

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt

Professur für Siedlungsstruktur und Verkehrsplanung

**Systemanalyse der Wirkungen von On-Demand-Mobilitätsdienstleistungen  
im Kontext nachhaltiger urbaner Mobilität**

Christian Assmann, M.Sc.

Vollständiger Abdruck der von der Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt der Technischen  
Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

**Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)**

genehmigten Dissertation.

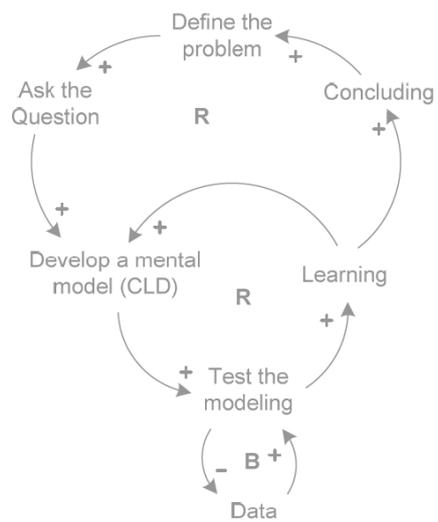
Vorsitzender: Prof. Dr. Constantinos Antoniou

Prüfende der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Gebhard Wulfhorst
2. Prof. Dr. Claus Tully

Die Dissertation wurde am 13.07.2020 bei der Technischen Universität München  
eingereicht und durch die Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt am 14.09.2020  
angenommen.





***„A Model is successful when the thinking behind it is successfully transferred from the model builder to the observer”***  
*(Haraldsson, 2004, S. 4)*



## **Danksagung**

Einen besonderen Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Gebhard Wulfhorst für das entgegengebrachte Vertrauen, die intensive Unterstützung und das stetige konstruktive Feedback. Auch für die Möglichkeit zur Mitarbeit an der Professur für Siedlungsstruktur und Verkehrsplanung und die Integration in den mobil.LAB Promotionskolleg danke ich Ihnen von Herzen.

Weiterhin danke ich Prof. Dr. Claus Tully für die konstruktive Unterstützung bei meiner Arbeit und die Einbringung seiner weitläufigen Erfahrungen in das Projekt.

Ich danke Tilman Haas und Dr. Julian Weber für die Ermöglichung dieser Arbeit, sowie Dr. Carl-Friedrich Eckhardt und Andreas Welter für das inhaltliche Feedback.

Weiter danke ich allen die mich auf dem Weg dieser Arbeit begleitet haben, insbesondere den Kolleginnen und Kollegen im mobil.LAB, meinen Freundinnen und Freunden und meiner Familie für die Unterstützung während der vergangenen Jahre.



In dieser Arbeit wird aus Gründen der besseren Lesbarkeit das generische Maskulinum verwendet. Weibliche und anderweitige Geschlechteridentitäten werden dabei ausdrücklich mitgemeint, soweit es für die Aussage erforderlich ist.



## **Kurzfassung**

Der starke Bevölkerungszuwachs in Städten stellt das urbane Mobilitätssystem vielerorts vor große Herausforderungen. Stau, Schadstoffemissionen, Parkdruck und ein überfüllter öffentlicher Personennahverkehr stehen insbesondere während der Stoßzeiten auf der Tagesordnung. Seit den gesteigerten digitalen Möglichkeiten durch Informations- und Kommunikationstechnologien gelten On-Demand Mobilitätsdienstleistungen als mögliche innovative Lösung im urbanen Raum. In diesem Zusammenhang strömten in den vergangenen Jahren zahlreiche Anbieter auf den Markt, um neue Mobilitätsangebote zu unterbreiten.

Diese Arbeit untersucht die Auswirkungen von On-Demand Mobilitätsdienstleistungen im Kontext nachhaltiger urbaner Mobilität am Beispiel der Stadt München. Hierbei werden unterschiedliche Angebotsformen, wie Free-Floating und Station-Based Car Sharing, Ride Hailing und Ride Pooling, in die Untersuchung einbezogen. Nachhaltige urbane Mobilität wird auf der Basis bestehender Studien und qualitativer Expertengespräche in drei messbare Indikatoren zu dem Verkehrsfluss, den Emissionen und der Flächeninanspruchnahme durch im öffentlichen Raum parkende Fahrzeuge operationalisiert.

Im Zentrum der Untersuchung steht eine ganzheitliche, systemische Betrachtung von On-Demand Mobilitätsdienstleistungen auf Basis der Methode System Dynamics. Die Entwicklung eines geeigneten System-Modells ermöglicht es, Feedback-Strukturen und Rückkopplungseffekte, welche eine Auswirkung auf das Systemverhalten besitzen, zu identifizieren und deren Entwicklung im zeitlichen Verlauf abzubilden. Weiterhin werden in der Untersuchung mögliche Verlagerungs- und Substitutionseffekte zwischen unterschiedlichen Verkehrsmitteln berücksichtigt.

Die szenario-basierten Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass On-Demand Mobilitätsdienstleistungen eine positive Auswirkung auf die Emissionen im Untersuchungsgebiet sowie die benötigte Fläche durch parkende Fahrzeuge im öffentlichen Raum haben. Bezogen auf das Verkehrsaufkommen konnte in der Untersuchung keine entlastende Wirkung festgestellt werden. Neben den Ergebnissen zu den Auswirkungen von On-Demand Mobilitätsdienstleistungen bietet diese Untersuchung durch den ausgewählten, systemischen Ansatz ein besseres Verständnis und neue Erkenntnisse der zugrunde liegenden Systemstruktur.

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>Kurzfassung</b> .....	<b>I</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>V</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>VII</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>VIII</b>
<b>Symbolverzeichnis</b> .....	<b>IX</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Hintergrund und Problemstellung .....	1
1.2 Einordnung in den Kontext .....	3
1.3 Forschungsziel und Hypothesen .....	3
1.4 Methodisches Vorgehen und Aufbau .....	5
<b>2 Stand der Forschung</b> .....	<b>8</b>
2.1 Urbane Mobilität .....	8
2.1.1 Begriffsdefinition Urbaner Raum .....	8
2.1.2 Begriffsdefinition und Einordnung Urbane Mobilität .....	9
2.2 Nachhaltige Mobilität .....	10
2.2.1 Begriffsdefinition Nachhaltige Entwicklung .....	10
2.2.2 Begriffsdefinition Nachhaltige Urbane Mobilität .....	11
2.2.3 Indikatoren für Nachhaltige Mobilität .....	14
2.3 Definition und Abgrenzung nachhaltige urbane Mobilität in dieser Arbeit .....	17
2.3.1 Die Stadt München als Untersuchungsgebiet dieser Arbeit .....	18
2.3.2 Operationalisierung und Definition nachhaltige urbane Mobilität im Rahmen dieser Arbeit .....	26
2.3.2.1 Verkehrs-Indikator: Verkehrsfluss und Durchschnitts-Geschwindigkeit .....	27
2.3.2.2 Flächen-Indikator: Flächeninanspruchnahme und Flächenverbrauch .....	29
2.3.2.3 Emissions-Indikator: Luftschadstoff- und Treibhausgas-Emissionen .....	31
2.3.2.4 Einordnung der Indikatoren in Nachhaltigkeits-Dimensionen .....	36
2.4 On-Demand Mobilität .....	37
2.4.1 Technologischer und gesellschaftlicher Hintergrund .....	37
2.4.2 Begriffsdefinition und Abgrenzung ODM .....	39
2.4.2.1 Car Sharing .....	42
2.4.2.2 Car Rental .....	44
2.4.2.3 Car Pooling .....	44
2.4.2.4 Ride Hailing .....	45
2.4.2.5 Ride Pooling .....	46
2.4.2.6 Mikro Mobilität .....	47
2.4.3 Aktuelle Bedeutung ODM im urbanen Mobilitätskontext .....	48
2.4.4 Marktanalyse ODM in München .....	50
2.4.4.1 Übersicht ODM-Anbieter in München .....	51

2.4.4.2 Verkehrsleistung und Modal Split ODM in München .....	55
2.4.5 Entwicklungspotential ODM .....	58
2.4.6 Auswirkungen ODM auf nachhaltige urbane Mobilität.....	59
2.4.6.1 Car Sharing.....	59
2.4.6.2 Ride Hailing .....	63
2.4.6.3 Ride Pooling .....	66
2.5. Zusammenfassung und Zwischen-Fazit Stand der Forschung .....	69
<b>3 Qualitative Expertenstudie .....</b>	<b>74</b>
3.1 Zielsetzung Experteninterviews.....	74
3.2 Planung - Halbstrukturierte Interviews .....	75
3.3 Stichprobe .....	75
3.4 Implementierung und Transkription .....	76
3.5 Auswertung mittels qualitativer Inhaltsanalyse .....	77
3.6 Empirische Ergebnisse.....	80
3.6.1 Verständnis ODM und Mobilitätspräferenzen der Nutzer.....	80
3.6.2 Externe Einflussfaktoren und Rahmenbedingungen ODM .....	85
3.6.3 Nachhaltige urbane Mobilität und die Auswirkung von ODM .....	90
3.6.4 Ableitung Modell-Variablen.....	95
3.7 Zusammenfassung und Zwischen-Fazit qualitative Expertenstudie.....	97
<b>4 System-Modell .....</b>	<b>100</b>
4.1 Methodisches Verständnis und Einordnung .....	100
4.1.1 Grundlagen und Einordnung System Thinking / System Dynamics .....	102
4.1.1.1 Causal-Loop Diagram .....	105
4.1.1.2 Stock-and-Flow Diagramm .....	107
4.1.2 Qualitative versus quantitative System-Modellierung.....	110
4.1.3 Überblick System Thinking / System Dynamics im Kontext Mobilität und Transport.....	110
4.2 Modellbildung.....	111
4.2.1 Überblick über den Modellbildungsprozess .....	112
4.2.2 Erstellung eines qualitativen Causal-Loop Diagramms.....	114
4.2.2.1 Variablensatz .....	114
4.2.2.2 Analyse der Wirkzusammenhänge und Feedbackstrukturen .....	115
4.2.2.3 Causal Loop-Diagramm .....	122
4.2.3 Erstellung eines quantitativen Stock-and-Flow Diagramms .....	124
4.2.3.1 Datengrundlage der quantitativen Modellierung.....	124
4.2.3.2 Variablensatz .....	126
4.2.3.3 Modularer Aufbau des Stock-and-Flow Diagramms .....	128
4.2.3.4 Exemplarischer Aufbau Stock-and-Flow Fahrzeug Modell MIV .....	128
4.2.3.5 Stock-and-Flow Diagramm .....	132

4.3	Aufstellung relevanter Zukunfts-Szenarien zur Simulation des Systemverhaltens.....	133
4.3.1	Methodische Anwendung der Szenario-Technik.....	134
4.3.2	Aufstellung Szenarien.....	135
4.3.2.1	Evolutions-Szenario .....	140
4.3.2.2	Revolutions-Szenario .....	141
4.3.2.3	Disruptions-Szenario .....	142
4.4	Auswertung der Ergebnisse .....	143
4.4.1	Bevölkerungszuwachs und Entwicklung der Verkehrsnachfrage .....	143
4.4.2	Verteilung der Anzahl der Wege und Verkehrsleistung.....	144
4.4.3	Fahrzeugkilometer und MIV Fahrzeugbestand .....	146
4.4.4	Auswertung Verkehrs-Indikator: Verkehrsfluss und Durchschnitts-Geschwindigkeit .....	150
4.4.5	Auswertung Flächen-Indikator: Flächeninanspruchnahme und Flächenverbrauch.....	151
4.4.6	Auswertung Emissions-Indikator: Luftschadstoff- und Treibhausgas-Emissionen .....	154
4.5	Validierung des Modells.....	158
4.5.1	Limitationen des System Dynamics Stock-and-Flow Modells .....	159
4.5.2	Methoden zur Validierung und Plausibilisierung von System Dynamics Modellen .....	164
4.5.3	Überprüfung der Modellstruktur.....	167
4.5.4	Plausibilisierung des Modellverhaltens .....	168
4.6	Zusammenfassung und Zwischen-Fazit System-Modell.....	171
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse.....</b>	<b>173</b>
<b>6</b>	<b>Kritische Reflexion der methodischen Vorgehensweise und weiterer Forschungsbedarf .....</b>	<b>180</b>
<b>7</b>	<b>Ableitung von Handlungsempfehlungen .....</b>	<b>183</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>185</b>
	<b>Eidesstattliche Erklärung .....</b>	<b>210</b>
	<b>Anhang .....</b>	<b>211</b>

**Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Aufbau der vorliegenden Arbeit .....	7
Abbildung 2: Rangfolge nachhaltiger Verkehrsmittel .....	14
Abbildung 3: Überblick unterschiedlicher Indikatoren.....	15
Abbildung 4: Einwohnerdichte der Stadtbezirke in München 2018 .....	19
Abbildung 5: Entwicklung Modal Split in der Stadt München.....	21
Abbildung 6: Autobesitz in München nach Regionen .....	21
Abbildung 7: Spezifische Emissionen Pkw .....	32
Abbildung 8: NO <sub>2</sub> -Belastung im Jahresmittel im Hauptverkehrsstraßennetz der LHM.....	34
Abbildung 9: Vorgehen Quantifizierung Indikatoren Emissionsinventar.....	36
Abbildung 10: Abbildung und Verortung der Nachhaltigkeits-Dimensionen .....	36
Abbildung 11: Segmentierung bestehender On-Demand Mobilitäts-Angebote .....	41
Abbildung 12: Differenzierung bestehender On-Demand Mobilitäts-Angebote.....	41
Abbildung 13: Ausprägungsformen Mikro Mobilität .....	48
Abbildung 14: Hypecurve bei der Einführung neuer technologischer Produkte/Services ..	48
Abbildung 15: Überblick ODM-Marktanalyse München 2019 .....	51
Abbildung 16: Entwicklung Anteil ODM am Modal Split in München.....	57
Abbildung 17: qualitativer Forschungsansatz der Expertenstudie.....	74
Abbildung 18: Stichprobe qualitative Expertenstudie .....	76
Abbildung 19: Haupt-Stufen im Analyse-Prozess der qualitativen Inhaltsanalyse .....	78
Abbildung 20: Beispiel des Kategorisierungsprozesses.....	79
Abbildung 21: Wortwolke Expertenverständnis ODM.....	80
Abbildung 22: Mobilitätspräferenzen bei Nutzung von ODM-Angeboten .....	82
Abbildung 23: Überblick externe Einflussfaktoren und Rahmenbedingungen .....	85
Abbildung 24: Expertenverständnis nachhaltige urbane Mobilität.....	92
Abbildung 25: Überblick relevanter Nachhaltigkeits Aspekte .....	92
Abbildung 26: Vereinfachte Darstellung der Wirkzusammenhänge der Haupt-Kategorien ...	96
Abbildung 27: System Thinking Eisberg-Modell .....	101
Abbildung 28: Verständnis System Thinking, System Analyse und System Dynamics .....	102
Abbildung 29: Kausalität und Rückkopplungsstrukturen .....	105
Abbildung 30: Grundelemente eines Stock-and-Flow Diagramms .....	107
Abbildung 31: Verknüpfungen verschiedener Elemente eines Stock-and-Flow Diagramms.	108
Abbildung 32: Prozesse der Modellbildung nach Richardson und Forrester .....	112
Abbildung 33: Überblick CLD Variablen.....	115
Abbildung 34: Rückkopplungsschleife Attraktivität und Verkehrsnachfrage.....	116
Abbildung 35: Rückkopplungssystem Attraktivität und Verkehrsnachfrage .....	117
Abbildung 36: Rückkopplungsschleife Verkehrsfluss und Durchschnitts-Geschwindigkeit	118
Abbildung 37: Rückkopplungssystem Verkehrsfluss und Durchschnitts-Geschwindigkeit..	118
Abbildung 38: Rückkopplungsschleife Flächeninanspruchnahme und Flächenverbrauch....	119

Abbildung 39: Rückkopplungssystem Flächeninanspruchnahme und Flächenverbrauch.....	120
Abbildung 40: Rückkopplungssystem für Luftschadstoff- und Treibhausgas-Emissionen .	121
Abbildung 41: CLD ODM im Kontext nachhaltiger urbaner Mobilität .....	123
Abbildung 42: Tagesverlauf der Startzeitpunkte der MIV-Fahrten an Wochentag im Untersuchungsgebiet .....	124
Abbildung 43: Tagesverlauf der Durchschnitts-Geschwindigkeit im Untersuchungsgebiet.	125
Abbildung 44: Überblick relevanter Systemvariablen .....	126
Abbildung 45: Überblick ausgewählter SFD Variablen .....	127
Abbildung 46: Modularer Aufbau des SFD's .....	128
Abbildung 47: SFD Fahrzeuge MIV .....	129
Abbildung 48: SFD Fahrzeuge MIV BEV/PHEV .....	131
Abbildung 49: Szenario-Trichter möglicher Zukunfts-Entwicklungen .....	134
Abbildung 50: Überblick Szenarien-Struktur .....	135
Abbildung 51: Lineare Trendextrapolation des Anteils von ODM im Evolutions-Szenario.	136
Abbildung 52: Zugrundeliegende Substitutionseffekte Unter-Szenarien .....	137
Abbildung 53: Entwicklung Bevölkerungsanzahl und Anzahl an Wegen .....	143
Abbildung 54: Simulationsergebnisse Anzahl Wege SE-2, SR-2, SD-2 .....	144
Abbildung 55: Simulationsergebnisse Verkehrsleistung SE-2, SR-2, SD-2.....	145
Abbildung 56: Simulationsergebnisse der ODM und MIV Fahrzeugkilometer SE-2, SR-2, SD-2.....	146
Abbildung 57: Simulationsergebnisse der ODM und MIV Fahrzeugkilometer SD-3.....	147
Abbildung 58: Simulationsergebnisse Gesamt Fahrzeugkilometer .....	147
Abbildung 59: Simulationsergebnisse Fahrzeuge MIV SE-2 .....	148
Abbildung 60: Simulationsergebnisse Fahrzeuge MIV .....	149
Abbildung 61: Simulationsergebnisse ODM Fahrzeugflotte SE-2 .....	149
Abbildung 62: Simulationsergebnisse Durchschnitts-Geschwindigkeit .....	150
Abbildung 63: Simulationsergebnisse durch ODM abgeschaffte MIV Fahrzeuge.....	152
Abbildung 64: Simulationsergebnisse Parkende Fahrzeuge im öffentlichen Raum .....	153
Abbildung 65: Simulationsergebnisse benötigte Stellplatz-Fläche im öffentlichen Raum....	153
Abbildung 66: Simulationsergebnisse CO <sub>2</sub> Emissionen .....	155
Abbildung 67: Simulationsergebnisse NO <sub>x</sub> Emissionen .....	156
Abbildung 68: Simulationsergebnisse PM Emissionen .....	157
Abbildung 69: Zeitlich-schwankende Nachfrage-Verteilungen .....	162
Abbildung 70: Überblick über traditionelle Test-Verfahren zur Validierung von SD Modellen .....	165
Abbildung 71: Iterativer Prozess der unterschiedlichen Validierungs-Stufen .....	166
Abbildung 72: Identifizierte Ursachen des Modellverhaltens.....	178

**Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Definitionen nachhaltige Entwicklung..... 11

Tabelle 2: Definitionen nachhaltige (urbane) Mobilität..... 12

Tabelle 3: Nachhaltigkeits-Ziele im Kontext Mobilität ..... 13

Tabelle 4: Herausforderungen nachhaltiger (urbaner) Mobilität ..... 13

Tabelle 5: Studienüberblick zur Operationalisierung nachhaltiger urbaner Mobilität..... 15

Tabelle 6: WBCSD Indikatoren für nachhaltige urbane Mobilität ..... 16

Tabelle 7: Ziele der Modellstadt 2030 ..... 25

Tabelle 8: Übersicht Strassenstatistik München ..... 30

Tabelle 9: Grenzwerte Luftschadstoffe ..... 33

Tabelle 10: Entwicklung der NO<sub>2</sub>-Belastung an den LÜB-Messstationen  
im Jahresmittel in µg/m<sup>3</sup> ..... 34

Tabelle 11: Überblick Car Sharing Anbieter München ..... 52

Tabelle 12: Überblick Ride Hailing / Pooling Anbieter München..... 53

Tabelle 13: Überblick Mikro Mobilität Anbieter München..... 54

Tabelle 14: Überblick relevanter Literatur zur Auswirkung von Car Sharing..... 61

Tabelle 15: Überblick relevanter Literatur zur Auswirkung von Ride Hailing und TNC ..... 64

Tabelle 16: Überblick relevanter Literatur zur Auswirkung von Ride Pooling ..... 68

Tabelle 17: Zusammenfassung Indikatoren Nachhaltige urbane Mobilität ..... 70

Tabelle 18: Zusammenfassung ODM-Angebotsformen in München ..... 71

Tabelle 19: Überblick Haupt- und Unter-Kategorien der qualitativen Inhaltsanalyse..... 96

Tabelle 20: Beschreibung der Symbole eines Causal-Loop Diagramms ..... 106

Tabelle 21: Überblick Rückkopplungsschleifen des CLD's ..... 121

Tabelle 22: Zugrunde liegende Differenz- und Differentialgleichungssysteme  
des SFD Fahrzeuge MIV ..... 130

Tabelle 23: Zugrunde liegende Differentialgleichungssysteme des SFD Fahrzeuge MIV... 131

Tabelle 24: Zusammenfassung der Berechnungs-Systemelemente in SFD Sub-Modellen... 133

Tabelle 25: Entwicklungsfaktoren der Unter-Szenarien des Haupt-Szenarien Evolution ..... 140

Tabelle 26: Entwicklungsfaktoren der Unter-Szenarien des Haupt-Szenarien Revolution ... 141

Tabelle 27: Entwicklungsfaktoren der Unter-Szenarien des Haupt-Szenarien Disruption.... 142

Tabelle 28: Simulationsergebnisse Durchschnitts-Geschwindigkeit 2030 ..... 151

Tabelle 29: Simulationsergebnisse benötigte Stellplatz-Fläche im öffentlichen Raum 2030 154

Tabelle 30: Simulationsergebnisse CO<sub>2</sub> Emissionen ..... 155

Tabelle 31: Simulationsergebnisse NO<sub>x</sub> Emissionen ..... 156

Tabelle 32: Simulationsergebnisse PM Emissionen ..... 157

Tabelle 33: Überblick angewandter Test-Verfahren zur Validierung der Modellstruktur..... 168

Tabelle 34: Überblick angewandter Test-Verfahren zur Validierung des Modellverhaltens 169

## Abkürzungsverzeichnis

<b>ASTRA</b>	Assessment of Transport Strategies (Modell)
<b>BBSR</b>	Bundesinstitut für Bau- Stadt- und Raumforschung
<b>bcs</b>	Bundesverband für Car Sharing e.V.
<b>BEV</b>	Battery Electric Vehicle
<b>BImSchV</b>	Bundesimmissionsschutzverordnung
<b>BMW</b>	Bayrische Motoren Werke AG
<b>CLD</b>	Causal-Loop Diagramm
<b>CO<sub>2</sub></b>	Kohlenstoffdioxid
<b>COPERT</b>	Computer Program for estimating Emissions from Road Transport
<b>CSU</b>	Christlich-Soziale Union
<b>DB</b>	Deutsche Bahn AG
<b>ECMT</b>	European Conference of Ministers of Transportation
<b>EEA</b>	European Environment Agency
<b>Eurostat</b>	Statistisches Amt der Europäischen Union
<b>FCD</b>	Floating-Car Daten
<b>HBEFA</b>	Handbuch für Emissionsschutzfaktoren
<b>ICE</b>	Internal Combustion Engine
<b>ifmo</b>	Institut für Mobilitätsforschung
<b>IKT</b>	Information- und Kommunikationstechnologie
<b>LÜB</b>	Lufthygienischen Landesüberwachungssystem Bayern
<b>MARS</b>	Metropolitan Activity Relocation Simulator
<b>MFD</b>	Makroskopisches Fundamentaldiagramm
<b>MIV</b>	Motorisierter Individualverkehr
<b>MOST</b>	Moving on Sustainable Transportation
<b>MVG</b>	Münchner Verkehrsgesellschaft mbH
<b>MVV</b>	Münchner Verkehrsverbund
<b>NEC</b>	National Emission Ceilings
<b>NGO</b>	Non-Profit-Organisationen (Nichtregierungsorganisation)
<b>NO<sub>x</sub></b>	Stickoxide
<b>ODM</b>	On-Demand Mobilität
<b>OECD</b>	Organization for Economic Cooperation and Development
<b>ÖPNV</b>	Öffentlicher Personennahverkehr
<b>PHEV</b>	Plug-In-Hybrid Electric Vehicle
<b>PKM</b>	Personenkilometer
<b>PKW</b>	Personenkraftwagen
<b>PM</b>	Feinstaub
<b>SD</b>	System Dynamics
<b>SFD</b>	Stock-and-Flow Diagramm
<b>SM</b>	Shared Mobility
<b>SMART</b>	spezifisch, messbar, erreichbar, realistisch und zeitgebunden
<b>ST</b>	System Thinking
<b>StIBV</b>	Bayerisches Staatsministerium des Innern, für Bau und Verkehr
<b>StMUV</b>	Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz
<b>SUMP</b>	Sustainable-Urban-Mobility-Plan
<b>TRB</b>	Transportation Research Board
<b>TREMOT</b>	Transport Emission Model
<b>VAF</b>	Vollautonomes Fahren
<b>VEP</b>	Verkehrsentwicklungsplan
<b>VKM</b>	Fahrzeugkilometer (Vehicle-Kilometer)
<b>VMP</b>	Verkehrs- und Mobilitätsmanagementplan
<b>WBCSD</b>	World Business Council for Sustainable Development

## Symbolverzeichnis

<i>A</i>	Fläche	m <sup>2</sup>
<i>ax</i>	Zufluss	-
<i>bx</i>	Abfluss	-
<i>C</i>	Anzahl Fahrzeuge im Untersuchungsgebiet München	-
<i>CS</i>	Car Sharing	-
<i>EF</i>	Emissionsfaktoren	gr/km
<i>EI</i>	Emissionsinventar	gr
<i>F</i>	Fahrzeug	-
<i>Fb</i>	Fahrzeugbesitzquote	%
<i>FF</i>	Free-Floating	-
<i>FL</i>	Fahrleistung	km
<i>h</i>	Indize - Tagesstunden	-
<i>i</i>	Anzahl Trips pro Stunde	-
<i>m</i>	Indize	-
<i>MS</i>	Modal Split	%
<i>n</i>	Indize - absolute Anzahl Trips pro Tag	-
<i>Poll</i>	Pollutant	-
<i>Q</i>	Verkehrsfluss	-
<i>RH</i>	Ride Hailing	-
<i>RP</i>	Ride Pooling	-
<i>SB</i>	Station-Based	-
<i>t</i>	Zeit	t
<i>V</i>	Geschwindigkeit	Km/h
<i>x</i>	Niveau	-
<i>x<sub>0</sub></i>	Anfangswert (Niveau)	-
<i>z</i>	Definierter Ort	-
$\Delta N$	Straßenquerschnitt	-
<i>V</i>	Geschwindigkeit	km/h
$\omega$	Anteil der im öffentlichen Raum parkenden Fahrzeuge	%



## 1 Einleitung

### 1.1 Hintergrund und Problemstellung

Seit dem Jahr 2008 wohnen zum ersten Mal in der Geschichte der Menschheit mehr Menschen in urbanen Agglomerationen als in ländlichen Gebieten (vgl. United Nations, 2019). Studien zufolge soll der prozentuale Anteil der globalen Weltbevölkerung in Städten bis zum Jahr 2050 auf über 68 % steigen (vgl. United Nations, 2019; Rode, 2013). Diese drastische Erhöhung der Bevölkerungszahlen in urbanen Gebieten bringt neben positiven Effekten wie einem generellen Produktivitätszuwachs auch viele Herausforderungen für die Umwelt und die Lebensqualität der Bevölkerung in den Städten mit sich (vgl. Xiaoshan, 2019; Glaeser, 2011). Das Mobilitätssystem steht vor dem Hintergrund eines immer weiter steigenden Verkehrsaufkommens vor großen Herausforderungen. Insbesondere in Großstädten mündet das stark anwachsende Verkehrsaufkommen zunehmend in Verkehrsproblemen und einer generellen Überlastung des Mobilitätssystems. Global benennen Städte in diesem Zusammenhang folgende fünf Haupt-Herausforderungen: eine Überlastung des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV), massive Verkehrs- und Parkprobleme im motorisierten Individualverkehr (MIV) sowie Luftverschmutzung und CO<sub>2</sub>-Emissionen (vgl. United Nations, 2015, Wulfhorst et al. 2013). Besonders spürbar werden diese Überlastungseffekte während der Stoßzeiten im MIV und ÖPNV.

In Deutschland treten die genannten Effekte unter anderem besonders in München auf. Die Einwohnerzahl ist hier seit dem Olympiajahr 1972 um mehr als 200.000 Personen auf über 1,55 Millionen angestiegen. Prognosen zufolge wird bis zum Jahr 2040 ein weiterer Anstieg auf über 1,85 Millionen Personen erwartet (vgl. LHM, 2019a). Überlastungen des MIV sowie Kapazitätsprobleme des ÖPNV stehen beim Mobilitätssystem auf der Tagesordnung. Weiterhin steigt die absolute Anzahl an Personenkraftwagen (PKW) stetig an (vgl. Follmer & Belz, 2018), wodurch der Parkdruck und der damit verbundene Parksuchverkehr kontinuierlich zunehmen. Immissionsmessungen im Stadtgebiet zeigen, dass an einigen Hauptstraßen die Grenzwerte für Stickstoffdioxid regelmäßig überstiegen werden (vgl. StMUV, 2019).

Es liegt nahe, dass diese starke Wachstumsentwicklung vor dem Hintergrund einer nachhaltigen Stadtentwicklung nicht ungehindert weiter ansteigen kann. So gibt es unterschiedliche Bestrebungen aus Politik, Wirtschaft und Wissenschaft, um den Einfluss des Mobilitätssystems und insbesondere des MIV auf die Umwelt zu mildern. Die Politik stellt dabei mit dem regulatorischen Rechtsrahmen die wohl wichtigste Komponente dar. Neben der Umwidmung von Flächen, einer Erhöhung der Parkkosten für das Kurz- und Langzeitparken oder einer CO<sub>2</sub>-Steuer werden zunehmend auch regulatorische Maßnahmen, wie eine City-Maut oder Fahrverbote, diskutiert (vgl. LHM, 2019b). In der Wirtschaft wurde in den vergangenen Jahren eine erhöhte Aufmerksamkeit in die technologische Weiterentwicklung der Fahrzeuge gesteckt, um

---

den Kraftstoffverbrauch und die Emissionen zu senken. Im urbanen Kontext werden die Ergebnisse dieser technologischen Verbesserungen jedoch in aller Regel durch die stetige Zunahme und Nutzung an Fahrzeugen kompensiert (vgl. Hautzinger et al., 2010). In der Wissenschaft wird neben der Erforschung von technischen Innovationen zunehmend das breite Thema der „Mobilität der Zukunft“ diskutiert und erforscht. Aber wie sieht diese Mobilität aus? Was sind mögliche Lösungen der genannten Problematik? Können neuartige Mobilitätskonzepte und –services zu einer positiven Veränderung beitragen? Wie wirken sich unterschiedliche Mobilitätsangebote auf die Städte und auf die Umwelt aus?

Ein weiteres Potential zur Reduzierung der urbanen Herausforderungen im Mobilitätssystem bieten ‚On-Demand‘ Mobilitätsdienstleistungen (folgend als On-Demand Mobilität bezeichnet). Diese meist bedarfsorientierten Systeme bieten die Möglichkeit, durch das Teilen von Fahrten oder Fahrzeugen Personen zu transportieren, ohne dass jede Person ein eigenes Fahrzeug benötigt. Insbesondere seit der gestiegenen technologischen Möglichkeiten der Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) durch Smartphones erleben flexible ‚On-Demand‘ Mobilitätsangebote einen starken Zuwachs. So strömten seit 2007 zahlreiche neue Mobilitätsanbieter auf den Markt, mit dem Ziel sich als Akteur im urbanen Mobilitätssystem zu etablieren (vgl. Machado et al., 2018). Das Angebotsspektrum reicht dabei von einer Vielzahl kleinerer Startups bis hin zu bereits global vertretenen Unternehmen, die ihr bestehendes Angebot um weitere Services erweitert haben. Die Bayerische Motoren Werke (BMW) erkannten die hohe Bedeutung von On-Demand Mobilität für die Automobilindustrie, was sich beispielsweise durch die Gründung des Car Sharing Joint Ventures DriveNow (seit 2019 ShareNow) im Jahr 2011 zusammen mit der Firma Sixt bestätigt hat. In einem Interview sagte Harald Krüger, der damalige Vorstandsvorsitzende der BMW Group, hierzu:

» *Ich gehe davon aus, dass die Bedeutung der Mobilitätsdienstleistungen für unser Unternehmen und damit der entsprechende Umsatzanteil deutlich zunehmen werden. Aber die digitale Entwicklung schreitet viel zu rasch fort, um sich heute auf eine Zahl festzulegen.* « (vgl. Tagesspiegel, 2016)

Aufgrund der Neuheit sowie der starken Dynamik dieser Angebote ist es sowohl für Städte als auch für die betreibenden Unternehmen schwer zu prognostizieren, wie groß der Anteil von On-Demand Mobilität am urbanen Mobilitätssystem einmal werden kann. Auch die Effekte und Auswirkungen eines steigenden Anteils von On-Demand Mobilität konnten in diesem Zusammenhang in diesem jungen Forschungsfeld bislang noch nicht final wissenschaftlich erforscht werden.

Auf der einen Seite stellt On-Demand Mobilität für die Nutzer eine attraktive Mobilitätsoption dar, welche das Potential hat, Fahrzeuge besser auszulasten, Besetzungsgrade zu erhöhen und

somit Ressourcen einzusparen. Auf der anderen Seite können Leerfahrten und Verlagerungseffekte vom ÖPNV hin zu neuen Mobilitätsservices zu einer Erhöhung der insgesamt gefahrenen Kilometer führen und somit in einem erhöhten Verkehrsaufkommen und steigenden Emissionen resultieren.

In der Literatur existieren bereits zahlreiche Studien im Forschungsbereich neuer Mobilitätsdienstleistungen. Methodisch basieren diese Untersuchungen häufig auf quantitativen Befragungen, Experteneinschätzungen oder greifen auf mikroskopische und agenten-basierte Simulationen zurück. Eine wissenschaftliche Untersuchung von On-Demand Mobilität in einem holistischen, ganzheitlichen Systemverständnis einer Stadt, welches mögliche Wechselwirkungen, Verlagerungs- und potentielle Rebound-Effekte mit berücksichtigt, existiert nach eigenen Recherchen zum aktuellen Zeitpunkt allerdings noch nicht.

## 1.2 Einordnung in den Kontext

Diese Arbeit versteht sich als eine systemische Technikfolgeabschätzung von On-Demand Mobilität im Kontext nachhaltiger urbaner Mobilität. Dem Autor ist dabei bewusst, dass bei einer umfassenden Betrachtung der Problemstellung der aktuelle Transformationsprozess westlich geprägter Städte von der Autogerechten zur Lebenswerten Stadt in erster Linie eine politische Herausforderung darstellt. Diesbezüglich wird für eine nachhaltige und stadtverträgliche Mobilitätsentwicklung eine Neuausrichtung der Verkehrsstrategie als notwendig angesehen, welche das Zusammenspiel von Mobilitätsnachfrage, Rahmenbedingungen und Angebot integrativ betrachtet und dabei auch die heterogenen Mobilitätspräferenzen der Menschen berücksichtigt (vgl. Wefering et al., 2014; European Union, 2018; Eckhardt & Hansen, 2020). On-Demand Mobilität wird in diesem übergeordneten, ordnungspolitischen Zusammenhang als eine Option angesehen, um die strukturelle Angebotslücke zwischen dem ÖPNV und dem MIV zu schließen (vgl. Karl & Maertins, 2009). Nur durch die Implementierung attraktiver Alternativangebote zum MIV im urbanen Mobilitätssystem wird es langfristig möglich sein, die Mobilität in der Stadt nachhaltig zu gestalten und dabei den Mobilitätspräferenzen der Menschen gerecht zu werden. Für eine erfolgreiche Transformation wird es weiterhin als notwendig angesehen, Verkehrsstrategien zu entwickeln, welche nicht ausschließlich an den Folgen der Verkehrsprobleme ansetzen, sondern die eigentlichen Ursachen beseitigen und in ein schlüssiges Gesamtkonzept einzahlen.

## 1.3 Forschungsziel und Hypothesen

Diese Arbeit verfolgt das Ziel, auf Basis eines holistischen Modellansatzes, die Auswirkungen von On-Demand Mobilität im Kontext nachhaltiger urbaner Mobilität aufzuzeigen und mögliche Entwicklungen in der Zukunft, am Beispiel der Stadt München, zu beschreiben. Hierfür ist

---

es zunächst notwendig, alle existierenden Ausprägungen und Formen von On-Demand Mobilität in das Mobilitätssystem einzuordnen und nachhaltige urbane Mobilität entsprechend zu operationalisieren. Weiterhin ist es essentiell, alle relevanten Einflussgrößen und Rahmenbedingungen zu analysieren, welche die zukünftige Entwicklung von On-Demand Mobilität beeinflussen. Der Arbeit liegt dabei stets ein holistischer Ansatz zugrunde, welcher die Wechselwirkungen zwischen den Rahmenbedingungen des Mobilitätssystems in der Stadt München, On-Demand Mobilität und den Auswirkungen dieser auf ausgewählten Kriterien der Nachhaltigkeit beschreibt und hinterfragt. Auf Basis der durchgeführten Expertenbefragung (vgl. Kapitel 3) sollen in dieser Arbeit konkret die Auswirkungen von On-Demand Mobilität auf die Indikatoren Verkehrsfluss, Emissionen und Flächeninanspruchnahme untersucht werden. Ziel ist es herauszufinden, unter welchen Bedingungen On-Demand Mobilität zu einer Verbesserung der Indikatoren im Untersuchungsgebiet beitragen kann.

