/globalcompact/A_RES_70_1_E.pdf (Zugriff am: 15. Februar 2024).
- [19] Die Bundesregierung, *Nicht weniger fortbewegen, sondern anders*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/schwerpunkte/klimaschutz/nachhaltige-mobilitaet-2044132> (Zugriff am: 27. November 2023).
- [20] Umweltbundesamt Deutschland, *Klimaschutz im Verkehr*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr/klimaschutz-im-verkehr#bausteine> (Zugriff am: 27. November 2023).
- [21] Landeshauptstadt München, *Mobilitätsstrategie 2035: Münchens Fahrplan für die Verkehrswende*. [Online]. Verfügbar unter: <https://muenchenunterwegs.de/2035> (Zugriff am: 27. November 2023).
- [22] F. Kupferschmidt, "Marktversagen" in *Markt und Staat*, H. Drewello, F. Kupferschmidt und O. Sievering, Hg., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018, S. 221–244.
- [23] B. Woeckener, *Volkswirtschaftslehre*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019.
- [24] OECD, *Glossary of Statistical Terms - Externalities - OECD Definition*. [Online]. Verfügbar unter: <https://stats.oecd.org/glossary/detail.asp?ID=3215> (Zugriff am: 1. Juli 2022).
- [25] A. Korzhenevych *et al.*, "Update of the Handbook on External Costs of Transport: Final Report", Ricardo-AEA; Europäische Kommission, 8. Jan. 2014. [Online]. Verfügbar unter: https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/handbook_on_external_costs_of_transport_2014_0.pdf. Zugriff am: 16. Januar 2021.
- [26] A. Neumann, "Ermittlung der externen Kosten des Verkehrs in Sachsen" Diplomarbeit, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“, Institut für Verkehrsplanung und Straßenverkehr, Technische Universität Dresden, Dresden, 2014. [Online]. Verfügbar unter: <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-203144>

- [27] A. Saighani, "Bewertungsverfahren für einen ökonomischen Vergleich städtischer Verkehrssysteme", 2020.
- [28] R. Kochhan, J. Lim, S. Knackfuß, D. Gleyzes und M. Lienkamp, "Total Cost of Ownership and Willingness-to-Pay for Private Mobility in Singapore" in *Lecture Notes in Mobility, Sustainable Automotive Technologies 2013*, J. Wellnitz, A. Subic und R. Trufin, Hg., Cham: Springer International Publishing, 2014, S. 251–261, doi: 10.1007/978-3-319-01884-3_26.
- [29] A. Pomykala, "Effectiveness of urban transport modes", *MATEC Web of Conferences*, Jg. 180, S. 3003, 2018, doi: 10.1051/mateconf/201818003003.
- [30] B. Propfe, M. Redelbach, D. Santini und H. Friedrich, "Cost analysis of Plug-in Hybrid Electric Vehicles including Maintenance & Repair Costs and Resale Values", *WEVJ*, Jg. 5, Nr. 4, S. 886–895, 2012, doi: 10.3390/wevj5040886.
- [31] Nic Lutsey und Michael Nicholas, "Update on electric vehicle costs in the United States through 2030", 2019.
- [32] J. Compostella, L. M. Fulton, R. de Kleine, H. C. Kim und T. J. Wallington, "Near- (2020) and long-term (2030–2035) costs of automated, electrified, and shared mobility in the United States", *Transport Policy*, Jg. 85, S. 54–66, 2020, doi: 10.1016/j.tranpol.2019.10.001.
- [33] P. M. Bösch, F. Becker, H. Becker und K. W. Axhausen, "Cost-based analysis of autonomous mobility services", *Transport Policy*, Jg. 64, S. 76–91, 2018, doi: 10.1016/j.tranpol.2017.09.005.
- [34] L. Lim und A. M. Tawfik, "Estimating Future Travel Costs for Autonomous Vehicles (AVs) and Shared Autonomous Vehicles (SAVs)" in *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Maui, HI, 2018, S. 1702–1707, doi: 10.1109/ITSC.2018.8569715.
- [35] A. Ongel, E. Loewer, F. Roemer, G. Sethuraman, F. Chang und M. Lienkamp, "Economic Assessment of Autonomous Electric Microtransit Vehicles", *Sustainability*, Jg. 11, Nr. 3, S. 648, 2019, doi: 10.3390/su11030648.
- [36] P. Frank, M. Friedrich und J. Schlaich, "Betriebskosten von Busverkehren schnell und genau ermitteln", *DER NAHVERKEHR*, Jg. 26, Nr. 11, 2008.
- [37] S. Bubeck, J. Tomaschek und U. Fahl, "Perspectives of electric mobility: Total cost of ownership of electric vehicles in Germany", *Transport Policy*, Jg. 50, S. 63–77, 2016, doi: 10.1016/j.tranpol.2016.05.012.
- [38] J. M. Buchanan und W. C. Stubblebine, "Externality", *Economica*, Jg. 29, Nr. 116, S. 371, 1962, doi: 10.2307/2551386.
- [39] Bundesamt für Raumentwicklung ARE und Bundesamt für Strassen ASTRA, Hg., "Die Nutzen des Verkehrs: Teilprojekt 1: Begriffe, Grundlagen und Messkonzepte", Okt. 2006. [Online]. Verfügbar unter: https://www.are.admin.ch/dam/are/de/dokumente/verkehr/publikationen/die_nutzen_des_verkehrsteilprojekt1begriffgrundlagenundmesskonz.pdf.
- [40] R. Gerike, "Wie kann das Leitbild nachhaltiger Verkehrsentwicklung konkretisiert werden?: Ableitung grundlegender Aufgabenbereiche" Dissertation, Fakultät

- Verkehrswissenschaften, Technische Universität Dresden, Dresden, 2005. [Online].
Verfügbar unter: <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:swb:14-1132862870193-12708>
- [41] H. van Essen, D. Fiorello, K. El Beyrouty, C. Bieler, L. van Wijngaarden, A. Schrotten, R. Parolin, M. Brambilla, D. Sutter, S. Maffii und F. Fermi, *Handbook on the external costs of transport: Version 2019 - 1.1*. Luxemburg: Publications Office of the European Union, 2020.
- [42] H. Baum, T. Kranz und U. Westerkamp, "Volkswirtschaftliche Kosten durch Straßenverkehrsunfälle in Deutschland: Bericht zum Forschungsprojekt FP 82.321/2007: Ermittlung der volkswirtschaftlichen Kosten durch Straßenverkehrsunfälle in Deutschland", Bremerhaven, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen M, Mensch und Sicherheit FP-82.321/2007, 2010.
- [43] B. Bünger und A. Matthey, "Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten: Methodische Grundlagen", Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, Nov. 2018. [Online].
Verfügbar unter:
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-11-12_methodenkonvention-3-0_methodische-grundlagen.pdf. Zugriff am: 16. Januar 2021.
- [44] Matthey, Astrid und B. Bünger, "Methodenkonvention 3.1: Kostensätze" Stand 12/2020, Dessau-Roßlau, 2020. [Online]. Verfügbar unter:
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-12-21_methodenkonvention_3_1_kostensaetze.pdf. Zugriff am: 3. März 2021.
- [45] U. J. Becker, R. Gerike, A. Rau und F. Zimmermann, "Ermittlung der Kosten und Nutzen von Verkehr in Sachsen: Hauptstudie" Abschlussbericht, Lehrstuhl für Verkehrsökologie, Technische Universität Dresden, Dresden, Juni 2002.
- [46] S. Gössling, A. Choi, K. Dekker und D. Metzler, "The Social Cost of Automobility, Cycling and Walking in the European Union", *Ecological Economics*, Jg. 158, S. 65–74, 2019, doi: 10.1016/j.ecolecon.2018.12.016.
- [47] S. Gössling, J. Kees und T. Litman, "The lifetime cost of driving a car", *Ecological Economics*, Jg. 194, 2022, doi: 10.1016/j.ecolecon.2021.107335.
- [48] F. Mizutani, Y. Suzuki und H. Sakai, "Estimation of Social Costs of Transport in Japan", *Urban Studies*, Jg. 48, Nr. 16, S. 3537–3559, 2011, doi: 10.1177/0042098011399597.
- [49] G. Glazebrook, "Taking the Con Out of Convenience: The True Cost of Transport Modes in Sydney", *Urban Policy and Research*, Jg. 27, Nr. 1, S. 5–24, 2009, doi: 10.1080/08111140802369820.
- [50] *Umweltmeteorologie Kfz-Emissionsbestimmung Luftbeimengungen*, VDI 3782, Blatt 7, Verein Deutscher Ingenieure e.V., Berlin, Mai. 2020.
- [51] World Health Organization, *Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease*. Genf: WHO Document Production Services. [Online]. Verfügbar unter: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/250141/9789241511353-eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [52] T. Becker, "Sozialräumliche Verteilung von verkehrsbedingtem Lärm und Luftschadstoffen am Beispiel von Berlin" Dissertation, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“, Technische Universität Dresden, Dresden, 2015. [Online]. Verfügbar unter: <https://tud.qucosa.de/api/qucosa%3A29510/attachment/ATT-0/?L=1>

- [53] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit und www.bmu.de, "Klimaschutz in Zahlen: Fakten, Trends und Impulse deutscher Klimapolitik Ausgabe 2020", Berlin, Mai 2020. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/klimaschutz_zahlen_2020_broschuere_bf.pdf. Zugriff am: 24. Juli 2021.
- [54] J. Wothge und H. Niemann, "Gesundheitliche Auswirkungen von Umgebungslärm im urbanen Raum" (ger), *Bundesgesundheitsblatt, Gesundheitsforschung, Gesundheitsschutz*, Jg. 63, Nr. 8, S. 987–996, 2020, doi: 10.1007/s00103-020-03178-9.
- [55] G. Roik, "Reifen/Fahrbahn-Geräusche: Entstehungsmechanismen und Einflussgrößen", *Zeitschrift für Lärmbekämpfung*, Jg. 44, Nr. 1, S. 15–20, 1997.
- [56] S. A. Schmid, "Externe Kosten des Verkehrs: Grenz- und Gesamtkosten durch Luftschadstoffe und Lärm in Deutschland" Dissertation, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2005. [Online]. Verfügbar unter: https://elib.uni-stuttgart.de/bitstream/11682/1688/1/SSCHMID_2005_Externe_Kosten_des_Verkehrs_Dissertation.pdf
- [57] P. Zeller, *Handbuch Fahrzeugakustik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018.
- [58] U. Clausen *et al.*, "Reduzierung der Lärmbelastigung durch Schienenverkehr", Europäisches Parlament, Fachabteilung B: Struktur- und Kohäsionspolitik, Ausschuss für Verkehr und Fremdenverkehr, Brüssel, März 2012. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/etudes/join/2012/474533/IPOL-TRAN_ET\(2012\)474533_DE.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/etudes/join/2012/474533/IPOL-TRAN_ET(2012)474533_DE.pdf). Zugriff am: 11. April 2021.
- [59] *Richtlinie 2002/49/EG des Europäischen Parlaments und des Rates: vom 25. Juni 2002 über die Bewertung und Bekämpfung von Umgebungslärm*, 2002. [Online]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2002:189:0012:0025:DE:PDF>
- [60] J. Scheiner, N. Faust, J. Helmer, M. Straub und C. Holz-Rau, "What's that garage for? Private parking and on-street parking in a high-density urban residential neighbourhood", *Journal of Transport Geography*, Jg. 85, S. 102714, 2020, doi: 10.1016/j.jtrangeo.2020.102714.
- [61] C. Köberlein, *Verkehrswörterbuch*, 2018. Aufl. Berlin, Boston: Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 1997.
- [62] O. Bruns, H. M. Ebel, M. Hohloch, R. Krüger, S. Kurzbein und S. Schütt, "Ökonomisches Konzept zur Parkraumbewirtschaftung in Berlin-Wilmersdorf: Diskussionspapier", *Diskussionspapiere der Wirtschaftswissenschaftlichen Dokumentation*, 2002/6, 2002. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.econstor.eu/obitstream/10419/36436/1/348855729.pdf>
- [63] M. Treiber, A. Kesting und C. Thiemann, "How Much Does Traffic Congestion Increase Fuel Consumption and Emissions? Applying Fuel Consumption Model to NGSIM Trajectory Data", *TRB 2008*, 2008. [Online]. Verfügbar unter: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:106406291>