Durch das Hinterfragen von unterschiedlichen Wechselwirkungen sollen in der Arbeit Feedback-Strukturen und somit mögliche Rebound-Effekte aufgedeckt und diskutiert werden. Als besonders interessant werden in diesem Zusammenhang mögliche Verlagerungseffekte zwischen unterschiedlichen Verkehrsträgern des Mobilitätssystems angenommen. Die Arbeit soll dabei in relevanten Zukunfts-Szenarien beleuchten, wie sich die neu eingestellten Verteilungen im Modal Split auf die Indikatoren Verkehrsfluss, Emissionen und Flächeninanspruchnahme auswirken. Ein weiteres Ziel der Arbeit ist es konkrete Handlungsempfehlungen zur Planung und Integration zukünftiger On-Demand Mobilität unter Berücksichtigung und Bewertung der neu gewonnenen Ergebnisse abzuleiten. Auf Basis einer umfangreichen Literaturanalyse (vgl. Kapitel 2), einer explorativen Expertenstudie (vgl. Kapitel 3) und der daraus resultierenden Problemstellung ergeben sich für diese Arbeit folgende übergeordnete Forschungsfragen:

- 1. Was sind die Auswirkungen von On-Demand Mobilität auf den Verkehrsfluss, die Flächeninanspruchnahme und die Emissionen in der Stadt München?**
- 2. Was sind die relevanten Einflussfaktoren auf die zukünftige Entwicklung von On-Demand Mobilität?**
- 3. Unter welchen Bedingungen kann On-Demand Mobilität zu einer Verbesserung von Verkehrsfluss, Flächeninanspruchnahme und Emissionen in der Stadt München beitragen?**

Aufgrund der hohen Unsicherheiten bei der zukünftigen Entwicklung von On-Demand Mobilität sollen in der Arbeit unterschiedliche, konkrete Zukunfts-Szenarien untersucht werden. Für jedes Szenario sollen die folgenden Hypothesen (H1, H2, H3) für den Untersuchungsraum München im Vergleich zu einem Basis-Szenario geprüft und diskutiert werden (vgl. Kapitel 4.4). Die Hypothesen lauten dabei wie folgt:

H1: On-Demand Mobilität führt zu einer Verbesserung des Verkehrsflusses.

H2: On-Demand Mobilität führt zu einer Reduktion der Flächeninanspruchnahme durch im öffentlichen Raum parkende Fahrzeuge.

H3: On-Demand Mobilität führt zu einer Reduktion der verkehrsbedingten Treibhausgasemissionen und lokaler Luftschadstoffe.

#### 1.4 Methodisches Vorgehen und Aufbau

Um alle existierenden und neuartigen Formen von On-Demand Mobilität in einem holistischen Wirkungsgefüge am Beispiel der Stadt München einordnen zu können, folgt die Arbeit einem explorativen Ansatz. Hierbei wird zunächst in einer fundierten Literaturanalyse der aktuelle Stand der Forschung aller relevanten Themenfelder aufgezeigt. Einleitend werden die Begriffe „urbane Mobilität“ und „nachhaltige urbane Mobilität“ für diese Arbeit abgegrenzt und operationalisiert. Darauf aufbauend wird der Bereich der On-Demand-Mobilität vorgestellt und eingeordnet. Hierbei erfolgen neben einer eindeutigen Begriffsdefinition und Abgrenzung eine Erläuterung der technologischen und kulturellen Hintergründe, eine Marktanalyse in München sowie eine Einordnung der derzeitigen Bedeutung von On-Demand Mobilität im aktuellen Mobilitätssystem. Anschließend wird der aktuelle Forschungsstand der Literatur zu den Auswirkungen von On-Demand Mobilität im Kontext nachhaltiger urbaner Mobilität aufgezeigt und der daraus entstehende Forschungsbedarf für diese Arbeit abgeleitet.

Auf Basis dieser fundierten Literaturanalyse werden qualitative Experteninterviews zum Untersuchungsgegenstand von On-Demand Mobilität und deren Auswirkungen auf eine nachhaltige Mobilitätsentwicklung in der Stadt durchgeführt und ausgewertet. Durch diese explorative Vorgehensweise sollen noch weitere Aspekte in die Untersuchung aufgenommen werden, auf welche noch nicht explizit in der Literatur verwiesen wurde. Die Auswertung der Interviews orientiert sich an der qualitativen Inhaltsanalyse nach Mayring (2010) und erfolgt auf Basis induktiver Codierung des transkribierten Interviewmaterials. Ziel der Auswertung der Interviews ist es, ein qualitatives Verständnis über die Sichtweisen unterschiedlicher Stakeholder zu den Auswirkungen von On-Demand Mobilität zu gewinnen sowie alle relevanten Systemelemente zur Erstellung eines holistischen System-Modells zu identifizieren.

Den weitaus größeren Stellenwert dieser Arbeit nimmt die qualitative und quantitative Systemmodellierung auf Basis von System Thinking und System Dynamics ein (vgl. Kapitel 4). Zunächst werden hier alle aus der Literatur und den Expertenbefragungen gewonnenen relevanten Systemvariablen in einen Zusammenhang gebracht. Ziel der qualitativen Modellierung ist es, ein holistisches Wirkungsgefüge in Form eines Causal-Loop Diagramms aufzuzeigen, welches über alle für das System bedeutsamen Variablen und deren Rückkopplungen verfügt. Aufbauend auf den Erkenntnissen des qualitativen System-Modells werden im quantitativen Modell

---

durch die Nutzung von Stock-and-Flow Diagrammen datengestützte Zusammenhänge und Wechselwirkungen modelliert. Auf Basis des quantitativen Modells werden für das Untersuchungsgebiet München konkrete Zukunfts-Szenarien für die Entwicklung von On-Demand Mobilität und deren Auswirkung auf das Mobilitätssystem mit ihrem zeitlichen Verlauf simuliert. Der Fokus der Modellierung liegt dabei auf den On-Demand Mobilitäts-Angebotsformen Free-Floating und Station-Based Car Sharing, Ride Hailing und Ride Pooling (vgl. Kapitel 2.4.2).

Nachdem die Ergebnisse aus dem System-Modell einem Plausibilisierungs- und Validierungsprozess unterzogen wurden, wird in der Arbeit die methodische Vorgehensweise kritisch reflektiert und der zukünftige Forschungsbedarf abgeleitet. Abschließend erfolgt die Aufstellung von konkreten Handlungsempfehlungen zur Planung und Integration von On-Demand Mobilität. Zum besseren Verständnis sind die Hauptteile der Arbeit in der Abbildung 1 dargestellt.

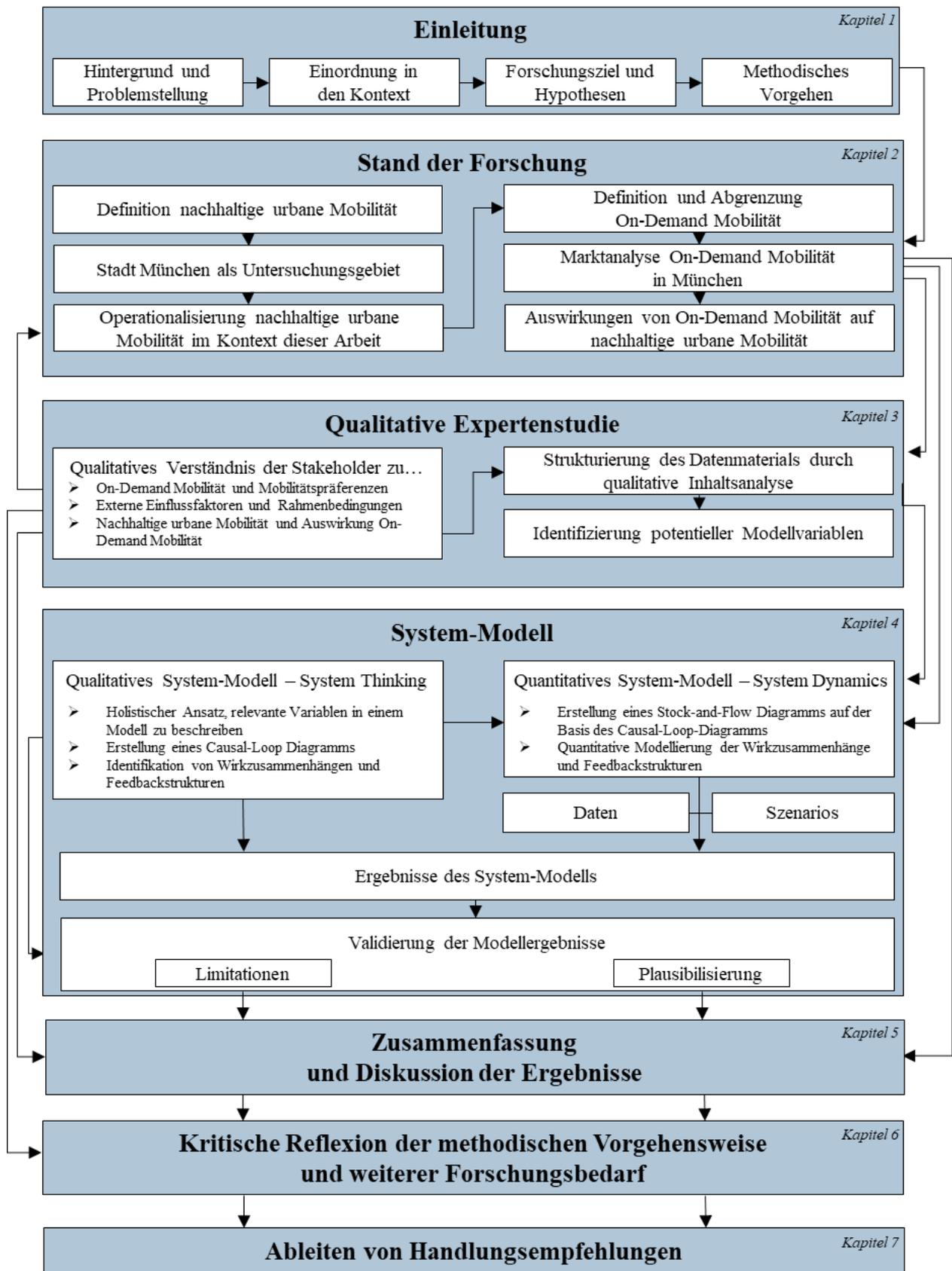


Abbildung 1: Aufbau der vorliegenden Arbeit (eigene Darstellung)

---

## 2 Stand der Forschung

Um sich den verschiedenen, für diese Arbeit relevanten, Themen anzunähern, werden diese im Folgenden dargelegt. Hierbei soll neben eindeutigen Abgrenzungen und Begriffsdefinitionen, ein der Arbeit zugrunde liegendes Verständnis der Themenfelder nachhaltiger urbaner Mobilität und On-Demand Mobilität geschaffen werden. Ein vertiefender Fokus wird weiterhin auf die Auswirkungen von On-Demand Mobilität im Kontext nachhaltiger urbaner Mobilität gelegt.

### 2.1 Urbane Mobilität

Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit ist die Analyse der Auswirkungen von On-Demand Mobilität im Kontext nachhaltiger urbaner Mobilität. Da die Nutzung des Begriffs „urbaner Mobilität“ in der Fachliteratur nicht immer einheitlich erfolgt, soll einleitend eine für diese Arbeit zutreffende Begriffsdefinition und Abgrenzung des urbanen Raums und urbaner Mobilität erfolgen.

#### 2.1.1 Begriffsdefinition Urbaner Raum

Die Urbanisierung ist einer der zentralen Megatrends dieses Jahrhunderts. Im Jahr 2050 werden über zwei Drittel der Weltbevölkerung in urbanen Zentren leben, was Prognosen zufolge zu diesem Zeitpunkt etwa 9,8 Milliarden Menschen entsprechen wird (vgl. United Nations, 2019). Auf der einen Seite ziehen Städte aufgrund des hohen infrastrukturellen Angebots immer mehr Menschen an, auf der anderen Seite erreichen anthropogene Phänomene, wie Verkehrs- oder Emissionsprobleme, in den urbanen Zentren Maximalwerte und schmälern somit die Lebensqualität (vgl. Rode, 2013). On-Demand Mobilität hingegen, benötigt eine hohe Bevölkerungsdichte mit entsprechender Siedlungsstruktur, um wirtschaftlich und ökologisch sinnvoll betrieben werden zu können, weshalb im Folgenden das Verständnis zum Begriff „urbaner Raum“ genauer eingegrenzt und erläutert wird.

In der Literatur findet der Begriff „urbaner Raum“ inzwischen immer häufiger Anwendung (vgl. Bundesamt für Raumentwicklung ARE, 2009; Tunsch, 2015). Er stellt eine Ergänzung zum Begriff „Urbanität“ (laut Duden, 2019a: „städtische Atmosphäre“) dar. Demnach handelt es sich hierbei um einen Raum, in dem eine städtische Atmosphäre herrscht. „Urbaner Raum“ wird in der Regel als Synonym für den deutschen Fachbegriff „städtischer Raum“ genutzt, welcher überwiegend in der Sozio-Geografie und der Stadt- und Raumplanung angewendet wird, um Gebiete nach ländlichem und städtischem Charakter voneinander abzugrenzen (vgl. Schubert, 2000; BBSR, 2012). Durch die zunehmende Auflösung physischer Grenzen bestehen heute in aller Regel fließende Übergänge zwischen ländlichem und städtischem Raum und damit auch Mischformen. Zusätzlich zu diesem Umstand tragen auch die Vielschichtigkeit und die unterschiedliche Anwendung des Begriffes dazu bei, dass es in der Literatur keine übergreifend etablierte Begriffsdefinition gibt. Für statistische Abgrenzungen werden in der Regel

quantitativ messbare Indikatoren, wie Siedlungs- und Bebauungsdichte herangezogen (siehe unten BBSR, Eurostat). Zwar ist Urbanität nicht allein durch solche numerischen Größen gekennzeichnet, sondern auch kulturelle Betrachtungsweisen sind von Bedeutung (vgl. Reicher, 2014). Da derartige Charakteristiken aber nur sehr eingegrenzt quantifizierbar sind, werden sie erfahrungsgemäß nicht als Unterscheidungsmerkmal herangezogen.

Sowohl das Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) in Deutschland, als auch das Statistische Amt der Europäischen Union (Eurostat) definieren den urbanen Raum für statistische Zwecke nach Verstädterungsgrad. Beide Ansätze nutzen die Bevölkerungsdichte als zentrale Kenngröße. Hierfür wird das Untersuchungsgebiet zunächst in kleinere Raumzellen unterteilt. Das Eurostat definiert ab einer Bevölkerungsdichte von 1.500 Einwohner je km<sup>2</sup> eine Raumzelle als „Urban Center“. Raumzellen mit einer Bevölkerungsdichte zwischen 300 - 1.500 Einwohnern je km<sup>2</sup> werden als „Urban Clusters“ definiert und Zellen mit weniger als 300 Einwohnern je km<sup>2</sup> werden als „Rural grid cells“ bezeichnet (vgl. Eurostat, 2018).

Das BBSR differenziert nur zwischen städtischen und ländlichen Zellen, bezieht aber zusätzlich zur Bevölkerungsdichte die Siedlungsdichte in die Untersuchung mit ein. Ab einem Schwellenwert von 230 Einwohnern je km<sup>2</sup> und einer Siedlungsdichte von über 13,6 % wird die Raumzelle als städtisch definiert (vgl. BBSR, 2012). Die kleinsten Verwaltungseinheiten (in Deutschland: Gemeinden) werden anhand dieser Raumzellen in drei Abstufungen als städtisch, ländlich oder als Zwischenform deklariert. Hierbei definiert das BBSR eine Gemeinde anhand ihres Flächenanteils und Eurostat anhand des Anteils der Einwohner (EW) in städtischen Zellen (vgl. BBSR, 2012; Eurostat, 2018).

### 2.1.2 Begriffsdefinition und Einordnung Urbane Mobilität

Der Begriff „Urbane Mobilität“ findet heutzutage in den Medien, aber auch in entsprechender Fachliteratur in zahlreichen Zusammenhängen seine Anwendung. Er setzt sich aus den beiden vielschichtigen Begriffen „urban“ und „Mobilität“ zusammen. Während der Begriff „urban“ wie bereits beschrieben mit einer städtischen Atmosphäre in einem Untersuchungsgebiet verbunden wird, handelt es sich bei der Mobilität um die räumliche Mobilität, also die Beweglichkeit von Personen und Gütern im Raum (vgl. Zimmermann, 2001).

In der Fachliteratur gibt es einige Ansätze urbane Mobilität durch konkrete Kennzahlen zu beschreiben. Indikatoren für die Erstellung solcher Kennzahl können beispielsweise die Straßendichte, der Anteil emissionsarmer Verkehrsträger am Gesamt-Verkehrsaufkommen, die Fahrzeugdichte, oder transportrelevante CO<sub>2</sub> Emissionen sein. Priester et al. (2013) beschrieben in diesem Zusammenhang, basierend auf städtischen Indikatoren, unterschiedliche Ausprägungsformen urbaner Mobilität. Arthur D.Little (2011; 2016) untersuchte weiterhin auf der Basis von

---

19 unterschiedlichen Bewertungskriterien die Reife und Leistungsfähigkeit des urbanen Mobilitätssystems in 84 Städten weltweit. Hong Kong, Singapur, Wien oder München werden im globalen Kontext als besonders reif und leistungsfähig eingeordnet, wohingegen Städte wie Hanoi, Houston, Atlanta oder Bangkok die Schlusslichter darstellen (vgl. Arthur D. Little, 2016). Eine Zusammenfassung der unterschiedlichen Bewertungskriterien und ihren Gewichtungen befindet sich im Anhang 1.

Weiterhin wird mit der Kombination des Begriffs häufig eine (Weiter-)Entwicklung des Mobilitätssystems in der Zukunft dargestellt und assoziiert. Insbesondere private Forschungseinrichtungen und Beratungsfirmen publizieren hierzu regelmäßig Berichte und Studien. Für weitere Informationen siehe unter: McKinsey, 2015; Manz et al., 2017; OECD, 2015; Arthur D. Little, 2011; 2016; BCG, 2016; Berylls, 2018; Deloitte, 2012; Rode et al., 2015.

## 2.2 Nachhaltige Mobilität

Um nachhaltige Mobilität umfassend beschreiben zu können, wird zunächst der allgemeine Begriff der nachhaltigen Entwicklung erläutert. Hierauf aufbauend wird der Stand der Wissenschaft zu nachhaltiger (urbaner) Mobilität aufgezeigt und der Begriff für diese Arbeit definiert und operationalisiert.

### 2.2.1 Begriffsdefinition Nachhaltige Entwicklung

Nachhaltigkeit wird aufgrund ihrer facettenreichen Begriffsgeschichte und vielfältiger Definitionen in der Gesellschaft häufig verschieden verstanden (vgl. Wullenweber, 2000). Kritiker haben Bedenken, dass die allgemeine Definition so umfassend formuliert ist, dass Nachhaltigkeit als „Modebegriff“ sehr unterschiedlich interpretiert werden kann und somit keine eindeutige Orientierung mehr möglich ist (vgl. Brüggemeier, 2012). Laut Duden (2019b) wird im Wesentlichen zwischen einer ursprünglichen-, einer forstwirtschaftlichen- und einer modernen Bedeutung unterschieden.

Der ursprünglichen Bedeutung zufolge steht der Begriff der Nachhaltigkeit für eine „längere Zeit anhaltende Wirkung“ (vgl. Duden, 2019b). Gemäß der forstwirtschaftlichen Bedeutung wird Nachhaltigkeit als „forstwirtschaftliches Prinzip, nach dem nicht mehr Holz gefällt werden darf, als jeweils nachwachsen kann“, bezeichnet (vgl. Duden, 2019b). In diesem Zusammenhang besteht liegt der Ursprung des Begriffs in der deutschen Sprache im Anfang des 18. Jahrhunderts. Hans Carl von Carlowitz (1713) hinterfragte zu diesem Zeitpunkt in seinem Werk *Silvicultura oeconomica*, wie der Anbau von Holz anzustellen wäre, um eine kontinuierliche, beständige und nachhaltige Nutzung zu ermöglichen. Laut der dritten, modernen Bedeutung des Dudens folgt Nachhaltigkeit dem „Prinzip, nach dem nicht mehr verbraucht werden darf, als jeweils nachwachsen, sich regenerieren, künftig wieder bereitgestellt werden kann“

(vgl. Duden, 2019b). Den Grundstein für dieses heutige Verständnis legte der Bericht *Our Common Future* der Vereinten Nationen im Jahr 1987 (vgl. WCED, 1987). Gro Harlem Brundtland thematisierte in diesem insbesondere das Ziel der Generationengerechtigkeit.

Heutzutage existieren zahlreiche unterschiedliche Definitionen zu dem Begriff nachhaltige Entwicklung. In der Tabelle 1 sind einige relevante Definitionen aus der Vergangenheit aufgeführt.

Tabelle 1: Definitionen nachhaltige Entwicklung (eigene Darstellung)

<b>Autor</b>	<b>Definition</b>
WCED, 1987	» Sustainable development meets the needs of the present without compromising the ability of the future generations to meet their own needs «
Mega & Pedersen, 1998	» Sustainability is equity and harmony extended into the future, a careful journey without an endpoint, a continuous striving for the harmonious co-evolution of environmental, economic and socio-cultural goals. «
Wilson, 1998	» The common aim [of sustainable development] must be to expand resources and improve the quality of life for as many people as heedless population growth forces upon the Earth, and do it with minimal prosthetic dependence. «
Center for Sustainability, 2004	» Sustainability is: 'the capacity for continuance into the long-term future. Anything that can go on being done on an indefinite basis is sustainable. Anything that cannot go on being done indefinitely is unsustainable. «

Basierend auf den unterschiedlichen Definitionen ist festzustellen, dass Nachhaltigkeit immer eine fortdauernde, langfristige Zukunft in den Mittelpunkt stellt. Der Begriff bezieht sich also immer auf Gegenwart und Zukunft, bei der die Überlebensfähigkeit (des Systems) im Vordergrund steht. Weiterhin umschließt der Begriff ökologische, ökonomische und soziale Aspekte – die drei Säulen der Nachhaltigkeit ein, welche Capra (2015) zufolge auf den Prinzipien von System Thinking (vgl. Kapitel 4.1.1) mit einander in starker Wechselwirkung stehen.

### 2.2.2 Begriffsdefinition Nachhaltige Urbane Mobilität

Die Ursprünge der nachhaltigen Mobilität gehen zurück in das Jahr 1994. Zu diesem Zeitpunkt setzte die OECD das Projekt *Environmentally Sustainable Transport* (EST) auf die politische Agenda (vgl. OECD, 1996). 1996 folgte mit der Formulierung der *Vancouver Principles for Sustainable Transport* bei der OECD Konferenz in Vancouver ein weiterer Meilenstein in der Diskussion um nachhaltige Mobilität (vgl. OECD, 1996; Yevdokimov, 2003).

Heute existieren in der Fachliteratur umfassende Literaturanalysen und zahlreiche Definitionen zu diesem Thema (vgl. Hoyer, 2000; Zegras, 2005; Zhang & Wei, 2012 und Holden et al., 2013). Auch in der Öffentlichkeit findet der Begriff durch dessen steigende Bedeutung seit dem 20. Jahrhundert vermehrt Anwendung. Einige relevante Definitionen sind in der Tabelle 2 zusammengetragen.

Tabelle 2: Definitionen nachhaltige (urbane) Mobilität (eigene Darstellung)

<b>Autor</b>	<b>Definition nachhaltige Mobilität</b>
OECD, 1996	» Transportation that does not endanger public health or ecosystems and meets mobility needs consistent with (a) use of renewable resources at below their rates of regeneration and (b) use of non-renewable resources at below the rates of development of renewable substitutes. «
TRB, 1997	» Sustainability is not about threat analysis; sustainability is about system analysis. Specifically, it is about how environmental, economic, and social systems interact to their mutual advantage or disadvantage at various space-based scales of operation. «
WBCSD, 2001	» The ability to meet the needs of society to move freely, gain access, communicate, trade, and establish relationships without sacrificing other essential human or ecological values today or in the future. «
ECMT, 2004	» A sustainable transport system is one that is accessible, safe, environmentally-friendly, and affordable. «
mobil.LAB Promotionskolleg, 2014	» Sustainable mobility ensures the individual fulfillment of basic needs and activities located in different places without harming the environment, economy or society, whether now or in the future. This requires affordable access to multiple mobility options, freedom of choice in terms of mode and access to life opportunities. Sustainable mobility, however, does not and should not require a reduction in mobility. It is oriented to reduce individual's derived demand of mobility and increase the intrinsic demand of mobility. Instead, it should be safe for all users and therefore minimize any type of negative effects on individuals, communities, the private sector and the environment. «
Miramontes, 2018	» Sustainable urban mobility is the result of transportation systems that allow goods to be delivered and all people to fulfill their needs within an urban environment in a way that the resources needed for this are not depleted, allowing future generations to do the same. «

Aufbauend auf den unterschiedlichen Definitionen lassen sich klare Eigenschaften und Planungsrichtlinien ableiten. Ein nachhaltiges urbanes Mobilitätssystem ...

- ermöglicht es, die grundlegenden Mobilitätsbedürfnisse von Einzelpersonen und der Gesellschaft abzudecken und im Einklang mit der Gesundheit von Mensch und Ökosystem zu bringen.
- ist für alle Nutzer bezahlbar, arbeitet effizient, unterstützt eine dynamische Wirtschaft und bietet eine Auswahl unterschiedlicher Verkehrsmittel.
- bietet Gerechtigkeit innerhalb und zwischen unterschiedlichen Personengruppen und Generationen.
- begrenzt Emissionen und Abfälle, minimiert den Verbrauch nicht erneuerbarer Ressourcen und begrenzt ebenfalls den Verbrauch erneuerbarer Ressourcen auf ein nachhaltiges Ertragsniveau und
- recycelt seine Komponenten und minimiert die Flächennutzung und Geräuschentwicklung (vgl. CST, 2005; Litman, 2019).

Weltweit nutzen viele Experten (wie zum Beispiel das *Transportation Research Board's Sustainable Transportation Indicators Subcommittee*, oder auch das *European Council of Ministers of Transport* und das *Centre for Sustainable Transportation*) diese zusammenfassende Definition, weil sie umfassend formuliert ist und darauf hinweist, dass nachhaltige Mobilität wirtschaftliche, soziale und ökologische Ziele miteinander in Einklang bringen muss. Obwohl

dies impliziert, dass jedes Ziel in nur einer bestimmten Kategorie verortet wird, können einzelne Ziele häufig mehreren Nachhaltigkeits-Dimensionen zugeordnet werden. Beispielsweise wird die Luftverschmutzung durch Luftschadstoffe im Allgemeinen als ökologisches Problem angesehen, wirkt sich jedoch auch auf die menschliche Gesundheit aus und ist somit ein soziales Problem. Einen Überblick über bedeutende Ziele nachhaltiger Mobilität bietet die Tabelle 3.

Tabelle 3: Nachhaltigkeits-Ziele im Kontext Mobilität (eigene Darstellung, basierend auf Litman, 2019)

Ökonomische Ziele	Ökologische Ziele	Soziale Ziele
- Wirtschaftliche Produktivität	- Prävention und Eindämmung des Klimawandels	- Gerechtigkeit / Fairness
- Ressourceneffizienz	- Lärmreduzierung und -verhinderung	- Gemeindeentwicklung
- Bezahlbarkeit	- Schutz der biologischen Vielfalt	- Sicherheit und Schutz
- Betriebseffizienz	- Verhinderung von Luft- und	- Erhaltung des kulturellen Erbes
- Lokale wirtschaftliche	Wasserverschmutzung	- Öffentliche Fitness und
Entwicklung		Gesundheit

Insbesondere im urbanen Kontext stehen diesen Zielen allerdings große Herausforderungen im Mobilitätssystem gegenüber. Weiterhin können die Ziele der unterschiedlichen Nachhaltigkeits-Dimensionen teilweise auch in einem Interessenskonflikt zueinander auftreten. Das bedeutet, dass nicht alle Ziele gleichzeitig in gleichem Maße maximiert werden können. Einen Auszug über bestehende Herausforderungen der unterschiedlichen Nachhaltigkeits-Dimensionen bietet die Tabelle 4.

Tabelle 4: Herausforderungen nachhaltiger (urbaner) Mobilität (eigene Darstellung, basierend auf Litman & Burwell, 2006; Newman & Kenworthy, 1996)

Ökonomisch	Ökologisch	Sozial
- Verkehrsprobleme und Stau	- Luftverschmutzung, Treibhausgasemissionen	- Mobilität für schutzbedürftige Gruppen
- Infrastrukturkosten	- Verlust des Lebensraums	- Ästhetik
- Verbraucherkosten	- Hydrologische Einflüsse	- Isolation in Vororten
- Mobilitätsbarrieren	- Lärmemissionen	- Öffentliche Sicherheit
- Unfallschäden	- Zersiedelung	- Lebensqualität in der Gemeinschaft
- Flächenversiegelung und	- Erschöpfung von nachwachsenden Rohstoffen	- Gemeinschaftlicher Zusammenhalt
Flächenverbrauch	- Wasserverschmutzung	- Verlust des Straßenlebens

Bezogen auf die unterschiedlichen Verkehrsmittel eines Mobilitätssystems sind in der Literatur konkrete Einordnungen auf Basis ihrer Umweltauswirkungen zu finden. Besonders üblich sind Rangordnungen basierend auf dem CO<sub>2</sub>-Ausstoß sowie dem benötigten Flächenverbrauch pro Person und Transportmittel. Der sogenannten *hierarchy of sustainable transport* zufolge gehören das Laufen, das Radfahren und der ÖPNV (häufig auch als Umweltverbund bezeichnet) zu den ökologisch saubersten Verkehrsmitteln, während der motorisierte Individualverkehr oder auch das Taxi einen höheren CO<sub>2</sub> Ausstoß und Flächenverbrauch aufweisen (vgl. Banister, 2008; Vallone, 2001). Die Abbildung 2 zeigt eine Rangfolge nachhaltiger Verkehrsmittel basierend auf ihren CO<sub>2</sub> Emissionen pro Person und Transportmittel.

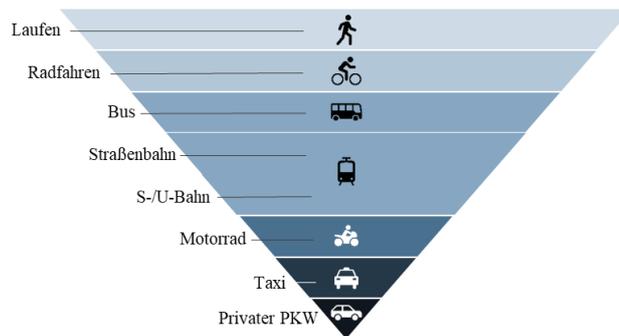


Abbildung 2: Rangfolge nachhaltiger Verkehrsmittel (eigene Darstellung, in Anlehnung an Vallone, 2001)

### 2.2.3 Indikatoren für Nachhaltige Mobilität

Um nachhaltige urbane Mobilität messbar zu machen und somit auch Vergleichbarkeit zwischen unterschiedlichen Städten zu ermöglichen, gibt es zahlreiche Ansätze der Operationalisierung des vielschichtigen Begriffs mittels geeigneter Indikatoren. Im Folgenden werden zunächst Leitlinien für die Aufstellung von Indikatoren aus der Literatur aufgeführt und darauf folgend relevante Studien vorgestellt. Für eine weitere Vertiefung siehe auch Nicolas & Pochnel, 2003; Karagiannakidis et al., 2014; Dobranskyte-Niskota et al., 2007; Priester et al., 2014; Zito & Salvo, 2011; Marsden et al., 2005; OECD, 2008.

Miramontes (2018) untersuchte in ihrer Dissertation verschiedenartige Ansätze und Leitlinien für die Verwendung von Indikatoren zur Messung nachhaltiger urbaner Mobilität. Folgende Eigenschaften sollten demnach bei der Aufstellung von Indikatoren beachtet werden:

- Vor Beginn der Auswahl geeigneter Indikatoren ist es wichtig eine genaue Definition des zu operationalisierenden Konzepts nachhaltiger urbaner Mobilität zu erarbeiten. Diese konkrete Definition kann wiederum dazu beitragen, weitere noch zu messende Aspekte zu identifizieren.
- Durch die Formulierung und Definition klarer Ziele auf Basis der Sustainable-Urban-Mobility-Plan (SUMP<sup>1</sup>) Richtlinien *SMART* (spezifisch, messbar, erreichbar, realistisch und zeitgebunden) fällt es leichter geeignete Indikatoren zu identifizieren. (vgl. Wefering et al., 2013).
- Weiterhin ist bei der Aufstellung von Indikatoren darauf zu achten, dass diese relevant, verständlich, verlässlich, vergleichbar und sensibel sind (vgl. Shen & Hermans, 2017; Joumard & Gudmundsson, 2010; Marsden, 2007; Renne, 2009; FHWA, 2011).
- Die Verfügbarkeit und die Qualität von Daten stellt ein weiteres, wichtiges Kriterium dar. Litman (2019) definiert fünf Anforderungen und Eigenschaften von Daten (umfassend, konsistent, korrekt, transparent, verfügbar), um einen Qualitätsstandard zu sichern und somit eine Vergleichbarkeit zuzulassen.

<sup>1</sup> Die SUMP-Richtlinien sind das Ergebnis eines europaweiten Experten-Beratungsprozesses, der zwischen 2010 und 2013 für die Europäische Kommission durchgeführt wurde (vgl. Wefering et al., 2014).

Neben der Vergleichbarkeit des Mobilitätssystems unterschiedlicher Städte im Kontext nachhaltiger urbaner Mobilität können die Indikatoren auch zur Messung der Auswirkungen neu implementierter Maßnahmen herangezogen werden. Bei den Indikatoren wird daher zwischen drei unterschiedlichen Typen differenziert (vgl. Abbildung 3):

- Input-Indikatoren, welche den aktuellen Stand des Mobilitätssystems aufzeigen (beispielsweise ÖPNV-Angebot oder Zugang zu Mobilitätsdienstleistungen),
- Output-Indikatoren, welche aufzeigen, ob das Mobilitätssystem wirksam auf ausgewählte Maßnahmen reagiert (beispielsweise Änderungen des Fahrzeugbesitzes und der Fahrzeugnutzung) und
- Outcome-Indikatoren, mit denen die Erreichung von Zielen einer Stadt gemessen werden kann (beispielsweise Schadstoffemissionen) (vgl. Litman, 2019).

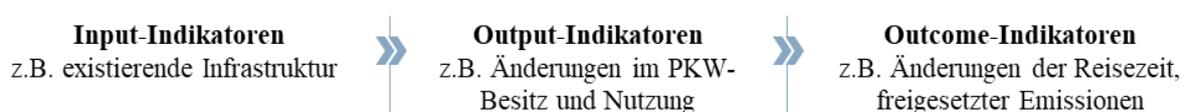


Abbildung 3: Überblick unterschiedlicher Indikatoren (eigene Darstellung, basierend auf Litman, 2019)

Bei der Analyse unterschiedlicher Nachhaltigkeits-Indikatoren ist zu erkennen, dass die meisten Studien darauf abzielen, ein Set an Indikatoren zu erstellen, welches möglichst global auf viele unterschiedliche Städte angewendet werden kann. Dies wird zunehmend als eine große Herausforderung angesehen (vgl. Zegras, 2011; Miramontes 2018), da Städte sich teils fundamental in ihrem Mobilitätssystem voneinander unterscheiden und somit global bestimmte Indikatoren häufig nicht spezifisch auf die Herausforderungen und Ziele einer einzelnen Stadt eingehen können.

Die nachfolgende Tabelle 5 führt einige relevante Studien der letzten Jahre auf. Weitere Operationalisierungs-Ansätze sind zum Beispiel unter Nicolas & Pochnel, 2002; Marsden, 2007; und Litman, 2007 zu finden. Für eine umfassende Bestandsaufnahme der in der Literatur verfügbaren Operationalisierungs-Ansätze siehe Litman, 2019.

Tabelle 5: Studienüberblick zur Operationalisierung nachhaltiger urbaner Mobilität (eigene Darstellung)

<b>Autor</b>	<b>Indikatoren nachhaltiger urbaner Mobilität</b>	<b>Projekt / Institution</b>
WBCSD, 2001	12 Indikatoren in 3 Nachhaltigkeits-Dimensionen	WBCSD
EEA, 2002	37 Indikatoren in 7 unterschiedlichen Kategorien	TERM
Lautso et al., 2004	7 Indikatoren in 3 Nachhaltigkeits-Dimensionen	PROPOLIS
Jeon et al., 2008	30 Indikatoren in 4 Nachhaltigkeits-Dimensionen	-
Ramani, 2009	13 Indikatoren in 5 übergeordneten Nachhaltigkeits-Zielen	TXDOT
UNECE, 2011	17 Indikatoren in 5 Nachhaltigkeits-Dimensionen	UNECE
Rye & Stanchev, 2016	28 Indikatoren in 9 unterschiedlichen Kategorien	CIVITAS
WBCSD, 2015	19 Indikatoren in 4 Nachhaltigkeits-Dimensionen	WBCSD
Litman, 2019	14 Indikatoren in 3 Nachhaltigkeits-Dimensionen	-

Bei einem Vergleich der aufgeführten Studien untereinander ist auffällig, dass die Anzahl an Indikatoren zur Operationalisierung nachhaltiger urbaner Mobilität stark schwankt. Ebenso nutzen die Studien teils unterschiedlich viele Dimensionen oder Kategorien, um die Indikatoren in Funktionsgruppen einzuordnen. Es hängt wie beschrieben stark davon ab, wie nachhaltige urbane Mobilität definiert wurde und welches übergeordnete Ziel die Studie verfolgt.

Nachfolgend werden die Indikatoren der *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD) überblicksartig aufgeführt und beschrieben.

Die 2015 überarbeitete Studie zur quantitativen Operationalisierung nachhaltiger urbaner Mobilität soll der WBCSD zufolge als ein Instrument für Städte dienen, „um die aktuelle Situation eines Mobilitätssystems zu bewerten, seine Entwicklung im Laufe der Zeit zu verstehen und die möglichen Auswirkungen ausgewählter Lösungen zu bewerten“ (vgl. WBCSD, 2015, S. 9). Das WBCSD publizierte in der Vergangenheit bereits zwei Indikatoren-Sets, welche stets überarbeitet wurden (vgl. WBCSD, 2001; 2004). Insgesamt werden in dem Report 19 Indikatoren aufgeführt, welche neben den drei klassischen Dimensionen der Nachhaltigkeit auch einer vierten Dimension, der allgemeinen Performance des Mobilitätssystems, zugeordnet werden können. Die Indikatoren wurden in einem aufwendigen, iterativen Prozess nach den SMART-Kriterien festgelegt. Besonders kennzeichnend für die Studie ist, dass für jeden Indikator eine Methodik zur Quantifizierung mittels geeigneter Daten erarbeitet wurde und anhand einer Skala von 0 – 10 (0 für den niedrigsten und 10 für den höchsten Punktestand) bewertet werden kann. Die Tabelle 6 bietet einen Überblick über alle 19 Indikatoren der Studie.

Tabelle 6: WBCSD Indikatoren für nachhaltige urbane Mobilität (eigene Darstellung, in Anlehnung an WBCSD, 2015)

<b>Ökologische Indikatoren</b>	<b>Soziale Indikatoren</b>	<b>Ökonomische Indikatoren</b>	<b>Mobilitätssystem Performance</b>
- Flächennutzung	- Bezahlbarkeit	- Funktionelle Diversität	- Bezahlbarkeit
- Treibhausgase	- Luftschadstoffe	- Reisezeit	- Energieeffizienz
- Energieeffizienz	- Lärm	- wirtschaftliche Chancen	- Aktive Mobilität
- Aktive Mobilität	- Sicherheit	- öffentliche Finanzen	- Intermodale Integration
- Verkehrsüberlastung und Stau	- Zugänglichkeit	- Flächennutzung	- Komfort und Vergnügen
	- Funktionelle Diversität		- Sicherheit
	- Reisezeit		- Zugänglichkeit für Behinderte
	- wirtschaftliche Chancen		
	- Komfort und Vergnügen		- Verkehrsüberlastung und Stau
	- Sicherheit		
	- Diversität öffentlicher Raum		
	- Zugänglichkeit für Behinderte		

Wie aus der Tabelle 6 hervorgeht, können einige Indikatoren nicht trennscharf zugeordnet werden und treten somit in unterschiedlichen Nachhaltigkeits-Dimensionen gleichzeitig auf

(vgl. z.B. Reisezeit, Flächennutzung, Verkehrsüberlastung und Stau). Aufgrund der Vielschichtigkeit des Begriffs nachhaltiger urbaner Mobilität ist es schwierig, präzise Indikatoren auf Basis der weiter oben aufgeführten Eigenschaften und Leitlinien zu bestimmen und eindeutig voneinander abzugrenzen. Eine große Anzahl an Indikatoren stellt keine Garantie dafür dar, dass nachhaltige urbane Mobilität oder die Nachhaltigkeits-Aspekte eines Mobilitätssystems (basierend auf den SUMP-Richtlinien) angemessen abgebildet werden können (vgl. Rupprecht et al., 2019).

Weiterhin stellt eine große Anzahl an Indikatoren für die Städte aus Kosten- und Zeitgründen in der Regel keine praktikable Lösung dar. Selbst, wenn alle Indikatoren quantifiziert werden könnten, werden bestehende Zusammenhänge und Wechselbeziehungen zwischen diesen häufig nicht in den Studien berücksichtigt, da sie keine zeitlichen Dynamiken zulassen, sondern nur eine Momentaufnahme abbilden. So kann die Verbesserung eines Indikators (mit einer zeitlichen Verzögerung) zu einer Abschwächung oder gar Verschlechterung eines anderen Indikators führen. In der Literatur gibt es für dieses Phänomen unterschiedliche Ansätze zur Analyse der Gesamtauswirkung (z.B. multikriterielle Bewertungsverfahren). Das Kernproblem eines Zielkonflikts unter den Indikatoren bleibt dabei allerdings unverändert. Ein mögliches Beispiel für solch einen Zielkonflikt stellt eine Steigerung der Energieeffizienz dar. Angewandt auf den Kraftstoffverbrauch von individuellen PKW resultiert hierdurch zunächst eine Reduzierung der ausgestoßenen Emissionen. Weiterhin erfolgen aus der Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs auch geringere Betriebskosten für den Fahrer, was (nach einer zeitlichen Verzögerung) zu einem Anstieg der gefahrenen Kilometer führen kann und somit erneut in einer Zunahme von Emissionen mündet. Eine Erhöhung der gefahrenen Kilometer kann sich zusätzlich negativ auf die Sicherheit im Mobilitätssystem auswirken. Hanan (2019) untersuchte die wechselseitigen Beziehungen unterschiedlicher Indikatoren nachhaltiger urbaner Mobilität und diskutierte sie in einem qualitativen Zusammenhang durch die Anwendung von Causal-Loop Diagrammen (vgl. Kapitel 4.2.3). Das Übersehen solcher Zusammenhänge kann zu mehrdeutigen Ergebnissen führen und die Konzeption wirksamer Maßnahmen zum Erreichen des Ziels einer nachhaltigen Mobilität behindern (vgl. Miramontes, 2018).

### 2.3 Definition und Abgrenzung nachhaltige urbane Mobilität in dieser Arbeit

Die vorliegende Arbeit entsteht im Rahmen des mobil.LAB Promotionskollegs<sup>2</sup>, welches sich interdisziplinär dem Thema *Nachhaltige Mobilität in der Metropolregion München* widmet (vgl. Villeneuve et al., 2019). Basierend auf dieser thematischen Verankerung wird in diesem

---

<sup>2</sup> Das mobil.LAB Promotionskolleg (kurz: mobil.LAB) ist eine interdisziplinär ausgerichtete Forschungsgruppe an der Technischen Universität München, bei der alle Forscher im Themenfeld „Nachhaltige Mobilität“ im Kontext der Metropolregion München promovieren und/oder arbeiten.

---

Kapitel zunächst das ausgewählte räumliche Untersuchungsgebiet München vorgestellt. Darüber hinaus erfolgen auf Basis von Erkenntnissen aus der Literatur, eine für diese Arbeit zutreffende Definition, Abgrenzung und Operationalisierung nachhaltiger urbaner Mobilität.

### 2.3.1 Die Stadt München als Untersuchungsgebiet dieser Arbeit

Um die übergeordnete Zielstellung dieser Arbeit am Beispiel der Stadt München hinreichend einordnen zu können, werden folgend einige Eigenschaften, Herausforderungen und Strategien des Münchner Mobilitätssystems vorgestellt. Hierbei werden die demografische Entwicklung der Stadt, die Mobilitäts- und Transportinfrastruktur, relevante Mobilitätskennzahlen, die Haupt-Herausforderungen und zukünftige Strategien im Kontext des Mobilitätssystems beschrieben. Eine detaillierte Erläuterung der bestehenden On-Demand Mobilitätsangebote in München erfolgt im Kapitel 2.4.4.

#### *Demografische Entwicklung*

Die Stadt München bietet heute mit über 1,55 Millionen Einwohnern das Zentrum der Metropolregion München (vgl. LHM, 2019c). Im bundesweiten Vergleich ist München somit nach Berlin (3,74 Millionen Einwohner) und Hamburg (1,82 Millionen Einwohner) die drittgrößte Stadt in Deutschland. In den vergangenen Jahren war München (und das Münchner Umland) durch einen starken Anstieg der Bevölkerungszahlen geprägt. Zwischen 2004 und 2014 stiegen die Bevölkerungszahlen um über 15 % an. Dieser Trend soll auch bis zum Jahr 2030 weiter anhalten. Prognosen der Landeshauptstadt München zufolge werden zu diesem Zeitpunkt mehr als 1,72 Millionen Einwohner in München leben (vgl. LHM, 2019a).

Mit einer Fläche von 310 Quadratkilometern und über 4.900 Einwohnern je Quadratkilometer ist München die am dichtesten besiedelte Stadt Deutschlands. Aufgrund des hohen Zuwachses und der damit verbundenen Nachverdichtung wird weiterhin ein Anstieg der Bevölkerungsdichte auf über 5.500 Einwohner je Quadratkilometer bis zum Jahr 2030 erwartet (vgl. LHM, 2019a). Die folgende Abbildung 4 zeigt die Einwohnerdichte auf Basis der Stadtbezirke aus dem Jahr 2018 an.

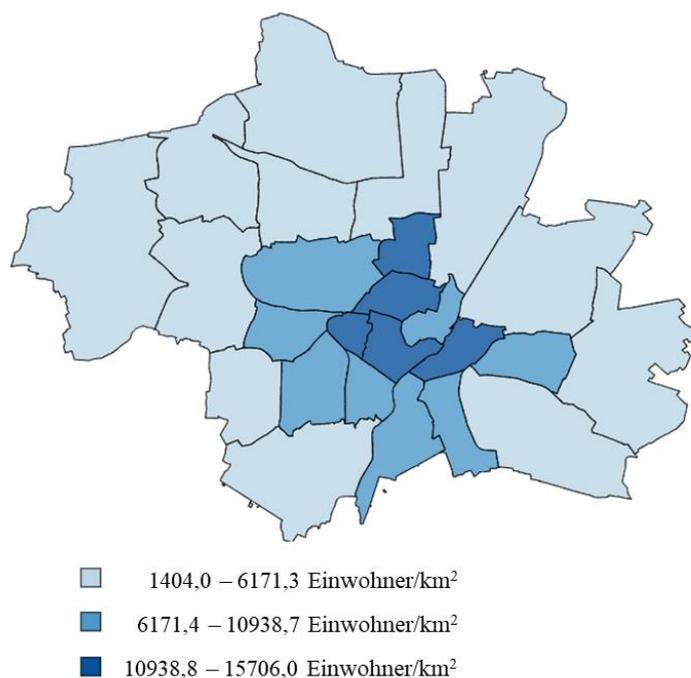


Abbildung 4: Einwohnerdichte der Stadtbezirke in München 2018 (eigene Abbildung, in Anlehnung an LHM, 2020)

Ein Grund für den hohen Zuzug ist die ausgezeichnete wirtschaftliche Lage der Stadt im deutschlandweiten Vergleich. Die hohe Konzentration an Arbeitsplätzen hat zur Folge, dass zahlreiche Beschäftigte direkt nach München oder in die angrenzenden Gemeinden pendeln (vgl. Sterzer, 2017). Daten zwischen 2000 und 2015 zeigen, dass die Anzahl der nach München einpendelnden Personen bereits auf über 355.000 angestiegen ist (vgl. BBSR, 2017). Obwohl keine fundierten Informationen zur Wahl der Verkehrsträger für diese Pendler verfügbar sind, ist eindeutig festzustellen, dass die zunehmende Zahl arbeitsbedingter Fahrten das öffentliche Verkehrssystem und das Straßennetz in und um die Stadt intensiv belastet. Für weitere Informationen zur demografischen Entwicklung in München siehe LHM (2017; 2019c).

#### *Mobilitäts- und Transportinfrastruktur*

Die Stadt München besitzt ein umfassendes Straßennetz. Insgesamt münden sieben Autobahnen aus allen Himmelsrichtungen am 54 Kilometer langen, äußeren Autobahnring, der im Südwesten der Stadt nicht vollständig geschlossen ist. Weiterhin verfügt die Stadt über einen Mittleren Ring (28 Kilometer) und einen Altstadttring, welche für das Straßennetz von herausragender Bedeutung sind. Das Gesamtstraßennetz beläuft sich auf 2.189 Kilometer Fahrbahn und unterteilt sich entsprechend in Haupt- und Nebenstraßen (vgl. LHM, 2018a), wobei circa 85 % der Straßen über eine Geschwindigkeitsbegrenzung von 30 km/h verfügen (vgl. LHM, 2010a).

In München gibt es 62 Parkzonen, die sich hauptsächlich innerhalb des Mittleren Rings befinden und etwa 80.000 bewirtschaftete öffentliche Parkplätze umfassen. Darüber hinaus gibt es

---

innerhalb des Altstadtrings (Blaue Zone) und rund um den Hauptbahnhof besondere Parkvorschriften (vgl. LHM, 2020a). Zusätzlich dazu existieren weitere 32 Parkhäuser mit einer Gesamtkapazität von 8.500 Stellplätzen für Besucher, Pendler und Anwohner, sowie 28.400 Park and Ride (P+R) Stellplätze im Gesamtgebiet des Münchner Verkehrsverbunds (vgl. MVV, 2019a).

München verfügt im nationalen und internationalen Vergleich über ein überdurchschnittlich gut ausgebautes Nah- und Regionalverkehrsnetz. Das öffentliche Nahverkehrsnetz aus U-Bahn, Straßenbahn und Bus wird von der Münchner Verkehrsgesellschaft (MVG) betrieben, während die DB Regio die S-Bahn betreibt. Das S-Bahn Netz besteht aus acht Linien mit einer Gesamtlänge von 434 Kilometer (vgl. MVV, 2019b) und transportiert täglich über 840.000 Personen (vgl. Deutsche Bahn, 2017).

Das öffentliche Nahverkehrsnetz in der Stadt setzt sich aus 95 Kilometer U-Bahn, 82 Kilometer Straßenbahn und 495 Kilometer Bus-Netz (vgl. Statistisches Amt München, 2017). Jeder Standort im Stadtgebiet ist innerhalb von maximal 400 Metern durch den ÖPNV zu erreichen (vgl. MVG, 2016). Da die Nutzerzahlen in den vergangenen Jahren im Vergleich zum Ausbau des ÖPNV-Systems überproportional angestiegen sind, kann von einer Überlastung des Systems, insbesondere während der Stoßzeiten gesprochen werden (vgl. LHM, 2015a). Bis zum Jahr 2028 ist der Ausbau einer zweiten S-Bahn-Stammstrecke geplant, was die Kapazität und Störanfälligkeit des Systems verbessern soll. Kritiker beanstanden hierbei unter anderem die starke zentralisierte Form des Systems (vgl. Schubert, 2019a).

Die Stadt München verfügt über eine umfassende Radinfrastruktur. Das Rad-Netz mit einer Gesamtlänge von über 1.200 Kilometern verläuft zu 860 Kilometern auf ausgebauten, abgetrennten Radwegen und auf circa 340 Kilometern in verkehrsberuhigten Bereichen (vgl. LHM, 2018a). Weiterhin verfügt München über einen inneren und einen äußeren Radring. Diese verbinden wichtige Punkte der Stadt tangential miteinander.

#### *Relevante Mobilitätskennzahlen*

Der aktuellen Mobilitäts-Erhebung zufolge (vgl. Follmer & Belz, 2018) sind Personen, die in der Stadt München wohnen, täglich im Schnitt 95 Minuten unterwegs. Die durchschnittliche Tagesstrecke liegt bei 40 Kilometern und ist mit 3,2 Wegen pro Tag leicht höher als im deutschen Durchschnitt. Bezogen auf alle Haushalte in München ergeben sich hieraus 4,8 Millionen Wege pro Tag, welche bei einer durchschnittlichen Wegelänge von 12,5 Kilometern zu einer absoluten Summe von 60 Millionen Personenkilometern führen (vgl. Follmer & Belz, 2018). Die folgende Abbildung 5 zeigt die Entwicklung des Modal Split in der Stadt München auf.

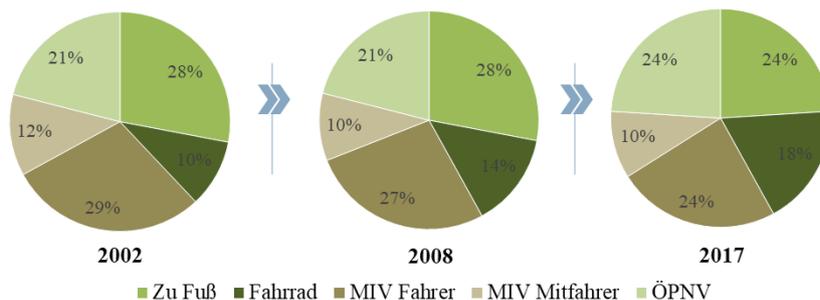


Abbildung 5: Entwicklung Modal Split in der Stadt München (eigene Darstellung)

Wie aus der Abbildung ersichtlich wird, haben die Anteile der Wege, die mit dem Fahrrad und dem ÖPNV zurückgelegt wurden, im Zeitverlauf zwischen 2002 und 2017 deutlich zugenommen (vgl. Follmer & Belz, 2018). Demgegenüber steht eine Reduktion der Anteile des MIV als Fahrer und Mitfahrer sowie des zu Fuß Gehens. Mit einem Gesamtanteil des ÖPNV von 24 % im Jahr 2017 steht München im deutschlandweiten Vergleich mit an der Spitze (Köln 19 %, Hamburg 22 %, Berlin 25 %).

Während im Münchner Umland gut 84 % der Haushalte über mindestens ein Fahrzeug verfügen, beläuft sich der Wert für die Stadt auf 56 % (vgl. Follmer & Belz, 2018). Auch innerhalb der Stadt treten mit zunehmender Entfernung vom Innenstadtbereich deutliche Unterschiede beim Fahrzeugbesitz auf. Wie in der Abbildung 6 dargestellt, ist der Fahrzeugbesitz pro Haushalt zwischen Mittlerem Ring und Stadtgrenze signifikant höher als im Innenstadtbereich innerhalb des Mittleren Rings. Ende 2018 waren in München insgesamt 714.658 PKW zugelassen, was einem neuen Rekord entspricht (vgl. LHM, 2019d).

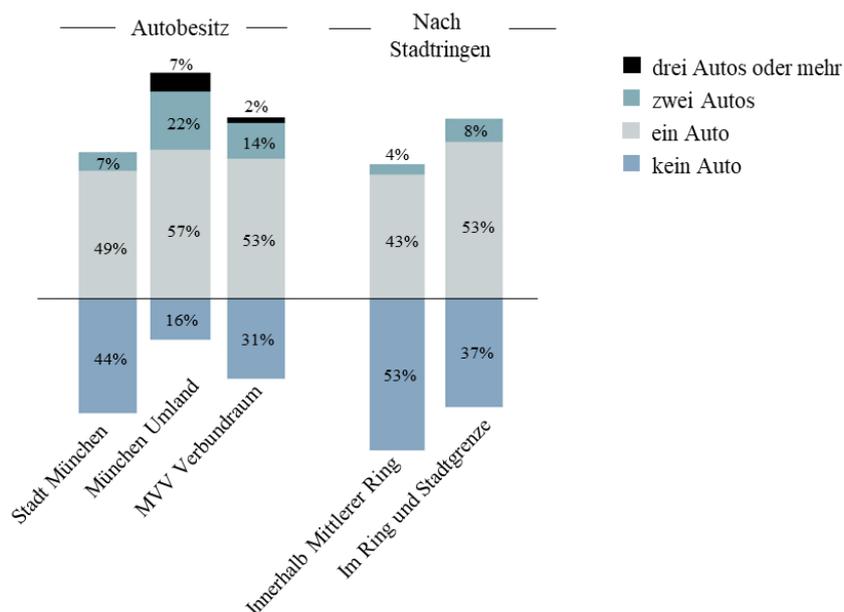


Abbildung 6: Autobesitz in München nach Regionen (eigene Darstellung, basierend auf infras, 2019)

---

Der Fahrradbesitz fällt hingegen deutlich homogener aus. In München „befindet sich in über 80 % der Haushalte mindestens ein „verkehrstüchtiges“ Fahrrad“ (vgl. Follmer & Belz, 2018, S.10). Kumuliert entspricht dies etwa einer Millionen Fahrräder im Stadtgebiet, von denen etwa 25.000 elektrisch unterstützt werden (vgl. Follmer & Belz, 2018).

### *Haupt-Herausforderungen des Münchner Mobilitätssystems*

Die Entwicklung des Modal Split der vergangenen Jahre mit einer signifikanten Zunahme von Verkehrsträgern aus dem Umweltverbund kann vor dem Hintergrund der SUMP-Leitlinien als durchaus positiv angesehen werden. Allerdings werden die Veränderungen im Modal Split aufgrund des starken Wachstums der Stadt durch ein stetig steigendes Verkehrsaufkommen überkompensiert (vgl. LHM, 2015a). Allein im Zeitraum zwischen 2008 und 2017 stieg die Anzahl an Personenkilometern der in München befindlichen Haushalte pro Tag von 44 auf 60 Millionen an (vgl. LHM, 2008; Follmer & Belz, 2018). Dieser starke Anstieg bringt das Mobilitätssystem an seine Kapazitätsgrenzen und wird zunehmend intensiv in der Öffentlichkeit diskutiert.

Als Haupt-Herausforderungen werden die Überlastung der Straßenkapazität und des ÖPNV, die starken Emissionen, die Stellplatz-Knappheit und die gerechte Aufteilung des öffentlichen Raums angesehen (vgl. Inzell-Initiative, 2019; Harloff, 2018; Hutter, 2017). Diese werden folgend kurz aufgeführt.

### *Verkehrsüberlastung und Stau*

Den Ergebnissen der Global Traffic Scorecard (2019) des Verkehrsinformationsanbieters INRIX zufolge gehört München mit Abstand zu den staureichsten Städten Deutschlands (vgl. Kapitel 2.3.2.1). Während die Stadt in den Jahren 2016 und 2017 noch als Stauhauptstadt Deutschlands bezeichnet wurde (vgl. INRIX, 2018a), wurde sie in der aktuellen Studie im Jahr 2018 von Berlin auf Platz 2 verdrängt. Autofahrer verbringen demnach über 59 Stunden pro Jahr im Stau (vgl. INRIX, 2019).

### *Luftschadstoffe und Treibhausgasemissionen*

Der Straßenverkehr gilt in München als der Hauptverursacher für Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>) (vgl. StMUV, 2015). Für die maximale Konzentration des Stickstoffdioxidgehaltes in der Luft gibt es in Deutschland zwei Grenzwerte, „einen Jahresmittelwert in Höhe von 40 µg/m<sup>3</sup>, und einen 1-Stundenmittelwert, der bei 200 µg/m<sup>3</sup> liegt und 18 Mal innerhalb eines Jahres überschritten werden darf“ (vgl. LHM, 2020b). In München wird der Grenzwert für den Stundenmittelwert für Stickstoffdioxid seit 2016 eingehalten, jedoch wird der Jahresgrenzwert von 40 µg/m<sup>3</sup> an unterschiedlichen Stationen des Lufthygienischen Landesüberwachungssystems Bayern (LÜB) und an Hauptverkehrsstraßen mit hoher Verkehrsbelastung und Randbebauung teilweise deutlich überschritten.

Die ebenfalls stark in der öffentlichen Diskussion betrachteten Feinstaub-Grenzwerte werden zwei Grenzwerte. „Ein Jahresmittelwert in Höhe von  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  und ergänzend dazu ein Grenzwert für den Tagesmittelwert ( $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), der im Kalenderjahr insgesamt 35 Mal überschritten werden darf“ (vgl. LHM, 2020b). Für  $\text{PM}_{2,5}$  existiert nur ein Grenzwert, der im Jahresmittelwert bei  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  liegt.

Neben der lokalen Luftverschmutzung ist das Mobilitätssystem eine der Hauptquellen für Treibhausgasemissionen. In München verursacht der Verkehrssektor rund 20 % der gesamten  $\text{CO}_2$ -Emissionen in der Stadt (vgl. LHM, 2012; Kenkmann et al., 2017).

### *Auslastung ÖPNV*

Die Kapazität des ÖPNV gilt insbesondere während der Stoßzeiten als voll ausgeschöpft. Neue Kapazitätserweiterungen, wie der Ausbau einer zweiten Stammstrecke oder der geplanten U-Bahn U9, werden aufgrund von langen Planungs- und Umsetzungsphasen erst längerfristig zu einer Entlastung führen können. Auf eine Anfrage der CSU zur Darstellung der derzeit möglichen Gesamtkapazität des ÖPNV innerhalb der Stadtgrenzen Münchens antwortete die DB als S-Bahn-Betreiber im MVV Raum: „Zu den Hauptverkehrszeiten sind die S-Bahnen derzeit innerhalb der Stadtgrenzen Münchens – Schwerpunkt Stammstrecke – nahezu vollständig ausgelastet. Mit 30 Fahrten pro Richtung / Stunde hat die Stammstrecke hinsichtlich der Zugfrequenz ihre Leistungsgrenze erreicht.“ (vgl. LHM, 2018b, S. 4). Die MVG fasste weiterhin zusammen, „dass im heutigen Netz die Möglichkeiten zum weiteren Kapazitätsausbau beschränkt sind und größere Investitionen nötig sind. Besonders vorteilhaft ist [...] die Schaffung leistungsfähiger Querverbindungen.“ (vgl. LHM, 2018b, S. 3).

### *Gerechte Aufteilung des öffentlichen Raums*

Insbesondere vor dem Hintergrund der ansteigenden Zahl der in München zugelassenen Fahrzeuge und Mobilitätsdienstleistungs-Angebote (vgl. Kapitel 2.4.4) wird eine gerechte Aufteilung des öffentlichen Raums immer stärker diskutiert. Die steigenden Zulassungszahlen an Privatfahrzeugen und Fahrzeuge der berufsbedingten Pendler, erhöhen den Parkdruck in der Stadt kontinuierlich. Weiterhin übersteigt die Nachfrage an Parkplätzen das vorhandene Angebot teilweise deutlich, und führt somit zu illegalen Parkvorgängen und zu einem zusätzlichen Anstieg des Parksuchverkehrs im Innenstadtbereich (vgl. Shoup, 2006; Welte, 2016; Braatz, 2017). Die Kapazitäten einiger außerhalb der Stadt befindlichen P+R Parkplätze sind häufig erschöpft, sodass ein Anteil vermeidbarer PKW-Pendler aufgrund der Alternativlosigkeit mit dem Fahrzeug zum Arbeitsplatz in die Stadt fährt.

---

### *Münchens Strategien zu einer nachhaltigen Mobilität*

Die steigende Verkehrsnachfrage in München führt wie beschrieben zu vielfältigen Herausforderungen für das Mobilitätssystem, die neben innovativen Lösungen eine interdisziplinäre, regionale Zusammenarbeit zwischen Organisationen und Kommunen erfordern. In München existieren verschiedene Pläne und Austauschplattformen, die einen solchen strategischen Rahmen für die Umsetzung verkehrsbezogener Maßnahmen ermöglichen (vgl. Miramontes, 2018). Im Folgenden werden einige davon kurz vorgestellt.

#### *Pläne zur Steuerung und Stadtentwicklung*

Der Verkehrsentwicklungsplan (VEP) der Stadt München ist ein „konzeptionelles, übergeordnetes Steuerungsinstrument, das die Ziele und Strategien der Stadtentwicklung im Bereich Verkehr darstellt“ (vgl. LHM, 2019e). Der letzte VEP wurde bereits im Jahr 2006 aufgestellt und unterstreicht, dass die verkehrlichen Ziele in soziale, ökonomische, ökologische und kulturelle Zielsetzungen eingebettet sein sollen. Er verschreibt sich somit einer nachhaltigen Entwicklung auf Basis der SUMP-Leitlinien (vgl. LHM, 2006). Verkehr zu vermindern, diesen auf umweltgerechte Verkehrsmittel zu verlagern und stadtverträglich abzuwickeln, sind dabei die übergeordneten Ziele des Plans. Der VEP bietet somit das Fundament zur Planung und Umsetzung neuer Projekte. Aufgrund der geänderten Rahmenbedingungen und der damit verbundenen neuen Herausforderungen für das Münchner Mobilitätssystem soll sich der VEP ab 2020 zu einem Mobilitätsplan für München (vgl. MobiMUC) weiterentwickeln, „um den Mobilitätsbedürfnissen und -anforderungen der Bürgerinnen und Bürger der Landeshauptstadt München wie auch der Region gerecht zu werden“ (vgl. Listl & Gerstenberger, 2018, S. 15).

Weitere wichtige Pläne zur Verbesserung des Mobilitätssystems in München sind beispielsweise der Verkehrs- und Mobilitätsmanagementplan, der (regionale) Nahverkehrsplan (vgl. MVV, 2018), das Bayerische Radverkehrsprogramm (auf Basis des nationalen Radverkehrsplans) (vgl. LHM, 2010a), der Luftreinhalteplan (vgl. StMUV, 2015) und der Masterplan zur Luftreinhaltung (vgl. Listl & Gerstenberger, 2018) sowie der auf dem Pariser Klimaschutzabkommen basierende Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung (vgl. BMU, 2016).

#### *Austausch- und Kooperationsplattformen*

In München gibt es bereits seit längerem etablierte Austausch- und Kooperationsplattformen, die eine Diskussion und Zusammenarbeit zwischen öffentlichen Kommunen und privaten Akteuren zulassen und unterstützen. Als zwei besonders relevante Plattformen werden an dieser Stelle die Inzell-Initiative und die Europäische Metropolregion München (EMM) genannt (vgl. Mailer et al., 2014). Beide Plattformen führen Studien durch, erarbeiten Konzepte, pilotieren ausgewählte Projekte und unterstützen somit die Entscheidungsträger bei einer nachhaltigen Entwicklung.

Im Folgenden soll die *Modellstadt 2030*, eine Projekt-Initiative der Inzell-Initiative kurz erläutert werden. Die *Modellstadt 2030* wurde im Frühjahr 2018 mit dem Ziel ins Leben gerufen, eine Strategie für eine noch lebenswertere Stadt München aufzustellen. Zunächst wurden in mehreren Tagesworkshops mit Fachexperten unterschiedlicher Interessensgruppen eine Vision, Ziele und benötigte Werkzeuge zum Erreichen dieser Ziele erarbeitet. „Die Vision zeigt die Qualitäten, die in der Stadt und Region München bis zum Jahr 2030 für die Menschen erlebbar sein sollen. Lebens- und Mobilitätsqualitäten gehen dabei Hand in Hand“ (vgl. Inzell-Initiative, 2019, S. 5). Die Ziele orientieren sich ebenso wie die Vision an vier übergeordneten Ebenen: Mensch, Verkehr, Raum und Prozess. Zu jeder der vier Ebenen wurden weiterhin vier konkrete Ziele aufgestellt (vgl. Tabelle 7).

Tabelle 7: Ziele der Modellstadt 2030 (eigene Darstellung)

<b>Mensch</b>	<b>Raum</b>	<b>Verkehr</b>	<b>Prozess</b>
- soziale Teilhabe	- erreichbare & schwellenlose Region	- sicher	- zukunftsweisend & ganzheitlich
- aktiv & gesund	- effiziente Raumaufteilung	- robust & verlässlich	- handlungsfähig & wirksam
- funktionsfähig & gestaltbar	- Raumqualität in Aufenthalt & Bewegung	- qualitätsvolle Wegezeit	- Partizipation & Identifikation
- Austausch & Begegnung	- starke Ökologie & Stadtklima	- minimale Ressourcen & Emissionen	- Inzell-Initiative als Berater & Partner

Basierend auf den Zielen benennt die *Modellstadt 2030* 24 unterschiedliche Maßnahmen („Werkzeuge“), die bei guter Verknüpfung untereinander zu einer verbesserten Lebens- und Mobilitätsqualität führen sollen. Als Beispiele für solche Maßnahmen werden das Bepreisen und Neuaufteilen von Räumen, die Kostenwahrheit, effizientere Auslastung oder der öffentliche Verkehr mit erster und letzter Meile genannt. Die erarbeitete Vision der *Modellstadt 2030* bietet somit ein Maßnahmenpaket für eine lebenswerte Stadt und Region München. Für eine vollständige Übersicht aller Ziele und Maßnahmen siehe Inzell-Initiative (2019).

### *Weitere Initiativen*

Neben den großen Kooperationsprojekten existieren in München noch zahlreiche weitere Projekte und Initiativen, die eine nachhaltige Entwicklung des Mobilitätssystems der Stadt unterstützen. So wurde beispielsweise die Fahrradkampagne „Radlhauptstadt“ in den letzten Jahren durchgeführt, um die Nutzung anderer Verkehrsmittel anstelle von motorisierten Fahrzeugen zu fördern (vgl. MVG, 2016). Weitere Projekte und Initiativen sind unter anderem „EasyRide“, „smarter together“, „City2share“, „CIVITAS ECCENTRIC“ und das „Digitale Testfeld Autobahn“ zum automatisierten und vernetzten Fahren auf der A9 (Abschnitt München – Nürnberg). Im Anhang 2 sind die inhaltlichen Schwerpunkte der Initiativen und Projekte zusammengefasst.

---

### 2.3.2 Operationalisierung und Definition nachhaltige urbane Mobilität im Rahmen dieser Arbeit

In diesem Kapitel soll der Begriff nachhaltiger urbaner Mobilität auf Basis der unterschiedlichen Definitionen (vgl. Tabelle 2) sowie bestehender Operationalisierungs-Ansätze aus der Literatur (vgl. Tabelle 5) für den weiteren Verlauf dieser Arbeit definiert und operationalisiert werden. Als Grundverständnis für nachhaltige Mobilität wird die Begriffsbestimmung des mobil.LAB Promotionskollegs (2014) ausgewählt, in der neben der Einbeziehung aller drei Ebenen der Nachhaltigkeit ein starker Fokus auf die individuelle Befriedigung von (Mobilitäts)-Bedürfnissen und der Wahlfreiheit in Bezug auf unterschiedliche Mobilitätsoptionen gelegt wird.

» *Sustainable mobility ensures the individual fulfillment of basic needs and activities located in different places without harming the environment, economy or society, whether now or in the future. This requires affordable access to multiple mobility options, freedom of choice in terms of mode and access to life opportunities. Sustainable mobility, however, does not and should not require a reduction in mobility. It is oriented to reduce individual's derived demand of mobility and increase the intrinsic demand of mobility. Instead, it should be safe for all users and therefore minimize any type of negative effects on individuals, communities, the private sector and the environment.* « (vgl. mobil.LAB Promotionskolleg, 2014)

„Verkürzt dargestellt ist der Grundgedanke nachhaltiger Mobilität, jedem Menschen Mobilitätsoptionen zur Verfügung zu stellen und dabei die negativen, vor allem durch Verkehr entstehenden Externalitäten zu minimieren“ (vgl. Sterzer, 2017, S. 8).

Da es das Ziel dieser Arbeit ist, die Auswirkungen von On-Demand Mobilität auf eine nachhaltige Entwicklung der Stadt München zu untersuchen, wird die beschriebene Definition zunächst in den urbanen Kontext der Stadt München gestellt. Hierfür wird nachhaltige urbane Mobilität auf Basis der Haupt-Herausforderungen, sowie einer durchgeführten explorativen Expertenstudie (vgl. Kapitel 3) nach drei relevanten Indikatoren (Verkehrs-, Flächen- und Emissions-Indikator) operationalisiert. Basierend auf der zugrunde gelegten Definition und der Zielstellung dieser Arbeit ist bei der Aufstellung und Anwendung der Indikatoren:

- eine verkehrsträgerübergreifende, holistische Perspektive wichtig, die es ermöglicht,
- Wechselwirkungen unterschiedlicher Verkehrsträger auf Stadtebene mit zu berücksichtigen und dabei
- auf Basis der SMART Richtlinien (spezifisch, messbar, erreichbar, realistisch und zeitgebunden) und
- Verfügbarkeit entsprechender Daten eine Vergleichbarkeit des Indikators (z.B. zu unterschiedlichen Zeiten) zuzulassen.

Die Indikatoren haben dabei nicht den Anspruch, die gesamte Bandbreite nachhaltiger urbaner Mobilität abzubilden. Vielmehr stehen sie stellvertretend für die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit und bieten basierend auf dem vorliegenden Forschungsdesign dieser Arbeit die

Chance, zugrunde liegende Zusammenhänge und Einflussfaktoren gezielt zu analysieren und deren Auswirkungen zu beschreiben.

Im Folgenden wird jeder Indikator in den theoretischen Rahmen der Arbeit und die entsprechenden Nachhaltigkeits-Dimensionen eingeordnet. Hierfür erfolgt für jeden Indikator eine Definition basierend auf der Literatur und es wird ein Überblick über die aktuelle Entwicklung sowie politische Ziele gegeben. Anschließend werden bereits existierende Methoden zur Quantifizierung der Indikatoren dargelegt und bezüglich ihrer Eignung zur Abschätzung im Rahmen dieser Arbeit diskutiert. Abschließend wird für jeden Indikator eine für diese Arbeit geeignete Begriffsbestimmung und Quantifizierung (anhand der Stadt München) definiert und eine Zielrichtung für eine nachhaltige urbane Mobilitäts-Entwicklung festgelegt.