- [64] Ecoplan, "Empfehlungen zur Festlegung der Zahlungsbereitschaft für die Verminderung des Unfall- und Gesundheitsrisikos (value of statistical life): Schlussbericht", Bundesamt für Raumentwicklung ARE; Beratungsstelle für Unfallverhütung bfu, Bern, 19. Sep. 2016.
- [65] World Health Organization, *Health economic assessment tool (HEAT) for walking and for cycling: Methods and user guide on physical activity, air pollution, injuries and carbon impact assessments*. [Online]. Verfügbar unter: https://cdn.who.int/media/docs/default-source/air-pollution-documents/heat.pdf?sfvrsn=ba0969b9_1&download=true (Zugriff am: 15. November 2023).
- [66] Victoria Transport Policy Institute, *Transportation Cost and Benefit Analysis II – Barrier Effect*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.vtpi.org/tca/tca0513.pdf> (Zugriff am: 1. Juli 2023).
- [67] P. Kelly *et al.*, "Systematic review and meta-analysis of reduction in all-cause mortality from walking and cycling and shape of dose response relationship" (eng), *The international journal of behavioral nutrition and physical activity*, Jg. 11, S. 132, 2014, doi: 10.1186/s12966-014-0132-x.
- [68] K. Pfeifer und A. Rütten, "Nationale Empfehlungen für Bewegung und Bewegungsförderung" (ger), *Gesundheitswesen (Bundesverband der Ärzte des Öffentlichen Gesundheitsdienstes (Germany))*, Jg. 79, S 01, 2017, doi: 10.1055/s-0042-123346.
- [69] A. Korzhenevych *et al.*, "Update of the Handbook on External Costs of Transport: Final Report", Ricardo-AEA; Europäische Kommission, 8. Jan. 2014. [Online]. Verfügbar unter: https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/handbook_on_external_costs_of_transport_2014_0.pdf. Zugriff am: 16. Januar 2021.
- [70] C. Bieler und D. Sutter, "Externe Kosten des Verkehrs in Deutschland: Externe Kosten des Verkehrs in Deutschland Straßen-, Schienen-, Luft- und Binnenschiffverkehr 2017" Schlussbericht, INFRAS, Zürich, 21. Aug. 2019.
- [71] M. Maibach *et al.*, "Handbook on estimation of external costs in the transport sector: Internalisation Measures and Policies for All external Cost of Transport (IMPACT)", INFRAS; CE Delft; Fraunhofer ISI; University of Gdansk, 2008.
- [72] M. Allekotte *et al.*, "Ökologische Bewertung von Verkehrsarten: Abschlussbericht", Texte / Umweltbundesamt 156, 2020.
- [73] S. Weinreich, *Nachhaltige Entwicklung im Personenverkehr*. Heidelberg: Physica-Verlag HD, 2004.
- [74] Stadt Zürich, "Gestaltungs-Standards: Stadträume: Parkierung" Stadträume 2010 - Umsetzung der Strategie für die Gestaltung von Zürichs öffentlichem Raum, Zürich, Okt. 2007.
- [75] Ecoplan und INFRAS, "Externe Effekte des Verkehrs 2010: Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten", 18. Juni 2014. [Online]. Verfügbar unter: www.are.admin.ch/dam/are/de/dokumente/verkehr/publikationen/externe_effekte_desverkehrs2010.pdf.download.pdf. Zugriff am: 31. Januar 2021.
- [76] Ecoplan und Metron, "Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr: Kommentar zur VSS-Grundnorm", Bern, Dez. 2005. [Online]. Verfügbar unter: https://trimis.ec.europa.eu/sites/default/files/project/documents/20150724_184552_93351

- _2000342_KostenNutzenAnalysen_bei_Massnahmen_im_Strassenbereich.pdf. Zugriff am: 11. Juli 2021.
- [77] Ecoplan, "Externalitäten im Verkehr - methodische Grundlagen: Schlussbericht", Nov. 1997. [Online]. Verfügbar unter: https://www.ecoplan.ch/download/vs2_hb_de.pdf. Zugriff am: 11. Juli 2021.
- [78] J. Axsen, P. Plötz und M. Wolinetz, "Crafting strong, integrated policy mixes for deep CO2 mitigation in road transport", *Nat. Clim. Chang.*, Jg. 10, Nr. 9, S. 809–818, 2020, doi: 10.1038/s41558-020-0877-y.
- [79] D. Schröder, J. Kinigadner, A. Loder und R. Rothfeld, "Enhancing Sustainability in a Government-Contracted Mobility-as-a-Service Model", *TRB 2022 Annual Meeting - Presentation*, 2022.
- [80] *SASIM Web App*, 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://github.com/TUMFTM/SASIM>
- [81] G. Ottrubay, "Implementierung eines vollkostenbasierten und multimodalen Routenplaners als interaktive Web-App" Masterarbeit, Technische Universität München, 2022.
- [82] J. H. Dales, "Land, Water, and Ownership", *The Canadian Journal of Economics*, Jg. 1, Nr. 4, S. 791, 1968, doi: 10.2307/133706.
- [83] Y. Chen, C. Wang, P. Nie und Z. Chen, "A clean innovation comparison between carbon tax and cap-and-trade system", *Energy Strategy Reviews*, Jg. 29, S. 100483, 2020, doi: 10.1016/j.esr.2020.100483.
- [84] H. Hautzinger, F. Fichert, M. Fuchs und W. Stock, *Eignung einer City-Maut als Instrument der Verkehrs- und Umweltpolitik in der Freien und Hansestadt Hamburg*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.hamburg.de/contentblob/2929662/9ba9fda27de536018d50d276d22482d9/data/city-maut.pdf> (Zugriff am: 8. Dezember 2023).
- [85] Picodi, *On-street parking: comparison of prices in paid parking zones around the world*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.picodi.com/ie/bargain-hunting/cost-of-on-street-parking> (Zugriff am: 8. Dezember 2023).
- [86] B. Bracher, "Intelligente verkehrsabhängige Steuerung einer City Maut" Dissertation, Universität der Bundeswehr, München, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://athene-forschung.unibw.de/doc/129898/129898.pdf>
- [87] VDV - Die Verkehrsunternehmen, *Tarif*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.mobi-wissen.de/Finanzierung/Tarif> (Zugriff am: 8. Dezember 2023).
- [88] House of Commons Transport Committee, *Mobility as a Service - Eighth Report of Session 2017-19*. [Online]. Verfügbar unter: <https://publications.parliament.uk/pa/cm201719/cmselect/cmtrans/590/590.pdf> (Zugriff am: 11. März 2021).
- [89] D. J. Reck, D. A. Hensher und C. Q. Ho, "MaaS bundle design", *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Jg. 141, S. 485–501, 2020, doi: 10.1016/j.tra.2020.09.021.
- [90] A.-M. Feneri, S. Rasouli und H. J. Timmermans, "Modeling the effect of Mobility-as-a-Service on mode choice decisions", *Transportation Letters*, Jg. 14, Nr. 4, S. 324–331, 2022, doi: 10.1080/19427867.2020.1730025.

- [91] Y. Z. Wong, D. A. Hensher und C. Mulley, "Mobility as a service (MaaS): Charting a future context", *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Jg. 131, S. 5–19, 2020, doi: 10.1016/j.tra.2019.09.030.
- [92] K. Bogenberger *et al.*, "MobilityCoins -- A new currency for the multimodal urban transportation system", 28. Juli 2021. [Online]. Verfügbar unter: <http://arxiv.org/pdf/2107.13441v1>.
- [93] D. Ziegler, L. Adenaw und M. Lienkamk, "Smart Mobility - Modeling Mobility" Vorlesung, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, 2022.
- [94] H.-J. Bungartz, S. Zimmer, M. Buchholz und D. Pflüger, *Modellbildung und Simulation*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [95] R. Moeckel, N. Kuehnel, C. Llorca, A. T. Moreno und H. Rayaprolu, "Agent-Based Simulation to Improve Policy Sensitivity of Trip-Based Models", *Journal of Advanced Transportation*, Jg. 2020, S. 1–13, 2020, doi: 10.1155/2020/1902162.
- [96] M. G. McNally, *The Four Step Model*. [Online]. Verfügbar unter: <https://escholarship.org/uc/item/7j0003j0> (Zugriff am: 12. Dezember 2023).
- [97] E. Hensinger, *Iterative Proportional Fitting For A Two-Dimensional Table*. [Online]. Verfügbar unter: <https://u.demog.berkeley.edu/~eddieh/IPFDescription/AKDOLWDIPFTWOD.pdf> (Zugriff am: 12. Dezember 2023).
- [98] J. G. WARDROP, "ROAD PAPER. SOME THEORETICAL ASPECTS OF ROAD TRAFFIC RESEARCH", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, Jg. 1, Nr. 3, S. 325–362, 1952, doi: 10.1680/ipeds.1952.11259.
- [99] *MITO: Microscopic Transport Orchestrator*, 2017. [Online]. Verfügbar unter: <https://github.com/msmobility/mito>
- [100] Cambridge Systematics, Inc., "Status of Activity-Based Models and Dynamic Traffic Assignment: Task Order 15.2, Final Report 2 of 3", Metropolitan Washington Council of Governments/National Capital Region Transportation Planning Board, 2015.
- [101] L. Shanmugam und M. Ramasamy, "RETRACTED ARTICLE: Study on mode choice using nested logit models in travel towards Chennai metropolitan city", *J Ambient Intell Human Comput*, Jg. 13, S1, S. 125, 2022, doi: 10.1007/s12652-020-02868-1.
- [102] P. A. Viton, "Mode Choice - Models" Vorlesung, University of Pennsylvania, 2013. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.slideshare.net/AntrnioOliveira30/mode-choice-models>
- [103] H. Kosow und R. Gassner, *Methods of future and scenario analysis: Overview, assessment, and selection criteria*. Bonn: Deutsches Institut für Entwicklungspolitik, 2008.
- [104] M. Mißler-Behr, *Methoden der Szenarioanalyse*. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag, 1993.
- [105] G. Wright und G. Cairns, *Scenario Thinking*. London: Palgrave Macmillan UK, 2011.
- [106] A. Fink, O. Schlake und A. Siebe, *Erfolg durch Szenario-Management: Prinzip und Werkzeuge der strategischen Vorausschau*, 2. Aufl. Frankfurt/Main: Campus-Verl., 2002.
- [107] D. Mietzner, *Strategische Vorausschau und Szenarioanalysen*. Gabler, 2009.

- [108] Tom Ritchey, "General Morphological Analysis as a Basic Scientific Modelling Method", *Journal of Technological Forecasting and Social Change*, Jg. 126, S. 81–91, 2018.
- [109] K. W. Axhausen *et al.*, "Empirical analysis of mobility behavior in the presence of Pigovian transport pricing", 2021.
- [110] A. Chakirov, "Urban mobility pricing with heterogeneous users", ETH Zurich, 2016.
- [111] M. Vrtic, N. Schüssler, A. Erath und K. W. Axhausen, "Mobility Pricing: Zahlungsbereitschaft und Verhaltensreaktionen", 2011.
- [112] A. König, L. Nicoletti, D. Schröder, S. Wolff, A. Waclaw und M. Lienkamp, "An Overview of Parameter and Cost for Battery Electric Vehicles", *WEVJ*, Jg. 12, Nr. 1, S. 21, 2021, doi: 10.3390/wevj12010021.
- [113] D. Rausch, "Cost analysis including future scenarios for all transport modes in Munich" Masterarbeit, Technische Universität München, 2020.
- [114] D. Schröder und F. Gotzler, "Comprehensive spatial and cost assessment of urban transport options in Munich", *Journal of Urban Mobility*, Jg. 1, S. 100007, 2021, doi: 10.1016/j.urbmob.2021.100007.
- [115] F. Gotzler, "Bewertung multimodaler Mobilitätsoptionen im urbanen Raum" Masterarbeit, Technische Universität München, 2020.
- [116] AutoScout24 GmbH, *Fahrzeugaewertung*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.autoscout24.de/fahrzeugaewertung> (Zugriff am: 15. Juni 2020).
- [117] ADAC, *Autokatalog*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/> (Zugriff am: 18. Dezember 2020).
- [118] Statista, *Mobility Market Outlook*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.statista.com/outlook/mobility-markets> (Zugriff am: 23. September 2020).
- [119] check24.de, *Kfz-Versicherung Vergleichsportal*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.check24.de/kfz-versicherung/> (Zugriff am: 25. Juli 2020).
- [120] Bundesregierung, *Kraftfahrzeugsteuergesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 26. September 2002*. [Online]. Verfügbar unter: http://www.gesetze-im-internet.de/kraftstg/KraftStG_2002.pdf (Zugriff am: 17. Dezember 2020).
- [121] Bundesregierung, *Entwurf eines Siebten Gesetzes zur Änderung des Kraftfahrzeugsteuergesetzes*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Gesetzestexte/Gesetze_Gesetzesvorhaben/Abteilungen/Abteilung_III/19_Legislaturperiode/2020-10-22-7-Aenderung-Kraftfahrzeugsteuergesetz/1-Gesetz.pdf?__blob=publicationFile&v=2 (Zugriff am: 18. Dezember 2020).
- [122] TÜV, *Hauptuntersuchung (HU) Gebühren*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.tuvsud.com/de-de/branchen/mobilitaet-und-automotive/hauptuntersuchung/> (Zugriff am: 25. September 2020).
- [123] ADAC, *Autokosten-Rechner*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.adac.de/infotestrat/autodatenbank/autokosten/autokosten-rechner/> (Zugriff am: 10. Oktober 2020).