### 2.3.2.1 Verkehrs-Indikator: Verkehrsfluss und Durchschnitts-Geschwindigkeit

#### *Allgemeine Hintergrundinformation und Einordnung in den Kontext*

Der Verkehrsfluss des Mobilitätssystems einer Stadt besitzt in Bezug auf die Lebensqualität eine essentielle Bedeutung. In der klassischen Verkehrsforschung wird der Verkehrsfluss  $Q$  in der Regel für einen konkreten Straßenquerschnitt zur Beurteilung des Verkehrsablaufes herangezogen. Laut Treiber und Kesting (2010) wird der Verkehrsfluss  $Q$  definiert als die Anzahl der Fahrzeuge  $\Delta N$ , die einen Straßenquerschnitt an einem definierten Ort  $z$  in einem definierten Zeitintervall  $\Delta t$  überqueren:

$$Q(z,t) = \Delta N / \Delta t \quad (\text{Formel 1})$$

Als Gütekriterium zur Beurteilung des Verkehrsflusses findet eine Untergliederung auf Basis der *Level of Service* Kategorien von A – F seine Anwendung (vgl. Knoflacher, 1994). Störungen des Verkehrsflusses treten im Alltag vor allem durch ein zu hohes Verkehrsaufkommen (insbesondere während der Stoßzeiten), lokale Störstellen und temporäre Störungen im Verkehrsfluss selbst auf. Diese Störungen führen auf der einen Seite durch eine verminderte Geschwindigkeit zu einem erhöhten Zeitaufwand pro Strecke und auf der anderen Seite aus verkehrsökologischer Sicht zu zusätzlichem Verbrauch von Kraftstoff und Ressourcen. Insbesondere aus wirtschaftlicher und ökologischer Sicht ist somit eine effiziente Verkehrsabwicklung in den Städten erwünscht.

#### *Relevanz in der Stadt München*

München gehört in Deutschland zu einer der staureichsten Städte (vgl. Kapitel 2.3.1). Den Berechnungen der Traffic Scorecard der Firma INRIX zufolge war München 2016 und 2017 sogar die Stadt mit dem höchsten Stauaufkommen (vgl. INRIX, 2018b). Gründe für das hohe Verkehrsaufkommen und die daraus folgende Überlastung des Straßenverkehrs liegen vor allem in dem starken Bevölkerungszuwachs der Stadt und anliegender Gemeinden. Dieses führte zu ei-

---

nem bedeutenden Anstieg der regionalen und überregionalen Verkehrsnachfrage (wie zum Beispiel des Pendler- und Güter-Verkehrs) im Straßenverkehr, welche nicht ausreichend durch die vorhandene Verkehrsinfrastruktur gedeckt werden kann. Insbesondere in einem urbanen Straßennetzwerk kann sich ein gestörter Verkehrsfluss in einer Straße schnell auf andere Straßen ausbreiten (vgl. Wang et al., 2012).

#### *Definition und Quantifizierung für diese Arbeit*

In der Literatur gibt es unterschiedliche Ansätze und Methoden zur Bestimmung der Verkehrslage. Besonders weit verbreitet für die Messung an einem speziell definierten Straßenabschnitt ist die Verkehrslageschätzung mittels Fundamentaldiagrammen. Greenshield entdeckte Anfang der 1930er Jahre erstmals die Zusammenhänge zwischen Verkehrsstärke, Verkehrsdichte und Geschwindigkeit und verortete sie in einem Fundamentaldiagramm (vgl. Greenshield, 1935). Mittlerweile konnte nachgewiesen werden, dass Fundamentaldiagramme auch für größere städtische Gebiete, wie etwa für einen Stadtteil, existieren (vgl. Geroliminis & Daganzo, 2007; 2008). Als Bedingung für die Erstellung und Anwendung eines solchen makroskopischen Fundamentaldiagramms (MFD) gelten ein homogener Verkehrszustand im Netz über den betrachteten Zeitraum und die Anzahl der begonnenen Trips im Untersuchungsgebiet proportional zu den beendeten Trips.

Bei entsprechender Datenverfügbarkeit kann der Verkehrsfluss auch über gemessene Geschwindigkeiten (zum Beispiel durch Loop-Detektor<sup>3</sup> oder Floating-Car Daten (FCD)<sup>4</sup>) erfolgen. Google Maps nutzt diese Möglichkeit beispielsweise zur Einteilung eines Straßenabschnittes in unterschiedliche Verkehrszustände.

Da für diese Arbeit allerdings ein vergleichbarer, aggregierter Indikator gesucht wird, für den die entsprechende Datengrundlage zur Erfassung gegeben sein muss, wird nicht auf existierende Methoden aus der Literatur zur Bestimmung des Verkehrsflusses auf einem definierten Streckenabschnitt zurückgegriffen. Vielmehr soll vereinfachend eine räumlich und zeitlich aggregierte Durchschnitts-Geschwindigkeit für das Untersuchungsgebiet aufgestellt und angewandt werden. Räumlich werden demnach alle Fahrten in der Stadt München berücksichtigt. Zeitlich werden alle Fahrten an einem Tag einbezogen, um die aggregierte Durchschnitts-Geschwindigkeit pro Tag ermitteln zu können.

---

<sup>3</sup> Loop-Detektor Daten können zum Beispiel Daten von Fahrzeugen sein, welche durch induktive Verkehrsdetektoren erfasst werden (beispielsweise Anzahl Fahrzeuge bei Annäherung an eine Ampel).

<sup>4</sup> „Grundidee ist die Nutzung von im Verkehrsfluss ‚mitschwimmenden‘ Fahrzeugen als mobile Sensoren für die aktuelle Verkehrslage.“ (vgl. Lorkowski et al., 2003)

Die Berechnung des Indikators erfolgt, wie beschrieben, auf Basis zur Verfügung stehender Daten immer für einen Tag und fasst somit sämtliche Trips an einem Tag im Untersuchungsgebiet zusammen (vgl. Formel 2).

$$V_{Avg}(t) = \frac{\sum_{h=1}^{24} \sum_{i=1}^{h_n} V_{hi}}{\sum_{h=1}^{24} n_h} \quad (\text{Formel 2})$$

Die aggregierte Durchschnitts-Geschwindigkeit  $V_{Avg}(t)$  wird demnach berechnet aus der Summe der an einem Tag stattfindenden Geschwindigkeiten der Trips  $\sum_{h=1}^{24} \sum_{i=1}^{h_n} V_{hi}$ , geteilt durch die absolute Anzahl an Trips pro Tag  $\sum_{h=1}^{24} n_h$ . Der Indikator kann für jeden Tag berechnet werden und bietet somit die Möglichkeit, Veränderungen an unterschiedlichen Tagen abzubilden. Als Haupt-Datengrundlage wird auf INRIX Geschwindigkeitsdaten sowie Mobilitäts- und Trip-Daten aus der aktuellen Erhebung der Mobilität in Deutschland im Untersuchungsgebiet München zugegriffen (vgl. INRIX Analytics, 2020; Follmer & Belz, 2018).

### 2.3.2.2 Flächen-Indikator: Flächeninanspruchnahme und Flächenverbrauch

#### *Allgemeine Hintergrundinformation und Einordnung in den Kontext*

Die öffentlich zur Verfügung stehende Fläche ist insbesondere in urbanen Räumen ein vielseitig diskutiertes, knappes Gut (vgl. Kapitel 2.3.1). Auf der einen Seite ist es der Ort der Bürger einer Stadt für sozialen Austausch und Interaktion, auf der anderen Seite müssen wichtige Funktionen, wie beispielsweise das Mobilitätssystem, darin effizient abgewickelt werden. Aufgrund dieser hohen Anforderungen (insbesondere in stark verdichteten Räumen) mit direkten Auswirkungen auf die Lebensqualität einer Stadt, entflammt häufig die Diskussion über eine gerechte Aufteilung der zur Verfügung stehenden Flächen. Bevor genauer auf die Relevanz in der Stadt München und die Aufstellung eines hierfür geeigneten Indikators eingegangen wird, soll zunächst der verkehrsökologischen Betrachtung zufolge ein genaueres Verständnis der Begriffe Flächeninanspruchnahme und Flächenverbrauch geschaffen werden.

Der Begriff „Flächeninanspruchnahme“ wird in der Literatur (vgl. Becker, 2016; UBA, 2017) für den absoluten Wert der Fläche einer bestimmten Nutzung oder deren relativen Anteil an einer Gesamtfläche verwendet.

Der Begriff „Flächenverbrauch“ wird hingegen im politischen Kontext definiert als „der tägliche Zuwachs der Siedlungs- und Verkehrsfläche, welcher zum Verlust der ökologischen und land-wirtschaftlichen Funktion des Bodens führt“ (vgl. Bundestag, 2017). Flächenverbrauch definiert somit die tägliche Änderung der Flächeninanspruchnahme in einem Untersuchungsraum. Allerdings wird der Begriff dahingehend kritisiert, dass eine Fläche nicht wirklich „verbraucht“ wird, sondern sich lediglich der Zweck der Nutzung über die Zeit ändern kann (vgl. Becker et al., 2009).

In Deutschland wird gemäß des Umweltbundesamtes in folgende Flächen-Nutzungsarten unterschieden:

- „Gebäude und gebäudebezogene Freiflächen für unterschiedliche Nutzungen, wie Wohnen, Arbeiten, Bildung, Verwaltung
- Erholungsflächen: Sportanlagen, Campingplätze, Parks und Grünanlagen
- Betriebsflächen (ohne Abbauland): Lager und Halden, Anlagen der Ver- und Entsorgung
- Friedhöfe
- Verkehrsflächen: Straßen, Wege, Plätze, Schienen“ (vgl. UBA, 2017)

### *Relevanz in der Stadt München*

Aufgrund der starken Nachverdichtung in vielen Teilen der Stadt München gerät die Diskussion um eine gerechte Verteilung der zur Verfügung stehenden Flächen vermehrt in den Vordergrund. Tendenziell wachsen „Wohnviertel, Industriegebiete und Straßen [...] meist auf Kosten von Freiräumen, die der Landwirtschaft, der Natur oder der Erholung dienen“ (vgl. IÖR, 2018, S. 6). In der Tabelle 8 werden die Gesamtlängen (in km), und die zugehörige Gesamtfläche (in m<sup>2</sup>) der Münchner Straßeninfrastruktur abgebildet.

Tabelle 8: Übersicht Strassenstatistik München (eigene Darstellung, in Anlehnung an LHM, 2018a)

<b>Straßeninfrastruktur</b>	<b>Gesamtlänge</b> (km)	<b>Gesamtfläche</b> (m <sup>2</sup> )	<b>Anteil an Gesamtverkehrsfläche</b> (%)
Fahrbahnen	2.189,03	17.291.975	55,3
Verkehrsberuhigte Bereiche	33,313	281.325	0,9
Fußgängerbereiche	6,562	121.722	0,4
Gehwege	4.294,22	10.988.429	35,1
Radwege ausgebaut	860,635	1.730.834	5,5
Stellplatz-Flächen	-	874.949	2,8
<b>Gesamtverkehrsfläche</b>	-	<b>31.289.234</b>	<b>100,0</b>

Kumuliert nimmt die Gesamtverkehrsfläche<sup>5</sup> im Untersuchungsraum München aktuell mit rund 31,3 km<sup>2</sup> (vgl. Tabelle 8) einen signifikanten Anteil der Stadt-Gesamtfläche von etwa 10 % ein (310 km<sup>2</sup>).

Weiteren Statistiken zufolge ist der Kraftfahrzeugbestand zum Jahresende 2018 auf 714.658 angestiegen (vgl. LHM, 2019d). Es wird davon ausgegangen, dass in München zwischen 40 - 60 % der zugelassenen Fahrzeuge dauerhaft im öffentlichen Raum, also am Fahrbahnrand oder auf designierten Stellplatz-Flächen, abgestellt werden. Bei einer durchschnittlichen Stellplatz-Fläche von circa 13,5 m<sup>2</sup> pro Fahrzeug (vgl. Randelhoff, 2014), entspricht dies einer Gesamtfläche von 4,8 - 5,8 km<sup>2</sup> für parkende Fahrzeuge (15,3 - 18,5 % der Gesamtverkehrsfläche).

Insbesondere durch die hohe Besitzquote an Privatfahrzeugen im Untersuchungsraum stellt sich die Frage, ob dem MIV nicht unverhältnismäßig viel Fläche zugesprochen wird und ob diese

<sup>5</sup> Keine Berücksichtigung von Parkhäusern und Betriebshöhen.

nicht effizienter genutzt werden könnte (vgl. LHM, 2019b). „Anstatt kaum genutzter, parkender Autos, würden zum Beispiel Erholungsflächen für die Bürger, eine Stadt deutlich lebenswerter machen“ (vgl. Greiderer, 2019, S. 10). Außerdem gilt der städtische Raum als „Brennpunkt der gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Entwicklung, der vielfältigste Möglichkeiten des sozialen Zusammenwirkens und der Kommunikation bietet“ (vgl. Reicher, 2014, S. 8).

#### *Definition und Quantifizierung für diese Arbeit*

Für den weiteren Verlauf dieser Arbeit wird der Flächen-Indikator als die benötigte Gesamtfläche  $A(t)$  für (dauerhaft) parkende Fahrzeuge im öffentlichen Raum der Stadt München  $C(t)$  definiert. Der Indikator besitzt somit die Möglichkeit, Veränderungen im Fahrzeugbesitz  $Fb(t)$  abzubilden und vergleichbar einzuordnen. Die Berechnung des Indikators erfolgt wie in den Formeln 3 und 4 dargestellt.  $Ac(t)$  berücksichtigt die benötigte, durchschnittliche Fläche pro Fahrzeug und  $\omega$  steht für den Anteil der im öffentlichen Raum parkenden Fahrzeuge.

$$A(t) = C(t) * Ac(t) * \omega \quad (\text{Formel 3})$$

$$C(t) = f\{Fb(t)\} \quad (\text{Formel 4})$$

#### 2.3.2.3 Emissions-Indikator: Luftschadstoff- und Treibhausgas-Emissionen

##### *Allgemeine Hintergrundinformation und Einordnung in den Kontext*

Im Kontext nachhaltiger urbaner Mobilität wird in der Öffentlichkeit häufig der facettenreiche Begriff „Emissionen“ angewandt. Dem deutschen Bundesimmissionsschutzgesetz zufolge, sind Emissionen „die von einer Anlage ausgehenden Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen, Licht, Wärme, Strahlen und ähnlichen Erscheinungen.“ (vgl. BImSch, 2019), wobei (motorisierte) Fahrzeuge, der weiteren Definition nach, eindeutig auch als Anlage zugeordnet werden können. Bei der Verwendung des Begriffs Emissionen stehen aber meist nur die Fahrzeugabgase im Zentrum der Betrachtung, welche aufgrund ihrer Wirkung im Wesentlichen in zwei Gruppen unterteilt werden können: gesundheitsrelevante Luftschadstoffe und klimarelevante Treibhausgase. Während Treibhausgase schon seit mehreren Jahren im Zusammenhang mit dem Klimawandel intensiv diskutiert werden (vgl. Europäische Kommission, 2017), sind Luftschadstoffe seit der Debatte um manipulierte Dieselfahrzeuge insbesondere in Europa stark in den Fokus geraten (vgl. Kraus, 2017).

Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>), Methan (CH<sub>4</sub>) und Distickstoffoxid (N<sub>2</sub>O) zählen zu den weltweit am meisten ausgestoßenen klimarelevanten Treibhausgasen (vgl. EU, 2018). An diesen hat der Verkehrssektor eine zentrale Bedeutung (vgl. UBA, 2016a). Für eine bessere Vergleichbarkeit werden unterschiedliche Treibhausgase häufig auch in Kohlenstoffdioxid-Äquivalenten (CO<sub>2</sub>äqu.) umgerechnet. Einem Bericht des Umweltbundesamtes (vgl. UBA, 2016b) zufolge macht der Straßenverkehr, der zu einem Großteil aus motorisierten Individualverkehr besteht,

rund 95 % der emittierten Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors aus. In der Abbildung 7 sind die spezifischen Kohlenstoffdioxid-Emissionen (direkte Fahrzeug-Emissionen / Verkehrsaufwand Fahrzeug) eines durchschnittlichen Fahrzeugs in Deutschland im zeitlichen Verlauf von 1995 – 2017 abgebildet.

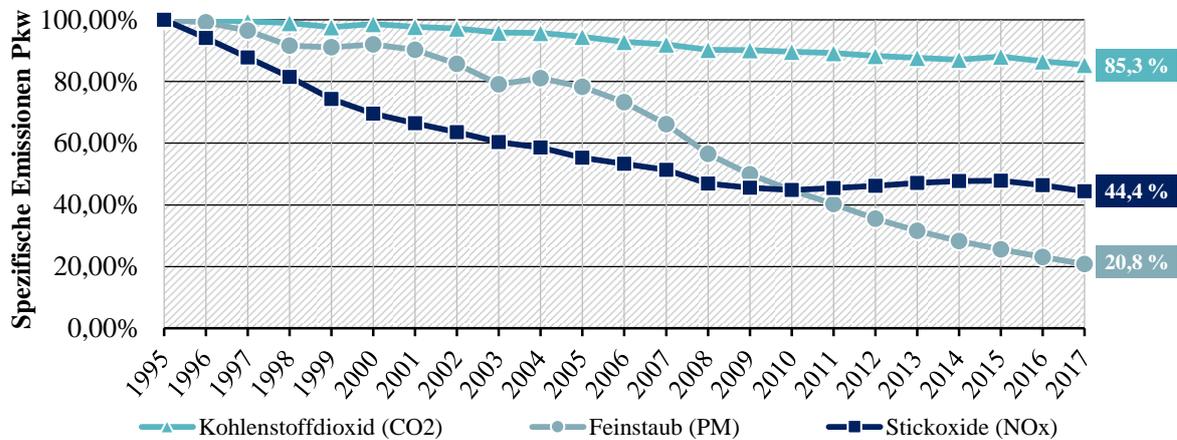


Abbildung 7: Spezifische Emissionen Pkw (eigene Darstellung, in Anlehnung an UBA, 2018a)

Ebenfalls werden in der Abbildung 7 die spezifischen Emissionen der gesundheitsschädlichen Luftschadstoffe Stickoxide (NO<sub>x</sub>) und Feinstaub (PM) dargestellt. Wie deutlich erkennbar ist, konnte der direkte Schadstoffausstoß von Stickoxiden (NO<sub>x</sub>) und Feinstaub (PM) im Vergleich zum Treibhausgas Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) stark gesenkt werden. Als Grund hierfür zählen vor allem technologische Verbesserungen, wie beispielsweise der Partikelfilter im Abgasstrang von Fahrzeugen. Allerdings hebt die stetige Verkehrszunahme die Fortschritte teilweise vollständig wieder auf, weshalb die Einsparungen der Luftschadstoffe auf den gesamten Verkehr bezogen deutlich geringer ausfallen als die fahrzeugspezifischen Einsparungen (vgl. UBA, 2018a).

Zu den Stickstoffoxiden (NO<sub>x</sub>) zählen Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>), welche zu Augenbrennen, Schädigungen der Lunge und schweren Reizungen der Atemwege führen können (vgl. UBA, 2018b). Feinstaub (PM) wird hingegen (wie in Kapitel 2.3.1 beschrieben) nach der Teilchengröße gemäß der 39. Bundesimmissionsschutzverordnung (BImSchV) §1 weiter differenziert:

- „PM<sub>10</sub>“ sind Partikel, die einen gröbenselektierenden Lufteinlass passieren, der für einen aerodynamischen Durchmesser von zehn Mikrometern einen Abscheidungsgrad von 50 % aufweist
- „PM<sub>2,5</sub>“ sind Partikel, die einen gröbenselektierenden Lufteinlass passieren, der für einen aerodynamischen Durchmesser von zweieinhalb Mikrometern einen Abscheidungsgrad von 50 % aufweist

Während größere Partikel hauptsächlich Atemwegserkrankungen (wie z.B. Asthma) auslösen, können kleinere Partikel bis ins Blut gelangen und so das Herz-Kreislaufsystem angreifen (vgl. WHO, 2013).

Auf europäischer und deutscher Ebene existieren zahlreiche Bemühungen, ausgestoßene Luftschadstoffe und Treibhausgase aus dem Verkehrssektor zu reduzieren. Die von der Europäischen Union verabschiedete *National Emission Ceilings-Richtlinie* (NEC-Richtlinie) legt in diesem Zusammenhang die zulässigen Höchstmengen für die wichtigsten Luftschadstoffe fest (vgl. EEA, 2016). Diese wurden mit der 39. BImSchV in deutsches Recht übernommen und sind für einen besseren Überblick in Tabelle 9 zusammengefasst (siehe auch Kapitel 2.3.1).

Tabelle 9: Grenzwerte Luftschadstoffe

<b>Luftschadstoff</b>	<b>Immissionsgrenzwert</b>	<b>Bezugszeitraum</b>
Stickstoffdioxid (NO <sub>2</sub> )	200 µg/m <sup>3</sup> max. 18 Überschreitungen pro Jahr	Ein-Stunden-Mittelwert
	40 µg/m <sup>3</sup>	Jahresmittelwert
Feinstaub (PM <sub>10</sub> )	50 µg/m <sup>3</sup> max. 35 Überschreitungen pro Jahr	Tagesmittelwert
	40 µg/m <sup>3</sup>	Jahresmittelwert
Feinstaub (PM <sub>2,5</sub> )	25 µg/m <sup>3</sup>	Jahresmittelwert

Durch die Einführung von Fahrzeugemissionsnormen in der EU wurden Emissionsgrenzwerte für alle Typen von Straßenfahrzeugen festgelegt und sukzessive verstärkt. Die Fahrzeughersteller müssen neue Fahrzeugmodelle hinsichtlich ihrer Schadstoffemissionen testen und die Einhaltung der jeweiligen Euro-Norm garantieren. Ab dem Jahr 2020 wurde das festgelegte Durchschnittsziel für neu zugelassene Fahrzeuge auf 95 Gramm CO<sub>2</sub>/km verschärft (2015 noch 130 Gramm CO<sub>2</sub>/km). Bei Nichteinhaltung der Grenzwerte drohen den Herstellern ab 2021 Strafzahlungen. Weiterhin müssen die CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2025 in Europa um 15 % und bis 2030 um 37,5 % gegenüber den Emissionsgrenzwerten von 2021 gesenkt werden (vgl. EU, 2019). Kritiker beanstanden, dass sich in der Vergangenheit herausgestellt hat, dass die realen Emissionen der Fahrzeuge teils deutlich über den im Testbetrieb ermittelten Emissionen liegen (vgl. EEA, 2013). Die Euro-Abgasnorm dient in Deutschland weiterhin als Grundlage für die Feinstaubplaketten. Fahrzeuge, welche die entsprechenden Grenzwerte nicht einhalten, dürfen demnach in einigen Städten nicht mehr im innerstädtischen Bereich fahren (vgl. UBA, 2018c).

Speziell im urbanen Raum führen einige Faktoren dazu, dass die Emissionsbelastung durch das Mobilitätssystem besonders gravierend ist. Neben der hohen Dichte an Fahrzeugen, die täglich im Stadtgebiet verkehren, trägt insbesondere „die städtische Bebauung mit hohen Gebäuden an den Straßenrändern dazu [bei], dass sich die Abgase und Partikel nicht gleichmäßig verteilen können“ (vgl. Greiderer, 2019, S. 19). Dadurch kann es lokal zu sehr hohen Belastungen oberhalb der festgesetzten Grenzwerte kommen. Weiterhin führen Kaltstarts und ein ungleichmäßiger Verkehrsfluss zu einem erhöhten Kraftstoffverbrauch und daraus resultierend erhöhten Emissionsbelastungen (vgl. EEA, 2012).

### Relevanz von Luftschadstoffen und Treibhausgasen in der Stadt München

Auch, wenn die Grenzwerte für Feinstaub (PM) in München seit 2012 eingehalten werden, steht die Stadt bezüglich der Emission von Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>) vor enormen Herausforderungen (vgl. Kapitel 2.3.1). Die folgende Tabelle 10 zeigt die Entwicklung der NO<sub>2</sub> Belastung an den LÜB-Messstationen im Stadtgebiet im Jahresmittel in µg/m<sup>3</sup>.

Tabelle 10: Entwicklung der NO<sub>2</sub>-Belastung an den LÜB-Messstationen im Jahresmittel in µg/m<sup>3</sup> (eigene Darstellung, in Anlehnung an Listl & Gerstenberger, 2018; LfU 2019)

LÜB-Messstationen	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Allach	-	25	26	26	25	24
Johanneskirchen	22	22	23	22	21	20
Landshuter Allee	81	83	84	80	78	66
Lothstraße	31	31	33	33	32	27
Stachus	64	62	64	56	53	48

Beim Vergleich der Messwerte ist festzustellen, dass die an der Landshuter Allee ermittelten Jahres-Durchschnittswerte im Zeitraum zwischen 2013 – 2017 den Jahresgrenzwert von 40 µg/m<sup>3</sup> um teilweise mehr als 100% überstiegen. Seit dem Jahr 2018 ist jedoch eine signifikante Besserung der Messwerte an allen LÜB-Stationen festzustellen (vgl. LfU, 2019).

Neben den Stickstoffdioxid-Messungen an den LÜB-Messstationen traten, basierend auf einer Modellrechnung für das Jahr 2015, Grenzwertüberschreitungen flächendeckend an 24 % des 511 Kilometer langen Münchner Hauptstraßennetzes auf (vgl. Listl et al., 2017). Wie in der Abbildung 8 zu sehen ist, traten diese NO<sub>2</sub>-Grenzwertüberschreitungen nicht lokal auf, sondern verteilten sich über das gesamte Münchner Straßennetz.

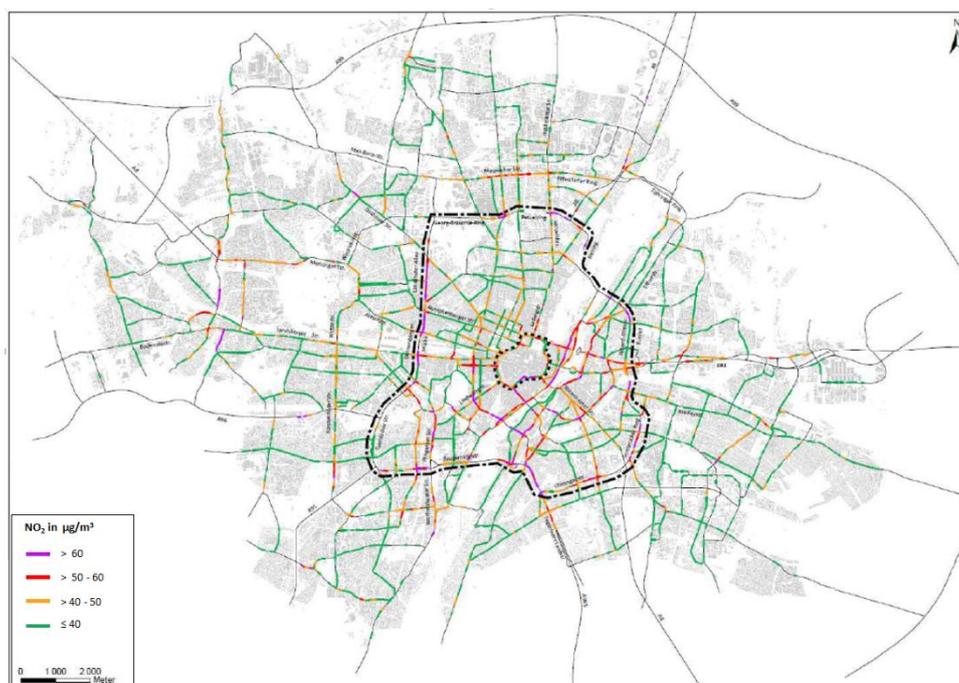


Abbildung 8: NO<sub>2</sub>-Belastung im Jahresmittel im Hauptverkehrsstraßennetz der LHM (vgl. Listl & Gerstenberger, 2018)

Der im ersten Halbjahr 2018 erarbeitete Masterplan zur Luftreinhaltung für die Landeshauptstadt München zeigt klare Maßnahmen zur netzweiten Reduktion der Schadstoffemissionen und –immissionen auf. Hierunter zählen vor allem „eine Verringerung des Verkehrsaufwandes im emissionsbehafteten motorisierten Individualverkehr“ (vgl. Listl & Gerstenberger, 2018, S. 29). Weiterhin sieht er Potentiale zur Reduzierung der Immissionswerte durch eine intelligente Steuerung und Parkraummanagement, weitere Entwicklungen in der Fahrzeug- und Antriebstechnik und eine Substitution der Fahrzeugflotte durch elektrifizierte Fahrzeuge. Darüber hinaus enthält die aktuelle Fortschreibung des Masterplans eine NO<sub>2</sub>-Immissionsprognose, wonach der NO<sub>2</sub>-Grenzwert bis zum Jahr 2020 bereits an 98,8 % des Straßennetzes eingehalten werden kann. Überschreitungen treten dieser Prognose nach nur noch auf 6,1 Kilometern des Münchner Straßennetzes auf. Bis 2023 wird auch dort die Einhaltung prognostiziert, mit Ausnahme eines Abschnitts an der Landshuter Allee. Es wird angenommen, dass die Grenzwerte dort bis 2026 eingehalten werden (vgl. StMUV, 2019).

#### *Definition und Quantifizierung für diese Arbeit*

Für diese Arbeit werden insgesamt zwei Indikatoren zur Bestimmung der Stickstoffoxid- und Feinstaub-Emissionen (NO<sub>x</sub> und PM) sowie ein aggregierter Wert für das kumulierte Treibhausgaspotential (CO<sub>2äqu.</sub>) definiert. Da durch die Indikatoren eine verkehrsträgerübergreifende, holistische Perspektive im Vordergrund steht, liegt der Fokus auf den insgesamt im urbanen Mobilitätssystem emittierten Luftschadstoffen bzw. Treibhausgasen, welche sich aus unterschiedlichen Verkehrsträgern des ÖPNV, MIV und On-Demand Mobilität zusammensetzen. Als messbarer, vergleichbarer Wert (entsprechend der SMART-Richtlinien, siehe Kapitel 2.2.3), werden für jeden der drei Indikatoren die Emissionsinventare auf Basis der Fahrzeugkilometer über einen gewählten Zeitverlauf abgebildet.

Zur Quantifizierung von Emissionsinventaren gibt es in der Praxis eine Reihe unterschiedlicher Methoden: von einfachen Überschlagsrechnungen, wie der verkehrsökologischen Tautologie (vgl. Becker, 2016), über detaillierte, computergestützte Verkehrsemissionsmodelle (HBEFA<sup>6</sup>, TREMOD<sup>7</sup>, COPERT<sup>8</sup>, REMOVE) bis hin zu Vor-Ort-Messungen (vgl. Greiderer, 2019).

In dieser Arbeit erfolgt die Bestimmung der Emissionsinventare auf Basis HBEFA bestimmten Emissionsfaktoren. Die in dieser Arbeit angewandte HBEFA Version 3.3 ermöglicht es, die Emissionsfaktoren für den urbanen Raum bis zum Jahr 2030 unter Berücksichtigung des Fahrzeugbestandes und entsprechender Fahrleistungen  $FL_m$  abzubilden. Die Verrechnung der Emissionsfaktoren  $EF_m$  erfolgt, wie in Abbildung 9 dargestellt, mit den berechneten Fahrleistungen  $FL_m$  zu den gewünschten Emissionsinventaren  $EI_{Poll}$ .

---

<sup>6</sup> Handbuch für Emissionsschutzfaktoren (HBEFA)

<sup>7</sup> Transport Emission Model (TREMODO)

<sup>8</sup> Computer Program for estimating Emissions from Road Transport (COPERT)

$$EI_{Poll} = \sum_{m=1}^M [FL_m * EF_m] \quad (\text{Formel 5})$$

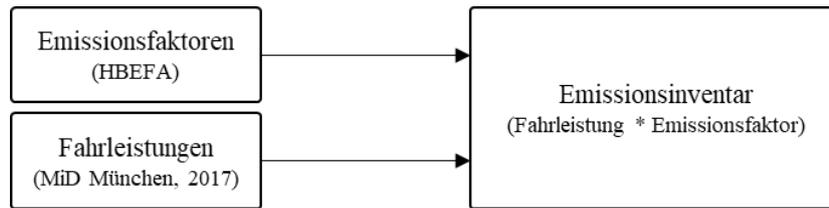


Abbildung 9: Vorgehen Quantifizierung Indikatoren Emissionsinventar (eigene Darstellung)

### 2.3.2.4 Einordnung der Indikatoren in Nachhaltigkeits-Dimensionen

Auf Basis der SMART-Richtlinien wurden für diese Arbeit drei Indikatoren ausgewählt, welche im späteren Verlauf in einem holistischen, verkehrsträgerübergreifenden Modell angewendet werden und dabei die Betrachtung von Wechselwirkungen unterschiedlicher Verkehrsträger auf Stadtebene zulassen. Die ausgewählten Indikatoren haben dabei nicht den Anspruch, nachhaltige urbane Mobilität vollständig beschreiben oder gar evaluieren zu können. Vielmehr geben sie gezielt Auskunft über die Entwicklung eines spezifischen Messwertes (bei quantitativer Berechnung) mit hoher Relevanz zu nachhaltiger Mobilität. Wie bereits beschrieben, basieren die Indikatoren auf einer durchgeführten Expertenstudie (vgl. Kapitel 3) sowie einer Analyse der aktuellen Haupt-Herausforderungen des Mobilitätssystems der Stadt München.

Auch, wenn nachhaltige urbane Mobilität mit diesem Operationalisierungs-Ansatz nicht vollumfänglich abgebildet und evaluiert werden kann, so können die ausgewählten Indikatoren entsprechend einer Nachhaltigkeits-Dimensionen zugeordnet werden. Ähnlich wie bei einigen aufgeführten Studien zur Operationalisierung nachhaltiger urbaner Mobilität erfolgt die Einordnung in eine Nachhaltigkeits-Dimension hierbei nicht trennscharf. Die Abbildung 10 gibt einen Überblick über die Verortung der Indikatoren in den klassischen drei Säulen der Nachhaltigkeit.

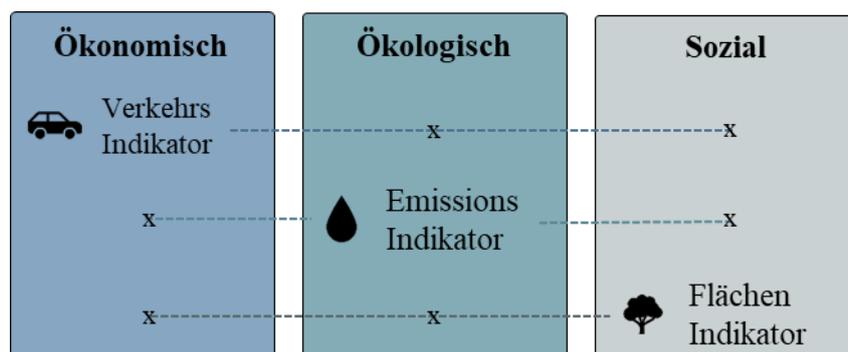


Abbildung 10: Abbildung und Verortung der Nachhaltigkeits-Dimensionen der gewählten Indikatoren (eigene Darstellung)

Da als Messwert zur Berechnung des Verkehrs-Indikators die aggregierte Durchschnittsgeschwindigkeit im Untersuchungsgebiet herangezogen wird, ist der Indikator überwiegend in der ökonomischen Säule der Nachhaltigkeit verortet. Verzögerungen im Verkehrsfluss und Staus führen zu einer verminderten Durchschnittsgeschwindigkeit, deren Auswirkungen in Studien

häufig in Form eines wirtschaftlichen Schadens berechnet werden. Neben der ökonomischen Verortung besitzt der Verkehrs-Indikator auch eine ökologische und soziale Komponente, da Verzögerungen im Verkehrsablauf auch zu einem erhöhten Kraftstoffverbrauch und schließlich ansteigenden Emissionen führen und sich ebenfalls durch erhöhten Stress und Unzufriedenheit auf die Gesellschaft auswirken.

Der Emissions-Indikator wird in diesem Zusammenhang überwiegend in der ökologischen Nachhaltigkeits-Dimension verortet. Auf der einen Seite besitzen die ausgestoßenen Treibhausgase einen signifikanten Einfluss auf den Klimawandel und können somit enorme ökologische Folgen verursachen. Auf der anderen Seite haben Emissionen und insbesondere Luftschadstoffe auch eine soziale und ökonomische Auswirkung, da sie sich negativ auf die menschliche Gesundheit auswirken.

Der Flächen-Indikator wird der Abbildung 10 zufolge überwiegend als sozialer Indikator eingestuft, da insbesondere im urbanen Kontext eine gerechte Aufteilung des öffentlichen Raums von hoher sozialer Bedeutung ist. Weiterhin besitzt der Indikator auch eine ökonomische und ökologische Komponente, da Flächen in hochverdichteten urbanen Räumen eine hohe wirtschaftliche Bedeutung aufweisen und durch die Versiegelung mit Stellplatz-Flächen teilweise wertvolle Böden vernichtet und das Stadtklima beeinflusst werden (vgl. Becker, 2009; UBA, 2017).

## 2.4 On-Demand Mobilität

In diesem Kapitel soll ein fundiertes Verständnis zu On-Demand Mobilität (ODM) geschaffen werden. Vor dem technologischen und gesellschaftlichen Hintergrund werden unterschiedliche Erscheinungsformen von ODM vorgestellt und voneinander abgegrenzt. Weiterhin wird eine umfassende Marktanalyse existierender ODM-Services im Untersuchungsgebiet der Stadt München durchgeführt. Abschließend erfolgt die Verbindung zu den vorangegangenen Kapitel 2.2 und 2.3, indem eine fundierte Literaturanalyse zu den Auswirkungen unterschiedlicher ODM-Services auf eine nachhaltige urbane Mobilität durchgeführt wird.