- [124] DAT, *DAT Report 2018*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dat.de/news/dat-report-2018-jetzt-erhaeltlich/> (Zugriff am: 18. Dezember 2020).
- [125] Reifendirekt.de, *Reifendirekt*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.reifendirekt.de> (Zugriff am: 10. Oktober 2020).
- [126] INRIX, *INRIX Studie zu den Kosten des Autofahrens: Parken Verursacht die höchsten laufenden Ausgaben*. [Online]. Verfügbar unter: <https://inrix.com/press-releases/inrix-studie-zu-den-kosten-des-autofahrens-parken-verursacht-die-hochsten-laufenden-ausgaben/> (Zugriff am: 11. August 2020).
- [127] D. Schröder *et al.*, "Ending the myth of mobility at zero costs: An external cost analysis", *Research in Transportation Economics*, S. 101246, 2022, doi: 10.1016/j.retrec.2022.101246.
- [128] L. Kirn, "Externe Kosten urbaner Mobilität: Entwicklung eines Kostenmodells für alle Personenverkehrsmittel in München" Masterarbeit, Technische Universität München, 2021.
- [129] Polizeioberkommissar des Polizeipräsidiums München, "Forschungsanfrage Unfalldaten München 2019", 2021.
- [130] A. Matthey und B. Bünger, *Methodenkonvention 3.1: Kostensätze*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-12-21_methodenkonvention_3_1_kostensaetze.pdf (Zugriff am: 3. März 2021).
- [131] *RICHTLINIE 2011/76/EU DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES: 2011/76/EU*, 2011. [Online]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32011L0076>
- [132] H. Beck, *Behavioral Economics*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014.
- [133] Umweltbundesamt Österreich, *Berechnung von Treibhausgas (THG)-Emissionen verschiedener Energieträger*. [Online]. Verfügbar unter: <https://secure.umweltbundesamt.at/co2mon/co2mon.html>. (Zugriff am: 22. April 2021).
- [134] Bundesfinanzministerium, *Kraftfahrzeugsteuer*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Downloads/Broschueren_Bestellservice/2018-03-29-zoll-kraftfahrzeugsteuer.html (Zugriff am: 1. Juli 2022).
- [135] Bund der Steuerzahler Deutschland e.V., *Energiesteuer*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.steuerzahler.de/aktuelles/detail/energiesteuer/?L=0&cHash=66935f448977e90c8ae17972e958e9e2> (Zugriff am: 1. Juli 2022).
- [136] M. Maibach *et al.*, *Handbook on estimation of external costs in the transport sector: Internalisation Measures and Policies for All external Cost of Transport (IMPACT)*, 2008.
- [137] M. Bäumer *et al.*, *Fahrleistungserhebung 2014 - Inländerfahrleistung*. Bremen: Fachverlag NW, 2017.
- [138] Landeshauptstadt München, *Haushalt und Finanzen*. [Online]. Verfügbar unter: <https://stadt.muenchen.de/infos/haushalt-finanzen.html> (Zugriff am: 1. Juli 2022).
- [139] Ulrich, Axhausen und Fuhrer, "Eine Kosten-Nutzen-Analyse für den Parkplatz", Institut für Verkehrsplanung und Transportsystem, ETH Zürich, 2017.

- [140] Landeshauptstadt München, *Stellplatzsatzung*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.muenchen.de/rathaus/Stadtverwaltung/Referat-fuer-Stadtplanung-und-Bauordnung/Lokalbaukommission/Kundeninfo/Satzungen/stellplatz.html> (Zugriff am: 7. Mai 2021).
- [141] M. Welling, "Nutzen von Grünflächen", e-Mail, 2021.
- [142] K. A. Small, "Valuation of travel time", *Economics of Transportation*, Jg. 1, 1-2, S. 2–14, 2012, doi: 10.1016/j.ecotra.2012.09.002.
- [143] INRIX, *INRIX Verkehrsstudie: Stau verursacht Kosten in Milliardenhöhe*. [Online]. Verfügbar unter: <https://inrix.com/press-releases/2019-traffic-scorecard-german> (Zugriff am: 1. Juli 2022).
- [144] L. Martin, M. Wittmann und X. Li, "The Influence of Public Transport Delays on Mobility on Demand Services", *Electronics*, Jg. 10, Nr. 4, S. 379, 2021, doi: 10.3390/electronics10040379.
- [145] U. Becker, R. Rau und F. Zimmermann, "Ermittlung der Kosten und Nutzen von Verkehr in Sachsen: Hauptstudie" Hauptstudie, Technische Universität Dresden, 2001. [Online]. Verfügbar unter: 10.1007/3-8350-5713-8_4
- [146] C. Böttger, "Abschätzung der Kosten der Verkehrsträger im Vergleich - Explorative Studie im Auftrag von Netzwerk Europäischer Eisenbahnen (NEE)", Netzwerk Europäischer Eisenbahnen e.V., Berlin, 2017. [Online]. Verfügbar unter: <https://die-gueterbahnen.com/news/wie-sehr-die-strasse-finanziell-bevorzugt-wird-und-warum-transparenz-jetzt-der-erste-schritt-ist.html>.
- [147] A. Neumann, "Ermittlung der externen Kosten des Verkehrs in Sachsen" Diplomarbeit, Technische Universität Dresden, 2014.
- [148] Statistisches Bundesamt, *GENESIS-Online: Verbraucherpreisindex (inkl. Veränderungsdaten): Deutschland, Jahre*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online?operation=result&code=61111-0001&deep=true#abreadcrumb> (Zugriff am: 3. März 2021).
- [149] J.P.L. Vermeulen *et al.*, *The price of transport: Overview of the social costs of transport*. CE, 2004.
- [150] L. Aarts und I. van Schagen, "Driving speed and the risk of road crashes: a review" (eng), *Accident; analysis and prevention*, Jg. 38, Nr. 2, S. 215–224, 2006, doi: 10.1016/j.aap.2005.07.004.
- [151] World Health Organization, *Health Economic Assessment Tool (HEAT) for walking and cycling: v. 4.2*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.heatwalkingcycling.org/#homepage> (Zugriff am: 16. Februar 2021).
- [152] E. T. Verhoef, "The implementation of marginal external cost pricing in road transport", *Papers Reg Sci*, Jg. 79, Nr. 3, S. 307–332, 2000, doi: 10.1007/PL00013611.
- [153] Moghaddam, Afandizadeh und Ziyadi, "Prediction of accident severity using artificial neural networks", *International Journal of Civil Engineering*, 2010.
- [154] M. Quddus, "Exploring the Relationship Between Average Speed, Speed Variation, and Accident Rates Using Spatial Statistical Models and GIS", *Journal of Transportation Safety & Security*, Jg. 5, Nr. 1, S. 27–45, 2013, doi: 10.1080/19439962.2012.705232.

- [155] H. R. G. Kröyer, "The relation between speed environment, age and injury outcome for bicyclists struck by a motorized vehicle - a comparison with pedestrians" (eng), *Accident; analysis and prevention*, Jg. 76, S. 57–63, 2015, doi: 10.1016/j.aap.2014.12.023.
- [156] T. Berge, P. Mioduszewski, J. Ejsmont und B. Åšwieczko-Å»urek, "Reduction of road traffic noise by source measures â–" present and future strategies", *noise cont engng j*, Jg. 65, Nr. 6, S. 549–559, 2017, doi: 10.3397/1/376568.
- [157] J. Cesbron und P. Klein, "Correlation between tyre/road noise levels measured by the Coast-By and the Close-ProXimity methods", *Applied Acoustics*, Jg. 126, S. 36–46, 2017, doi: 10.1016/j.apacoust.2017.05.005.
- [158] M. Leupolz und F. Gauterin, "Vehicle Impact on Tire Road Noise and Validation of an Algorithm to Virtually Change Tires", *Applied Sciences*, Jg. 12, Nr. 17, S. 8810, 2022, doi: 10.3390/app12178810.
- [159] D. Schröder und M. Kaspi, "Quantifying the External Costs of Autonomous On-Demand Ride Pooling Services", *Case Studies on Transport Policy*, 2024, doi: 10.1016/j.cstp.2024.101302.
- [160] F. Küçükay, *Grundlagen der Fahrzeugtechnik: Antriebe, Getriebe, Energieverbrauch, Bremsen, Fahrdynamik, Fahrkomfort*, 1. Aufl. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden; Springer Vieweg, 2022.
- [161] S. Afandizadeh Zargari, N. Amoei Khorshidi, H. Mirzahosseini und H. Heidari, "Analyzing the effects of congestion on planning time index – Grey models vs. random forest regression", *International Journal of Transportation Science and Technology*, Jg. 12, Nr. 2, S. 578–593, 2023, doi: 10.1016/j.ijtst.2022.05.008.
- [162] Y. Zhang, F. Rempe, F. Dandl, G. Tilg, M. Kraus und K. Bogenberger, "Network Fundamental Diagram based Dynamic Routing in a Clustered Network" in *2023 8th International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS)*, Nice, France, 2023, S. 1–7, doi: 10.1109/MT-ITS56129.2023.10241650.
- [163] I. F. Radam und E. Heriyatna, "A Correlation Analysis of Noise Level and Traffic Flow: Case of One Way Road in Banjarmasin", *Asian Journal of Applied Sciences*, 6(2), 2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ajouronline.com/index.php/AJAS/article/view/5264>
- [164] Südbayerische Immobiliengesellschaft, *Bevölkerungsdichte München*. [Online]. Verfügbar unter: <https://suedbayerische-immobilien.de/Bevoelkerungsdichte-Muenchen-Stadtteile> (Zugriff am: 17. November 2023).
- [165] Umweltbundesamt Deutschland, *Traffic noise*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/en/topics/noise/traffic-noise#noise-abatement-target-values> (Zugriff am: 17. November 2023).
- [166] Südbayerische Immobiliengesellschaft, *Immobilienpreise München*. [Online]. Verfügbar unter: <https://suedbayerische-immobilien.de/Immobilienpreise-Muenchen> (Zugriff am: 17. November 2023).
- [167] Statistisches Bundesamt, *Ergebnisse des Zensus 2011*. [Online]. Verfügbar unter: <https://ergebnisse2011.zensus2022.de/datenbank/online/> (Zugriff am: 20. November 2023).

-
- [168] Landeshauptstadt München, *Veröffentlichung des Regionalberichts 2017 für München - Mobilität in Deutschland (MID)*. [Online]. Verfügbar unter: <https://muenchenunterwegs.de/angebote/mobilitaet-in-deutschland-mid> (Zugriff am: 20. November 2023).
- [169] R. Moeckel, "Constraints in household relocation: Modeling land-use/transport interactions that respect time and monetary budgets", *JTLU*, 2017, doi: 10.5198/jtlu.2015.810.
- [170] TUM Professur für Verkehrsverhalten, *MITO: Microscopic Transport Orchestrator*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.mos.ed.tum.de/tb/forschung/models/travel-demand/mito/> (Zugriff am: 20. November 2023).
- [171] R. Moeckel, N. Kuehnel, C. Llorca, A. Moreno und Rayaprolu. H, "Microscopic Travel Demand Modeling: Using the Agility of Agent-Based Modeling Without the Complexity of Activity-Based Models" Washington, D.C., 15. Jan. 2019.
- [172] R. Moeckel, L. Huntsinger und R. Donnelly, "From Macro to Microscopic Trip Generation: Representing Heterogeneous Travel Behavior", *TOTJ*, Jg. 11, Nr. 1, S. 31–43, 2017, doi: 10.2174/1874447801711010031.
- [173] A. T. Moreno und R. Moeckel, "Microscopic Destination Choice: Incorporating Travel Time Budgets as Constraints", *World Conference on Transport Research - WCTR 2016 Shanghai*, 2016. [Online]. Verfügbar unter: <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1430699/1430699.pdf>
- [174] *External Cost Routing in FleetPy*, 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://github.com/TUM-VT/FleetPy/tree/daniel/routing>
- [175] R. Engelhardt *et al.*, "FleetPy: A Modular Open-Source Simulation Tool for Mobility On-Demand Services", 28. Juli 2022. [Online]. Verfügbar unter: <http://arxiv.org/pdf/2207.14246v1>.
- [176] E. W. Dijkstra, "A note on two problems in connexion with graphs", *Numer. Math.*, Jg. 1, Nr. 1, S. 269–271, 1959, doi: 10.1007/BF01386390.
- [177] M. Bierlaire, "PythonBiogeme: a short introduction" Report TRANSP-OR 160706, Series on Biogeme, Transport and Mobility Laboratory, School of Architecture, Civil and Environmental Engineering, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland, 2016.
- [178] F. S. Koppelman und C. Bhat, "A Self Instructing Course in Mode Choice Modeling: Multinomial and Nested Logit Models", U.S. Department of Transportation - Federal Transit Administration, Washington, D.C., 2006. [Online]. Verfügbar unter: https://www.cae.utexas.edu/prof/bhat/courses/lm_draft_060131final-060630.pdf. Zugriff am: 21. November 2023.
- [179] TUM Professur für Verkehrsverhalten, *Mode Choice Model*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.mos.ed.tum.de/tb/forschung/travel-analytics/discrete-choice-models/traveldemand/> (Zugriff am: 21. November 2023).
- [180] S. Frenzer, "Entwicklung und Analyse von Bepreisungsszenarien für die Simulation einer vollkostenbasierten Bepreisung von Mobilität in MATSim" Semesterarbeit, Technische Universität München, 2023.