### 2.4.1 Technologischer und gesellschaftlicher Hintergrund

In den vergangenen Jahrzehnten sind in vielen westlichen Städten signifikante sozioökonomische Veränderungen festzustellen (vgl. Tully & Alfaraz, 2017). Neben einer stark anwachsenden Bevölkerung in vielen Städten führen vor allem technologische- und gesellschaftliche Trends zu starken Veränderungen im urbanen Mobilitätssystem (vgl. Tully & Alfaraz, 2017; Plewnia & Guenther, 2018).

Der anhaltende Trend der Urbanisierung, welcher aufgrund der gestiegenen Lebensqualität und besserer Perspektiven zu einer weiteren Nachverdichtung der Städte führt, stellt das urbane

---

Mobilitätssystem vor erhebliche Herausforderungen (vgl. Majedi et al., 2012). Der Zuwachs der Bevölkerung führt entsprechend zu einer starken Erhöhung der Nachfrage nach Mobilität, was sich in einer hohen Auslastung des ÖPNV und einer Überlastung des Straßennetzes durch den MIV widerspiegelt (vgl. Kapitel 2.3.1). Häufig fehlen trotz hoher Notwendigkeit, mittelfristig die finanziellen Mittel, um weitere Infrastrukturkapazitäten für den ÖPNV oder den MIV zu schaffen. Angestoßene Kapazitätserweiterungen führen aufgrund langer Planungs- und Umsetzungsverfahren in der Regel erst langfristig zu einer Entlastung. Städte thematisieren aus diesem Grund häufig eine Veränderung des Mobilitätsverhaltens der Stadtbewohner sowie technologische Innovationen, die zu einer besseren Auslastung und erhöhten Effizienz des Mobilitätssystems führen. Übergreifend betrachtet, stehen diese technologischen und gesellschaftlichen Veränderungen in einer Wechselwirkung zueinander, sowie unter dem Einfluss der wirtschaftlichen, politischen und rechtlichen Rahmenbedingungen.

#### *Digitale Technologien und Mobilitätsinnovationen*

Im Zeitalter der Digitalisierung sind die Auswirkungen von digitalen Technologien auf das menschliche Verhalten und damit auch das Mobilitätssystem von essentieller Bedeutung (vgl. Tully & Baier, 2006). Die zunehmende Entwicklung von Informations- und Kommunikationstechnik hat insbesondere durch die verbreitete Nutzung des Smartphones radikal beeinflusst, wie wir kommunizieren, Kontakte knüpfen, einkaufen, Medien konsumieren und unsere Mobilität gestalten (vgl. Tully, 2018). Ganze Branchen, insbesondere mit Bezug zu traditionellen Medien, wurden im vergangenen Jahrzehnt von diesen Veränderungen zutiefst in Frage gestellt (vgl. Rode et al., 2015).

Die technologische Verfügbarkeit von standortbasierter Echtzeit-Kommunikation bietet die Möglichkeit vollständig neuer Geschäftsfelder im Mobilitätsmarkt. Das Angebot neuer Dienstleistungen kann durch die Verfügbarkeit und Nutzung von Daten bedarfsgerecht in Zeit und Raum auf eine flexible Nachfrage abgestimmt werden (vgl. Tully, 2018). Weiterhin kann durch die Entwicklung und Bereitstellung fortschrittlicher Algorithmen (unter anderem auch durch maschinelles Lernen und künstliche Intelligenz) das Angebot (zum Beispiel durch flexible Routenauswahl im Ride Pooling (vgl. Kapitel 2.4.2.5)) fortlaufend optimiert werden (vgl. Shaheen, 2017).

#### *Gesellschaftliche Trends und Mobilitätsverhalten*

Bedingt durch disruptive technologische Trends kommt es auch zu gesellschaftlichen Anpassungen und Veränderungen, da diese grundsätzlich in Wechselwirkungen zueinander stehen. Neben einem generell gestiegenen Umweltbewusstsein der Gesellschaft (vgl. Mitran et al., 2019) ist es beispielsweise aufgrund der hohen Angebotsvielfalt unterschiedlicher Mobilitäts-Optionen und Dienstleistungen im urbanen Raum heute möglich, ohne ein eigenes Fahrzeug mobil zu sein (vgl. Busch-Geertsema et al., 2016). Insbesondere in jüngeren Personengruppen

verliert der Besitz eines eigenen Fahrzeugs als Statussymbol zunehmend an Bedeutung (vgl. Tully, 2011). Vielmehr sollte für jeden Anlass das passende Mobilitäts-Angebot bequem und multimodal verfügbar sein. Ein einfacher, unkomplizierter Zugang zu den Optionen steht bei einer dienstleistungsorientierten Gesellschaft klar im Vordergrund (vgl. Machado et al., 2018).

Eine weitere gesellschaftliche Veränderung der letzten Jahrzehnte ist der Trend zum Teilen. Angetrieben durch die digitalen Möglichkeiten, generiert die sogenannte Sharing-Economy einer Studie der Unternehmensberatung PwC zufolge im Jahr 2017 allein in Deutschland ein Marktvolumen von circa 23 Milliarden Euro (vgl. PwC, 2018; Basselier et al., 2018). Besonders stark vertreten sind die Märkte für das Finanz-, Unterkunft- und Transportwesen. Angebot und Nachfrage finden hierbei ausschließlich über Online-Plattformen, wie Kickstarter, Airbnb oder BlaBlaCar, zusammen. In diesem Zusammenhang erfreuen sich im Mobilitätsmarkt unterschiedliche, neue Angebotskonzepte einer hohen Nachfrage (vgl. Kapitel 2.4.3).

Weiterhin ist festzustellen, dass ein Großteil der Bevölkerung das Bedürfnis einer sofortigen Befriedigung der Nachfrage entwickelt hat (vgl. Panek, 2012). Dieser Trend, bei dem Waren und Dienstleistungen „on-demand“ abgerufen und konsumiert werden, wird überhaupt erst durch jederzeit verfügbare IKT ermöglicht. Auch hier setzen sich große Online-Marktplätze in vielen Fällen gegen den klassischen Einzelhandel durch. Bei Online-Anbietern nimmt die Lieferung bestellter Produkte teilweise nur einige Stunden in Anspruch. Bei dem Übertragen der Kundenbedürfnisse auf den Mobilitäts- und Transportmarkt ist ebenfalls eine steigende Bedeutung für die sofortige Verfügbarkeit (unterschiedlicher ODM-Services) erkennbar. Kennzeichnend hierfür sind als identifizierte Erfolgsfaktoren beispielsweise eine besonders kurze *Estimated-Time-of-Arrival*<sup>9</sup> (ETA) im Ride Hailing oder eine hohe Verfügbarkeit von Car Sharing Fahrzeugen innerhalb eines Geschäftsgebietes (vgl. Kapitel 3).

#### 2.4.2 Begriffsdefinition und Abgrenzung ODM

Wie im Kapitel 2.4.1 beschrieben, unterstützten die technologischen und gesellschaftlichen Veränderungen seit den vergangenen Jahren massiv die Etablierung neuer ODM-Services in urbanen Mobilitätssystemen. Die Angebote solcher ODM-Services werden durch eine Vielzahl unterschiedlicher Angebotsformen charakterisiert, welche in der entsprechenden Fachliteratur sowie bei den Anbietern selbst nicht eindeutig definiert und begrifflich zugeordnet werden. Aus diesem Grund ist es zwingend erforderlich, die in der Literatur und in der praktischen Anwendung genutzten Begriffe für diese Arbeit zu definieren und voneinander abzugrenzen. Die hier

---

<sup>9</sup> ETA bezeichnet die geplante Ankunftszeit eines Verkehrsmittels am Ziel unter den gegebenen Voraussetzungen.

---

vorliegende Abgrenzung erfolgt insbesondere auf Basis bestehender wissenschaftlicher Arbeiten (vgl. Shaheen et al., 2016a; 2017; Machado et al., 2018; Mogge, 2018; Mehlert & Schiefelbusch, 2017), Angaben der Service-Anbieter, Zeitungsartikel sowie der Aussagen und Einschätzungen verwaltender Institutionen. Bevor die unterschiedlichen ODM-Angebote für diese Arbeit definiert und charakterisiert werden, erfolgt zunächst eine Definition und Einordnung relevanter, übergeordneter Begriffe wie *On-Demand Mobilität*, *Shared Mobility* und *Mobility-as-a-Service*.

*On-Demand Mobilität* versteht sich als ein innovatives, bedarfsgesteuertes Mobilitätsangebot. Im Vordergrund steht dabei, durch die Nutzung von Echtzeit-Informationen (wie beispielsweise standortbezogener Daten) den Nutzern ein individuelles Mobilitätserlebnis zu ermöglichen. In der Regel erfolgen die, in einer App integrierten, Reservierung, Buchung und Zahlung einer Fahrt oder eines Fahrzeugs unmittelbar vor Reisebeginn über das Smartphone der Nutzer (vgl. Shaheen et al., 2017; Mogge, 2018). Dabei fördert ODM durch die Nutzung neuer Technologien, multimodale Konnektivität und führt durch die Schaffung von Alternativen zwischen dem Besitz eines Privatfahrzeugs und der Nutzung des ÖPNV zu einer Erweiterung der bestehenden Mobilitätsangebote. Weiterhin folgt laut Shaheen et al. (2017) die Vision von ODM drei übergeordneten Leitprinzipien:

- Kundenzentriertheit durch individuelle Mobilitätsangebote,
- datenbasiert und plattformunabhängig,
- multimodal und nicht auf ein Verkehrsmittel festgelegt .

*Shared Mobility* (SM) wird als eine innovative Transportstrategie verstanden, welche es den Nutzern ermöglicht, bei Bedarf kurzfristig auf unterschiedliche Mobilitäts-Angebote zuzugreifen (vgl. Shaheen et al., 2016b). SM wird dabei als Teil der Sharing Economy beschrieben, bei welcher der zeitlich begrenzte Nutzen einem Besitz gegenüber klar im Vordergrund steht. In diesem Zusammenhang wirkt SM im urbanen Kontext transformierend als Mobilitätsalternative zum MIV (vgl. Shaheen et al., 2016b). Für weitere Informationen siehe unter Machado et al. (2018) und Shaheen et al. (2016).

*Mobility-as-a-Service* (MaaS) wird als innovatives, multimodales Mobilitätskonzept verstanden, bei dem den Nutzern über eine in der Regel monatliche Abonnementgebühr ein maßgeschneidertes Mobilitätspaket angeboten wird. Dieses Mobilitätsangebot kombiniert öffentliche und private Mobilitätsangebote und stellt dabei stets den Nutzer mit seinen individuellen Bedürfnissen in den Mittelpunkt (vgl. Jittrapirom et al., 2017). MaaS vereint somit (ähnlich zu einem monatlichen Handy-Vertrag) unterschiedliche Mobilitäts-Services in einem übergreifenden Angebot und beinhaltet zusätzlich ergänzende Dienstleistungen, wie Reiseplanung, Reser-

vierung und Zahlung über eine einzige Schnittstelle (vgl. Holmberg et al., 2016). Einen vertiefenden Überblick über die Haupt-Charakteristiken und bestehende MaaS-Angebote bieten Jittrapirom et al. (2017) und Kamargianni et al. (2016).

Neben einer klaren Definition der übergeordneten Begriffe ist es erforderlich, die unterschiedlichen Angebotsformen von ODM für diese Arbeit eindeutig zu definieren und voneinander abzugrenzen, da zum aktuellen Zeitpunkt in der Literatur keine eindeutige, global zutreffende Einordnung und Definition vorhanden ist (vgl. Mogge, 2018; Chan & Shaheen, 2012; Shaheen et al., 2017; Mehlert & Schiefelbusch, 2017). Die nachfolgende Abbildung 11 bietet daher eine, dieser Arbeit zugrunde gelegte Segmentierung, über die Bandbreite bestehender ODM-Angebote:

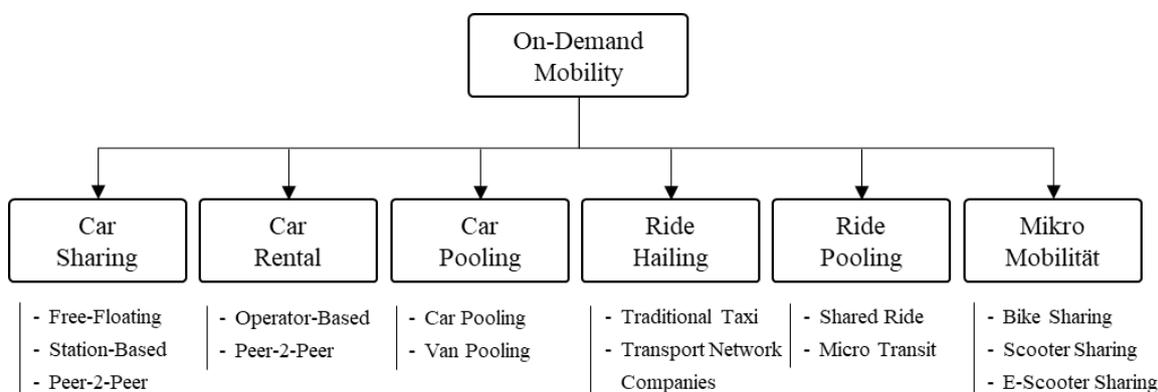


Abbildung 11: Segmentierung bestehender On-Demand Mobilitäts-Angebote (eigene Darstellung, basierend auf: Chan & Shaheen, 2012; Shaheen & Cohen, 2012; Mogge, 2018; Mehlert & Schiefelbusch, 2017)

Neben einer generellen Segmentierung lassen sich die in Abbildung 11 aufgeführten Angebotsformen auch auf Basis ihrer Angebotsmerkmale von einander differenzieren. Die nachfolgende Abbildung 12 unterscheidet die ODM-Angebotsformen durch die Anzahl der Fahrgäste pro Fahrzeug (y-Achse), die Kosten (x-Achse) und den Grad der Flexibilität (z-Achse) voneinander.

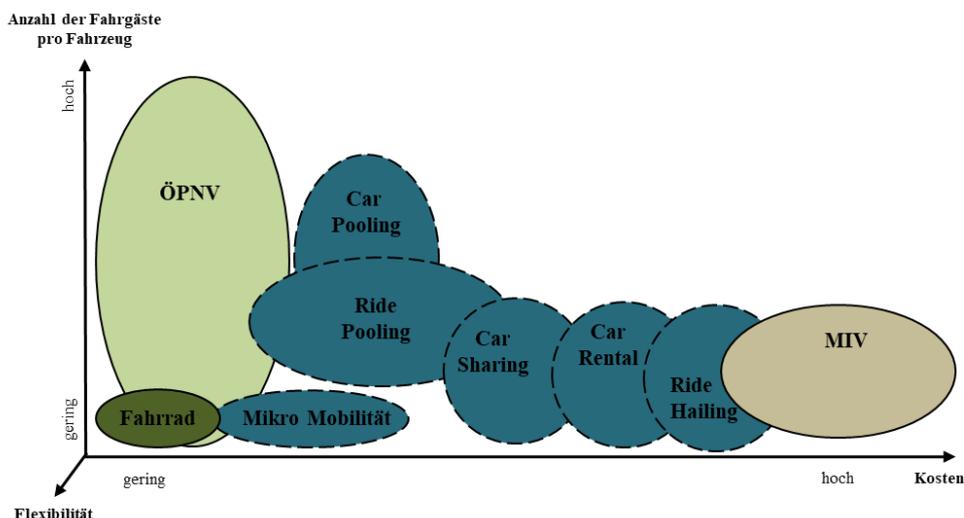


Abbildung 12: Differenzierung bestehender On-Demand Mobilitäts-Angebote (eigene Darstellung, in Anlehnung an Földes & Csiszár, 2016)

---

Nachfolgend werden die unterschiedlichen Angebotsformen von ODM auf Basis des Verständnisses der Literatur definiert und beschrieben, sowie bestehende Anbieter und zugrunde liegende Business-Modelle kurz erläutert.

#### 2.4.2.1 Car Sharing

Die ersten Ansätze des Car Sharings entstanden 1987/1988 in der Schweiz und in Deutschland. Damals startete das Konzept aus der Idee, Privatfahrzeuge durch Gemeinschaftsfahrzeuge zu ersetzen und somit als Einzelperson von den Vorteilen eines Fahrzeugs zu profitieren, ohne die vollen Kosten und die Verantwortung tragen zu müssen (vgl. Shaheen & Cohen, 2012). In Nord-Amerika gab es die ersten modernen Car Sharing Angebote Mitte der neunziger Jahre in Kanada und in den USA (vgl. Martin et al., 2010).

Shaheen et al. (2016a) zufolge ist Car Sharing ein Mobilitätsangebot, bei dem mehrere Personen dasselbe Fahrzeug nutzen. Der Bundesverband für Car Sharing (bcs) in Deutschland definiert Car Sharing als eine „organisierte, gemeinschaftliche Nutzung von Kraftfahrzeugen“, bei der die „Car Sharing Organisationen ihr Dienstleistungsprodukt als integrierten Baustein im Umweltverbund (Bahn, Bus, Fahrrad, zu Fuß Gehen) anbieten“ (vgl. bcs, 2007, S.1). Car Sharing hat demnach „eine sowohl den öffentlichen Verkehr ergänzende und stärkende als auch die Umwelt und das kommunale Verkehrssystem entlastende, individuell gestaltbare Mobilität zum Ergebnis“ (vgl. bcs, 2007, S. 1).

Über die vergangenen Jahre haben sich, durch neue technologische Möglichkeiten insbesondere im Bereich IKT, unterschiedliche Ausprägungsformen von Car Sharing etabliert, welche sich hauptsächlich durch das zugrunde gelegte Geschäftsmodell in zwei Kategorien unterteilen lassen. Auf der einen Seite gibt es Angebote, die durch einen kommerziellen Service-Operator betrieben werden, welcher eine Flotte an Fahrzeugen besitzt oder least und den Kunden zur Verfügung stellt (vgl. Free-Floating Car Sharing und Station-Based Car Sharing). Auf der anderen Seite existieren Peer-2-Peer basierte Services, bei denen im Privatbesitz befindliche Fahrzeuge in der Regel über eine Plattform (für einen definierten Zeitraum) zum Teilen mit anderen Nutzern zur Verfügung stehen. Die Mietdauer variiert dabei je nach Angebotsform stark zwischen wenigen Minuten bis hin zu mehreren Stunden oder Tagen. Die Abrechnung erfolgt auf Basis des Geschäftsmodells ebenfalls sehr unterschiedlich und kann zum Beispiel minuten-, kilometer-, stunden- oder tagesbasiert erfolgen. Weiterhin existieren Tarife, die sich aus einer festgelegten zeitlichen und einer flexiblen kilometerabhängigen Komponente zusammensetzen. Im Folgenden werden die drei bekanntesten Car Sharing Angebotsformen beschrieben. Für weitere, in der Literatur übliche, Unterteilungsformen siehe unter Rodenbach et al., 2018; Machado et al. (2018) und Miramontes (2018).

### *Free-Floating Car Sharing*

Diese durch einen Service-Operator betriebene Car Sharing Angebotsform ermöglicht es dem Nutzer, in einem eindeutig definierten Geschäftsgebiet Fahrzeuge zu nutzen und vollflexibel wieder abzustellen. Fahrzeug-Reservierung, -Buchung und -Nutzung erfolgen in der Regel über das Smartphone des Nutzers, welcher über IKT jederzeit auf Echtzeit-Informationen zu Standort und Verfügbarkeit der einzelnen Fahrzeuge aus der Flotte zugreifen kann (vgl. Machado et al., 2018). Free-Floating Car Sharing unterliegt in Deutschland seit der Einführung durch Car2go (heute ShareNow) im Jahr 2008 einem starken Wachstum (vgl. bcs, 2019a). Für weitere Informationen zum Free-Floating Car Sharing siehe unter bcs, 2019a.

### *Station-Based Car Sharing*

Beim Station-Based Car Sharing können die Fahrzeuge im Vergleich zum Free-Floating Car Sharing nur an hierfür vorgesehenen Stationen abgeholt und wieder abgegeben werden. In der Fachliteratur und der gängigen Praxis wird häufig in Station-Based Round-Trip oder Station-Based One-Way Car Sharing unterteilt (vgl. Machado et al. 2018; Ferrero et al., 2017). Beim Station-Based Round-Trip Car Sharing müssen Abhol- und Abgabestation identisch sein, wohingegen beim Station-Based One-Way Car Sharing das Fahrzeug auch an einer anderen, dafür vorgesehenen Station zurückgegeben werden kann. Aufgrund der Bündelung der Fahrzeuge an bestimmten Stationen eignet sich das Station-Based Car Sharing gut in Räumen mit einer geringeren Bevölkerungsdichte (vgl. Riegler et al., 2016). Für weitere Informationen zum Station-Based Car Sharing siehe unter bcs, 2019b.

### *Peer-2-Peer Car Sharing*

Generell werden beim Peer-2-Peer (P2P) Car Sharing zwei unterschiedliche Ausprägungsformen unterschieden. Zum einen gibt es die nicht-kommerzielle, gemeinschaftliche Nutzung von Privatfahrzeugen in einer Community (oder einem definierten Teilnehmerkreis), zum anderen kann das P2P Car Sharing auf einer Plattform basieren. Grundsätzlich handelt es sich bei den vermieteten Fahrzeugen in beiden Formen um Privatfahrzeuge, wodurch die Auslastung der bestehenden Fahrzeuge verbessert werden kann. Das P2P Car Sharing trifft den aktuellen Trend der Sharing Economy (vgl. PwC, 2018). Durch das Teilen eines Fahrzeugs kann der Fahrzeug-eigentümer seine laufenden Kosten in der Regel deutlich reduzieren und der Fahrzeugmieter profitiert von einem günstigen Angebot. Shaheen et al. zufolge waren im Jahr 2017 allein in Nord-Amerika über 2,9 Millionen Nutzer auf P2P Car Sharing Plattformen registriert (vgl. Shaheen et al., 2018). Für weitere Informationen zum P2P Car Sharing siehe unter Shaheen et al., 2018.

### *Mischformen und aktuelle Entwicklungen*

Ferrero et al. beschreibt auf Basis eines fundierten Reviews mit über 130 relevanten wissenschaftlichen Artikeln, dass eine Kategorisierung von Car Sharing Angeboten zum aktuellen

---

Zeitpunkt aufgrund der anhaltenden Dynamik in diesem Forschungsfeld nicht trennscharf durchführbar ist (vgl. Ferrero et al., 2017). Vielmehr entstehen immer mehr unterschiedliche Mischformen, wie beispielsweise das Zonen-basierte Car Sharing, welches als eine Kombination aus Free-Floating und Station-Based Car Sharing angesehen werden kann. Darüber hinaus integrieren sich zunehmend auch kommerzielle Anbieter auf P2P Car Sharing Plattformen, was eine eindeutige Abgrenzung erschwert. Weiterhin kombinieren Anbieter teilweise unterschiedliche Angebotsformen aus dem Bereich Car Sharing, Car Rental und Ride Hailing in einer App und verschieben somit die Grenze zwischen den jeweiligen Angebotsformen (vgl. Sürig, 2019).

#### 2.4.2.2 Car Rental

Die ersten Erscheinungsformen von Car Rental gehen in die Anfänge des 20. Jahrhunderts zurück. Die deutsche Vermietungsfirma Sixt wurde bereits im Jahr 1912 unter dem Namen *Sixt Autofahrten und Selbstfahrer* gegründet.

Heute zählt zu der Angebotsform Car Rental das Angebot aller klassischen Autovermietungen, bei denen ein Fahrzeug über einen definierten Zeitraum angemietet werden kann. Die Mietdauer kann dabei sehr unterschiedlich sein und zwischen wenigen Stunden bis hin zu mehreren Wochen andauern. In der Regel ist es auch möglich, das gemietete Fahrzeug an einem anderen Ort zurückzugeben. In der Literatur wird das bestehende Car Rental Angebot in fünf verschiedene Segmente unterteilt: kurzfristige Vermietung, langfristige Vermietung, Ersatzfahrzeug-Dienstleistungen, Nutzfahrzeug-Vermietung und Business-to-Business Dienstleistungen (vgl. Eronen, 2015).

Neue Plattformen ermöglichen im Zuge der Sharing Economy auch die Vermietung von Privatfahrzeugen zu gleichartigen Konditionen und Sicherheiten einer klassischen, kommerziellen Autovermietung. Das P2P Car Rental Angebot lässt sich häufig nicht eindeutig vom P2P Car Sharing Angebot unterscheiden. Beide Angebotsformen gehen in Abhängigkeit von der Buchungsdauer nahtlos ineinander über.

#### 2.4.2.3 Car Pooling

Car Pooling wird in der Fachliteratur als eine „nicht-kommerzielle Mitnahme weiterer Personen auf einer Fahrt, die ohnehin stattfinden würde“, beschrieben (Mehlert & Schiefelbusch, 2017, S. 6). Der Fahrzeughalter bestimmt dabei im Vorfeld das Fahrtziel und den entsprechenden Fahrtverlauf. Die Fahrt findet unabhängig davon statt, ob Mitfahrer dabei sind (vgl. Randelhoff, 2014). Da es sich beim Car Pooling ausschließlich um nicht-kommerzielle Fahrten handelt, zahlen die Mitfahrer in der Regel nur einen Anteil der für die Fahrt angefallenen Kosten (zum Beispiel in Form einer Benzinkostenbeteiligung).

Die Ursprünge des Car Poolings gehen ebenso weit, in das 20. Jahrhundert, zurück. In Zeiten des Zweiten Weltkriegs sowie der Ölkrise kam es bereits vielfach zum nicht-kommerziellen Teilen von Fahrten (vgl. Pisarski, 2006). Beim heutigen Car Pooling muss in zwei Angebotsformen unterschieden werden. Zum einen gibt es die informelle Anwendung von Car Pooling zwischen unterschiedlichen Personen, die sich (gegebenenfalls auch regelmäßig) verabreden, um eine Fahrt oder einen Fahrtabschnitt gemeinsam durchzuführen. Zum anderen existiert das organisierte Car Pooling, bei dem Angebot und Nachfrage von Fahrten über eine Plattform zusammenfinden. Diese Angebotsform verzeichnet insbesondere in den vergangenen Jahren aufgrund der starken Verbreitung unterschiedlicher Mitfahrzentralen (wie flinc oder BlaBlaCar) einen erheblichen Zuwachs (vgl. Bresciani et al., 2018). Die Online-Portale bieten für die Nutzer einen einfachen Zugang sowie eine große Transparenz des Angebots und erhöhen somit signifikant die Attraktivität eines Car Pooling Angebots. Während das informelle Car Pooling in Europa und Nord-Amerika überwiegend für das Pendeln zum Arbeitsplatz oder zur Ausbildungsstätte genutzt wird, findet organisiertes Car Pooling über eine Plattform größtenteils auf längeren Strecken statt. Im urbanen Raum existieren zwar erste Ansätze für Car Pooling auf kurzen Strecken (vgl. BlaBlaLines, Ridebee), diese konnten sich aber noch nicht erkennen gegen das hohe Mobilitätsangebot in einer Stadt durchsetzen (vgl. Setzwein, 2019).

Häufig wird in der Literatur auch der Begriff *Ride Sharing* als Synonym für Car Pooling verwendet (vgl. Mehlert & Schiefelbusch, 2017; Koesling, 2018). Da unterschiedliche Anbieter von kommerziellen Mobilitätsangeboten allerdings auch den Begriff *Ride Sharing* anwenden und es in der Vergangenheit diesbezüglich zu zahlreichen Verwechslungen der ODM-Angebote gekommen ist, wird an dieser Stelle nicht weiter auf den Begriff *Ride Sharing* eingegangen, sondern in die eindeutigen Begriffe Car Pooling, Ride Hailing und Ride Pooling unterschieden.

#### 2.4.2.4 Ride Hailing

Als Ride Hailing werden Fahrten bezeichnet, welche der kommerziellen Personenbeförderung dienen. Der Fahrer richtet sich ausschließlich nach dem Fahrtwunsch des Fahrgastes, ohne den die Fahrt nicht zustande kommen würde (vgl. Mehlert & Schiefelbusch, 2017). Bei einer Ride Hailing Fahrt handelt es sich demnach um eine ununterbrochene, personalisierte, hochflexible Mobilitätsdienstleistung von Tür-zu-Tür (vgl. Atasoy et al., 2015a; Földes & Csiszár, 2016; Miller & How, 2017).

Zu dieser Begriffsabgrenzung zufolge zählen neben klassischen, bedarfsgesteuerten Taxiangeboten auch die Angebote sogenannter Transportation-Network-Companies<sup>10</sup> (TNC), wie bei-

---

<sup>10</sup> Das Geschäftsangebot von TNC's besteht in der Vermittlung von Fahrten mit einem privaten Fahrzeug mithilfe digitaler Technologien.

---

spielsweise Uber, Lyft oder Didi Chuxing, welche in der Praxis häufig auch unter der Angebotsform Ride Sharing vermarktet werden (vgl. Mehlert & Schiefelbusch, 2017). Weiterhin können Fahrten im Ride Hailing von lizenzierten, professionellen Fahrern und in Abhängigkeit von den gesetzten Rahmenbedingungen auch von Privatpersonen mit ihren eigenen Fahrzeugen durchgeführt werden (vgl. Deighton-Smith, 2018).

Für diese Angebotsform finden häufig auch Begriffe, wie Ride Selling, Ride Booking, Ride Sourcing oder E-Hailing, Anwendung (vgl. Mogge, 2018). Je nach Definition inkludieren diese das traditionelle Taxigeschäft oder schließen es aus. Da sich das Taxigeschäft in den vergangenen Jahren auf Basis der gestiegenen Verfügbarkeit von IKT bedeutungsvoll weiterentwickelt hat, insbesondere bezüglich der Zugänglichkeit, Buchung und Zahlung, sollte es im europäischen Kontext zur Ride Hailing Angebotsform gezählt werden (vgl. Mehlert & Schiefelbusch, 2017).

Als Hauptgründe für die Beliebtheit des Angebotes bei den Nutzern und das starke Wachstum des Ride Hailing Marktes werden der generelle Komfort eines Tür-zu-Tür-Services sowie die einfache Buchung, automatische Zielinformation, Online-Zahlung und Kosteneffizienz angegeben (vgl. Gupta et al., 2018). Ein signifikantes Wachstum des Ride Hailing Marktes ist insbesondere seit der Verfügbarkeit von Smartphones und gesteigener IKT zu verzeichnen (vgl. Calvert & Chatterjee, 2016). Seit der Gründung von Uber (2009) und Lyft (2012) und der raschen Expansion dieser Angebote ist der weltweite Markt bis zum Jahr 2016 einer Studie zufolge auf über 36 Milliarden US-Dollar angestiegen (vgl. Burgstaller et al., 2017).

#### 2.4.2.5 Ride Pooling

Beim Ride Pooling handelt es sich (wie auch beim Ride Hailing) um eine Form der kommerziellen Personenbeförderung, bei der nicht zusammengehörige Personen in einer Fahrt gebündelt befördert werden können (vgl. Chen et al., 2017; Di et al., 2018). In der Regel kombiniert dabei ein intelligenter Algorithmus Fahrthanfragen mit ähnlichen Routenverläufen in Echtzeit zu einer gemeinsamen Fahrt (vgl. Fagnant & Kockelman, 2016).

Mit dem Shared-Ride und dem Microtransit existieren im Ride Pooling zwei unterschiedliche Ausprägungsformen. Beim Shared-Ride erweitern Ride Hailing Anbieter ihr Angebot um die Option, eine Fahrt mit weiteren Fahrgästen zu teilen. Microtransit-Angebote sind hingegen gezielt auf die Bündelung unterschiedlicher Fahrthanfragen ausgerichtet und stammen nicht von klassischen Ride Hailing Angeboten ab. Während einige Anbieter für den Fahrgast eine Tür-zu-Tür Verbindung anbieten (vgl. Uber Pool, Grab Share, Clever Shuttle), beschränken sich andere Anbieter auf die Verbindung (virtueller) Haltestellen in einem definierten Geschäftsgebiet (vgl. IsarTiger, MOIA). Aufgrund der vielschichtigen Angebotslage gehen die Begrifflichkeiten in der Literatur und in der Praxis auseinander. So kommt es für Ride Pooling auch zur

Anwendung der Begriffe Ride Splitting, Demand Responsive Transit, Smart Shuttle oder Ride Sharing (vgl. Machado et al., 2018; Mogge, 2018).

Die Idee, mehrere Fahrthanfragen in einer Fahrt zu bündeln, besteht in Deutschland schon seit Einführung des Sammeltaxis in den achtziger Jahren (vgl. Mehler & Schiefelbusch, 2017). Durch den Aufwind technischer Möglichkeiten (IKT, Smartphones, Rechenleistung) und die aktive Suche der Städte nach innovativen Mobilitätsangeboten strömen heute zahlreiche Ride Pooling Anbieter auf den Markt (vgl. Kapitel 2.5.4). TNC's (vgl. Uber Pool, Grab Share), traditionelle Taxiunternehmen (vgl. FreeNow) und Anbieter des ÖPNV (vgl. BVG, MVG) haben in diesem Zusammenhang ihr Angebot um Ride Pooling erweitert, um damit ein attraktives Mobilitätsangebot zu schaffen und die verkehrliche und wirtschaftliche Effizienz zu erhöhen.

Unabhängig von der konkreten Ausführungsform hängt das Potential, Fahrten zu bündeln und die bestehende Infrastruktur effizienter auszulasten, von einer Reihe unterschiedlicher Faktoren ab. In der Fachliteratur wird hierbei auch von „Shareability“ gesprochen. Unter Shareability versteht sich die „Matching“-Wahrscheinlichkeit, eine oder mehrere zeitlich und räumlich verteilte Fahrthanfragen in einer gemeinsamen Fahrt zu kombinieren (vgl. Santi et al., 2014; Tachet et al., 2017; Biladi et al., 2019a). Besonders signifikante Faktoren mit hoher Auswirkung auf die Shareability sind die, durch die Nutzer akzeptierte, Umweg- und Wartezeit, die durchschnittliche Geschwindigkeit in der Stadt (oder der Region) und die zeitliche und räumliche Nachfragedichte an Fahrten (vgl. Santi et al., 2014; Biladi et al., 2019b). Die Auswirkungen und Effekte von Ride Pooling Services auf eine Stadt konnten zum heutigen Stand allerdings noch nicht vollständig erforscht werden (vgl. Shaheen et al., 2016b; Jin et al., 2018).

#### 2.4.2.6 Mikro Mobilität

Mikro Mobilität wird im Kontext von ODM als ein Mobilitätsangebot für Kurzstrecken im urbanen Raum mit kleinen, motorisierten oder nicht motorisierten Fahrzeugen, die flexibel, kurzfristig und mit sehr geringem organisatorischem Aufwand genutzt werden können, definiert (vgl. NACTO, 2019).

Demnach stellt Mikro Mobilität insbesondere für kurze Strecken eine attraktive Alternative zu den bestehenden Mobilitätsangeboten dar. Der Definition zufolge umschließt Mikro Mobilität unterschiedliche Angebotsformen, wie Free-Floating oder Station-Based Bike Sharing (vgl. Nikitas, 2019; Duran-Rodas et al., 2019), Scooter Sharing und E-Scooter Sharing (vgl. Hollingsworth et al., 2019). Diese werden für ein besseres Verständnis in der Abbildung 13 zusammengefasst.

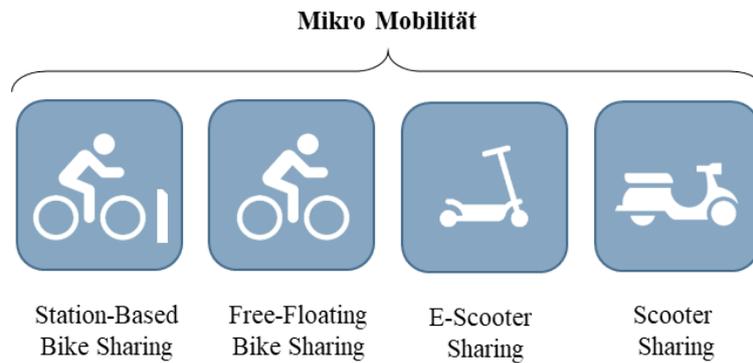


Abbildung 13: Ausprägungsformen Mikro Mobilität (eigene Darstellung)

Während in der Praxis unter dem Begriff Mikro Mobilität häufig auch Fahrzeug(-konzepte), ohne die Anwendung in einer geteilten On-Demand Flotte verstanden werden, liegt der Fokus im Kontext dieser Arbeit auf Mikro Mobilität im Kontext eines ODM-Angebots.

### 2.4.3 Aktuelle Bedeutung ODM im urbanen Mobilitätskontext

ODM wird in der Öffentlichkeit als ein integratives Mobilitätsangebot verstanden, welches multimodales Mobilitätsverhalten stärkt und im urbanen Raum eine Alternative zur motorisierten, individuellen Mobilität mit dem eigenen Fahrzeug darstellt. Auch, wenn die unterschiedlichen Angebotsformen von ODM im heutigen urbanen Mobilitätssystem nicht mehr wegzudenken sind, so überstieg die Erwartungshaltung und die öffentliche Wahrnehmung in der Vergangenheit häufig die realisierte Tragweite und Auswirkung unterschiedlicher Angebotsformen. Mehlert & Schiefelbusch (2017) beschreiben die öffentliche Wahrnehmung und Aufmerksamkeit von ODM Angeboten, wie in Abbildung 14 dargestellt, anhand der fünf Phasen einer Hypecurve.