- [181] E. Croci, "Urban Road Pricing: A Comparative Study on the Experiences of London, Stockholm and Milan", *Transportation Research Procedia*, Jg. 14, S. 253–262, 2016, doi: 10.1016/j.trpro.2016.05.062.
- [182] M. Lee, *Mobility pricing in practice: A look at London, Stockholm and Singapore*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.policynote.ca/mobility-pricing-in-practice-a-look-at-london-stockholm-and-singapore/> (Zugriff am: 9. November 2023).
- [183] E. Yurday, *Average Car Journeys in the UK*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.nimblefins.co.uk/largest-car-insurance-companies/average-car-journey-uk> (Zugriff am: 9. November 2023).
- [184] A. Bastian und M. Börjesson, *The city as a driver of new mobility patterns, cycling and gender equality: Travel behaviour trends in Stockholm 1985-2015*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.transportportal.se/swopec/CTS2017-9.pdf> (Zugriff am: 9. November 2023).
- [185] D. Wafer, *Durham City Centre Road Charging Scheme*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.ciht.org.uk/media/8057/durham_city_centre_road_charging_scheme.pdf (Zugriff am: 9. November 2023).
- [186] US Department of Transportation, *Lessons Learned From International Experience in Congestion Pricing*. [Online]. Verfügbar unter: <https://ops.fhwa.dot.gov/publications/fhwahop08047/02summ.htm> (Zugriff am: 9. November 2023).
- [187] A. Menon, *ERP in Singapore - a perspective one year on*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.researchgate.net/publication/292219192_ERP_in_Singapore_-_a_perspective_one_year_on (Zugriff am: 9. November 2023).
- [188] Government of Singapore, *Electronic Road Pricing (ERP)*. [Online]. Verfügbar unter: <https://onemotoring.lta.gov.sg/content/onemotoring/home/driving/ERP/ERP.html> (Zugriff am: 9. November 2023).
- [189] Y. Tsubota, N. Hirao und H. Kawashima, "The Evaluation of Road Pricing for the Tokyo Metropolitan Area with Respect to the Environment", *International Congress on Modelling and Simulation*, Volume 4, 2003. [Online]. Verfügbar unter: https://www.mssanz.org.au/MODSIM03/Volume_04/C14/04_Hirao.pdf
- [190] P. Blum, L. Hamm, A. Loder und K. Bogenberger, "Conceptualizing an individual full-trip tradable credit scheme for multi-modal demand and supply management: The MobilityCoin System", *Front. Future Transp.*, Jg. 3, 2022, Art. no. 914496, doi: 10.3389/ffutr.2022.914496.
- [191] P. Servatius *et al.*, "Trading activity and market liquidity in tradable mobility credit schemes", *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, Jg. 22, S. 100970, 2023, doi: 10.1016/j.trip.2023.100970.
- [192] J. Horlemann, Y. Xu, D. Schröder und J. Kinigadner, "Welches Potential hat ein Externe-Kosten-Tool für die Mobilitätsplanung in ländlichen Räumen?", *KommunalPraxis (in review process)*, 2024.
- [193] P. Bastani, J. B. Heywood und C. Hope, "The effect of uncertainty on US transport-related GHG emissions and fuel consumption out to 2050", *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Jg. 46, Nr. 3, S. 517–548, 2012, doi: 10.1016/j.tra.2011.11.011.

- [194] M. Delucchi, "Environmental Externalities of Motor-Vehicle Use in the US", *Journal of Transport Economics and Policy* 34(2):135-168, 2000.
- [195] R. S. Tol, "The marginal damage costs of carbon dioxide emissions: an assessment of the uncertainties", *Energy Policy*, Jg. 33, Nr. 16, S. 2064–2074, 2005, doi: 10.1016/j.enpol.2004.04.002.
- [196] T. Dyr, P. Misiurski und K. Ziółkowska, "Costs and benefits of using buses fuelled by natural gas in public transport", *Journal of Cleaner Production*, Jg. 225, S. 1134–1146, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.03.317.
- [197] S. Nocera und F. Cavallaro, "A methodological framework for the economic evaluation of CO₂ emissions from transport", *J. Adv. Transp.*, Jg. 48, Nr. 2, S. 138–164, 2014, doi: 10.1002/atr.1249.
- [198] F. Cavallaro und S. Nocera, "Are transport policies and economic appraisal aligned in evaluating road externalities?", *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Jg. 106, S. 103266, 2022, doi: 10.1016/j.trd.2022.103266.
- [199] C. Jephcote, H. Chen und K. Ropkins, "Implementation of the Polluter-Pays Principle (PPP) in local transport policy", *Journal of Transport Geography*, Jg. 55, S. 58–71, 2016, doi: 10.1016/j.jtrangeo.2016.06.017.
- [200] Intraplan Consult GmbH, *Standardisierte Bewertung von Verkehrswegeinvestitionen im öffentlichen Personennahverkehr: Version 2016+*. [Online]. Verfügbar unter: https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/E/standardisierte-bewertung-2016plus-verfahrensanleitung.pdf?__blob=publicationFile (Zugriff am: 22. Dezember 2023).
- [201] ADAC, *ADAC Autokosten Herbst/Winter 2024*. [Online]. Verfügbar unter: <https://assets.adac.de/Autodatenbank/Autokosten/autokosteneuebersicht.pdf> (Zugriff am: 23. Februar 2024).
- [202] ADAC, *Benzinpreis und Dieselpreis: So entstehen die Spritpreise aktuell*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/tipps-zum-tanken/7-fragen-zum-benzinpreis/> (Zugriff am: 24. März 2024).
- [203] A. Schrotten *et al.*, *State of play of Internalisation in the European Transport Sector*. [Online]. Verfügbar unter: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/696d402f-a45a-11e9-9d01-01aa75ed71a1> (Zugriff am: 8. März 2023).

Vorveröffentlichungsliste

Während der Anfertigung dieser Dissertation entstanden Veröffentlichungen, Software und Studienarbeiten, in denen Teilaspekte dieser Arbeit vorgestellt wurden.

Zeitschriften; Scopus/ Web of Science gelistet (peer-reviewed)

[112] König, Adrian; Nicoletti, Lorenzo; Schröder, Daniel; Wolff, Sebastian; Waclaw, Adam; Lienkamp, Markus (2021): An Overview of Parameter and Cost for Battery Electric Vehicles. In: *WEVJ* 12 (1), S. 21. DOI: 10.3390/wevj12010021.

[114] Schröder, Daniel; Gotzler, Felix (2021): Comprehensive spatial and cost assessment of urban transport options in Munich. In: *Journal of Urban Mobility* 1, S. 100007. DOI: 10.1016/j.urbmob.2021.100007.

[127] Schröder, Daniel; Kirn, Lukas; Kinigadner, Julia; Loder, Allister; Blum, Philipp; Xu, Yihan; Lienkamp, Markus (2022): Ending the myth of mobility at zero costs: An external cost analysis. In: *Research in Transportation Economics*, S. 101246. DOI: 10.1016/j.retrec.2022.101246.

[159] Schröder, Daniel; Kaspi, Mor (2024): Quantifying the external costs of autonomous on-demand ride pooling services. In: *Case Studies on Transport Policy*, S. 101302. DOI: 10.1016/j.cstp.2024.101302.

Konferenzen, Magazine, etc.; Scopus/ Web of Science gelistet (peer-reviewed)

Patente

Zeitschriften, Konferenzen, Magazine, Berichte, Konferenzvorträge und -poster, etc.; nicht Scopus/ Web of Science gelistet

[79] Schröder, Daniel; Kinigadner, Julia; Loder, Allister; Rothfeld, Raoul (2022): Enhancing Sustainability in a Government-Contracted Mobility-as-a-Service Model. In: *TRB 2022 Annual Meeting - Presentation*.

[192] Horlemann, Jonas; Xu, Yihan; Schröder, Daniel; Kinigadner, Julia (2024): Welches Potential hat ein Externe-Kosten-Tool für die Mobilitätsplanung in ländlichen Räumen? In: *KommunalPraxis (in review process)*.

Nicht-dissertationsrelevante Veröffentlichungen; Scopus/ Web of Science gelistet (peer-reviewed)

Dissertationsrelevante Open-Source Software

[80] Schröder, Daniel; Ottrubay, Gusztav (2022): SASIM Web App. Online verfügbar unter <https://github.com/TUMFTM/SASIM>.

[174] Schröder, Daniel; Dandl, Florian; Engelhardt, Roman (2023): External Cost Routing in FleetPy. Online verfügbar unter <https://github.com/TUM-VT/FleetPy/tree/daniel/routing>.

Betreute Studienarbeiten

[81] Ottrubay, Gusztav (2022): Implementierung eines vollkostenbasierten und multimodalen Routenplaners als interaktive Web-App. Masterarbeit. Technische Universität München.

[113] Rausch, Dennis (2020): Cost analysis including future scenarios for all transport modes in Munich. Masterarbeit. Technische Universität München.

[115] Gotzler, Felix (2020): Bewertung multimodaler Mobilitätsoptionen im urbanen Raum. Masterarbeit. Technische Universität München.

[128] Kirn, Lukas (2021): Externe Kosten urbaner Mobilität: Entwicklung eines Kostenmodells für alle Personenverkehrsmittel in München. Masterarbeit. Technische Universität München.

[180] Frenzer, Sebastian (2023): Entwicklung und Analyse von Bepreisungsszenarien für die Simulation einer vollkostenbasierten Bepreisung von Mobilität in MATSim. Semesterarbeit. Technische Universität München.

Anhang

Anhang A	Parameter für die Kostenberechnung	xxvii
Anhang B	Parameter für die Simulation.....	xlvi

Anhang A Parameter für die Kostenberechnung

Tabelle A.1: Durchschnittswerte für die TCO-Berechnung bei einer Haltedauer von fünf Jahren und einer jährlichen Fahrleistung von 15.000 km [112]

Fahrzeugsegment ^{1,2}	Anschaffungspreis	Umweltbonus ³	Wertverlust ⁴	Versicherung	Steuern	TÜV	Wartung	Reparatur	Reifen	Parken	Fahrzeugpflege	Verbrauch pro 100 km
Kleiner Benziner	15.090 €	0 €	1427 €	437 €	82 €	44 €	180 €	252 €	179 €	805 €	250 €	5,9 l
Kleiner BEV	24.771 €	9570 €	1437 €	415 €	0 €	44 €	108 €	204 €	218 €	805 €	250 €	14,3 kWh
Medium Benziner	21.921 €	0 €	2073 €	492 €	87 €	44 €	180 €	276 €	176 €	805 €	250 €	6,5 l
Medium Diesel	22.944 €	0 €	2169 €	517 €	214 €	44 €	168 €	288 €	176 €	805 €	250 €	5,2 l
Medium BEV	36.241 €	9570 €	2522 €	474 €	0 €	44 €	96 €	288 €	259 €	805 €	250 €	15,4 kWh
Großer Benziner	33.345 €	0 €	3153 €	495 €	178 €	44 €	180 €	288 €	246 €	805 €	250 €	7,6 l
Großer Diesel	34.902 €	0 €	3300 €	563 €	263 €	44 €	156 €	300 €	246 €	805 €	250 €	5,8 l
Großer PHEV	38.639 €	5981 €	3088 €	545 €	0 €	44 €	288 €	300 €	252 €	805 €	250 €	3,8 l + 8,3 kWh ⁵
Großer BEV	54.972 €	7975 €	4443 €	895 €	0 €	44 €	228 €	252 €	283 €	805 €	250 €	18,5 kWh
Großer FCEV	75.889 €	7975 €	6421 €	895 €	0 €	44 €	228 €	252 €	283 €	805 €	250 €	0,8 kg
SUV Benziner	27.290 €	0 €	2580 €	390 €	140 €	44 €	180 €	276 €	223 €	805 €	250 €	7,1 l
SUV Diesel	28.564 €	0 €	2701 €	549 €	240 €	44 €	156 €	288 €	223 €	805 €	250 €	6,2 l
SUV PHEV	31.546 €	7178 €	2304 €	721 €	2 €	44 €	216 €	264 €	217 €	805 €	250 €	3,8 l + 7,3 kWh ⁵
SUV BEV	44.949 €	9570 €	3345 €	582 €	0 €	44 €	120 €	288 €	235 €	805 €	250 €	17,2 kWh
SUV FCEV	76.139 €	7975 €	6445 €	582 €	144 €	44 €	120 €	288 €	235 €	805 €	250 €	0,9 kg
Motorrad Benziner	16.035 €	0 €	1525 €	568 €	88 €	33 €		725 €		0 €	0 €	4,75 l
Motorrad BEV	22.170 €	0 €	2108 €	568 €	0 €	33 €		725 €		0 €	0 €	9,2 kWh

¹ Werte basieren auf WLTP (ADAC). Beispielfahrzeuge: Kleiner BEV = VW e-UP, Medium BEV = VW ID3, Großer BEV = Tesla Model S, Großer FCEV = Toyota Mirai, SUV BEV = VW ID4, SUV FCEV = Hyundai Nexo; ² Nur kleine SUVs unter SUV berücksichtigt; ³ Inkludiert 19% Steuer; ⁴ 3,3% pro Jahr; 0,82% pro 5000 km; ⁵ mit geladener Batterie

Tabelle A.2: Durchschnittswerte für die TCO-Berechnung bei einer Haltedauer von fünf Jahren und 2000 km Jahresfahrleistung [112]

Fahrzeugsegment	Anschaffungspreis	Umweltbonus ¹	Wertverlust ²	Versicherung	Steuern	TÜV	Wartung	Reparatur	Reifen	Parken	Fahrzeugpflege	Verbrauch pro 100 km
Fahrrad	420 €	0 €	47 €	0 €	0 €	0 €	45 €		18 €	0 €	0 €	n/a
Pedelec	2100 €	0 €	236 €	0 €	0 €	0 €	55 €		22 €	0 €	0 €	0.73 kWh
S-Pedelec	4607 €	0 €	517 €	21 €	0 €	0 €	55 €		22 €	0 €	0 €	0.73 kWh
Moped Benzin	3520 €	0 €	226 €	21 €	0 €	0 €	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	2.9 l
Moped BEV	6220 €	0 €	399 €	21 €	0 €	0 €	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	3.5 kWh
e-Scooter ³	799 €	0 €	145 €	21 €	0 €	0 €	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	1.2 kWh

¹ Inkludiert 19% Steuern; ² 3,3% pro Jahr; 0,82% pro 5000 km; ³ Die erwartete Lebensdauer eines e-Scooters beträgt nur etwa 7500 km.