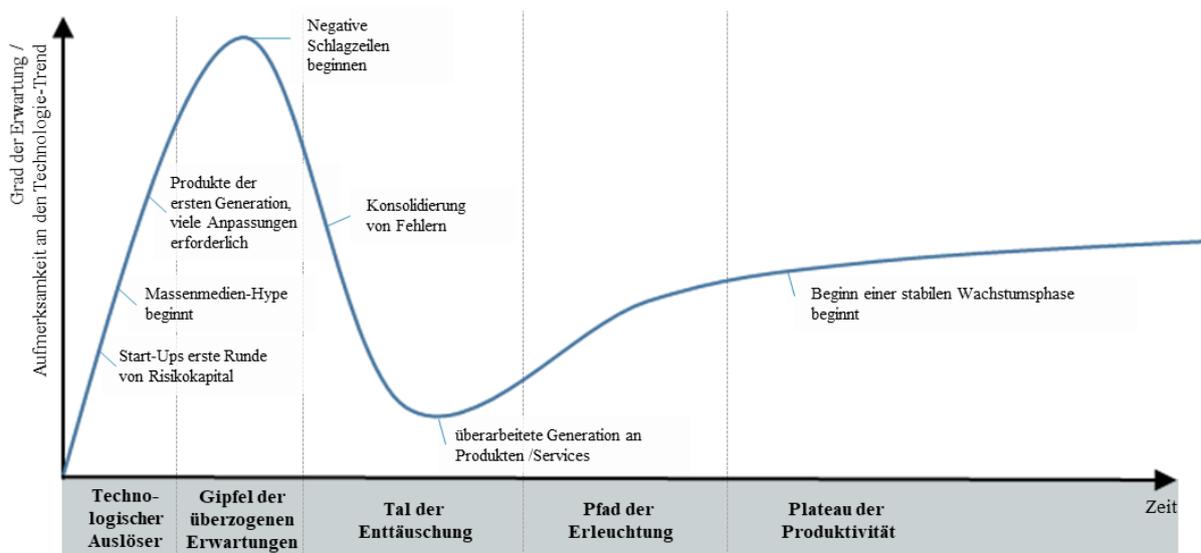


Abbildung 14: Hypecurve bei der Einführung neuer technologischer Produkte / Services (eigene Darstellung, in Anlehnung an Linden & Fenn, 2003; Mehlert & Schiefelbusch, 2017)

„Der einfache Hype-Zyklus wird nach dieser Definition in fünf umgangssprachliche Abschnitte unterteilt: Technologischer Auslöser, Gipfel der überzogenen Erwartungen, Tal der Enttäuschungen, Pfad der Erleuchtung und Plateau der Produktivität“ (Mehlert & Schiefelbusch, 2017, S. 11). Dem abgebildeten Hype-Modell zufolge steigt die öffentliche Aufmerksamkeit bei der Einführung eines neuen Produkts oder neuer Services zunächst überproportional an, um nach Erreichen des Maximums wieder stark abzufallen und zu einem späteren Zeitpunkt ein höheres Niveau der Beharrung zu erreichen (vgl. Linden & Fenn, 2003).

Die hohe Erwartungshaltung in der Bevölkerung wurde in Deutschland in der Vergangenheit insbesondere durch die Berichterstattung in den öffentlichen Medien hervorgerufen. Innovative ODM-Services wurden hier häufig in Verbindung mit weiteren Technologien, wie dem autonomen Fahren, oder der Konnektivität, als disruptiver Treiber des urbanen Mobilitätssystems dargestellt. Zusätzlich steigerte der Eintritt zahlreicher Mobilitäts-Start-Ups in den Markt die Erwartungen an „disruptive“ Veränderungen, die sich in klaren Verbesserungen des Mobilitätssystems widerspiegeln sollten.

Auch, wenn ODM-Angebote das urbane Stadtbild bereits signifikant prägen, spielen die heute realisierten Transportleistungen und Beförderungsmengen im Vergleich zu ÖPNV oder MIV noch eine untergeordnete Rolle (vgl. Kapitel 2.4.4.2). Dem bcs zufolge waren Anfang 2019 deutschlandweit circa 20.200 Car Sharing Fahrzeuge durch Service Operator im Betrieb (vgl. bcs, 2019b). Im Verhältnis zum Gesamtbestand von über 47,1 Millionen Pkw in Deutschland, entspricht dies nur einem Anteil von circa 0,04 %, welcher im urbanen Kontext entsprechend der Zulassungszahlen etwas höher ausfällt (vgl. KBA, 2019).

Auf Basis dieser Daten ist zu erkennen, dass die Tragweite und Aufmerksamkeit neuer ODM-Angebote die aktuelle Wirkung im urbanen Mobilitätssystem teilweise deutlich übersteigt. Einer stärkeren Marktdurchdringung der unterschiedlichen ODM-Angebotsformen steht häufig eine einschränkende Regulatorik gegenüber. So muss vor der Einführung in Deutschland in der Regel erst der regulatorische Rechtsrahmen geklärt werden (vgl. z.B. Elektrokleinstfahrzeuge-Verordnung (eKFV)).

Für in München zugelassene Free-Floating Car Sharing Fahrzeuge muss beispielsweise eine Gebühr in Höhe von 1.800 Euro an die Stadt entrichtet werden (Station-Based Car Sharing Fahrzeuge 240 Euro), was den möglichen finanziellen Erfolg des Angebots maßgebend schmälert (vgl. LHM, 2015b). Weiterhin werden zum aktuellen Zeitpunkt in Deutschland nur Ride Pooling Angebote in Form von kleinen Pilot-Versuchen zugelassen, bei denen häufig die benötigte, kritische Angebotsmenge für einen sinnvollen Betrieb nicht erreicht werden kann (vgl. Slavik, 2019). Der Ride Hailing Markt ist in Deutschland ebenfalls durch das Personenbeförderungsgesetz (noch) stark reglementiert (vgl. Karl et al., 2017).

---

Weiterhin gibt es nach heutigem Stand unterschiedliche limitierende Faktoren, die eine flächendeckende Durchdringung aus wirtschaftlicher Sicht begrenzen. So können beispielsweise Free-Floating Car Sharing Systeme einer Studie zufolge erst ab einer Bevölkerungsdichte von mindestens 3.000 Einwohnern je Quadratkilometer ökonomisch sinnvoll betrieben werden (vgl. ATKearney, 2019). Gleichmaßen benötigen Ride Pooling Angebote unterstützende Rahmenbedingungen, um erfolgreich Fahrten bündeln zu können. Hierunter zählen zum einen eine kritische Angebots- und Nachfragemenge und zum anderen die Akzeptanz der Nutzer, einen Umweg oder eine längere Wartezeit in Kauf zu nehmen (vgl. Santi et al., 2014).

Aus aktuellen Nutzerbefragungen der unterschiedlichen ODM-Angebotsformen geht hervor, dass insbesondere jüngere Personengruppen mit hoher digitaler Affinität dazu tendieren, ODM Angebote zu nutzen und ihr Mobilitätsverhalten entsprechend anzupassen (vgl. Trommer et al., 2016). Verfügbarkeit, Kosten, Zuverlässigkeit und Reisezeit zählen bei der Verkehrsmittelwahl in Deutschland zu den besonders ausschlaggebenden Einflussfaktoren. Auch Flexibilität, Bequemlichkeit, Privatsphäre, Umweltverträglichkeit und Sicherheit spielen zunehmend eine wichtigere Rolle (vgl. Bartz, 2015). ODM-Angebote zielen insbesondere auf die aufstrebenden Faktoren ab, indem sie den Nutzern – je nach Angebotsform – hohe Flexibilität, Bequemlichkeit und Privatsphäre bieten. Vor dem Hintergrund einer steigenden Affinität der Bevölkerung zu digitalen Services und innovativen Konzepten ist weiterhin davon auszugehen, dass die Bedeutung und Nutzung von ODM-Angeboten weiter ansteigen wird (vgl. Kapitel 2.4.5).

#### 2.4.4 Marktanalyse ODM in München

Da für den ökonomisch erfolgreichen Betrieb von ODM-Services in der Regel eine kritische Nachfragemenge an Nutzern vorhanden sein muss, ist in dieser noch jungen, dynamischen Phase der Markt unter den Anbietern stark umkämpft (vgl. Kapalschinski, 2019). Etablierte Anbieter versuchen stetig zu wachsen, indem sie ihr Angebot in weiteren Städten expandieren. Zusätzlich stoßen regelmäßig neue Anbieter in den Markt, um ihr Mobilitätsangebot zu unterbreiten (vgl. Bogenberger et al., 2016). In München herrscht ebenfalls ein hoher Wettbewerb zwischen den unterschiedlichen Anbietern. Da die Einstiegs-Hürden im Vergleich zu anderen Märkten nicht sonderlich hoch sind, ziehen sich manche Anbieter ohne den erhofften Erfolg bereits kurze Zeit nach ihrem Start wieder aus dem Markt zurück (vgl. ZebraMobil, CiteeCar, scoo.me, oBike, BeeZero).

Im Folgenden soll ein Überblick über alle bestehenden Anbieter der unterschiedlichen ODM Angebotsformen im Untersuchungsgebiet München dargelegt werden. Weiterhin sollen auf Basis der durchgeführten Analyse die Anzahl der Wege sowie der Verkehrsleistung der einzelnen Services abgeschätzt (vgl. Kapitel 2.4.3.2) und darauf aufbauend die aktuelle Bedeutung von ODM für das Mobilitätssystem in München bestimmt werden (vgl. Kapitel 2.4.3.3).

#### 2.4.4.1 Übersicht ODM-Anbieter in München

Die in dieser Arbeit durchgeführte Marktanalyse entstand auf Basis der Analyse und Auswertung relevanter Informationen aus öffentlichen Berichten, Studien und Pressemitteilungen sowie teilweise aus dem persönlichen Kontakt zu einzelnen Anbietern. Weiterhin wurden Informationen über die Internet-Seiten der Anbieter sowie aus Zeitungsartikeln ausgewertet. Aufgrund des intensiven Wettbewerbs unter den bestehenden ODM-Anbietern, der traditionell bestehenden Verkehrsmittel (z.B. MIV, ÖPNV) und der hohen Dynamik im Mobilitätsmarkt ist es grundsätzlich schwierig, bei der Analyse aktuelle, belastbare Nutzerzahlen einzelner Anbieter zu ermitteln.

Die Analyse stellt dabei nicht den Anspruch an eine absolute Vollständigkeit aller verfügbaren Anbieter. Vielmehr sollen alle relevanten Anbieter erfasst und abgebildet werden, um einen aktuellen Überblick über den Markt darzustellen (vgl. Abbildung 15). Hieraus geht eindeutig hervor, dass seit dem Jahr 2010 die Anzahl an ODM-Anbietern deutlich zugenommen hat. Im Bereich Car Sharing und Mikro Mobilität ist die Anbieterdichte zum Zeitpunkt der Analyse, im Oktober 2019, am höchsten.

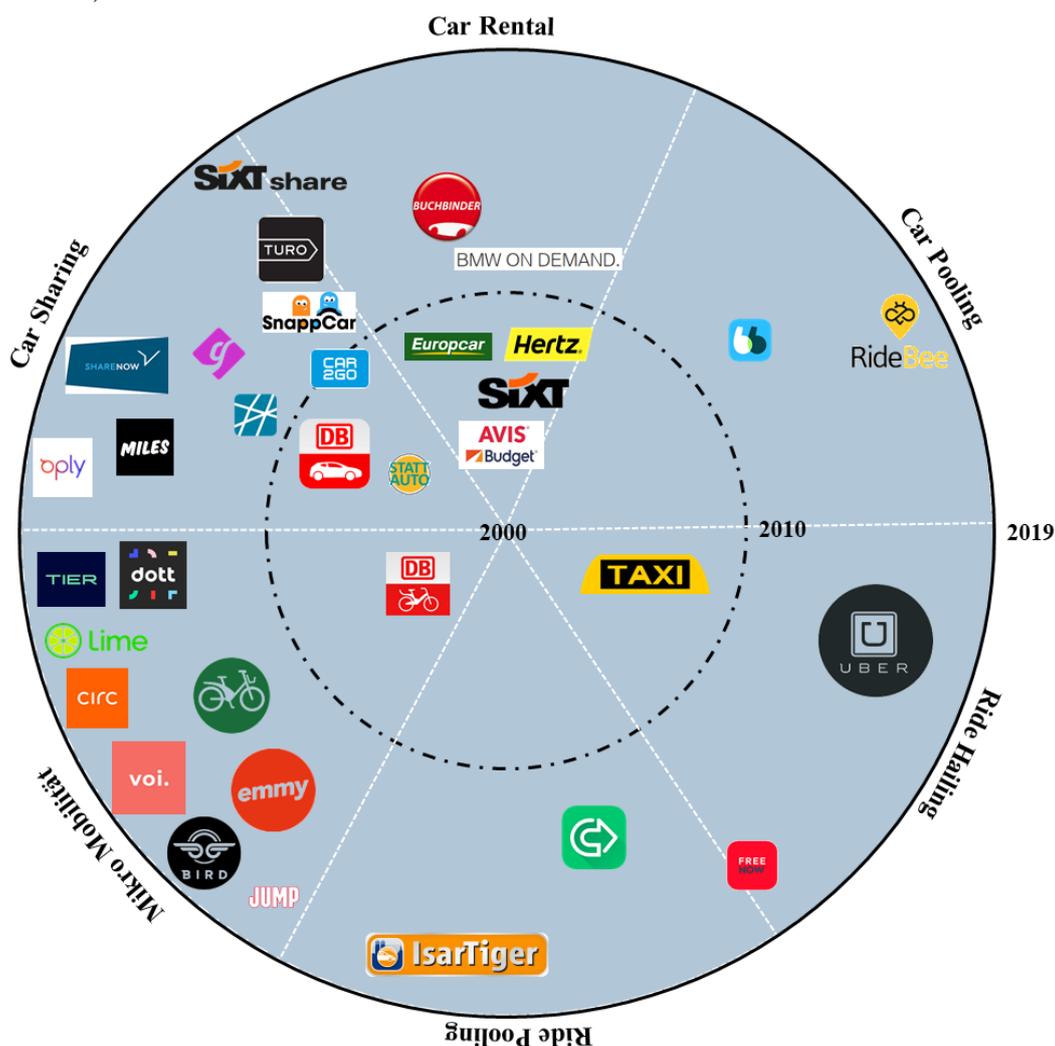


Abbildung 15: Überblick ODM-Marktanalyse München 2019 (eigene Darstellung)

Im Folgenden werden die Märkte der unterschiedlichen ODM Angebotsformen in München vorgestellt. Dabei werden verfügbare Informationen der einzelnen Anbieter zum dem Marktstart in München, dem vorliegenden Business Modell, der Flottengröße, dem Geschäftsgebiet und der Anzahl der registrierten Kunden aufgeführt.

### *Car Sharing*

Wie in Tabelle 11 abgebildet, haben sich in München elf Car Sharing Anbieter etabliert, wobei sich die Anbieter Car2go und DriveNow aktuell in der Zusammenführungs-Phase zu einem gemeinsamen Anbieter *SHARENOW* befinden (vgl. Schubert, 2019b). Weiterhin geht aus der Tabelle 11 hervor, dass die Anzahl der Anbieter seit dem Jahr 2018 signifikant angestiegen ist. Car Sharing Anbieter, welche sich wieder aus dem Markt zurückgezogen haben, werden in der Tabelle nicht mit aufgeführt.

Tabelle 11: Überblick Car Sharing Anbieter München (eigene Darstellung)

<b>Car Sharing</b>	<b>Start</b> (in München)	<b>Business Modell</b>	<b>Flottengröße</b> (Verbrenner/Elektro)	<b>Geschäftsgebiet</b> (Abstellgebiet)	<b>Registrierte Kunden</b> <sup>11</sup>
STATAUTO	1992	Station-Based	450 (435/15)	310 km <sup>2</sup>	>16.000
DB Flinkster	2009	Station-Based	ca. 135	310 (46,8) km <sup>2</sup>	>6.500
DriveNow	2011	Free-Floating	750 (665/85)	88 km <sup>2</sup>	>200.000
Car2go	2013	Free-Floating	550 (550/0)	89 km <sup>2</sup>	≈ 100.000
Snappcar <sup>12</sup>	2014	Peer-2-Peer	ca. 373	310 km <sup>2</sup>	>5.000
Getaround <sup>13</sup>	2014	Peer-2-Peer	ca. 300	310 km <sup>2</sup>	>4.000
Oply	2018	Zonenbasiert	200 (200/0)	310 (30) km <sup>2</sup>	>10.000
Turo	2018	Peer-2-Peer	ca. 380	310 km <sup>2</sup>	>1.000
SHARENOW <sup>14</sup>	2019	Free-Floating	1.300 (1.215/85)	89 km <sup>2</sup>	≈ 300.000
Miles	2019	Free-Floating	180	90 km <sup>2</sup>	≈ 8.700
SIXT share	2019	Free-Floating	700	80 km <sup>2</sup>	≈ 65.000

Darüber lässt sich ableiten, dass zum Zeitpunkt der Analyse mehr als 413.000 Kunden bei unterschiedlichen Car Sharing Anbietern in München registriert waren, wobei sich der Großteil den Free-Floating Anbietern zuordnen lässt. Die kumulierte Flottengröße aller Anbieter beträgt 4.018 Fahrzeuge, wobei hieraus etwa 1.053 (Privat-)Fahrzeuge für Peer-2-Peer und 2.965 Fahrzeuge durch einen Service Operator zum Free-Floating und Station-Based Car Sharing zur Verfügung stehen.

<sup>11</sup> Bezieht sich auf die registrierten Kunden in München. Hohe Dynamik im Markt, Mehrfachregistrierungen einer Person bei unterschiedlichen Anbietern möglich.

<sup>12</sup> ehem. Tamyca

<sup>13</sup> ehem. Drivy

<sup>14</sup> Zusammenführung von DriveNow und Car2go

*Ride Hailing / Ride Pooling*

Die absolute Anzahl der Ride Hailing und Ride Pooling Anbieter ist in München insbesondere aufgrund des in Deutschland bestehenden Personenbeförderungsgesetzes (November 2019) relativ überschaubar (vgl. PBefG, 1990). Neben über 3.300 zugelassenen, traditionellen Taxis treten mit *Uber X* und *Uber Black*, sowie *FREENOW* allerdings seit dem Jahr 2015 auch weitere Ride Hailing Anbieter in Konkurrenz zum traditionellen Taxi in den Markt. Der Anbieter *FREENOW* ermöglicht es neben der Vermittlung eigener Fahrten auch traditionelle Taxis über die Mobilitäts-App bestellen zu können.

Tabelle 12: Überblick Ride Hailing / Pooling Anbieter München (eigene Darstellung)

<b>Ride Hailing / Ride Pooling</b>	<b>Start</b> (in München)	<b>Business Modell</b>	<b>Flottengröße</b> (Verbrenner/Elektro)	<b>Geschäftsgebiet</b> (Abstellgebiet)	<b>Registrierte Kunden</b>
Traditionelles Taxi	1946	Ride Hailing	>3.300	310 km <sup>2</sup>	-
Uber (X & Black)	2015	Ride Hailing	132	310 km <sup>2</sup>	-
CleverShuttle	2016	Ride Pooling	57 (14/43) <sup>15</sup>	193 km <sup>2</sup>	>63.000
MVG IsarTiger	2018	Ride Pooling	16 (1/15)	150 km <sup>2</sup>	>3.500
FREENOW <sup>16</sup>	2019	Ride Hailing	300 <sup>17</sup>	310 km <sup>2</sup>	-

Die Angebotsformen Ride Hailing und Ride Pooling werden in der Tabelle 12 zusammen aufgeführt, da sie durch die Anbieter nicht immer trennscharf voneinander differenziert werden können. So ist es über eine „Shared-Ride“-Funktion in der *FREENOW* Mobilitäts-App beispielsweise auch möglich, eine gebuchte Fahrt mit anderen Personen zu teilen (vgl. Kapitel 2.4.2.4). In diesem Fall wird eine Ride Hailing Fahrt der Definition zufolge automatisch zu einer Ride Pooling Fahrt (vgl. Knoll & Meyer, 2018).

*Car Pooling*

Neben *BlaBlaCar* existiert in München seit 2019 mit *RideBee* ein weiterer Car Pooling Anbieter, der über eine Plattform insbesondere Fahrten im urbanen Umfeld bedienen möchte. *RideBee* richtet sein Angebot dabei gezielt auf Personen, die täglich mit dem eigenen Fahrzeug zur Arbeit oder Ausbildungsstätte unterwegs sind, versucht entsprechend Angebot und Nachfrage zu bündeln und somit den Besetzungsgrad in Fahrzeugen zu erhöhen. Da *RideBee* erst im Oktober 2019 offiziell in den Markt eingetreten ist, lagen zum Zeitpunkt der Analyse noch keine belastbaren Nutzerzahlen des Angebots vor (vgl. Setzwein, 2019).

Die Mitfahr-Plattform BlaBlaCar vermittelt in Deutschland hauptsächlich Fahrten zwischen unterschiedlichen Städten (vgl. Europäische Kommission, 2017). Demnach zählt dieses Angebot, der Definition nach, nicht zu einem urbanen Mobilitätsangebot und wird in der weiteren

<sup>15</sup> Clevershuttle Fahrzeuge teilweise auch mit Wasserstoff

<sup>16</sup> ehem. mytaxi

<sup>17</sup> FREE NOW per Definition Ride Hailing Anbieter, in Match Funktion jedoch auch Ride Pooling möglich

Betrachtung zum Modal Split / zur Transportleistung (vgl. Kapitel 2.4.3.2) nicht weiter berücksichtigt.

### *Car Rental*

Neben den klassischen Autovermietungen, bei denen Fahrzeuge in der Regel stunden-, tage- oder wochenweise angemietet werden können, gibt es in München auch Anbieter, die sich speziell auf eine stundenweise Vermietung spezialisiert haben. *BMW On-Demand* vermietet beispielsweise seit dem Jahr 2010 Fahrzeuge auf Stundenbasis. Weiterhin entwickeln klassische Autovermietungen ihr Geschäftsmodell weiter, um einer flexibleren Nutzung durch den Kunden gerecht zu werden. *SIXT* kombiniert in diesem Zusammenhang zum Beispiel in einer Mobilitäts-App die Möglichkeit, ein Fahrzeug anzumieten oder es als Free-Floating Car Sharing zu nutzen (vgl. Sürig, 2019).

Da die angemieteten Fahrzeuge überwiegend außerhalb von Städten genutzt werden (vgl. Car Pooling), werden sie in der weiteren Analyse zum Modal Split / zur Transportleistung (vgl. Kapitel 2.4.3.2) nicht weiter berücksichtigt.

### *Mikro Mobilität*

Durch den Beschluss zur Legalisierung der Nutzung von Elektrokleinstfahrzeugen hat sich seit Juni 2019 der Mikro Mobilitäts-Markt in München signifikant verändert. Wie in der Tabelle 13 abgebildet, traten innerhalb von weniger als sechs Monaten acht E-Scooter Sharing Anbieter in den Markt. Die kumulierte Anzahl an E-Scooter stieg demnach auf über 7.700 Stück an.

Tabelle 13: Überblick Mikro Mobilität Anbieter München (eigene Darstellung)

<b>Mikro Mobilität</b>	<b>Start</b> (in München)	<b>Business Modell</b>	<b>Flotten- größe</b>	<b>Geschäftsgebiet</b> (Abstellgebiet)	<b>Registrierte Kunden</b>
Call-a-bike	2000	FF Bike Sharing	1.500	Innerhalb Mittlerer Ring	-
MVG Rad	2015	FF Bike Sharing	3.200	133 Stationen, ca. 120 km <sup>2</sup>	>115.000
emmy	2017	FF Scooter Sharing	450	45 km <sup>2</sup>	≈ 50.000
Circ	2019	E-Scooter Sharing	500	Innenstadtnah <sup>18</sup>	-
Lime	2019	E-Scooter Sharing	>2000	Innenstadtnah	-
voi.	2019	E-Scooter Sharing	>1000	Innenstadtnah	-
BIRD	2019	E-Scooter Sharing	800	Innenstadtnah	-
JUMP	2019	E-Scooter Sharing	700	Innenstadtnah	-
JUMP	2019	FF E-Bike Sharing	200	Innenstadtnah	-
dott	2019	E-Scooter Sharing	500	Innenstadtnah	-
Tier	2019	E-Scooter Sharing	>1000	Innenstadtnah	-

<sup>18</sup> Geschäftsgebiete überwiegend innenstadtnah. Zum Beispiel: Maxvorstadt, Schwabing, Altstadt-Lehel, Sendling, Haidhausen, Ludwigsvorstadt, Schwanthalerhöhe

Bike Sharing Systeme existieren in München hingegen bereits seit dem Jahr 2000, wobei sich mit *Call-a-Bike* und *MVG Rad* zwei Systeme mit einer hohen Akzeptanz in der Bevölkerung durchgesetzt haben. Gemeinsam kommen die beiden Anbieter auf mehr als 4.700 Leihfahrräder im Stadtgebiet. Zusätzlich zum Bike Sharing existiert mit *emmy* seit 2017 ein Free-Floating Scooter Sharing Anbieter, der 2019 sein Angebot auf über 450 Scooter erweitert hat (vgl. Schubert, 2018).

#### 2.4.4.2 Verkehrsleistung und Modal Split ODM in München

Auf Basis der gesammelten Erkenntnisse und Daten zu ODM-Angeboten in München erfolgt in diesem Kapitel eine Abschätzung des Anteils von ODM am gesamten Münchner Mobilitätsaufkommen. Als aussagekräftige Kennzahlen, sollen Werte für die Verkehrsleistung, sowie den Anteil von ODM am Modal Split ermittelt werden.

Für die Ermittlung werden nur die ODM-Angebotsformen Free-Floating und Station-Based Car Sharing, Ride Hailing und Ride Pooling berücksichtigt. Da Car Rental, Car Pooling und Peer-2-Peer Car Sharing in aller Regel für längere Strecken außerhalb von Städten angewendet werden, findet die verkehrliche Belastung dieser Angebotsformen überwiegend nicht in städtischen Gebieten statt. Ebenfalls wird auf eine detaillierte Untersuchung der Mikro Mobilitäts-Angebote im weiteren Verlauf verzichtet, da in dieser Arbeit ODM-Services auf der Basis von motorisierten Fahrzeugen im Vordergrund stehen.

Aufgrund der hohen Marktdynamik und der starken Wettbewerbssituation stellt es sich als schwierig heraus, belastbare Daten der ODM-Anbieter zu erlangen, weshalb für die Abschätzung der Verkehrsleistung sowie des Anteils am Modal Split teilweise auf Daten aus vergleichbaren Städten in Verbindung mit plausiblen Annahmen zurückgegriffen werden musste. Die Hochrechnung der durch ODM in München gefahrenen Kilometer und Anzahl an Trips erfolgte auf Basis der bestehenden Flottengrößen, der durchschnittlichen Auslastungen der Flotten sowie der Besetzungsgrade. Diese Ergebnisse wurden in den Kontext der Studien-Ergebnisse zum Mobilitätsverhalten der repräsentativen Haushaltsbefragung der Mobilität in Deutschland (Follmer & Belz, 2018) eingeordnet. Da es sich bei der Befragung um das Mobilitätsverhalten der Haushalte in der Stadt München handelt (vgl. Kapitel 4.2.3.1) und die in der Stadt existierenden ODM-Angebote zu einem großen Anteil von Personen mit einem Wohnort außerhalb der Stadt genutzt werden (z.B. durch Touristen), wird die Einordnung der ODM-Anteile auf Basis der MiD-Daten als kritisch angesehen (vgl. Kapitel 4.5.1). Trotz dieser Vergleichsproblematik kann jedoch eine grobe Abschätzung erfolgen.

---

### *Anteil an Verkehrsleistung von ODM*

Eigenen Hochrechnungen zufolge (vgl. Formel 6) beträgt die Verkehrsleistung von Free-Floating und Station-Based Car Sharing, Ride Hailing und Ride Pooling im Untersuchungsgebiet München circa 303.723 Personenkilometer (PKM) pro Tag. Wird dieser Wert in das Verhältnis zur täglichen Gesamt-Verkehrsleistung der Münchner Bevölkerung auf Basis der aktuellen Daten der MiD (vgl. Follmer & Belz, 2018) gesetzt, so ergibt sich ein Anteil von circa 0,5 %. Bezogen auf den motorisierten Individualverkehr (vgl. Formel 7) entspricht dies einem Anteil von 0,91 % (33,4 Mio PKM; vgl. Follmer & Belz, 2018). Eine Aufteilung der berechneten PKM und der Fahrzeugkilometer (VKM) der einzelnen ODM Angebote befindet sich im Anhang 3.

$$PKM_{ODM_{MUC}} = \frac{\sum PKM_{ODM} \{CS, FF; SB; RH; RP\}}{\sum PKM_{München}} = \frac{303.723 \text{ PKM}}{60,0 \text{ Mio. PKM}} = 0,50 \% \quad (\text{Formel 6})$$

$$PKM_{ODM_{MIV}} = \frac{\sum PKM_{ODM} \{CS, FF; SB; RH; RP\}}{\sum PKM_{MIV, München}} = \frac{303.723 \text{ PKM}}{33,4 \text{ Mio. PKM}} = 0,91 \% \quad (\text{Formel 7})$$

Die ermittelten Werte basieren auf den bestehenden ODM-Angeboten und setzen diese ins Verhältnis zum Verkehrsaufkommen der Münchner Bevölkerung. Sie stellen somit einen Durchschnitt über das gesamte Münchner Stadtgebiet ohne räumliche Differenzierung dar. Da ODM-Services teilweise nur in innerstädtischen Geschäftsgebieten angeboten werden (z.B. Free-Floating Car Sharing), kann die Verteilung in unterschiedlichen Stadtgebieten teilweise stark variieren. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass entsprechende Einpendler, Durchgangs- und Lieferverkehr sowie Business- und Tourismusreisen im Datensatz der MiD nicht berücksichtigt werden. Unter Einbeziehung dieser wäre zu erwarten, dass der tatsächliche Anteil von ODM aller im Stadtgebiet realisierten Fahrten tendenziell geringer ausfallen würde.

Badling et al. (2019) untersuchten in diesem Zusammenhang den Anteil von TNC's an den insgesamt im Stadtgebiet zurückgelegten VMT in sechs amerikanischen Städten. Dabei differenzierte er zwischen unterschiedlichen Stadtteilen und stellte signifikante regionale Unterschiede fest. Während im Zentrum von San Francisco der Anteil von VMT durch TNC's 12,8 % betrifft, so ergibt sich über das gesamte Stadtgebiet hinweg nur ein Anteil von 2,7 % (vgl. Balding et al., 2019). Los Angeles kommt im Stadtzentrum auf einen Anteil von 2,6 % und im gesamten Stadtgebiet auf 1,5 %. Einen Überblick über alle sechs Städte bietet die Abbildung im Anhang 4.

In Deutschland, und speziell in München, ist aufgrund der hohen Leistungsfähigkeit des ÖPNV und der gesetzten regulatorischen Rahmenbedingungen mittelfristig keine derartig hohe Marktdurchdringung von Ride Hailing Angeboten zu erwarten.

### Anteil am Modal Split durch ODM

Da die Nutzung von ODM-Angeboten in der Befragung der MiD im Bezug auf das Untersuchungsgebiet deutlich unterrepräsentiert ist, gehen die ermittelten ODM-Fahrten zusätzlich zu den in der MiD erfassten Fahrten in die Berechnung ein. Bezogen auf den Modal Split wird ein Anteil von Free-Floating und Station-Based Car Sharing, Ride Hailing und Ride Pooling im gesamten Untersuchungsgebiet München von circa einem Prozent abgeschätzt (0,91%; vgl. Formel 8).

$$MS_{ODM} = \frac{\sum Trips_{ODM} \{CS\ FF;SB;RH;RP\}}{\sum Trips_{München} + \sum Trips_{ODM}} = \frac{45.000 \text{ trips}^{19}}{4.945.000 \text{ trips}} = 0,91 \% \quad (\text{Formel 8})$$

Auch wenn der Anteil für das Gesamt-Stadtgebiet noch bei unter einem Prozent liegt, konnte der Wert, wie in der Abbildung 16 erkennbar ist, im Vergleich zu den Jahren 2002 und 2008, für welche auch repräsentative Mobilitätsbefragungen für das Untersuchungsgebiet München vorliegen (vgl. LHM 2004; LHM 2008b), signifikant gesteigert werden. Erklärt wird die kontinuierliche Steigerung vor allem durch die Zunahme des Ride Hailing Marktes, der Ausweitung von Station-Based Car Sharing Angeboten und der starken Marktdurchdringung von Free-Floating Car Sharing Angeboten ab dem Jahr 2012.

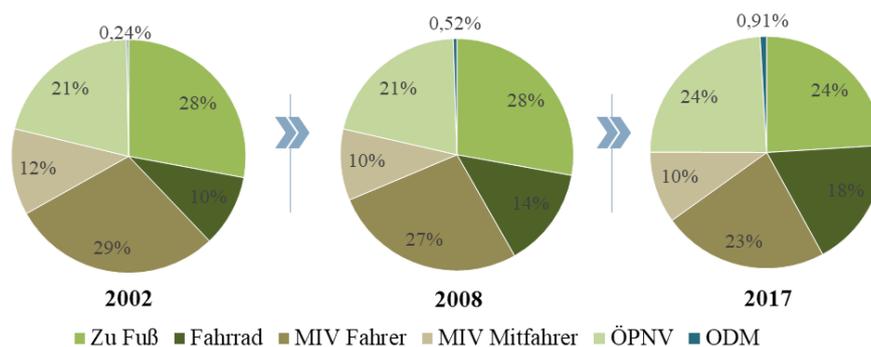


Abbildung 16: Entwicklung Anteil ODM am Modal Split in München 2002, 2008 und 2017 (eigene Darstellung, basierend auf Hochrechnung ODM und Modal Split Verteilung der Münchner Bevölkerung)

Setzt man den Anteil der Fahrten durch Free-Floating und Station-Based Car Sharing, Ride Hailing und Ride Pooling ins Verhältnis zu den zurückgelegten Fahrten des MIV (MIV Fahrer ~ 23 %), so ergibt sich ein Anteil von 3,8 % (vgl. Formel 9).

$$MS_{ODM,MIV} = \frac{\sum MS_{ODM} \{CS\ FF;SB;RH;RP\}}{\sum MS_{MIV} + \sum MS_{ODM}} = \frac{0,91\%}{23\% + 0,91\%} = 3,80 \% \quad (\text{Formel 9})$$

Dieser Wert fällt im Vergleich zum Anteil der ermittelten Verkehrsleistung (0,91 %) am MIV deutlich höher aus, da keine Wegelängen berücksichtigt werden. Die durchschnittliche Wegelänge im MIV ist basierend auf der Haushaltsbefragung in München 2017 mit 18,9 km angegeben (vgl. *infras*, 2019). Da ODM-Fahrten überwiegend im Stadtgebiet stattfinden, fallen die

<sup>19</sup> Eigene Abschätzung auf Basis der Flottengrößen, durchschnittlichen Auslastung und durchschnittlichen Tripplänge der unterschiedlichen ODM-Angebote

---

Fahrten im Durchschnitt dementsprechend deutlich kürzer aus (vgl. Ride Hailing/Pooling 5 – 9 km; Free-Floating Car Sharing 9 – 13 km) (vgl. Kopp et al., 2015; Schreier et al., 2015).

#### 2.4.5 Entwicklungspotential ODM

Anerkannte Unternehmensberatungen prognostizierten in den vergangenen Jahren ein gigantisches Wachstum von ODM-Angeboten (vgl. McKinsey, 2016; Roland Berger, 2016; Deloitte, 2016), welches bis zum heutigen Zeitpunkt trotz eines starken, realisierten Wachstums in allen Angebotsformen in dem Maße nicht erreicht werden konnte (vgl. Kapitel 2.4.1 und Kapitel 2.4.4.2). Der Fachliteratur zufolge könnten sich ODM-Angebote durch die Etablierung neuer Technologien, geänderte Mobilitätsbedürfnisse in der Gesellschaft oder die Anpassung der regulatorischen Rahmenbedingungen aber mittel- und langfristig noch deutlich weiterentwickeln (vgl. Eckhardt, 2004).

Neben der kontinuierlichen technologischen Weiterentwicklung von Mobilitäts-Apps, GPS-Tracking, Datenanalyse- und Managementsystemen, maschinellem Lernen oder auch künstlicher Intelligenz besitzt Studien zufolge insbesondere das vollautonome Fahren (VAF) das Potential, die Verbreitung und Integration von ODM deutlich zu beschleunigen (vgl. Bunghez, 2015; Trommer et al., 2016). Mobilitätsexperten sind der Meinung, dass sich durch VAF der private Fahrzeugbesitz reduzieren könnte und Personen stattdessen für die Ausübung ihrer Mobilität vermehrt auf ODM zurückgreifen werden (vgl. Soteropoulos et al., 2019). Zusätzlich kommen sie zu dem Ergebnis, dass ODM-Angebote durch VAF zu günstigeren Preisen angeboten werden können, was die Attraktivität der Angebote weiter steigert (vgl. Bösch et al., 2017). Durch VAF würden unterschiedliche Angebotsformen, wie Car Sharing, Ride Pooling und Ride Hailing fließend ineinander übergehen, da entsprechend alle Angebotsformen durch autonom fahrende Fahrzeuge abgedeckt werden können und es keinen Grund seitens des Betreibers mehr gibt, den Kunden das Fahrzeug selbst steuern zu lassen. Soteropoulos et al. (2019) bietet eine fundierte Zusammenfassung bestehender Simulationen und Modelle im Bereich ODM und VAF.

Neben dem autonomen Fahren werden neue Mobilitäts-Plattformen im Bereich MaaS mit dem Potential aufgeführt, das Angebot und die Nachfrage von ODM signifikant zu steigern (vgl. Burrows et al., 2015). Wie bereits im Kapitel 2.4.2 beschrieben, soll durch MaaS eine effizientere, multimodale Nutzung von traditionellen und neuen Mobilitätsangeboten unterstützt werden (vgl. Holmberg et al., 2016). Bei günstigen Rahmenbedingungen und einer daraus resultierenden hohen Akzeptanz in der Bevölkerung bietet MaaS somit ein hohes Potential zur Steigerung des Angebots und der Nachfrage von ODM. Weiterhin bietet MaaS die Möglichkeit, die hohe Anzahl unterschiedlicher ODM-Angebote in einer Plattform zu bündeln und den Nutzern

transparent einen einfachen Zugang zur Verfügung zu stellen. Bereits heute ist das sehr vielseitige Mobilitätsangebot im urbanen Raum aus Kundensicht schwierig zu überblicken. Darüber hinaus können durch MaaS-Plattformen unkompliziert strategische Partnerschaften unterschiedlicher Mobilitätsanbieter eingegangen werden, welche sich positiv auf die Angebotsqualität auswirken (vgl. Li, 2017).

Den wohl größten Einfluss auf die zukünftige Entwicklung von ODM-Angeboten bieten die regulatorischen Rahmenbedingungen. Neben der Überarbeitung bestehender Gesetze (wie beispielsweise dem Personenbeförderungsgesetz) müssen für eine steigende Marktentwicklung sinnvolle Rahmenbedingungen geschaffen werden (vgl. Karl et al., 2017; Eckhardt, 2004). Häufig ist eine regulatorische Anpassung (die in der Regel aufgrund bestehender Wechselwirkungen der unterschiedlichen Mobilitätsangebote auch andere Mobilitätsalternativen beeinflusst) in Deutschland jedoch aus politischen Gründen nicht einfach durchsetzbar.

#### 2.4.6 Auswirkungen ODM auf nachhaltige urbane Mobilität

In diesem Kapitel werden relevante Studien zu den Auswirkungen von Car Sharing, Ride Hailing und Ride Pooling im Kontext der in dieser Arbeit operationalisierten Definition nachhaltiger urbaner Mobilität analysiert. Da im weiteren Verlauf dieser Arbeit Car Pooling, Car Rental und Mikro Mobilität nicht im Fokus der Betrachtung stehen, wird an dieser Stelle auf eine fundierte Analyse der Auswirkungen verzichtet.

Für die folgende Analyse wurden gezielt Studien ausgewählt, welche sich mit den in Kapitel 2.3.2 operationalisierten Verkehrs-, Flächen- und Emissions-Indikatoren nachhaltiger urbaner Mobilität beschäftigen. Weiterhin wurden Auswirkungen in die Untersuchung einbezogen, welche in Wechselwirkung mit den genannten Indikatoren stehen. So stehen beispielsweise die zurückgelegten Fahrzeugkilometer im Zusammenhang mit der aggregierten Durchschnitts-Geschwindigkeit des Verkehrs-Indikators oder dem Emissionsinventar des Emissions-Indikators. Da die Auswirkungen im weiteren Verlauf der Arbeit verkehrsträgerübergreifend evaluiert werden, wurden darüber hinaus auch Auswirkungen berücksichtigt, die Verlagerungseffekte zwischen unterschiedlichen Mobilitätsangeboten beschreiben oder sogar eine Änderung des Mobilitätsverhaltens abbilden.

##### 2.4.6.1 Car Sharing

In der Fachliteratur existiert eine Vielzahl empirischer Studien, die sich mit den Auswirkungen von Car Sharing auf das Mobilitätssystem beschäftigen und dabei ökologische, ökonomische und soziale Aspekte berücksichtigen. Der größte Anteil fokussiert sich dabei auf das Free-Floating und das Station-Based Car Sharing, wohingegen es zum Peer-2-Peer Car Sharing zum aktuellen Zeitpunkt nur sehr begrenzt entsprechende Studien gibt. Weiterhin ist die Anzahl der

---

existierenden Studien in Europa und Nord-Amerika am höchsten, was mit einer hohen Car Sharing-Dichte in den Regionen korreliert. Eine umfangreiche Zusammenfassung bestehender Car Sharing Studien bieten beispielsweise Loose, 2010, Millard-Ball et al. 2005; Shaheen, 2016b oder Nijland & Meerkerk, 2017. Auch in Deutschland wurden in den vergangenen Jahren einige Studien durchgeführt, welche die Auswirkungen von Car Sharing untersuchen (vgl. Schreier et al., 2015; Loose, 2016; WiMobil, 2016; Hülsman et al., 2018). Die Tabelle 14 bietet eine Zusammenfassung ausgewählter empirischer Studien.

Tabelle 14: Überblick relevanter Literatur zur Auswirkung von Car Sharing (eigene Darstellung)

Autor	Stadt, Region	Ausprägungsform	Fahrzeugreduktion pro Car Sharing Fahrzeug [Fahrzeuge]	Fahrzeugabschaffung der Nutzer [%]	Nutzer, die Fahrzeugkauf vermeiden [%]	Änderung der VKM der Nutzer [%]	Einsparung von Emissionen [%]	Sonstige Ergebnisse	Stichprobe
Krietemayer, 2003	München, Deutschland	Station-Based	-	14,0	34,0	-	-	-	N=700 (Stattauto Nutzer in München)
Rydén & Morin, 2005	Bremen und Belgien	Station-Based, Station-Based	6,8 5,6	34,0 21,0	- -	-45,0 -28,0	-39,0 -54,0	- 32 % der Befragten in Bremen und 22 % in Belgien nutzen den ÖPNV nach Car Sharing Nutzung mehr als vorher	N=537 (Car Sharing Nutzer in Bremen und Belgien)
Price et al., 2006	Arlington, VA	Station-Based	-	29,0	71,0	-43,0	-	- 54 % der Befragten gehen durch die Nutzung mehr zu Fuß - 54 % der Befragten nutzen den ÖPNV mehr	N=369 Car Sharing Nutzer
Shaheen et al., 2009	Toronto, Kanada	Station-Based	6,0-8,0	15,0	25,0	-	-	-	- Rückblick über zehn Jahre Car Sharing in Nord-Amerika
Martin & Shaheen, 2010	USA und Kanada	Station-Based	9,0-13,0	33,0	25,0	-27,0 -- 43,0	-34,0 -- -41,0	-	N = 9.635 (Car Sharing Nutzer in Nord-Amerika)
Martin et al., 2010	USA und Kanada	Station-Based	-	-	-	-27,0	-	- 12 % der Befragten gehen durch die Nutzung mehr zu Fuß - 22 % der Befragten nutzen den ÖPNV mehr	N=6.281 (Car Sharing Nutzer in Nord-Amerika)
Firnkorn & Müller 2012	Ulm, Deutschland	Free-Floating	2.3 - 10.3	11,4	-	-	-	-	N=1.881 Car2go Nutzer in Ulm
Schuster et al., 2015	Wien, Österreich	Station-Based Free-Floating	1,8 - 3,7 2,8 - 7,1	2,0 9,0	36,0 15,0	-2,1 -- -6,8 -1,1 -- -5,3	-	- 7.000 Tonnen CO <sub>2</sub> Einsparung durch Car Sharing pro Jahr	vier Erhebungswellen mit Kunden aus FF und SB Car Sharing Systemen
Nijland et al., 2015	Niederlande	Station-Based	-	30,0	-	-15,0 -- 20,0	-8,0 -- -13,0	-	N=363 Car Sharing Nutzer in den Niederlanden
Schreier et al., (EVA-CS), 2015	München, Deutschland	Free-Floating, Zonen-Basiert	1,8 - 3,1	9,2 11,9 - 20,1	39,8	-5,0	-	- Reduzierung von circa 1.500 Fahrzeugen innerhalb des mittleren Rings	Betrachtung aller Car Sharing Systeme in München
Loose (bcs), 2016	Deutschland	Free-Floating Station-Based	15,7	18,5	-	-	-	- 15 % aller Befragten sagen, dass sie das Fahrrad vor der Car Sharing-Teilnahme seltener genutzt haben	N=3.622 Car Sharing Nutzer unterschiedlicher Anbieter in zwölf Städten
Martin & Shaheen, 2016	Nord-Amerika	Free-Floating	7,0 - 11,0	2,0 - 5,0	7,0 - 10,0	-6,0 -- -16,0	-4,0 -- -18,0	- 20 % der Befragten gehen durch die Nutzung mehr zu Fuß	N=7.346 (Car2go Nutzer in Calgary, San Diego, Seattle, Vancouver, Washington)
Giesel & Nobis (WiMobil), 2016	Berlin und München	Free-Floating, Station-Based	-	6,5 15,3	82,0 94,0	-	-	- für viele Menschen beider Systeme ist Car Sharing ein wichtiger Grund, kein Auto zu kaufen	N=1.046 (befragte Nutzer innerhalb des WiMobil-Projektes 2012 - 2015)
Hülsmann et al. (share), 2018	Deutschland	Free-Floating	0,3 - 0,8	2,6	0,5 - 2,6	3,0 - 7,0	12,0 - 27,0	- bezogen auf das absolute Ergebnis wird durch Car Sharing ein Anstieg der Pkw-Flotte von 3 – 15 % ermittelt	N=1.190 Car2go Nutzer in Stuttgart, Köln und Frankfurt (Längsschnittanalyse des Verkehrsverhaltens)

---

Bei der Auswertung unterschiedlicher Studienergebnisse (vgl. Tabelle 14) ist festzustellen, dass die ermittelten Auswirkungen von Car Sharing teilweise erheblich auseinander liegen. Zwar weisen die betrachteten Studien fast ausschließlich auf eine positive Wirkung von Car Sharing in Bezug auf den privaten Fahrzeugbesitz, den allgemeinen Emissionsausstoß und die zurückgelegten Fahrzeugkilometer hin, die konkreten Ergebnisse variieren jedoch insbesondere beim Free-Floating Car Sharing stark. Als Begründung für die Ergebnisvariationen werden in der Regel Unterschiede bei den Eigenschaften des Car Sharing Angebots sowie bei den betrachteten Städten angegeben (vgl. Loose, 2010). Bezüglich der Unterschiede zwischen den betrachteten Städten oder Regionen gibt es verschiedene Faktoren, welche die Ergebnisse beeinflussen können, wie beispielsweise das vorhandene Transportangebot im Untersuchungsgebiet zum Zeitpunkt der Erhebung oder auch die Demografie der Stichprobe (vgl. Miramontes, 2018). Darüber hinaus ist festzustellen, dass auch die Erhebungsmethoden zur Gewinnung der Daten teilweise deutlich variieren. So werden bei einigen Studien Daten zum Mobilitätsverhalten der Nutzer in mehreren Erhebungswellen jeweils vor- und nach der Einführung eines Car Sharing Angebots erhoben, um die Veränderung entsprechend abbilden zu können. Andere, weniger aufwendige Erhebungen fokussieren sich hingegen nur auf eine Befragung, bei der die Nutzer zu ihrem (vergangenen, oder auch zukünftigen) Verhalten befragt werden.

Ebenfalls sind beim Vergleichen der Studien Unregelmäßigkeiten bei der Definition konkreter Auswirkungen festzustellen. So betrachten einige Studien bei den Auswirkungen von Car Sharing auf den privaten Fahrzeugbesitz beispielsweise ausschließlich die durch die Nutzer abgeschafften Fahrzeuge (vgl. Rydén & Morin, 2005). Andere Studien allerdings kumulieren konkret abgeschaffte Fahrzeuge gemeinsam mit nicht zusätzlich angeschafften Fahrzeugen zu einer Kennzahl (vgl. Schuster et al., 2015). Der potentielle Effekt der Fahrzeugneuanschaffung durch Car Sharing bleibt in den meisten Studien hingegen unberücksichtigt.

Aufgrund der regionalen Unterschiede im Car Sharing Angebot der verglichenen Städte und der angewandten Untersuchungsdesigns der Studien ist eine allgemeingültige Aussage zur konkreten Wirkung von Car Sharing nach wie vor schwierig (vgl. Nijland & Meerkerk, 2017). Positive Effekte durch Car Sharing werden aber bei der Reduzierung der Fahrzeug-Dichte und damit auch bei der Verringerung des benötigten Parkflächenbedarfs gesehen (vgl. Schuster et al., 2015; Martin et al., 2016). Bezüglich eines Beitrags zur Reduzierung des Gesamtverkehrsaufkommens, wie ihn unter anderem die Studien von Martin et al. 2010 oder Millard-Ball et al., 2005 implizieren, wird dem hingegen nicht einheitlich zugestimmt (vgl. Hülsman et al., 2018). Ebenso wenig existiert eine einheitliche Meinung darüber, ob Car Sharing einen nennenswerten Beitrag zur Reduzierung von Abgas- und Schallemissionen leistet. Die Erhebung dieser Daten (inklusive aller entstandenen Vorketten und Lebenszyklusanalysen) wird als sehr aufwendig angesehen (vgl. Firnkorn & Müller, 2012).

Darüber hinaus berichten viele Car Sharing Nutzer nach ihrem Beitritt von einem zunehmenden Umweltbewusstsein. Empirische Daten belegen, dass die Nutzer von Car Sharing Systemen überwiegend multimodaler unterwegs sind und mehr zu Fuß gehen, Rad fahren oder den ÖPNV nutzen als zuvor (vgl. ifmo, 2011; Delatte et al., 2014). Martin et al. (2010) untersuchte in diesem Zusammenhang die Verlagerungseffekte von Car Sharing auf den ÖPNV und weitere nicht-motorisierte Verkehrsträger.

Zusätzlich zu den untersuchten operationalisierten Indikatoren ist festzuhalten, dass Car Sharing für die Nutzer eine attraktive Mobilitätsalternative zur Befriedigung ihrer Bedürfnisse darstellt. Somit zählt Car Sharing auch auf soziale Aspekte ein, indem es ein zusätzliches Angebot schafft und die Verfügbarkeit und Erreichbarkeit (im Geschäftsgebiet) verbessert.

#### 2.4.6.2 Ride Hailing

Seit der enormen Marktdurchdringung von TNC's in weniger regulierten Märkten sind die Effekte und Auswirkungen von Ride Hailing intensiv in den Fokus geraten. Unumstritten ist das Potential von Ride Hailing, das Mobilitätsverhalten unterschiedlicher Personengruppen beeinflussen und somit eine Wirkung auf die zurückgelegten VKM und dementsprechend auch auf die Emissionen ausüben zu können (vgl. Machado et al., 2018). In der wissenschaftlichen Diskussion existieren allerdings unterschiedliche Auffassungen über die Auswirkungen von Ride Hailing im Kontext nachhaltiger urbaner Mobilität.

Aktuelle Studien konzentrieren sich überwiegend auf die noch jungen TNC's und untersuchen dabei hauptsächlich die Wechselwirkungen und Verlagerungseffekte zu den traditionellen Verkehrsmitteln (vgl. Schaller, 2017; 2018; Clewlow & Mishra, 2017). Weiterhin analysieren sie in der Regel die durch TNC's zusätzlich entstandenen VKM im entsprechenden Untersuchungsgebiet (vgl. Cramer & Krueger, 2016; Erhardt et al., 2019).

Auf der einen Seite weisen Studien darauf hin, dass das Ziel von TNC's nicht darin besteht, die Nutzung von traditionellen Taxis zu verringern, sondern die Nutzer individueller und privater Verkehrsmittel zu ermutigen, auf Mobilitätsalternativen umzusteigen. Eine solche Verlagerung würde die Anzahl der im Verkehr befindlichen Fahrzeuge, insbesondere zu Stoßzeiten, verringern und damit Verkehrsprobleme und Umweltverschmutzung in den städtischen Zentren reduzieren (vgl. Carranza et al., 2016). Auf der anderen Seite kommen Studien zu dem Ergebnis, dass TNC's zu einer starken Erhöhung der gefahrenen Kilometer in den Städten führen und somit massiv zu aktuellen Verkehrsüberlastungen beitragen (vgl. MAPC, 2018). Als Haupt-Ursache hierfür werden Verlagerungseffekte von Verkehrsmitteln aus dem Umweltverbund sowie der hohe Anteil von Leerfahrten angesehen (vgl. Henao, 2017). Ein Überblick und eine Zusammenfassung der Ergebnisse aktueller, relevanter Studien befindet sich in Tabelle 15.

Tabelle 15: Überblick relevanter Literatur zur Auswirkung von Ride Hailing und TNC (eigene Darstellung)

Autor	Stadt, Region	Methode	Studienerkenntnisse	Bemerkungen/Limitationen
Cramer & Krueger, 2016	USA	Trip-Daten Analyse TNC und traditionelle Taxi Services	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vergleich der Auslastung eines TNCs mit traditionellen Taxis in fünf Städten der USA</li> <li>- im Allgemeinen haben TNC's eine höhere Auslastung, d.h. weniger Leerfahrten, die Auslastung variiert zwischen den untersuchten Städten von 55 % bis 64 % bei TNCs im Vergleich zu circa 40 % bei traditionellen Taxis</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- als Gründe für die höhere Auslastung werden effizientere Algorithmen bei den TNCs im Vergleich zu traditionellen Taxis, ein breiteres Angebot, ineffiziente Taxi Regularien und das flexible Arbeitsmodell von TNCs aufgeführt</li> </ul>
Schaller, 2017	New York, USA	Trip-Daten Analyse	<ul style="list-style-type: none"> <li>- TNC's haben zwischen 2013-2016 über 600 Millionen VMT im Straßennetz von New York erzeugt und führten weiterhin zu einem Rückgang der traditionellen Taxi- und anderer Mobilitäts-Service-Kilometer</li> <li>- TNC's erhöhen VKM im Untersuchungsgebiet um insgesamt 7 %</li> <li>- TNC's reduzieren U-Bahn- und Bus-Nutzung um 6 bzw. 12 %</li> <li>- die kumulierten Kilometer von TNCs, traditionellen Taxis und Limousinen-Services stiegen von 2013 bis 2016 von 14 % auf 19 % der Gesamtkilometerzahl im Untersuchungsgebiet an</li> <li>- Wenn TNC nicht verfügbar gewesen wäre, wären 16 % mit dem eigenen Fahrzeug, 23 % mit einem traditionellen Taxi, 42 % mit dem ÖPNV und 12 % zu Fuß oder mit dem Fahrrad gefahren. Weitere 12 % hätten den Trip gar nicht erst unternommen.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Report konzentriert sich ausschließlich auf New York, die Erkenntnisse lassen sich aber durchaus auf andere amerikanische Städte übertragen</li> </ul>
Henaio, 2017	Denver, USA	Quantitative Befragung	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Wenn TNC nicht verfügbar gewesen wäre, wären 26 % mit dem eigenen Fahrzeug, 10 % mit einem traditionellen Taxi, 11 % als Mitfahrer in einem anderen Auto, 22 % mit dem ÖPNV und 12 % zu Fuß oder mit dem Fahrrad gefahren. Weitere 12 % hätten den Trip gar nicht erst unternommen.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 311 Nutzerbefragungen</li> </ul>
Clewlow & Mishra, 2017	USA	Quantitative Befragung	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 49 % bis 61 % der TNC Trips hätten nicht stattgefunden oder wären zu Fuß, mit dem Fahrrad oder durch den ÖPNV erfolgt, wenn Ride Hailing nicht verfügbar wäre (abhängig von untersuchter Stadt)</li> <li>- Mehrheit der TNC Nutzer (91 %) ohne Änderungen im Pkw-Besitz</li> <li>- TNC Nutzer auf Haushaltsebene haben höhere Pkw-Besitzquote als ausschließlich ÖPNV Nutzer (1,07 Autos pro Haushalt gegenüber 1,02)</li> <li>- Nutzung von Ride Hailing führt bei Nutzern zu reduzierter ÖPNV-Nutzung (- 6 %)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Haushalts-Befragung (N=4000) in zwei Befragungswellen in sieben Großstädten der USA</li> </ul>
MAPC, 2018	Boston, USA	Trip-Daten Analyse	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Analyse des Anteils von Ride Hailing in unterschiedlichen Stadtteilen: Boston (Innenstadt) 3,93 %; Newton 0,86 %; Cambridge 3,6 %</li> <li>- Ride Hailing im Untersuchungsgebiet insgesamt circa 291 Millionen VMT</li> </ul>	-
Circella & Alemi, 2018	Kalifornien, USA	Quantitative Befragung Latent Class Analysis	<ul style="list-style-type: none"> <li>- detaillierte Online-Umfrage zur Identifizierung unterschiedlicher Ride Hailing Nutzergruppen und Erfassung des Mobilitätsverhaltens</li> <li>- Wenn TNC nicht verfügbar gewesen wäre, wären 35 % mit dem eigenen Fahrzeug, 51 % mit einem traditionellen Taxi, 22 % als Mitfahrer in einem anderen Auto, 33 % mit dem ÖPNV und 19 % zu Fuß gegangen oder mit dem Fahrrad gefahren. Weitere 9 % hätten den Trip gar nicht erst unternommen (Mehrfachantworten möglich).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Online-Umfrage mit 2.400 Personen mit Wohnort in Kalifornien</li> </ul>

Autor	Stadt, Region	Methode	Studienerkenntnisse	Bemerkungen/Limitationen
Grahler et al., 2018	USA	Longitudinalanalyse, Regressions Modell	- Ride Hailing führt ein Jahr nach der Einführung zu einer Reduktion von 1,3 - 1,7 % der Fahrgastzahlen des ÖPNV	- weitere Ergebnisse zeigen Erkenntnisse über weitere Determinanten der ÖPNV-Nutzung in 22 US-Städten
SFCTA, 2018	San Francisco, USA	Trip-Daten Analyse (Uber und Lyft), Verkehrsdatenanalyse (INRIX-Daten)	- TNC´s zwischen 2010 und 2016 sind Haupt-Auslöser für weitere Verkehrsüberlastungen (Reduktion der Durchschnitts-Geschwindigkeit in der Hauptverkehrszeit um 26 -27 % im Betrachtungszeitraum) - Anstieg von 2010 - 2016 um 630.000 VMT (Anteil Zunahme Ride Hailing 47 %)	-
Schaller, 2018	USA	Trip-Daten Analyse (Uber und Lyft) und Abgleich mit NHTS Daten	- 60 % der TNC Trips hätten nicht stattgefunden oder wären zu Fuß, mit dem Fahrrad oder durch den ÖPNV erfolgt, wenn TNC nicht verfügbar gewesen wäre - etwa 40 % hätten den Privat-Pkw oder ein Taxi genutzt, wenn kein TNC für die Fahrt zur Verfügung gestanden hätte - TNC´s erhöhen VKM um 180 % im Vergleich zu zurückgelegten MIV Kilometern (+ 2,8 VKM)	- basierend auf NHTS Daten 2017 und Uber und Lyft Daten 2018
Agrawal et al., 2019	Indien	Verkehrsdaten Analyse (Google Maps)	- Ride Hailing führt zur Substitution von Fahrten mit dem ÖPNV - Ride Hailing führt zur Erhöhung des Verkehrsaufkommens - Ride Hailing führt zu Verzögerungen des Verkehrsfluss von 4,6 - 7,3 %	- keine Aussagekraft über Langzeiteffekte, da mögliche Rebound-Effekte nicht berücksichtigt werden
Balding et al., 2019	USA	Trip-Daten Analyse (Uber und Lyft) und Abgleich mit NHTS Daten	- TNC´s haben kumuliert in allen Untersuchungsgebieten einen Anteil von 1,0 - 2,9 % der gesamten VKM (gesamtes Stadtgebiet) - Anteil Ride Hailing an VKM im Innenstadtbereich: San Francisco: 12,2 - 13,4 %; Seattle 1,7 - 2,0%	- basierend auf NHTS Daten 2017 und Uber und Lyft Daten 2018
Barrios et al., 2019	USA	Empirische Analyse	- Ride Hailing führt in den Untersuchungsgebieten zu einem Anstieg der tödlichen Unfälle im Straßenverkehr von 3 %	-
Henao & Marshall, 2019	Denver, USA	Ethnographische Methoden, quantitative Befragungen, Tree-Based-Modell	- Ride Hailing besitzt das Potential, die Nachfrage nach Parkplätzen insbesondere an Flughäfen und Veranstaltungsorten zu reduzieren	- Größe der Trip-Stichprobe im Vergleich zu Anzahl der durchgeführten Fahrten
Erhardt et al., 2019	San Francisco, USA	Trip-Daten Analyse (Uber und Lyft), Regressions-Modell	- TNC´s erhöhen die Verkehrsüberlastung im Untersuchungsgebiet - Anstieg der Stau-Stunden im Straßenverkehr (2010 - 2016) um 62 % (ohne Ride Hailing 22 %) - durch Ride Hailing VKM Anstieg im Vergleich zum Jahr 2010 um 13 % (2016), ohne Ride Hailing 7 % - Verringerung der Durchschnitts-Geschwindigkeit um 13 % (4 % ohne Ride Hailing)	-

---

Da es sich fast ausschließlich um nordamerikanische Studien handelt, ist eine Übertragung auf den europäischen / deutschen Kontext nicht ohne Einschränkung möglich. Zum einen werden TNC's in vielen europäischen Ländern (noch) stark reguliert, was eine rasche, starke Marktdurchdringung, wie in den amerikanischen Städten, mittelfristig nicht erwarten lässt. Auf der anderen Seite besitzen europäische Städte im Vergleich zu den Untersuchungsgebieten der Studien in Nord-Amerika ein in der Regel deutlich besser ausgebautes ÖPNV-System, wodurch in den europäischen / deutschen Städten eine andere Modal Split-Verteilung vorliegt und dementsprechend andere Verlagerungseffekte zu erwarten wären.

Unabhängig von den verkehrlichen Auswirkungen bieten TNC's einen nicht zu unterschätzenden gesellschaftlichen Nutzen, der durch die Tatsache verstärkt wird, dass bestehende Verkehrsmittel, wie beispielsweise traditionelle Taxis, auf diesen neuen Wettbewerb reagieren müssen, indem sie ihre Dienstleistungen verbessern und so zum Beispiel ihre Preise senken. Die Preissenkung ist jedoch keine zuverlässige Gegenmaßnahme, da die Taxiunternehmen aufgrund starker Regulierungen innerhalb der Branche die Preise nicht selbst senken können (vgl. Deighton-Smith, 2018).

#### 2.4.6.3 Ride Pooling

Ride Pooling stellt unter den betrachteten ODM Angeboten die wohl jüngste Angebotsform dar, über deren Auswirkungen aufgrund der Neuheit der Angebote in der Wissenschaft noch keine vollständige Einigkeit herrscht. Experten sind sich grundlegend einig, dass Ride Pooling Angebote durch eine effiziente Auslastung vorhandener Ressourcen und die Bündelung mehrerer Fahrten in einem Fahrzeug ein starkes Potential zur Leistung eines positiven Beitrags im Kontext nachhaltiger Mobilität bieten können (vgl. Liyanage et al., 2019; Atasoy et al., 2015b).

Diverse Studien kommen in diesem Zusammenhang zu dem Ergebnis, dass durch Ride Pooling die zurückgelegten VKM in einer Stadt signifikant reduziert werden könnten (vgl. Jalali et al., 2017; Fiedler et al., 2017). Weiterhin thematisieren die Studien eine damit verbundene Reduktion von Treibhausgasemission und Luftschadstoffen, sowie eine drastische Reduzierung von privaten Fahrzeugen (vgl. Alexander & González, 2015; Jalali et al., 2017). Einen Überblick über relevante Ride Pooling Studien und deren Auswirkungen im Kontext nachhaltiger Mobilität bietet die Tabelle 16. Weitere Studien thematisieren die potentiellen Auswirkungen von Ride Pooling in Kombination mit VAF (vgl. z.B. OECD, 2015; Rigole, 2014; Friedrich & Hartl, 2016; Fagnant, 2015; Agua, 2016; Dia & Javanshour, 2017; Shen & Lopes, 2015; Marczuk et al., 2015). Da das autonome Fahren aber nicht im Fokus dieser Arbeit steht, wird an dieser Stelle auf eine fundierte Beschreibung der Studien verzichtet. Eine Tabelle relevanter Studien zum Ride Pooling in Kombination mit VAF befindet sich im Anhang 5.

Während in der Fachliteratur zu den potentiellen Effekten von Ride Pooling überwiegend Einigkeit herrscht, existieren zum aktuellen Zeitpunkt noch keine fundierten Analysen über realisierte Auswirkungen bestehender Angebote. Aktuelle Prognosen bestehen in der Regel lediglich in Form von Simulationen und Modellierungen (vgl. Burns et al., 2013), die teilweise auf wirklichkeitsfernen Annahmen zur Marktdurchdringung beruhen (vgl. Jalali et al., 2017). In der Regel basieren die bestehenden Prognosen auf Datensätzen mit Quell-Ziel-Beziehungen des MIV's oder auf Taxi-Datensätzen, nicht aber auf der Datengrundlage bestehender Ride Pooling Angebote (vgl. Santi et al., 2014; Alexander & González, 2015). Als Haupt-Gründe hierfür werden die fehlende Erfahrung und Marktdurchdringung von Ride Pooling Services gesehen, welche nur erfolgreich Fahrten bündeln können, wenn eine kritische Angebots- und Nachfragemenge zur Verfügung steht (vgl. Santi et al., 2014; Alonso-Mora et al., 2016).

Ob und inwieweit ein potentieller Fahrgast überhaupt daran interessiert ist, seine Fahrt zu teilen, wird bei den bestehenden mathematischen Modellen und Simulationen in der Regel nicht berücksichtigt. Des Weiteren ist noch wenig darüber bekannt, welche maximale Warte- und Umwegzeit die Nutzer von Ride Pooling Angeboten akzeptieren und ab welchem Preisunterschied sie bereit sind, auf die Privatsphäre im eigenen Fahrzeug zu verzichten.

Tabelle 16: Überblick relevanter Literatur zur Auswirkung von Ride Pooling (eigene Darstellung)

Autor	Stadt, Region	Methode	Studienerkenntnisse	Bemerkungen/Limitationen
Santi et al., 2014	New York, USA	mathematisches Modell basierend auf New York Taxi-Daten	<ul style="list-style-type: none"> <li>- durch Einschränkung der Nutzer zum Teilen von Fahrten kann die kumulative Fahrstrecke um 40 % oder mehr reduziert werden (bei maximaler Wartezeit &lt; 5 Minuten)</li> <li>- Potential zur Reduzierung der Anzahl der Taxi-Trips um 50 %</li> <li>- großes Potential zur gemeinsamen Nutzung von Fahrten mit minimalen Unbehagen der Fahrgäste und Reduzierung der Reisezeit um 32 %</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Erkenntnisse basieren auf einer theoretischen "Shareability" Funktion, welche das Potential zum Teilen von Fahrten auf Basis signifikanter Indikatoren beschreibt - Infrastruktur in Manhattan (New York)</li> </ul>
Alexander & González, 2015	Boston, USA	Analyse von Mobil-Phone Daten	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reduzierung um 43 % der privat Fahrzeuge durch die Nutzung von Ride Pooling</li> <li>- Erhöhung der Anzahl der Fahrzeuge um 14 %, wenn ausschließlich Nutzer aus dem ÖPNV ihr Mobilitätsverhalten zu Ride Pooling Services verlagern</li> </ul>	-
Jalali et al., 2017	Changsha, China	GPS-Tracking privater Fahrzeuge und Modellierung möglicher Ride Pooling Fahrten	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ride Pooling besitzt innerhalb des Untersuchungsgebietes das Potenzial, die VKM (210.890 Kilometer) um rund 24 % (51.087 km) und die Anzahl der Fahrten (20.018 Fahrten) um rund 40 % (8480) zu reduzieren. (maximale Distanz zwischen unterschiedlichen Trips 10 km, Wartezeit weniger als 60 Minuten). Konservatives Szenario mit 2 km Distanz und weniger als 40 Minuten Wartezeit: VKM Reduktion 7 % und 14 % weniger Fahrten</li> <li>- Emissionseinsparungen sind insbesondere durch weitere Entfernungen zum Abhol- / Absetzort möglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Annahmen zu Wartezeiten und akzeptierten Umwegen werden als unwahrscheinlich eingestuft (40 - 60 Minuten)</li> </ul>
Alonso-Mora et al., 2017	New York, USA	mathematisches Modell basierend auf New York Taxi-Daten	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 98 % der Taxifahrten, die derzeit von über 13.000 Taxis durchgeführt werden, könnten bei höherer Auslastung und einem Besetzungsgrad von bis zu vier Personen mit nur 3.000 Taxis bedient werden.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- keine Berücksichtigung, ob Nutzer bereit sind, Fahrten zu teilen</li> </ul>
Fiedler et al., 2017	Prag, Tschechien	Agenten-basierte Simulation	<ul style="list-style-type: none"> <li>- hypothetisches Szenario, alle Privatfahrzeuge in der Stadt Prag durch ein ODM-System (Ride Hailing / Pooling) zu ersetzen</li> <li>- durch die Anwendung von Ride Pooling (Annahme Verlängerung Fahrzeit &lt; 10 Minuten), kann der durchschnittliche Besetzungsgrad eines Fahrzeugs auf 2,7 gesteigert werden</li> <li>- Reduzierung der VKM auf 35 % mit Ride Pooling und 60 % ohne Pooling</li> </ul>	-

## 2.5. Zusammenfassung und Zwischen-Fazit Stand der Forschung

Das vorliegende Kapitel zeigt den aktuellen Stand der Forschung von ODM im Kontext nachhaltiger urbaner Mobilität auf. Um die betrachteten Forschungsschwerpunkte möglichst umfassend abzubilden, lagen die Schwerpunkte dabei auf der Definition und Operationalisierung nachhaltiger urbaner Mobilität (vgl. Kapitel 2.3), der Begriffsbestimmung und Abgrenzung von ODM im urbanen Mobilitätskontext (vgl. Kapitel 2.4.2), einer Marktanalyse von ODM im Untersuchungsraum München (vgl. Kapitel 2.4.4) und den Auswirkungen von ODM auf nachhaltige urbane Mobilität (vgl. Kapitel 2.4.6). Im Folgenden werden die Haupt-Erkenntnisse aus den Schwerpunkts-Feldern noch einmal zusammenfassend vorgestellt und es wird ein Zwischen-Fazit gezogen.

### *Definition und Operationalisierung nachhaltiger urbaner Mobilität*

Basierend auf der Sichtung relevanter Literatur zur Definition und Operationalisierung nachhaltiger urbaner Mobilität sowie einer durchgeführten explorativen Expertenstudie (vgl. Kapitel 3), liegt dieser Arbeit folgendes Verständnis nachhaltiger urbaner Mobilität zugrunde:

- » *Sustainable mobility ensures the individual fulfillment of basic needs and activities located in different places without harming the environment, economy or society, whether now or in the future. This requires affordable access to multiple mobility options, freedom of choice in terms of mode and access to life opportunities. Sustainable mobility, however, does not and should not require a reduction in mobility. It is oriented to reduce individual's derived demand of mobility and increase the intrinsic demand of mobility. Instead, it should be safe for all users and therefore minimize any type of negative effects on individuals, communities, the private sector and the environment.* « (vgl. mobil.LAB Promotionskolleg, 2014)

Der Grundgedanke besteht somit darin, jedem Menschen Mobilitätsoptionen zur Verfügung zu stellen und dabei die negativen, vor allem durch Verkehr entstehenden, Externalitäten zu minimieren (vgl. Sterzer, 2017). Nach der Auswertung des qualitativen Datenmaterials der explorativen Expertenstudie und zahlreicher relevanter Studien zur Operationalisierung nachhaltiger urbaner Mobilität (vgl. Tabelle 5), wurden für diese Arbeit drei Indikatoren ausgewählt (Verkehrs-, Flächen- und Emissions-Indikator), welche stellvertretend und übergreifend für die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit stehen. Bei der Auswahl und Bestimmung der Indikatoren wurde darauf geachtet, dass:

- eine verkehrsträgerübergreifende, holistische Perspektive abgebildet werden kann,
- Wechselwirkungen unterschiedlicher Verkehrsträger auf Stadtebene berücksichtigt werden,
- die Indikatoren auf Basis der SMART Richtlinien (spezifisch, messbar, erreichbar, realistisch und zeitgebunden) aufgestellt werden und
- die Verfügbarkeit entsprechender Daten eine Vergleichbarkeit der Indikatoren (z.B. zu unterschiedlichen Zeiten) zulässt.

Die Indikatoren haben dabei nicht den Anspruch die gesamte Bandbreite nachhaltiger urbaner Mobilität abzubilden. Vielmehr bieten sie basierend auf dem vorliegenden Forschungsdesign dieser Arbeit die Möglichkeit, zugrundeliegende Zusammenhänge und Einflussfaktoren gezielt zu analysieren und deren Auswirkungen (im zeitlichen Verlauf) zu beschreiben. Die Tabelle 17 gibt einen Überblick über die drei Indikatoren (vgl. Kapitel 2.3.2).