Tabelle A.3: Erläuterung und Quellen für die bei der TCO-Berechnung berücksichtigten Kostenfaktoren [112]

Kostenkategorien	Beschreibung des Vorgehens für Autos, Mopeds und Motorräder	Quellen
Anschaffung	Die durchschnittlichen Verkaufspreise von Statista werden als Basis für jedes Segment herangezogen. Die durchschnittlichen MSRP-Listen des ADAC werden zur Berechnung der Faktoren für die verschiedenen Antriebstypen verwendet.	ADAC [117], Statista [118]
Wertverlust	Die Marktpreise für ein Beispielfahrzeug werden für verschiedene Fahrzeugalter zwischen 0 und 10 Jahren und Laufleistungen zwischen 0 und 300.000 km recherchiert.	AutoScout24 [116]
Energieverbrauch	Für Benzin- und Diesel-Fahrzeuge werden Durchschnittswerte für den Kraftstoffverbrauch der im jeweiligen Segment verkauften Fahrzeuge verwendet. Für den Kraftstoffverbrauch von PHEV und BEV werden die Herstellerangaben von Beispielfahrzeugen verwendet.	ADAC [117]
Versicherung	Die Versicherungskosten werden für jedes Segment und jeden Antriebstyp in Abhängigkeit von der jährlichen Fahrleistung ermittelt.	Check24 [119]
Steuern	Die Steuerbeiträge werden auf der Grundlage des Kraftfahrzeugsteuergesetzes in Deutschland und auf der Grundlage von beispielhaften Fahrzeugspezifikationen von häufig verkauften Fahrzeugen berechnet.	KraftStG 2002 [120, 121]
TÜV	Es wird von der üblichen TÜV-Gebühr ausgegangen.	TÜV [122]
Wartung und Reparatur	Die Werte für Inspektion und Reparatur stammen aus dem Online-Kostenrechner des ADAC für alle Segmente und Antriebstypen.	ADAC [123]
Reifen	Die Marktpreise für Sommer- und Winterreifen werden für alle Segmente und Antriebsarten abgefragt.	Reifendirekt.de [125], DAT [124]
Fahrzeugpflege	Konstanter Faktor unabhängig von der angenommenen jährlichen Fahrleistung.	ADAC [123]
Parken	Konstanter Faktor unabhängig von der angenommenen jährlichen Fahrleistung.	INRIX [126]
Beschreibung des Vorgehens für Fahrrad, Pedelecs, and e-Scooter		
Fahrrad, Pedelecs, S-Pedelecs	TCO-Informationen für Fahrräder aus verschiedenen Quellen	Quellen ¹⁻⁸
e-Scooter	TCO-Informationen für e-Scooter aus verschiedenen Quellen	Quellen ⁹⁻¹³

Sonstige Quellen:

¹Fahrrad.de. Fahrrad.de-Studie zu Allgemeinen Fahrradnutzung in Deutschland 2015. Available online: <https://www.fahrrad.de/on/demandware.static/-/Library-Sites-bikester/default/dw7f90cb9f/Blog/studie-fahrradnutzung-deutschland.pdf> (accessed on 17 December 2020).

²VSF. VSF-Fachhandelsmitglieder zur Entwicklung des Jahres 2018 (Verbund Service und Fahrrad). Available online: <https://nationaler-radverkehrsplan.de/de/aktuell/nachrichten/durchschnittspreis-aller-verkauften-fahrraeder-lag> (accessed on 15 September 2020).

³Zweirad-Industrie-Verband. Zweirad-Industrie-Verband (ZIV)-Wirtschaftspressekonferenz am 11. März 2020 in Berlin: Zahlen-Daten-Fakten zum Fahrradmarkt in Deutschland 2019. 2019.

⁴Zweirad-Industrie-Verband e.V. (ZIV). *Durchschnittspreise für Fahrräder*, ZIV: 2020.

⁵Fahrradblog.de. Fahrradblog-Fahrradinspektion-Wartung mit Checkliste. Available online: https://www.fahrradblog.de/sicherheit/fahrradinspektion-wartung-mit-checkliste/#Kosten_fuer_Fahrradinspektion (accessed on 3 October 2020).

⁶Schwalbe. Verschleiss Reifen. Available online: <https://www.schwalbe.com/de/verschleiss> (accessed on 3 August 2020).

⁷Wachotsch, U.; Kolodziej, A.; Specht, B.; Kohlmeyer, R.; Petrikowski, F. E-Rad macht mobil: Potenziale von Pedelecs und deren Umweltwirkung 2014.

⁸GHOST-BIKES. User Manual for Bicycles. Available online: https://www.ghost-bikes.com/fileadmin/user_upload/Downloads/Bedienungsanleitung/GHOST_bike_user_manual_german.pdf (accessed on 3 October 2020).

⁹Bundesregierung. Elektrokleinstfahrzeuge-Verordnung vom 6. Juni 2019 (BGBl. I S. 756). Available online: <https://www.gesetze-im-internet.de/ekfv/BJNR075610019.html> (accessed on 18 December 2020).

¹⁰Bundesregierung. Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung vom 26. April 2012 (BGBl. I S. 679). Available online: https://www.gesetze-im-internet.de/stvzo_2012/BJNR067910012.html (accessed on 18 December 2020).

¹¹Severengiz, S.; Finke, S.; Schelte, N.; Wendt, N. Life Cycle Assessment on the Mobility Service E-Scooter Sharing.

¹²Laa, B.; Leth, U. Survey of E-scooter users in Vienna: Who they are and how they ride. *J. Transp. Geogr.* **2020**, *89*, 102874, doi:10.1016/j.jtrangeo.2020.102874.

¹³Schellong, D.; Sadek, P.; Schaezberger, C.; Barrack, T. The Promise and Pitfalls of E-Scooter Sharing. Available online: https://image-src.bcg.com/Images/BCG-The-Promise-and-Pitfalls-of-E-Scooter%20Sharing-May-2019_tcm81-220107.pdf (accessed on 18 December 2020).

Tabelle A.4: Preisstruktur für verschiedene dienstleistungsorientierte Verkehrsträger in München [112]

Dienstleistung	Fahrzeugtyp	Min. Preis	Basis Preis	Preis pro Min	Preis pro Stunde	Preis pro km
Car Sharing (FF ¹) ⁴⁻⁷	Mini Auto	n/a	n/a	0,19 €/min	n/a	n/a
Car Sharing (FF ¹) ⁴⁻⁷	Kleines Auto	n/a	n/a	0,28 €/min	n/a	n/a
Car Sharing (FF ¹) ⁴⁻⁷	Medium Auto	n/a	n/a	0,31 €/min	n/a	n/a
Car Sharing (SB ²) ⁴⁻⁷	Mini Auto	n/a	n/a	n/a	2,30 €/h	0,23 €/km
Car Sharing (SB ²) ⁴⁻⁷	Kleines Auto	n/a	n/a	n/a	2,65 €/h	0,27 €/km
Car Sharing (SB ²) ⁴⁻⁷	Medium Auto	n/a	n/a	n/a	3,00 €/h	0,3 €/km
Bike Sharing ⁸	Fahrrad	n/a	n/a	0,08 €/min	n/a	n/a
e-Scooter Sharing ⁹⁻¹¹	e-Scooter	n/a	1,00 €	0,19 €/min	n/a	n/a
Moped Sharing ¹²	Moped	n/a	n/a	0,27 €/min	n/a	n/a
Ride-hailing ^{13,14}	Medium/Großes Auto	5,00 €	2,00 €	0,31 €/min	n/a	0,90 €/km
Ride-hailing ^{13,14}	Medium/Großes Auto	5,00 €	2,00 €	0,31 €/min	n/a	0,90 €/km
Ride-hailing ^{13,14}	Luxus Auto	9,00 €	6,00 €	0,50 €/min	n/a	1,50 €/km
Ride-hailing ^{13,14}	Van	9,00 €	6,00 €	0,50 €/min	n/a	1,50 €/km
Taxi ^{3,15}	Luxus Auto	n/a	3,70 €	n/a	n/a	1,70–2,00 €/km
Transportmittel	Ticket Typ	Preis pro Fahrt in € *		Preis pro Jahr in € *		
U-Bahn/Straßenbahn/Bus ¹⁶⁻¹⁸	Einzelticket	3,39 €		2471,20 €		
U-Bahn/Straßenbahn/Bus ¹⁶⁻¹⁸	Tagesticket	4,01 €		2920,50 €		
U-Bahn/Straßenbahn/Bus ¹⁶⁻¹⁸	Wochenticket	1,31 €		914,70 €		
U-Bahn/Straßenbahn/Bus ¹⁶⁻¹⁸	Monatsticket	0,97 €		681,40 €		
U-Bahn/Straßenbahn/Bus ¹⁶⁻¹⁸	Jahresticket	0,77 €		536,90 €		
U-Bahn/Straßenbahn/Bus ¹⁶⁻¹⁸	Streifenkarte	1,65 €		1153,20 €		
U-Bahn/Straßenbahn/Bus ¹⁶⁻¹⁸	Semester Ticket	0,58 €		402,60 €		

¹ Free-floating; ² Stationsbasiert; ³ Für Taxis müssen weitere 0,50 €/Min. für die Wartezeit hinzugerechnet werden.; * zum Beispiel Fahrten in Zone M; 2 Fahrten pro Tag; 7 Tage die Woche, 50 Wochen im Jahr

Quellen:

⁴CarSharing.de, CarSharing-Städteranking 2019: Karlsruhe ist weiterhin Spitzenreiter. [Online]. Verfügbar unter: <https://carsharing.de/presse/pressemitteilungen/carsharing-staedteranking-2019-karlsruhe-ist-weiterhin-spitzenreiter> (Zugriff am: 18. Dezember 2020).

⁵K. Münzel, W. Boon, K. Frenken und T. Vaskelainen, "Carsharing business models in Germany: characteristics, success and future prospects", Information Systems and e-Business Management, Jg. 16, Nr. 2, S. 271–291, 2018, doi: 10.1007/s10257-017-0355-x.

⁶ShareNow, Preisüberblick. [Online]. Verfügbar unter: https://www.share-now.com/de/de/pricing/?cid=sn_ppc_de_all_none_performance_google_prsitelink_none_none_none_none_none_none_none_none_gclid=CjwKCAjww5r8BRB6EiwArccK5R-gZb6mzlaAPSRDluq_OWgddb2W8a7nEk2sJR142NgSBfmgd-d3hoCj0MQAvD_BwE (Zugriff am: 10. Oktober 2020).

⁷STATTAUTO, Preise. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.stattauto-muenchen.de/standardtarif/> (Zugriff am: 18. Dezember 2020).

⁸MVG, MVG Rad. [Online]. Verfügbar unter: https://www.mvg.de/services/mobile-services/mvg-rad.html?pk_campaign=03_Generic_Standort&pk_kwd=%2Bleihrader%20%2Bmuenchen&pk_source=GoogleAds&pk_medium=cpc (Zugriff am: 18. Dezember 2020).

⁹K. Heineke, B. Kloss, D. Scurtu und F. Weig, Micromobility's 15,000-mile checkup. [On-line]. Verfügbar unter: <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/micromobilitys-15000-mile-checkup> (Zugriff am: 18. Dezember 2020).

¹⁰Tier, Tier App. [Online]. Verfügbar unter: <https://mytier.app> (Zugriff am: 18. Dezember 2020).

¹¹J. Zagorskas und M. Burinskienė, "Challenges Caused by Increased Use of E-Powered Personal Mobility Vehicles in European Cities", Sustainability, Jg. 12, S. 273, 2019, doi: 10.3390/su12010273.

¹²Emmy, Emmy-Sharing: Preise. [Online]. Verfügbar unter: <https://emmy-sharing.de> (Zugriff am: 2. November 2020).

¹³D. Ennen und T. Heilker, Ride-Hailing Services in Germany: Potential Impacts on Public Transport, Motorized Traffic, and Social Welfare. [Online]. Verfügbar unter: <https://ideas.repec.org/p/mut/wpaper/29.html> (Zugriff am: 18. Dezember 2020).

¹⁴Uber, Uber. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.uber.com/de/en/> (Zugriff am: 18. Dezember 2020).

¹⁵L. München, Taxitarif O 410 - Verordnung der Landeshauptstadt München über Beförderungsentgelte und Beförderungsbedingungen für den Verkehr mit Taxen (Taxitarif-ordnung). [Online]. Verfügbar unter: <https://www.muenchen.de/rathaus/Stadtrecht/vorschrift/410.pdf> (Zugriff am: 18. Dezember 2020).

¹⁶MVV, Der MVV in Zahlen. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.mvv-muenchen.de/mvv-und-service/der-verbund/mvv-in-zahlen/index.html> (Zugriff am: 15. Juni 2020).

¹⁷MVV, MVV-Pläne zum Download. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.mvv-muenchen.de/plaene-bahnhoefe/plaene/index.html> (Zugriff am: 31. Oktober 2020).

¹⁸MVV, Pressemitteilungen. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.mvv-muenchen.de/mvv-und-service/presse/index.html> (Zugriff am: 20. August 2020).

Tabelle A.5: Bürger und Sterblichkeitsrate im Stadtgebiet von München [127]

Beschreibung	Wert	Jahr
Gesamt	1.488.202 Einwohner ¹	2020
20-74 Jahre	1.085.496 Einwohner ¹	2020
20-64 Jahre	965.590 Einwohner ¹	2020
20-74 Jahre	0,004832 Tote / Einwohner ²	2021
20-64 Jahre	0,002650 Tote / Einwohner ²	2021

Quellen:

¹Bayerisches Landesamt für Statistik, GENESIS-Online: Bevölkerung: Gemeinden, Stichtage (letzten 6). Ergebnis 12411-001. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.statistikdaten.bayern.de/genesis/online;jsessionid=6CB3363574391F9435FD661D9125B699?sequenz=tabelleErgebnis&selectionname=12411-001#abreadcrumb> (Zugriff am: 15. Juli 2021).;

²Statistisches Bundesamt, „Fortschreibung des Bevölkerungsstandes: Bevölkerung: Kreise, Stichtag, Altersgruppen“, 2021. World Health Organization, Health Economic Assessment Tool (HEAT) for walking and cycling: v. 4.2. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.heatwalkingcycling.org/#homepage> (Zugriff am: 16. Februar 2021).

Tabelle A.6: Jährliche Verkehrsleistung pro Verkehrsmittel in München [127]

Verkehrsmittel	Jährliche Fahrleistung in Mio. Fkm/a	Jährliche Transport- leistung in Mio. Pkm/a	Anzahl Fahrzeuge
ÖPNV	70,40 ¹	approx. 4500	
Bus	37,36 ²	A ³	675 ²
Straßenbahn	8,87 ²	A ³	134 ²
U-Bahn	12,00 ²	A ³	702 ²
S-Bahn	7,64 ⁵	1585,08 ⁴	
Motorisierter Individualverkehr	7811,00	12.191,00	
Moped	86,57 ¹¹	88,30 ¹³	
Elektrisch	0,78 ¹¹	0,79 ¹³	181 ¹⁴
Benziner	85,01 ¹¹	86,71 ¹³	19788 ¹⁴
<i>Sharing</i>	1,54 ¹²	1,57 ¹³	1000 ¹⁵
Motorrad	278,20 ¹¹	308,80 ¹³	64755 ¹⁶
Auto	7446,23 ⁸	11.169,34 ¹³	
BEV	85,16 ¹¹	127,75 ¹³	8284 ¹⁷
Hybrid	316,77 ¹¹	475,16 ¹³	
PHEV	109,59 ¹¹	164,39 ¹³	10660 ¹⁷
Diesel	2495,82 ¹¹	3743,73 ¹³	242771 ¹⁷
Benzin	4401,09 ¹¹	6601,63 ¹³	428099 ¹⁷

Car Sharing	65,44 ¹²	91,61 ¹³	2400 ¹⁰
Sonstige			
Fußgänger	620,50 ¹³	620,50 ⁶	
Fahrrad	1131,50 ¹³	1131,50 ⁶	
Klassisch	1103,21 ¹³	1103,21 ¹¹	975000 ⁶
Pedelec	28,29 ¹³	28,29 ¹¹	25000 ⁶
e-Scooter	11,61 ⁷	11,61 ¹³	5401 ⁷

Quellen:

¹Statistisches Bundesamt, 2019. Verkehr: Personenverkehr mit Bussen und Bahnen. 2017. Fachserie 8 Reihe 3.1, 87 pp. https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Transport-Verkehr/Personenverkehr/Publikationen/Downloads-Personenverkehr/personenverkehr-busse-Bahnen-jahr-2080310177004.pdf?__blob=publicationFile. Accessed 3 March 2021.;

²Münchner Verkehrs- und Tarifverbund GmbH, 2020. Der MVV in Zahlen und Fakten, München, 11 pp. <https://www.mvv-muenchen.de/fileadmin/ServiceDownloads/MVV-Statistikbroschuere-20S-Online.pdf>. Accessed 12 March 2021.;

³Leiter Mobilitätsforschung MVG, 2021. Beförderungsleistung MVG 2019. per e-Mail, München.;

⁴Leiter Produktionsplanung S-Bahn München, 2021a. Beförderungsleistung S-Bahn München. e-Mail.

⁵Leiter Produktionsplanung S-Bahn München, 2021c. Fahrleistung S-Bahn München. e-Mail.;

⁶Föllmer, R., Belz, J., 2019. Mobilität in Deutschland – MiD: Kurzreport Stadt München, Münchner Umland und MVV-Verbundraum. infas; DLR; IVT; infas 360, Bonn, Berlin, 24 pp. <https://www.muenchen-transparent.de/dokumente/5499206/datei>. Accessed 26 February 2021.;

⁷Tack, A., Klein, A., Bock, B., 2019. E-Scooter in Deutschland. <https://scooters.civcity.de/>. Accessed 3 March 2021.;

⁸Calculated via domestic mileage according to Bäumer et al.: Bäumer, M., Hautzinger, H., Pfeiffer, M., Stock, W., Lenz, B., Kuhnimhof, T.G., Köhler, K., 2017b. Fahrleistungserhebung 2014 - Inlandsfahrleistung und Unfallrisiko. Fachverlag NW, Bremen, 103 pp.;

⁹Statistisches Amt der Landeshauptstadt München, „Personenkraftwagenbestand 2018 - 2020 nach Kraftstoffart“, 2021. [Online]. <https://www.muenchen.de/rathaus/dam/jcr:9caf4e7e-cb8e-4734-87fc-6397f91d050f/jt210706.pdf>. Accessed 26. July 2021.;

¹⁰Bundesverband CarSharing e.V. (bcs), „CarSharing Städteranking 2019,“ Dez. 2019. [Online] Verfügbar: https://carsharing.de/sites/default/files/uploads/tabelle_staedteranking_2019_0.pdf. (Accessed: March 10 2021).;

¹¹Berechnet über den Anteil der Fahrzeuge in München;

¹²Eigene Berechnung nach Expertenschätzung;

¹³Berechnet über den durchschnittlichen Besetzungsgrad;

¹⁴M. Allekotte, K. Biemann, C. Heidt, M. Colson, und W. Knörr, „Aktualisierung der Modelle TREMOD/TREMOD-MM für die Emissionsberichterstattung 2020 (Berichtsperiode 1990-2018): Berichtsteil „TREMOD“,“ Dessau-Roßlau, Texte 116, Jun. 2020. [Online] Verfügbar: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-06-29_texte_116-2020_tremod_2019_0.pdf. Gefunden am: Mrz. 03 2021.

¹⁵G. Harlander, "Fahrleistung Sharing-Fahrzeuge München", e-Mail, Apr. 2021.

¹⁶Statistisches Amt der Landeshauptstadt München, Monatszahlen-Monitoring München: Kfz-Bestand. [Online] Verfügbar: <https://www.mstatistik-muenchen.de/monatszahlenmonitoring/export/export.php>. Gefunden am: Feb. 26 2021.

¹⁷Statistisches Amt der Landeshauptstadt München, „Personenkraftwagenbestand 2018 - 2020 nach Kraftstoffart“, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.muenchen.de/rathaus/dam/jcr:9caf4e7e-cb8e-4734-87fc-6397f91d050f/jt210706.pdf>. Zugriff am: 26. Juli 2021.

^ADie Werte sind vertraulich, waren aber für die Berechnung verfügbar.

Tabelle A.7: Strommix für verschiedene Gebiete in Deutschland und im Raum München [127]

Art der Stromerzeugung	Strommix Land (für alle Privatfahrzeuge) ¹	Strommix öffentlicher Transport ²	Strommix Züge ³
Wasserenergie	4%	100%	25%
Windenergie	27%	0%	10%
Solar Energie	11%	0%	12%
Biomasse	9%	0%	10%
Braunkohle	17%	0%	7%
Steinkohle	7%	0%	18%

Gas	12%	0%	8%
Öl	0%	0%	0%
Kernenergie	13%	0%	9%

Quellen:

¹B. Burger und K. Schneider, Nettostromerzeugung in Deutschland 2020: erneuerbare Energien erstmals über 50 Prozent. [Online] <https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/news/2020/nettostromerzeugung-in-deutschland-2021-erneuerbare-energien-erstmals-ueber-50-prozent.html>. (Accessed: Apr. 28 2021).;

²Landeshauptstadt München, Ökostrom für Tram und U-Bahn. [Online]. <https://www.muenchen.de/aktuell/2018-01/oekostrom-fuer-muenchner-tram-und-u-bahn.html> (Accessed: 9. March 2021).;

³Deutscher Bundestag, „Drucksache 19/10121: Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Matthias Gastel, Lisa Badum, Dr. Julia Verlinden, weiterer Abgeordneter und der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN“; en:former, Der Bahnstrommix soll grüner werden: Europäische Eisenbahnbetriebe wollen klimafreundlicher werden – mit sehr unterschiedlichen Ambitionen. [Online]. <https://www.en-former.com/klimaziele-und-projekte-von-bahnunternehmen-in-europa/> (Accessed: 4. August 2021).

Tabelle A.8: Betroffenheitsstatistik für Straßen- und Schienenverkehrslärm in München¹ [127]

L _{DEN} in dB (A)	Straße	U-Bahn / Straßenbahn	Zug (EBA)
55 – 59	95.000	15.200	65.810
60 – 64	69.400	13.600	21.890
65 – 69	66.400	10.900	9270
70 – 74	21.900	1700	3570
≥ 75	1500	0	1350

Quellen:

¹Eisenbahn-Bundesamt, o.J. Lärmstatistik: Gemeinde: München. <http://laermkartierung1.eisenbahn-bundesamt.de/mb3/app.php/statistik?id=7914&br=false&gemeinde=M%C3%BCnchen>. Accessed 22 July 2021.

Tabelle A.9: Infrastrukturinvestitionen und Anzahl und Ertrag von Parkplätzen für München [127]

Beschreibung	Wert
Investitionen in die Straßeninfrastruktur für 5 Jahre	621 Millionen € ¹
Investitionen in den ÖPNV für 5 Jahre	619 Millionen € ¹
Investitionen in die Fahrradinfrastruktur pro Person und Jahr	2,30 € ²
Anzahl der öffentlichen Parkplätze	82000 ³
Gewinn pro Stellplatz	240 € ⁴

Quellen:

¹<https://stadt.muenchen.de/infos/haushalt-finanzen.html>;

²<https://www.sueddeutsche.de/muenchen/greenpeace-studie-muenchen-gibt-pro-kopf-2-30-euro-fuer-radverkehr-aus-in-berlin-ist-es-doppelt-so-viel-1.4108087>;

³Referat für Stadtplanung und Bauordnung der Landeshauptstadt München, 2017. Parkraummanagement in München – Fortschreibung Sektor V, 104 pp. [https://www.muenchen-transparent.de/dokumente/4747147/datei](https://www.muenchen-transparent.de/dokumente/4747147/datei;).;

⁴Becker, S., 2008. Landeshauptstadt München: Parkraummanagement Wirtschaftlichkeitsuntersuchung. Endbericht zum Projekt Nr. 0649, Hannover, 61 pp.

Tabelle A.10: Staukosten und Verspätungsdaten für München [127]

Beschreibung	Wert
Gesamtstaukosten für München	405 Millionen € ¹
Durchschnittliche Verspätung bei der U-Bahn	0,837 min ²
Durchschnittliche Verspätung bei der S-Bahn	1,168 min ²
Durchschnittliche Verspätung bei Bussen	2,101 min ^{2,3}
Durchschnittliche Verspätung bei der Straßenbahn	1,861 ^{2,3}
Anzahl der Fahrten mit öffentlichen Verkehrsmitteln pro Tag	1152000 ⁴
Kosten pro Stunde Verspätung	9 € ⁵

Quellen:

¹<https://inrix.com/press-releases/2019-traffic-scorecard-german/>;²Martin, L., Wittmann, M., Li, X., 2021. The Influence of Public Transport Delays on Mobility on Demand Services. Electronics 10, 379. 10.3390/electronics10040379.;³own calculations based on punctuality values from <https://www.mvg.de/services/fahrgastservice/mvg-puenktlichkeitswerte.html>⁴<https://muenchenunterwegs.de/content/657/download/infas-grossraummuennenchen-regionalbericht-mid5431-20201204.pdf>;⁵own calculations based on INRIX method: <https://media.bizj.us/view/img/10360454/inrix2016trafficscorecarden.pdf>**Tabelle A.11:** Kostensätze für die in dieser Arbeit betrachteten Luftschadstoffemissionen im Verkehr nach Emissionsumgebung in 2020 € pro Tonne Emission gemäß Methodischer Konvention 3.1 - Kostensätze des UBA¹ [127]

Bereich	Schaden für die Gesundheit in €				Nicht-gesundheitsbezogene Schäden
	Unbekannt	Urban	Suburban	Ländlich	
PM _{2,5}	62.900	255.300	73.600	43.200	0
PM _{grob}	1000	4900	1200	600	0
PM ₁₀	7200	30.000	8500	4900	0
NO _x	15.800	15.800	15.800	15.800	3700
SO ₂	14.900	14.900	14.900	14.900	1500
NM _{VOC}	1200	1200	1200	1200	1000
NH ₃	24.200	24.200	24.200	24.200	10.900

Annahmen: PM₁₀ besteht aus 10% PM_{2,5} und 90% PM_{grob}

Quellen:

¹Matthey, Astrid, Bünger, B., 2020. Methodenkonvention 3.1: Kostensätze. Stand 12/2020, Dessau-Roßlau, 69 pp. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-12-21_methodenkonvention_3_1_kostensaetze.pdf. Accessed 3 March 2021.

Tabelle A.12: Kostensätze für direkte Luftschadstoffemissionen im Stadtverkehr in €2020 pro Fahrzeugkilometer gemäß Methodischer Konvention 3.1 - UBA-Kostensätze¹, eigene Berechnungen. [127]

Fahrzeugklasse	Antriebstyp	Abgas in €	Abreibung in €
Bus	Diesel	14,63	0,86
Straßenbahn	Elektrisch	0	1,45
U-Bahn	Elektrisch	0	1,45
S-Bahn	Elektrisch	0	1,45
Moped	Benziner	0,68	0,03
Moped	Elektrisch	0	0,03
Motorrad	Benziner	0,38	0,03
Auto	BEV	0	0,11
Auto	PHEV	0,13	0,11
Auto	Diesel	1,68	0,11
Auto	Benziner	0,27	0,11

Quellen:

¹Matthey, Astrid, Bünger, B., 2020. Methodenkonvention 3.1: Kostensätze. Stand 12/2020, Dessau-Roßlau, 69 pp. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-12-21_methodenkonvention_3_1_kostensaetze.pdf. Accessed 3 March 2021.

Tabelle A.13: Emissionsfaktoren der direkten Treibhausgasemissionen in CO₂-Äquivalenten für Diesel und Benzin¹ [127]

Kraftstofftyp	Direkte Treibhausgasemissionen in kg CO ₂ eq/l
Diesel	2,458
Benzin	2,131

Quellen:

¹Umweltbundesamt GmbH, 2020. <https://secure.umweltbundesamt.at/co2mon/co2mon.html>. Accessed 22 April 2021.

Tabelle A.14: Klimaschadenskosten in €2020/t CO₂ eq für die Jahre 2020, 2030 und 2050¹ [127]

	2020	2030	2050
0% reine Zeitpräferenzrate	680	700	765
1% reine Zeitpräferenzrate	195	215	250

Quellen:

¹Matthey, Astrid, Bünger, B., 2020. Methodenkonvention 3.1: Kostensätze. Stand 12/2020, Dessau-Roßlau, 69 pp. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-12-21_methodenkonvention_3_1_kostensaetze.pdf. Accessed 3 March 2021.

Tabelle A.15: Luftverschmutzungskosten der Kraftstoffherstellung in €-ct2020 pro Liter Kraftstoff, eigene Berechnungen¹ [127]

Kraftstofftyp	Kosten der Luftverschmutzung durch vorgelagerte Prozesse in €-ct ₂₀₂₀ /l
Diesel	4,75
Benzin	4,34

Quellen:

¹eigene Berechnungen basierend auf: Matthey, Astrid, Bünger, B., 2020. Methodenkonvention 3.1: Kostensätze. Stand 12/2020, Dessau-Roßlau, 69 pp. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-12-21_methodenkonvention_3_1_kostensaetze.pdf. Accessed 3 March 2021

Tabelle A.16: Treibhausgasemissionen der Kraftstoffherstellung für Diesel und Benzin¹, eigene Berechnungen [127]

Kraftstofftyp	g CO ₂ eq/MJ	kg CO ₂ eq/liter
Diesel	18,9	0,592
Benzin	17,0	0,673

Quellen:

¹Prussi, M., Yugo, M., Prada, L. de, Padella, M., Edwards, R., Lonza, L., 2020. JEC Well-to-Tank report v5: Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context. EUR 30269 EN. Publications Office of the European Union; Joint Reserach Center, Luxemburg, 248 pp. <http://dx.doi.org/10.2760/959137>. Accessed 26 July 2021.

Tabelle A.17: Luftverschmutzungskosten und Treibhausgasemissionen der Stromerzeugung in Deutschland vorgelagerte Prozesse¹, eigene Berechnungen [127]

	Luftverschmutzungskosten (in €-ct ₂₀₂₀ /kWh _{el})	Treibhausgasemissionen (in kg CO ₂ eq/kWh _{el})
Fossile Energieträger		
Braunkohle	2,05	1,056
Steinkohle	1,68	0,975
Erdgas	0,87	0,435
Öl	5,18	0,847
Erneuerbare Energien		
Wasserenergie	0,06	0,013
Windenergie	0,11	0,010
Fotovoltaik	0,43	0,069
Biomasse	3,94	0,247

Anmerkung: Bei Biomasse und Windenergie handelt es sich um gewichtete Durchschnittswerte entsprechend den Erzeugungsanteilen (gasförmig/flüssig/fest bzw. Offshore/Onshore).

Quellen:

¹Matthey, Astrid, Bünger, B., 2020. Methodenkonvention 3.1: Kostensätze. Stand 12/2020, Dessau-Roßlau, 69 pp. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-12-21_methodenkonvention_3_1_kostensaetze.pdf. Accessed 3 March 2021.

Tabelle A.18: Kostensätze für Umgebungslärm, aufgeschlüsselt nach Lärmursache und Schallpegel, in €2020 pro betroffener Person und Jahr¹ [127]

L _{DEN} in dB (A)	Straße in €	Zug in €
35 – 39	0,00	0,00
40 – 44	0,00	0,00
45 – 49	29,46	9,40
50 – 54	62,65	23,13
55 – 59	116,38	54,42
60 – 64	196,34	107,85
65 – 69	306,27	185,35
70 – 74	454,91	293,21
≥ 75	650,74	437,38

Quellen:

¹Matthey, Astrid, Bürger, B., 2020. Methodenkonvention 3.1: Kostensätze. Stand 12/2020, Dessau-Roßlau, 69 pp. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-12-21_methodenkonvention_3_1_kostensaetze.pdf. Accessed 3 March 2021.

Tabelle A.19: Übersicht über Lärmgewichtungsfaktoren (NWF) für die Zuweisung von Lärmkosten nach Verkehrsträgern^{1,2,3}, Elektromoped: eigene Annahmen [127]

Fahrzeugklasse	Urban (50 km/h)	Ländlich (80 km/h)
Auto Sonstige	1,0	1,0
Auto Benzin	1,0	1,0
Auto Diesel	1,2	1,0
Moped	9,8	3,0
Elektrisches Moped	1,0	
Motorrad	13,2	4,2
Bus	9,8	3,3
Transporter	1,5	1,2
Kleiner Lkw	9,8	3,0
Großer Lkw	13,2	4,2
Semi-trailer	16,6	5,5
Passagierzug		1
Güterzug		4

Quellen:

¹Maibach, M., Schreyer, C., Sutter, D., van Essen, H., Boon, B.H., Smokers, R., Schroten, A., Doll, C., Pawlowska, B., Bak, M., 2008. Handbook on estimation of external costs in the transport sector: Internalisation Measures and Policies for All external Cost of Transport (IMPACT). INFRAS; CE Delft; Fraunhofer ISI; University of Gdansk, 336 pp.

²Saighani, A., 2020. Bewertungsverfahren für einen ökonomischen Vergleich städtischer Verkehrssysteme. Dissertation. Universität Kassel, Kassel, 387 pp. 10.17170/kobra-202009241843.

³van Essen, H., Fiorello, D., El Beyrouy, K., Bieler, C., van Wijngaarden, L., Schroten, A., Parolin, R., Brambilla, M., Sutter, D., Maffii, S., Fermi, F., 2020. Handbook on the external costs of transport: Version 2019 - 1.1. Publications Office of the European Union, Luxemburg, 332 pp. 10.2832/51388.

Tabelle A.20: Kosten der externen Barrierewirkung [127]

Verkehrsmittel	Costs in €-ct ₂₀₂₀ /Fkm
Auto	2,27 ¹
Bus	3,73 ¹
Motorrad	2,27 ¹
Fahrrad	0,16 ¹
e-Scooter	0,16 ²
Moped	1,22 ²

Quellen:

¹Victoria Transport Policy Institute, 2022. Transportation Cost and Benefit Analysis II – Barrier Effect. <https://www.vtpi.org/tca/tca0513.pdf>. Accessed 1 July 2022.

² eigene Annahmen / Berechnungen

Tabelle A.21: Korrekturfaktoren zur Berücksichtigung der Dunkelziffer von Verkehrsunfällen mit Personenschaden^{1,2} [127]

Art der Verkehrsteilnahme	Schwere der Schädigung		
	Leichtverletzt	Schwerverletzt	Getötet
Motorisiert*	2,00	1,82	1,00
Fahrrad	5,00	3,33	1,00
Fußgänger	2,86	2,00	1,00

* without participation from public transport

Quellen:

¹Hautzinger, H., Dürholt, H., Hörnstein, E., Tassaux-Becker, B., 1993. Dunkelziffer bei Unfällen mit Personenschäden. Berichte der BASt Heft M13. Bundesanstalt für Straßenwesen, Bremerhaven.

²Saighani, A., 2020. Bewertungsverfahren für einen ökonomischen Vergleich städtischer Verkehrssysteme. Dissertation. Universität Kassel, Kassel, 387 pp. 10.17170/kobra-202009241843

Tabelle A.22: Unfallkostensätze in €2020 pro Unfallbeteiligtem nach Verletzungsschwere^{1,2,3,4,5}, eigene Berechnungen [127]

	Schwere der Schädigung in €		
	Leichtverletzt	Schwerverletzt	Getötet
Reproduktionskosten ³	1274	24.923	19.775
Kosten für Ausfallzeiten von Ressourcen ⁴	979	64.726	129.913
Außermarktliche Kosten ⁴	525	33.506	529.059
Gesamt Verursacher	2778	123.155	678.747
Immaterielle Kosten ⁵	37.300	496.090	3.730.000
Gesamt Nicht-Verursacher	40.078	619.245	4.408.747

Quellen:

¹Becker, U., Rau, R.G.A., Zimmermann, F., 2001. Ermittlung der Kosten und Nutzen von Verkehr in Sachsen: Hauptstudie. Arbeitsstand 11/2001. Technische Universität Dresden, Dresden, 114 pp. 10.1007/3-8350-5713-8_4.²Becker, U.J., Gerike, R., Rau, A., Zimmermann, F., 2002. Ermittlung der Kosten und Nutzen von Verkehr in Sachsen: Hauptstudie. Abschlussbericht. Lehrstuhl für Verkehrsökologie, Technische Universität Dresden, Dresden, 214 pp.³Baum, H., Kranz, T., Westerkamp, U., 2010. Volkswirtschaftliche Kosten durch Straßenverkehrsunfälle in Deutschland: Bericht zum Forschungsprojekt FP 82.321/2007: Ermittlung der volkswirtschaftlichen Kosten durch Straßenverkehrsunfälle in Deutschland. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen M, Mensch und Sicherheit FP-82.321/2007, Bremerhaven, 96 pp.⁴Neumann, A., 2014. Ermittlung der externen Kosten des Verkehrs in Sachsen. Diplomarbeit, Dresden, 71 pp.⁵World Health Organization, 2019. Health Economic Assessment Tool (HEAT) for walking and cycling: v. 4.2. <https://www.heatwalkingcycling.org/#homepage>. Accessed 16 February 2021.**Tabelle A.23:** Angenommener Flächenbedarf für Stellplätze in m² je nach Verkehrsmittel [127]

Verkehrsmittel	Platzbedarf
Moped	2,30 ¹
Motorrad	2,76 ²
Auto	11,27 ³
Fahrrad / Pedelec	1,60 ⁴
e-Scooter	1,40 ⁵

Quellen:

¹Autoren Abschätzung²Stadt Zürich, 2007. Gestaltungs-Standards: Stadträume: Parkierung. Stadträume 2010 - Umsetzung der Strategie für die Gestaltung von Zürichs öffentlichem Raum, Zürich, 26 pp.³Basler Zeitung, 2018. Autos werden immer breiter und länger. <https://www.bazonline.ch/auto/autos-werden-immer-breiter-und-laenger/story/25635086>. Accessed 30 April 2021.⁴Steger-Vonmetz, C., Reis, M., 2018. Leitfaden FAHRRADPARKEN. Energieinstitut Vorarlberg; Amt der Vorarlberger Landesregierung, 32 pp. https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/cycling-guidance/leitfaden_fahrradparken.pdf. Accessed 7 May 2021.⁵Geis, I., Diaz, A.V., Wagner, N., Lietz, S., 2019. Analyse heutiger und zukünftiger Anwendungsfelder: Steckbriefe mikromobiler Fahrzeugtypen. Zukunftsfeld Mikromobile. Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik, 30 pp.

Tabelle A.24: Massen, Geschwindigkeiten und kinetische Energien im Stadtverkehr¹⁻⁹, eigene Berechnungen [127]

Verkehrsmittel	Masse in kg	Durchschnittsgeschwindigkeit in m/s	Kinetische Energie in J
Bus	17.185	6,70	385.719
Straßenbahn	37.874	6,70	850.091
Moped	189	9,60	8695
Motorrad	291	9,60	13.393
Auto	1588	9,70	74.690
Fußgänger	77	1,47	84
Fahrrad	93	3,89	704
Pedelec	100	3,89	754
e-Scooter	108	3,89	818
Lkw	16.000	8,60	591.680
Transporter	3500	8,60	129.430
Sonstige	16.000	8,60	591.680

Quellen:

¹Mensink, G.B.M., Schienkewitz, A., Haftenberger, M., Lampert, T., Ziese, T., Scheidt-Nave, C., 2013. Übergewicht und Adipositas in Deutschland: Ergebnisse der Studie zur Gesundheit Erwachsener in Deutschland (DEGS1). Bundesgesundheitsblatt, Gesundheitsforschung, Gesundheitsschutz 56, 786–794. 10.1007/s00103-012-1656-3.

²World Health Organization, 2019. Health Economic Assessment Tool (HEAT) for walking and cycling: v. 4.2. <https://www.heatwalkingcycling.org/#homepage>. Accessed 16 February 2021.

³Geis, I., Díaz, A.V., Wagner, N., Lietz, S., 2019. Analyse heutiger und zukünftiger Anwendungsfelder: Steckbriefe mikromobiler Fahrzeugtypen. Zukunftsfeld Mikromobile. Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik, 30 pp.

⁴Mein Fahrradträger, 2020. Wie schwer ist ein Fahrrad? <https://mein-fahrradtraeger.de/wie-schwer-ist-ein-fahrrad/>. Accessed 10 May 2021.

⁵Saighani, A., 2020. Bewertungsverfahren für einen ökonomischen Vergleich städtischer Verkehrssysteme. Dissertation. Universität Kassel, Kassel, 387 pp. 10.17170/kobra-202009241843.

⁶mobitool, 2021. mobitool-Faktoren v2.1: Die Excel-Datenbank mit aufbereiteten ecoinvent-Umweltdaten und Emissionsfaktoren (Update 2020). SBB CFF FFS; swisscom; Der Verband für nachhaltiges Wirtschaften; energie schweiz; Schweizerische Eidgenossenschaft - Bundesamt für Umwelt. <https://www.mobitool.ch/de/tools/mobitool-faktoren-v2-1-25.html>. Accessed 26 July 2021.

⁷Münchener Verkehrsgesellschaft mbH, 2021. U-Bahn, Bus und Tram: Unsere Fahrzeuge. Münchener Verkehrsgesellschaft mbH. <https://www.mvg.de/ueber/das-unternehmen/fahrzeuge.html>. Accessed 10 May 2021.

⁸Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), 2021b. Neuzulassungen von Pkw in den Jahren 2010 bis 2019 nach technischen Merkmalen. https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/Motorisierung/fz_n_motorisierung_archiv/2019/2019_n_motorisierung_pkw_zeitreihe_techn_merkmale.html?nn=2601598. Accessed 10 May 2021.

⁹MOTORselling, 2021. Motorroller 25km/h 45km/h 125cc. <https://www.motorselling.de/www-motor-selling-de>. Accessed 10 May 2021.

Tabelle A.25: Gesamtdaten zur Flächennutzung einschließlich Parkkosten und Platzbedarf [127]

Beschreibung	Wert
Flächenverbrauch pro Person für Pkw	² 65,2 m ²
Flächenverbrauch pro Person für Fahrrad / Motorrad / Moped	² 41 m ²
Flächenverbrauch pro Person für Busse (20% Auslastung)	² 8,6 m ²

Baukosten pro Stellplatz	17.644 € ¹
Lebenszeit eines Parkplatzes	25 Jahre ¹
Unterhaltskosten pro Jahr für einen Stellplatz	4.037 € ¹
Opportunitätskosten für Parkraum pro m ²	36,50 € ⁴
Größe des Parkplatzes	411,5 m ²
Stehzeit pro Tag für Car Sharing	20 Stunden ³
Stehzeit pro Tag für Privatfahrzeuge	23 Stunden ³
Opportunitätskosten für das Parken auf dem Gehweg pro m ²	4,00 € ⁵

Quellen:

¹Ulrich, Axhausen, Fuhrer, 2017. Eine Kosten-Nutzen-Analyse für den Parkplatz. Institut für Verkehrsplanung und Transportsystem - ETH Zürich.

²Randelhoff, M., 2019. Vergleich unterschiedlicher Flächeninanspruchnahmen nach Verkehrsarten (pro Person). <https://www.zukunft-mobilitaet.net/78246/analyse/flaechenbedarf-pkw-fahrrad-bus-strassenbahn-stadtbahn-fussgaenger-metro-bremsverzoegerung-vergleich/>. Accessed 5 July 2022.

³Abarzúa, T., 2015. CARSHARING UND ELEKTROMOBILITÄT. https://www.sonnenenergie.de/sonnenenergie-redaktion/SE-2015-06/Layout-fertig/PDF/Einzelartikel/SE-2015-06-s040-Mobilitaet-Carsharing_und_Elektromobilitaet.pdf. Accessed 5 July 2022.

⁴Landeshauptstadt München, M. Zielvorgabe "Vision Zero": Null Verkehrstote als Leitkonzept des Münchner Verkehrsmanagments. <https://muenchenunterwegs.de/angebote/zielvorgabe-vision-zero>. Accessed 16 February 2022.

⁵Welling, M., 2021. Nutzen von Grünflächen. e-Mail, 2 pp

Tabelle A.26: In HEAT¹ verwendete Berechnungsparameter [127]

	Fahrradverkehr	Fußgängerverkehr	Einheit
Relatives Sterberisiko (<i>RR</i>)	0,903 (0,87 – 0,94)*	0,886 (0,83 – 0,96)*	-
Bezugsdauer	100	168	Minuten/Woche
Referenzgeschwindigkeit	14	4,8	km / h
Anwendbare Altersgruppe	20 – 64	20 – 74	Jahre
Obergrenze für die Risikominde- rung	45 450	30 458	% Minuten/Woche
Wert der statistischen Lebensdauer		3.730.000	€ ₂₀₂₀

*95%- Konfidenzintervall

Quellen:

¹World Health Organization. Health economic assessment tool (HEAT) for walking and for cycling: Methods and user guide on physical activity, air pollution, injuries and carbon impact assessments, 86 pp. https://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0010/352963/Heat.pdf.

Tabelle A.27: Benzin-, Diesel- und Stromverbrauch nach Verkehrsträgern. Wo nötig, wurden die Verbrauchswerte auf die Flotte umgerechnet, die als Grundlage für die Arbeit diente [127]

Verkehrsmittel	Antriebstyp	Kraftstoffverbrauch in l/100 km	Stromverbrauch in kWh/100 km
Bus	Diesel	51,7 ¹	
Bus	Elektrisch		151,3 ²
Straßenbahn	Elektrisch		428,4 ³
U-Bahn	Elektrisch		1649,6 ³
S-Bahn	Elektrisch		400,0 ⁴
Moped	Benziner	2,9 ⁵	
Moped	Elektrisch		3,5 ⁵
Motorrad	Benziner	4,8 ⁵	
Auto	Benziner	7,8 ⁶	
Auto	Diesel	5,5 ⁶	
BEV	Elektrisch		15,4 ⁵
PHEV	Benziner u. Elektrisch	3,8 ⁵	8,3 ⁵
Car Sharing	Benziner u. Elektrisch	6,2 ^{5,6}	3,1 ^{5,6}
Pedelec	Elektrisch		0,7 ⁵
e-Scooter	Elektrisch		1,2 ⁵

Quellen:

¹Schmied, M., Mottschall, M., 2019. Berechnung des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen des ÖPNV, 60 pp.https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/energieverbrauch-treibhausgasemission-oepnv.pdf?__blob=publicationFile.²ViriCiti. Report E-Bus Performance: 100+ e-buses, 7 pp. <https://viriciti.com/wp-content/uploads/2020/07/ViriCiti-E-Bus-Performance-Report-July2020.pdf>. Accessed 9 August 2021.³Stadtverwaltung München, 2020. Strommix und Stromverbrauch der MVG. <https://fragdenstaat.de/anfrage/strommix-und-stromverbrauch-der-mvg/>. Accessed 22 July 2021⁴Leiter Produktionsplanung S-Bahn München, 2021b. Energieverbrauch S-Bahn München. e-Mail, München.⁵König, A., Nicoletti, L., Schröder, D., Wolff, S., Waclaw, A., Lienkamp, M., 2021b. An Overview of Parameter and Cost for Battery Electric Vehicles. WEVJ 12, 21. 10.3390/wevj12010021.⁶Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2020. Verkehr in Zahlen 2020/2021. Verkehr in Zahlen, Flensburg, 372 pp. <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/verkehr-in-zahlen-2020-pdf.pdf>. Accessed 13 March 2021.**Tabelle A.28:** Allgemeine Parameter für die Berechnung der zeitlich und räumlich variablen externen Kosten [159]

Parameter	Wert	Einheit	Anmerkung	Quelle
η	0,85		Für alle Fahrzeuge	[160]
f_r	0,014		Für alle Fahrzeuge	[160]
g	9,81	m/s ²		[160]

ρ	1,225	kg/m ³		[160]
NP_{street}	1,2		Wohnen, Leben und Fußgänger Straßen	
NP_{street}	0,8		Alle anderen Straßen	
C_{ref}	220,13	€	Referenzgeschwindigkeit 30 km/h	[41]
a	0,6418	€/dB ²		[41]
b	56,738	€/dB		[41]
c	1289,3	€		[41]
x_{BEV}	29,631	dB/(km/h) ^{ν}		[156]
y_{BEV}	0,2204			[156]
x_{ICEV}	35,177	dB/(km/h) ^{ν}		[156]
y_{ICEV}	0,1773			[156]
AP_{street}	1,2		Wohnen, Leben und Fußgänger Straßen	
$p_{fat_{ref}}$	0,28	%	Referenzgeschwindigkeit 30 km/h	[155]
$p_{ser_{ref}}$	10,33	%	Referenzgeschwindigkeit 30 km/h	[155]
$p_{(min_{ref})}$	89,39	%	Referenzgeschwindigkeit 30 km/h	[155]
α	0,0011	%/(km/h) ²		[155]
β	-0,0392	%/(km/h)		[155]
γ	0,1852	%		[155]
ε	0,1	%/(km/h)		[155]
ζ	5,5	%		[155]
κ	-0,0011	%/(km/h) ²		[155]
λ	-0,0608	%/(km/h)		[155]
μ	94,315	%		[155]

Tabelle A.29: Fahrzeugparameter für die Berechnung der zeitlich und räumlich variablen externen Kosten

	VW ID3	VW Golf VIII 1,4I TSI	VW Golf VIII 2,0I TDI
Fahrzeugmasse (m^k)	1925 kg	1480 kg	1585 kg
Luftwiderstandskoeffizient (w^k)	0,26	0,28	0,28
Stirnfläche (A^k)	2,36 m ²	2,21 m ²	2,21 m ²
Antriebstyp	BEV	Benziner	Diesel

Quelle: ADAC [117]

Tabelle A.30: Stauparameter für die Berechnung der zeitlich und räumlich variablen externen Kosten

Zeit	Start Uhrzeit	End Uhrzeit	$p_{con_{time}}$	$p_{con_{noise}}$	$p_{con_{pc}}$
Nacht	22	5	0,91	1	1
Morgen	6	9	1,08	1,04	1,03
Mittag	10	13	0,94	1,01	1,01
Nachmittag	14	17	1,21	1,06	1,05
Abend	18	21	1,01	1,02	1,02

Quellen: [63, 161, 163]

Tabelle A.31: Flächenverbrauchsparameter für die Berechnung der zeitlich und räumlich variablen externen Kosten

Nr.	Stadtteil	Kosten in €/m ²	Fläche in km ²	Einwohner pro km ²	Einwohnerzahl
1	Altstadt-Lehel	9208	3,15	6500	20475
2	Ludwigsvorstadt-Isarvorstadt	8464	4,4	11500	50600
3	Maxvorstadt	8460	4,3	12000	51600
4	Schwabing-West	7628	4,36	15100	65836
5	Au-Haidhausen	7872	4,21	14200	59782
6	Sendling	6426	3,94	10100	39794
7	Sendling-Westpark	6009	7,81	7100	55451

8	Schwanthalerhöhe	6965	2,07	14300	29601
9	Neuhausen-Nymphenburg	7907	12,91	7400	95534
10	Moosach	5644	11,09	4600	51014
11	Milbertshofen-Am Hart	5382	13,42	5500	73810
12	Schwabing-Freimann	6706	26	2700	69309
13	Bogenhausen	6829	23,17	3500	81095
14	Berg am Laim	5922	6,31	6800	42908
15	Tudering-Riem	5550	22,45	3000	67350
16	Ramersdorf-Perlach	5591	19,9	5400	107460
17	Obergiesing	5364	5,72	9000	51480
18	Untergiesing-Harlaching	6967	8,05	6400	51520
19	Thalkirchen-Obersendling- Forstenried-Fürstenried- Solln	5852	17,75	5100	90525
20	Hadern	5991	9,22	5300	48866
21	Pasing-Obermenzing	6061	16,49	4300	70907
22	Aubing-Lochhausen-Lang- wied	5396	34,06	1200	40872
23	Allach-Untermenzing	5700	15,45	2000	30900
24	Feldmoching-Hasenbergl	4824	28,93	2100	60753
25	Laim	5490	5,29	10200	53958

Quellen: [164, 166]

Anhang B Parameter für die Simulation

Tabelle B.1: Verwendete Durchschnittskostenwerte für die Simulation in €-cent/Pkm

Verkehrsmittel	Interne Kosten	Luftverschmutzung	Klima	Lärm	Flächenverbrauch	Stau	Unfälle	Barriere Effekte
Diesel Bus	15	1,158	1,936	0,183	2,759	2,939	2,144	0,241
U-Bahn	15	0,015	0,027	0,033	2,745	1,171	0,000	0,000
Straßenbahn	15	0,044	0,030	1,203	2,745	2,603	1,388	0,000
Auto (BEV)	37	0,230	1,110	0,193	4,902	3,651	2,549	1,513
Auto (Diesel)	38	1,415	2,709	0,231	4,902	3,651	2,549	1,513
Auto (Benziner)	38	0,479	2,608	0,193	4,902	3,651	2,549	1,513
Fußgänger	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,704	0,000
Fahrrad	5,5	0,000	0,000	0,000	0,841	0,000	5,715	0,162