Tabelle 17: Zusammenfassung Indikatoren Nachhaltige urbane Mobilität (eigene Darstellung)

Indikator	Beschreibung	Daten- grundlage	Einheit
Verkehrsfluss und Durchschnitts-Geschwindigkeit	Räumlich und zeitlich aggregierte Durchschnitts-Geschwindigkeit im Untersuchungsgebiet $V_{Avg}(t) = \frac{\sum_{h=1}^{24} \sum_{i=1}^{h_n} V_{hi}}{\sum_{h=1}^{24} n_h}$	INRIX, MiD	$\frac{km}{h}$
Flächeninanspruchnahme und Flächenverbrauch	Gesamtfläche für parkende Fahrzeuge im öffentlichen Raum der Stadt München. $A(t) = C(t) * Ac(t) * \omega$ $C(t) = f\{Fb(t)\}$	KBA	$m^2$
Luftschadstoff- und Treibhausgas-Emissionen	Emissionsinventare für Kohlenstoffdioxid (CO <sub>2</sub> ), Feinstaub (PM) und Stickoxide (NO <sub>x</sub> ) auf Basis der Fahrleistungen unterschiedlicher Fahrzeugklassen: $EI_{Poll} = \sum_{m=1}^M [FL_m * EF_m]$	HBEFA, MiD	$gr$

#### *Begriffsbestimmung und Abgrenzung von ODM im urbanen Mobilitätskontext*

*On-Demand Mobilität* versteht sich als ein innovatives, bedarfsgesteuertes Mobilitätsangebot. Im Vordergrund steht dabei, durch die Nutzung von Echtzeit-Informationen (wie beispielsweise standortbezogener Daten), den Nutzern ein individuelles Mobilitätserlebnis zu ermöglichen. In der Regel erfolgen die, in einer App integrierte, Reservierung, Buchung und Zahlung einer Fahrt oder eines Fahrzeugs unmittelbar vor Reisebeginn über das Smartphone des Nutzers (vgl. Shaheen et al., 2017; Mogge, 2018). Dabei fördert ODM durch die Nutzung neuer Technologien multimodale Konnektivität und führt durch die Schaffung von Alternativen zwischen dem Besitz eines Privatfahrzeugs und der Nutzung des ÖPNV zu einer Erweiterung der bestehenden Mobilitätsangebote. Weiterhin folgt Shaheen et al. (2017) zufolge die Vision von ODM drei übergeordneten Leitprinzipien:

- Kundenzentriertheit durch individuelle Mobilitätsangebote,
- datenbasiert und plattformunabhängig,
- multimodal und nicht auf ein Verkehrsmittel festgelegt.

Da die existierenden Angebotsformen von ODM in der entsprechenden Fachliteratur sowie bei den Anbietern selbst, nicht eindeutig definiert und begrifflich zugeordnet werden, ist es zwingend erforderlich, die in der Literatur und der praktischen Anwendung genutzten Begriffe eindeutig zu definieren und voneinander abzugrenzen. Die nachfolgende Tabelle 18 bietet daher eine Zusammenfassung und Charakterisierung bestehender ODM Angebote und nennt Beispiel-Unternehmen der Angebotsformen im Untersuchungsgebiet München.

Tabelle 18: Zusammenfassung ODM-Angebotsformen in München (eigene Darstellung)

ODM-Angebotsform	Ausprägungsform	Service-Definition und Charakteristik	ODM-Angebote in München	Fahrzeuglenker	Festlegung Fahrziel	Weitere Bezeichnungen in Literatur
Car Sharing	Free-Floating	Diese durch einen Service-Operator betriebene Car Sharing Angebotsform ermöglicht es dem Nutzer, in einem eindeutig definierten Geschäftsgebiet Fahrzeuge zu nutzen und vollflexibel wieder abzustellen. Die Fahrzeug-Reservierung, -buchung und -nutzung erfolgen in der Regel über das Smartphone des Nutzers, welcher über IKT auf Echtzeit-Informationen zu Standort und Verfügbarkeit der einzelnen Fahrzeuge aus der Flotte zugreifen kann.	DriveNow, Car2go, SixtShare	Car Sharing Nutzer	Car Sharing Nutzer	-
	Station-Based	Beim Station-Based Car Sharing können die Fahrzeuge an hierfür vorgesehenen Stationen abgeholt und wieder abgegeben werden. In der Fachliteratur und der gängigen Praxis wird häufig weiterhin in Station-Based Round-Trip oder Station-Based One-Way Car Sharing unterteilt.	DB Flinkster, STATAUTO	Car Sharing Nutzer	Car Sharing Nutzer	-
	Peer-2-Peer	Peer-2-Peer (P2P) Car Sharing wird in zwei unterschiedliche Ausprägungsformen unterschieden. Zum einen gibt es die nicht-kommerzielle, gemeinschaftliche Nutzung von Privat-Fahrzeugen in einer Community (oder einem definierten Teilnehmerkreis) und zum anderen das auf einer Plattform basierende P2P Car Sharing. Grundsätzlich handelt es sich bei den vermieteten Fahrzeugen immer um Privatfahrzeuge.	Snappcar, Getaround, Turo	Car Sharing Nutzer	Car Sharing Nutzer	-
Car Pooling	Car Pooling wird definiert als eine nicht-kommerzielle Mitnahme weiterer Personen auf einer Fahrt, die ohnehin stattfinden würde. Der Fahrzeughalter bestimmt dabei im Vorfeld das Fahrtziel und den entsprechenden Fahrtverlauf. Die Fahrt findet unabhängig davon statt, ob Mitfahrer mitkommen (vgl. Randelhoff, 2014). Da es sich beim Car Pooling ausschließlich um nicht-kommerzielle Fahrten handelt, zahlen die Mitfahrer in der Regel nur einen Anteil, der für die Fahrt angefallenen Kosten (zum Beispiel in Form einer Benzinkostenbeteiligung).	BlaBlaCar, RideBee	Fahrzeugbesitzer	Fahrzeugbesitzer	Ride Sharing, Van Pooling	
Car Rental	Operator Based / Peer-2-Peer	Car Rental umfasst das Angebot aller klassischen Autovermietungen, bei denen ein Fahrzeug über einen definierten Zeitraum angemietet werden kann. Die Mietdauer kann dabei unterschiedlich lange zwischen wenigen Stunden bis hin zu mehreren Wochen betragen.	Sixt, Avis, Hertz	Car Rental Nutzer	Car Rental Nutzer	-
Ride Hailing	Traditionelles Taxi, Chauffeur Services	Als Ride Hailing werden Fahrten bezeichnet, welche der kommerziellen Personenbeförderung dienen. Der Fahrer richtet sich bei der Fahrt ausschließlich nach dem Fahrtwunsch des Fahrgastes, ohne welchen die Fahrt nicht zustande kommen würde. Bei einer Ride Hailing Fahrt handelt es sich demnach um eine ununterbrochene, personalisierte, hochflexible Mobilitätsdienstleistung von Tür-zu-Tür (vgl. Atasoy et al., 2015a; Földes & Csiszár, 2016; Miller et al., 2005).	Taxi, FreeNow, Uber (X und Black)	lizenzierter, bezahlter Fahrer	Ride Hailing Nutzer	E-Hailing, Ride Selling, Ride Sourcing, Ride Sharing
	Transport Network Companies		-	bezahlter Fahrer	Ride Hailing Nutzer	
Ride Pooling	Shared Ride	Beim Ride Pooling handelt es sich (wie auch beim Ride Hailing) um eine Form der kommerziellen Personenbeförderung, bei der nicht zusammengehörige Personen in einer Fahrt gebündelt werden können (vgl. Chen et al., 2017; Di et al.; 2018). In der Regel kombiniert dabei ein intelligenter Algorithmus Fahrtanfragen mit ähnlichen Routenverläufen in Echtzeit zu einer Fahrt.	myTaxi Match	lizenzierter, bezahlter Fahrer	Ride Pooling Nutzer	Ride Sharing, Ride Splitting, Smart Shuttle, Demand Responsive Transit
	Mikro-Transit	Beim Shared-Ride erweitern Ride Hailing Anbieter ihr Angebot um die Option, eine Fahrt mit weiteren Fahrgästen zu teilen. Microtransit-Angebote sind hingegen gezielt auf die Bündelung unterschiedlicher Fahrtanfragen ausgerichtet und stammen nicht von klassischen Ride Hailing Angeboten ab.	CleverShuttle, IsarTiger	lizenzierter, bezahlter Fahrer	Ride Pooling Nutzer	
Mikro Mobilität	Bike Sharing (FF, SB)		MVG Rad	Nutzer	Nutzer	-
	Scooter Sharing	Mikro Mobilität wird definiert als ein Mobilitätsangebot für Kurzstrecken im urbanen Raum mit kleinen, motorisierten oder nicht motorisierten Fahrzeugen, die flexibel, kurzfristig und mit sehr geringem organisatorischen Aufwand genutzt werden können (vgl. NACTO, 2019).	Call-a-Bike emmy	Nutzer	Nutzer	-
	E-Scooter Sharing		Lime, BIRD, Circ, voi.	Nutzer	Nutzer	Scooter Sharing

---

### *Marktanalyse ODM im Untersuchungsraum München*

In einer umfassenden Marktanalyse im Untersuchungsgebiet München wurden alle sechs ODM-Angebotsformen (vgl. Tabelle 18) untersucht. Die Analyse bestätigt einen starken Anbieter-Zuwachs in München in den vergangenen Jahren. Die höchste Dichte an Anbietern ist aktuell (Oktober 2019) in den Angebotsformen Car Sharing und Mikro Mobilität zu verzeichnen. Weiterhin konnte durch die gezielte Analyse bestätigt werden, dass die existierenden Angebote teilweise in einander übergehen und nicht immer trennscharf differenziert werden können (vgl. Angebote der Anbieter Sixt, FREENOW, JUMP).

Neben überwiegend privaten Akteuren treten zunehmend auch öffentliche Verkehrsunternehmen, wie beispielsweise die MVG mit dem MVG Rad oder dem Ride Pooling Service IsarTiger, in den ODM-Markt ein. Dies bedeutet, dass eine pauschale Differenzierung und Abgrenzung von ODM zum ÖPNV nicht möglich ist, sondern die Grenzen fließend ineinander übergehen.

Auf Basis der bestehenden Flottengrößen, der durchschnittlichen Auslastungen der Flotten sowie der Besetzungsgrade der ODM-Angebotsformen Free-Floating und Station-Based Car Sharing, Ride Hailing und Ride Pooling erfolgte eine Abschätzung des Anteils an der Verkehrsleistung sowie am Modal Split. Den Berechnungen zufolge beträgt der Anteil der Verkehrsleistung der genannten ODM-Angebotsformen in München circa 0,5 % der Gesamt-Verkehrsleistung. Der Anteil am Modal Split fällt mit ~1 % vergleichsweise gering aus (vgl. Kapitel 2.4.4.2).

### *Auswirkungen von ODM auf nachhaltige urbane Mobilität*

Es gibt eine Vielzahl von Studien, welche sich mit den Auswirkungen von ODM auf nachhaltige urbane Mobilität beschäftigen. Das Potential dieser Services, einen positiven Beitrag zu einer nachhaltigen Entwicklung leisten zu können, wird in der Fachliteratur überwiegend geteilt. Allerdings ist nach einer detaillierten Analyse zahlreicher relevanter Studien zur ODM-Angebotsform Car Sharing, Ride Hailing und Ride Pooling festzustellen, dass die Ergebnisse der Studien teilweise deutlich auseinander liegen. Als Gründe hierfür werden vor allem Unterschiede bei den angewandten Methoden und den betrachteten Untersuchungsgebieten angesehen.

Für die ODM-Angebotsform Car Sharing existieren zahlreiche Studien aus Nord-Amerika und Europa. Ergebnisse zur Reduktion von privaten Fahrzeugen durch Car Sharing Fahrzeuge variieren erheblich für Free-Floating Fahrzeuge zwischen 0,3 – 11,0 Fahrzeuge (Station-Based 1,8 – 15,7, vgl. Tabelle 14). Zur konkreten Auswirkung auf den Verkehrsfluss, oder die Emissionen im Stadtgebiet gibt es hingegen nur wenige belastbare Aussagen. Für ein detaillierteres Verständnis siehe Kapitel 2.4.6.1.

Der Großteil der existierenden Ride Hailing Studien stammt aus Nord-Amerika und fokussiert sich auf die Auswirkung von TNC's. Besonders im Fokus stehen die Verlagerungseffekte dieser Ride Hailing Angebote. Circa 60 % der Nutzer von TNC's substituieren demnach eine Fahrt aus dem Umweltverbund oder treten eine Fahrt an, die sie ohne TNC's nicht unternommen hätten (vgl. Tabelle 15). Demnach kommen die Studien zu dem Ergebnis, dass Ride Hailing Angebote das Verkehrsaufkommen erhöhen und somit eine negative Auswirkung auf den Verkehrsfluss haben. Im deutschen Kontext existieren keine vergleichbaren Studien. Darüber hinaus gelten die Ergebnisse aufgrund teils deutlicher Unterschiede der Stadt-Charakteristika zwischen amerikanischen und deutschen Städten (ÖPNV-System, Fahrzeugbesitzquote) als nicht direkt übertragbar. Eine detailliertere Beschreibung und Übersicht der bestehenden Studien befindet sich in Tabelle 15.

Während in der Fachliteratur zu den positiven Effekten von Ride Pooling überwiegend Einigkeit herrscht, existieren zum aktuellen Zeitpunkt noch keine fundierten Analysen über realisierte Auswirkungen bestehender Angebote. Aktuelle Prognosen bestehen in der Regel in Form von Simulationen und Modellierungen (vgl. Burns et al., 2013), die teilweise auf wirklichkeitsfernen Annahmen zur Marktdurchdringung beruhen (vgl. Jalali et al., 2017). Als Haupt-Gründe hierfür werden die fehlende Erfahrung und Marktdurchdringung von Ride Pooling Services gesehen, welche nur erfolgreich Fahrten bündeln können, wenn eine kritische Angebots- und Nachfragemenge zur Verfügung steht (vgl. Santi et al., 2014; Alonso-Mora et al., 2016). Eine Übersicht in dieser Arbeit betrachteter Ride Pooling Studien befindet sich in Tabelle 16.

In der betrachteten Literatur zum Stand der Forschung konnte keine gesamtheitliche, verkehrsträgerübergreifende Untersuchung mit einem systemischen Forschungsansatz identifiziert werden. Die aufgezeigte Literatur fokussiert sich in der Regel auf eine konkrete ODM-Angebotsform und untersucht dabei eine spezielle Auswirkung im Detail. Einen übergeordneten, explorativen Systemzusammenhang, bei dem die Auswirkungen mehrerer unterschiedlicher ODM-Angebote auf das Gesamt-Mobilitätssystem betrachtet werden, ist zum aktuellen Zeitpunkt dieser Untersuchung nicht bekannt. Basierend auf dieser identifizierten Forschungslücke fokussiert sich diese Arbeit im weiteren Verlauf auf die Konzeption und Entwicklung eines geeigneten Modells zur ganzheitlichen, systemischen Untersuchung der Auswirkungen von ODM am Beispiel der Stadt München.

---

### 3 Qualitative Expertenstudie

#### 3.1 Zielsetzung Experteninterviews

Aufbauend auf der fundierten Literaturanalyse (vgl. Kapitel 2) erfolgt in diesem Kapitel eine qualitative Vertiefung der Forschungsproblematik mit Fokus auf dem Untersuchungsgebiet der Stadt München. In diesem Zusammenhang wurden Experteninterviews mit unterschiedlichen Stakeholdern in München durchgeführt, um weitere Erkenntnisse über die bestehenden ODM-Angebote zu sammeln und ihre Auswirkungen auf eine nachhaltige Mobilität besser verstehen zu können. Weiterhin sollen durch die Interviews relevante Einflussfaktoren für die zukünftige Entwicklung von ODM-Angeboten identifiziert werden.

Den durchgeführten qualitativen Interviews lag bei der Auswertung stets ein induktiver, holistischer Ansatz zugrunde, welcher sich auf subjektive Expertenmeinungen konzentriert und nicht auf die Analyse einer repräsentativen Stichprobe abzielt. Ziel ist es somit nicht, allgemeingültige Gesetzmäßigkeiten abzuleiten, sondern vielmehr von einzelnen Fällen auf übertragbare Aussagen zu schließen. Auch, wenn die Anwendung solcher qualitativen Methoden in den Verkehrswissenschaften lange Zeit eher unüblich war, so zeigen bestehende Arbeiten der vergangenen Jahre den Mehrwert und Erkenntnisgewinn, der durch trans- und interdisziplinäre Ansätze generiert werden kann (vgl. Deffner, 2009; Leben, 2016).

In diesem Sinne soll die qualitative Expertenstudie dazu beitragen, vorhandenes Wissen aus der bestehenden Literatur zu ergänzen, indem sie die befragten Experten und deren Sichtweisen explizit in den Fokus setzt und so zu einem tiefergehenden Verständnis der Wirkzusammenhänge im Spannungsfeld ODM und nachhaltiger urbaner Mobilität beiträgt. Als Ergebnis dieser qualitativen Studie sollen weiterhin potentielle Variablen aufgestellt werden, welche den Sichtweisen der Experten zufolge einen Teil des holistischen Gesamtsystems der Forschungsthematik darstellen.

Der qualitative Forschungsansatz kann folgend in fünf Abschnitte unterteilt werden (siehe Abbildung 17) (vgl. Bengtsson, 2016).



Abbildung 17: qualitativer Forschungsansatz der Expertenstudie (eigene Darstellung, in Anlehnung an Bengtsson, 2016)

### 3.2 Planung - Halbstrukturierte Interviews

Für die Durchführung der Studie wurde ein halbstrukturierter Interviewleitfaden ausgewählt (Döring et al., 2016). Dieser besteht aus einem Katalog offener Fragen, „zu denen sich die Befragungspersonen in eigenen Worten äußern sollen. Der Leitfaden gibt die Fragen und ihre Reihenfolge vor, erlaubt aber den Interviewenden je nach Interviewsituation in gewissen Grenzen individuelle Anpassungen. So können Fragen vorgezogen, übersprungen oder vertieft werden, um den Interviewfluss am Laufen zu halten.“ (vgl. Döring et al., 2016, S. 358).

Der Aufbau des Interviewleitfadens unterteilt sich nach einer kurzen Einführung in drei inhaltliche Themenblöcke: das Thema selbst, die Erläuterung der Zielstellung dieser Studie und die Aufnahme allgemeiner Informationen der Befragungsperson.

Der erste Themenblock umfasst Fragen zum allgemeinen Verständnis von ODM sowie den zugrunde liegenden Mobilitätsbedürfnissen und -präferenzen der Nutzer. Dieser Schritt ist notwendig, da die Definition von ODM in der Literatur und im Verständnis verschiedener Stakeholder-Perspektiven stark variiert. Im zweiten Themenblock werden mögliche Einflussfaktoren und Rahmenbedingungen untersucht. Der dritte Themenblock fokussiert das Verständnis nachhaltiger urbaner Mobilität und untersucht die Auswirkungen von ODM auf diese.

Als Ergebnis stellt der Interviewleitfaden mit insgesamt elf Teilfragen sicher, dass alle relevanten Themen in vergleichbarer Weise behandelt werden. Weiterhin wurden die Fragen sehr offen formuliert, um den Bereich für die Erfassung neuer Informationen so groß wie möglich zu halten. Hierdurch war es möglich, den interviewten Personen bei ihren Antwortmöglichkeiten maximale Offenheit zu gewähren und die verschiedenen Blickwinkel der unterschiedlichen Stakeholder aufnehmen zu können. Der vollständige Interviewleitfaden befindet sich im Anhang 6.

### 3.3 Stichprobe

Aufgrund der Vielschichtigkeit der Begriffe (ODM und nachhaltiger urbaner Mobilität), wurde bei der Stichprobe explizit darauf geachtet, das breite Spektrum bestehender Stakeholder zum Untersuchungsgegenstand abzubilden. Aus diesem Grund wurden Experten aus den Bereichen Automotive, städtische Vertreter, Wissenschaftler, ODM-Anbieter und weitere Institutionen, wie beratende Einrichtungen und Nichtregierungsorganisationen (NGO), in die Stichprobe integriert. Alle diese Bereiche sind in der Stadt München an der Entwicklung und Integration zukünftiger ODM-Angebote beteiligt. Abbildung 18 bietet einen Überblick über die Verteilung der Stichprobe über die fünf Bereiche. Insgesamt wurden 15 Interviews ausgewertet.

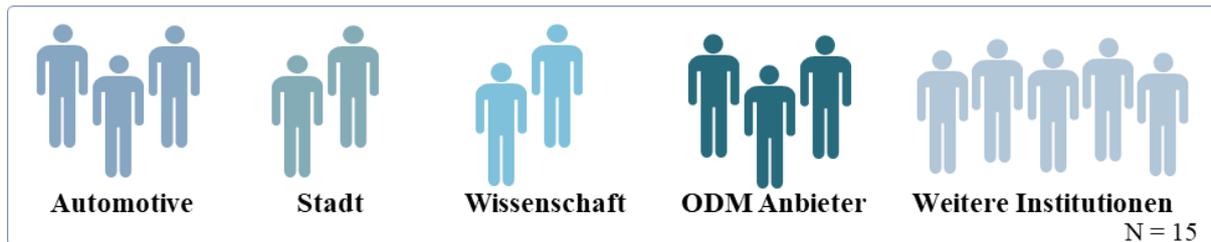


Abbildung 18: Stichprobe qualitative Expertenstudie (eigene Darstellung)

### 3.4 Implementierung und Transkription

Vor der Durchführung der Interviews wurde der aufgestellte Interviewleitfaden zunächst einem Pretest unterzogen. Hierbei konnten die dafür vorgesehenen Fragen auf Probleme in der Verständlichkeit, der Plausibilität und der Qualität überprüft werden. Für die Durchführung wurden drei Personen mit entsprechendem Fachwissen einem Pretest-Interview unterzogen. Nachfolgend wurden die Pretest-Interviews analysiert und die Formulierung der Fragen sowie deren inhaltliche Absicht mit der Befragungsperson diskutiert. Somit konnten bereits vor der Datenerhebung wichtige Erkenntnisse über eventuell auftretende Probleme während des Interviewverlaufs gewonnen werden (vgl. Flick et al., 2014). Als Ergebnis wurde nach dem Pretest eine weitere Frage in die Untersuchung einbezogen und die Formulierung von zwei Fragen verändert, da diese zu spezifisch gestellt waren und die Befragten in der Auswahl ihrer Antwortmöglichkeiten zu sehr einschränkten. Die Pretest Ergebnisse wurden aufgrund der Anpassung des Fragebogens nicht in die Stichprobe einbezogen.

Auf Basis des angepassten Interviewleitfadens wurde die finale Stichprobe kontaktiert, um einen Interviewtermin zu vereinbaren. Der Erstkontakt verlief dabei in der Regel über eine E-Mail, und in vereinzelt Fällen auch durch einen Anruf.

Die eigentliche Durchführung der Interviews erfolgte zum Großteil an der Arbeitsstätte der interviewten Experten. Lediglich in zwei Fällen erfolgte das Interview aufgrund größerer Entfernungen telefonisch. Die Interviews dauerten zwischen 30 und 120 Minuten.

Nach einer kurzen gegenseitigen Vorstellung wurden die teilnehmenden Experten über den Hintergrund und Ablauf des Interviews, die Freiwilligkeit der Angaben, die Verwendung der Daten und die Anonymisierung informiert. Weiterhin wurden sie nach ihrem Einverständnis zur Audioaufzeichnung gefragt, welcher alle Experten zustimmten. Das Interview erfolgte auf Basis des Interviewleitfadens. Dabei wurde sichergestellt, dass alle Fragestellungen abgehandelt und die Fragen durch die Experten inhaltlich verstanden wurden. Nach Abschluss des Interviews wurden nach Bedarf Notizen aufgezeichnet, um weitere Informationen über das Interview und Auffälligkeiten während des Interviewprozesses zu erfassen (vgl. Kuckartz & Grunenberg, 2013).

Weiterhin wurden alle aufgezeichneten Audioaufnahmen im Anschluss an die Interviews vollständig transkribiert, um eine detaillierte Grundlage für die weiteren Auswertungen zu erhalten. Die Transkription erfolgte in Anlehnung an die Transkriptionsregeln nach Dresing & Pehl (2015). Nicht transkribiert wurden vereinzelte Exkurse, bei denen sich die Experten weit vom eigentlichen Forschungsgegenstand entfernten. Weitere Sprecherwechsel und Beiträge ohne Relevanz wurden durch „(...)“ für den Experten, beziehungsweise „[...]“ für den Interviewenden gekennzeichnet. Die erstellten Transkripte wurden anschließend in das Programm MaxQDA 12 für die weitere Auswertung importiert. Zudem wurde eine Zeilennummerierung eingefügt.

### 3.5 Auswertung mittels qualitativer Inhaltsanalyse

Die Auswertung des transkribierten Interviewmaterials erfolgte in einem zweiteiligen Prozess. Auf der einen Seite wurden die Aussagen der Experten gewissenhaft durchgearbeitet und somit ein qualitativer Zusammenhang zu der Problemstellung geschaffen (vgl. Kapitel 3.6.1, 3.6.2 und 3.6.3). Auf der anderen Seite erfolgte eine Strukturierung des Datenmaterials auf Basis einer qualitativen Inhaltsanalyse nach Mayring (2010). Dieser qualitative Analyseansatz eignet sich durch seinen regelgeleiteten Charakter besonders für die Auswertung leitfadengestützter Interviews und sorgt für eine klare Strukturierung des erhobenen Datenmaterials. Ziel des explorativen Ansatzes ist es, Zusammenhänge aus dem Material herauszuarbeiten. Dabei liegt keine abgeschlossene, zu testende Theorie zugrunde, vielmehr orientiert und begrenzt sich der Ansatz am Forschungsgegenstand selbst. Die Analyse wurde computergestützt mit dem qualitativen Daten- und Textanalyse-Programm MaxQDA 12 durchgeführt. Über die unterschiedlichen Anzeige- und Sortierfunktionen des Programms konnte sichergestellt werden, den Überblick im Kodierungsprozess zu behalten (vgl. Kuckartz & Grunenberg, 2013).

Zum aktuellen Zeitpunkt existiert in der Literatur eine Vielzahl von modifizierten Varianten der qualitativen Inhaltsanalyse (vgl. Burnard, 1991; Downe-Wambolt, 1992), „letztendlich muss die Analyse gegenstandsangemessen und vor allem transparent und nachvollziehbar sein“ (vgl. Sterzer, 2017, S. 76). Weiterhin basieren alle unterschiedlichen Ausprägungen auf einem systematischen, regelgeleiteten und interpretativen Vorgehen bei der Kodierung und Kategorisierung relevanter Textstellen (vgl. Schreier, 2014).

Die Unterschiede bei den verschiedenen Ausprägungsformen liegen in der Reihenfolge der Analyseschritte sowie in der Art und Weise, wie die Forscher die Daten betrachten und anschließend konzeptualisieren. Basierend auf einer fundierten Analyse bestehender Ausprägungsformen identifizierte Bengtsson (2016) vier Hauptstufen für den Analyse-Prozess. Einen Überblick über die vier Stufen bietet die Abbildung 19. Um die Nachvollziehbarkeit und Transparenz der Analyse zu gewähren, werden die vier Stufen des Analyse-Prozesses folgend kurz beschrieben.

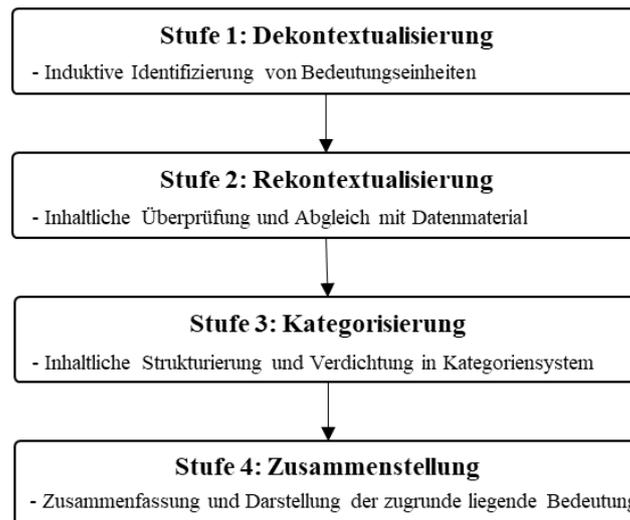


Abbildung 19: Haupt-Stufen im Analyse-Prozess der qualitativen Inhaltsanalyse (eigene Darstellung, in Anlehnung an Bengtsson, 2016)

Bei der *Dekontextualisierung* werden die vorhandenen transkribierten Interviewprotokolle induktiv durchgearbeitet, was bedeutet, dass das inhaltliche Erschließen rein aus dem vorliegenden Datenmaterial heraus erfolgt. Hierbei werden alle relevanten Textstellen, die einen Zusammenhang zu dem Forschungsgegenstand aufweisen, markiert und mit einer Bedeutungseinheit (meaning unit) versehen. Nach Bengtsson (2016) repräsentieren diese Bedeutungseinheiten die kleinsten möglichen Analyseeinheiten, welche später zu unterschiedlichen Codes und Kategorien zusammengefasst werden. Darüber hinaus ist es wichtig, dass die Bedeutungseinheiten in Bezug auf den Kontext verständlich sind. In der vorliegenden Analyse der 15 transkribierten Interviews wurden insgesamt 415 Textstellen markiert und als Bedeutungseinheit identifiziert.

Im folgenden *Rekontextualisierungsprozess* wurde geprüft, ob alle Aspekte des Inhalts in Bezug auf den Forschungsgegenstand abgedeckt wurden (vgl. Burnard, 1991). Hierfür wurde das Interviewmaterial wiederholt durchgearbeitet und mit der Liste der vorliegenden Bedeutungseinheiten abgeglichen.

Im Anschluss startet der *Kategorisierungsprozess*. Hierbei werden die bestehenden Bedeutungseinheiten durch die Einführung von Codes, Subkategorien und Hauptkategorien in der Regel induktiv verdichtet. Ziel ist es, vorhandene Erkenntnisse aus dem Datenmaterial herauszufiltern und systematisch zu beschreiben. Die vorhandenen Codes, Unter- und Haupt-Kategorien werden demnach in Form eines Kategoriensystems organisiert (vgl. Abbildung 20).

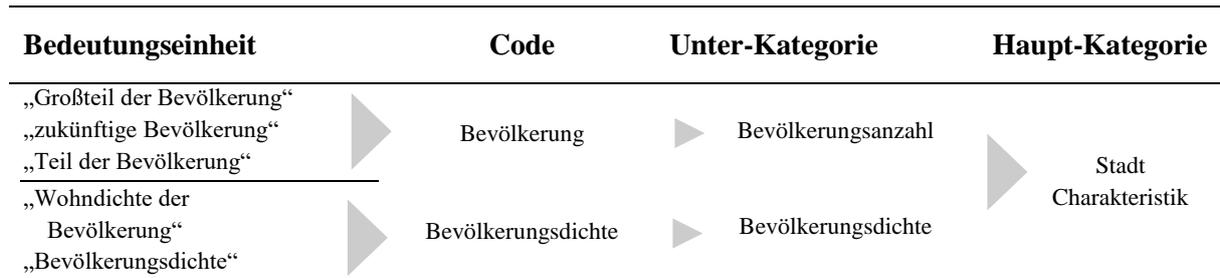


Abbildung 20: Beispiel des Kategorisierungsprozesses (eigene Darstellung)

Analog zu dem Beispiel in Abbildung 20 wurden zunächst die einzelnen Bedeutungseinheiten in entsprechend 291 Codes überführt (vgl. offene Kodierung<sup>20</sup>). Hierbei wurde explizit darauf geachtet, den Text zu komprimieren, ohne dass wichtige Informationen verloren gehen. Im darauffolgenden Schritt wurden inhaltlich verwandte Codes zu einer gemeinsamen Unter-Kategorie zusammengeführt. Insgesamt wurden im Kategorisierungsprozess 33 Unter-Kategorien gebildet, welche abschließend in sieben Haupt-Kategorien eingeteilt wurden. Dieser iterative Prozess wurde mehrfach wiederholt und angepasst, wobei am Ende sieben unterschiedliche Haupt-Kategorien blieben, von denen sich zwei auf das Angebot und die Nachfrage von ODM konzentrieren, vier Haupt-Kategorien auf die Einflussfaktoren und Rahmenbedingungen eingehen und eine Kategorie nachhaltige urbane Mobilität zusammenfasst (vgl. selektive Kodierung<sup>21</sup>). Wie in der Literatur beschrieben, gilt der Kategorisierungsprozess als abgeschlossen, wenn eine schlüssige Erklärung und Struktur der bereitgestellten Daten erreicht wurde (Bengtsson, 2016).

In der Literatur werden in einigen Fällen die Codes auch deduktiv vorgegeben oder bereits ihren entsprechenden Unter- oder Haupt-Kategorien zugeordnet. In der Analyse dieser Arbeit erfolgt die Auswertung jedoch einzig induktiv aus dem bestehenden Material heraus (vgl. Mayring, 2010; Kuckartz, 2014).

Im abschließenden *Zusammenfassungs-Prozess* der Analyse werden die herausgearbeiteten Codes, Unter- und Haupt-Kategorien in Form von Abbildungen oder auch tabellarisch dargestellt. Für den Leser ist es somit möglich, einen schnellen Überblick über die Ergebnisse zu bekommen (Bengtsson, 2016). Weiterhin können in diesem Prozess-Schritt die Ergebnisse der Analyse bezüglich ihrer Plausibilität diskutiert werden. Ein zusammenfassender Überblick über die Analyse-Ergebnisse erfolgt in Kapitel 3.6.4. Eine vertiefende Diskussion der Ergebnisse erfolgt hingegen in den Kapiteln 3.6.1; 3.6.2 und 3.6.3.

<sup>20</sup> Beim offenen Kodieren werden die zu analysierenden Dokumente in kleine Sinneinheiten segmentiert. Auf diese Weise können aus einem Datensegment unterschiedliche Codes / theoretische Konzepte generiert werden. Das offene Kodieren des Materials läuft auf eine lange Codeliste hinaus, wobei manche Codes bereits provisorisch zu übergeordneten bzw. abstrakteren Kategorien gebündelt werden können. (vgl. Döring et al., 2016).

<sup>21</sup> Beim selektiven Kodieren wird schließlich auf die ausgewählte Kern-Kategorie fokussiert: Ihre Unter-Kategorien, Haupt-Kategorien und Interrelationen werden detailliert am Material herausgearbeitet. Das im Zuge des Kodierens erstellte theoretische Modell wird auf diese Weise finalisiert und zudem oft grafisch dargestellt. (vgl. Döring et al., 2016).

---

## 3.6 Empirische Ergebnisse

### 3.6.1 Verständnis ODM und Mobilitätspräferenzen der Nutzer

Neben der Herausarbeitung einer klaren Struktur aus dem gegebenen transkribierten Datenmaterial ist es das Ziel dieser Auswertung, die Wirkzusammenhänge zwischen den thematischen Haupt-Kategorien näher zu betrachten und qualitativ herauszuarbeiten.

Der erste inhaltliche Teil des Interview-Leitfadens orientiert sich an dem allgemeinen Verständnis der befragten Experten von ODM. Die abgebildete Wortwolke gibt folgend einen Überblick darüber, welche Begriffe vermehrt in den durchgeführten Interviews zu dem Bereich ODM assoziiert wurden. Die Schriftgröße der Begriffe steht dabei als Orientierung für die Häufigkeit der jeweiligen Nennung.



Abbildung 21: Wortwolke Expertenverständnis ODM (eigene Darstellung)

Neben der Aufzählung unterschiedlicher ODM-Angebotsformen wurden auch explizit Service-Charakteristika durch die Experten angesprochen und zugeordnet. So wird ODM beispielsweise als Mobilität ohne Besitzverpflichtung verstanden, welche transaktionsbasiert abgerechnet wird und nicht fahrplan- und linienbezogen ist:

» *On-Demand Mobilität generell für mich bedeutet quasi keine Besitz-Verpflichtung, quasi „Mobilität in Realtime“. Das heißt ich biete in irgendeiner Art und Weise, über eine App oder Website oder wie auch immer, Mobilität an [...], und unterhalte die dann transaktionsbasiert abgerechnet* « (Herr A., ODM-Provider; Zeile 10-13)

Ein anderer Teilnehmer charakterisiert ODM wie folgt:

» *On-Demand Mobilität ist für mich eine Form der Mobilität, die nicht fahrplan- und linienbezogen ist. [...]* « (Herr B., Berater; Zeile 58-59)

In den Interviews wurden alle in der Literatur bestehenden Angebotsformen (vgl. Abbildung 11) durch die Experten genannt, häufig bezogen sich diese im weiteren Verlauf des Interviews fast ausschließlich auf die Angebotsform Ride Pooling. Bei der Zuordnung von Ride Hailing und Ride Pooling Angeboten in den übergeordneten Bereich von ODM kam es, wie bereits in

der Literatur (vgl. Kapitel 2.4.2.5), zu vereinzelt Definitionsschwierigkeiten. Nicht vollständig einig waren sich die Experten beispielsweise bei der Abgrenzung von ODM-Angeboten zu klassischen Taxi-Dienstleistungen oder zu neuartigen Angeboten des ÖPNV:

- » *Man könnte [...], wenn man den Begriff weiter fasst, ein Taxi auch als On-Demand Dienstleistung fassen, sodass das Unterscheidungskriterium an der Stelle sozusagen der Besetzungsgrad und die Sammeltätigkeit ist* « (Herr C., NGO; Zeile 30-32)
- » *... es gibt natürlich fließende Übergänge, Anrufsammeltaxis sind ja auch Taxis die ein Angebot des öffentlichen Verkehrs zu Schwachlastzeiten bieten, oder im ländlichen Bereich sind, die sind schon ein On-Demand Angebot des öffentlichen Verkehrs.* « (Herr D., NGO; Zeile 34-36)

Das allgemeine Verständnis und die Definition der Experten besitzt in Bezug zu den wissenschaftlichen Erkenntnissen aus der Literatur (vgl. Kapitel 2.4) eine große Schnittmenge. Bestehende Definitionsprobleme bei der Terminologie unterschiedlicher Services treten sowohl in der Literatur als auch unter den Experten auf. Weiterhin besteht Einigkeit zu der Nutzung von Echtzeit-Informationen sowie einem einfachen, bequemen und komfortablen Zugang zu den Services.

Das größte disruptive Potential sehen die Experten in der ODM-Angebotsform Ride Pooling. Hier sind sie überwiegend der Meinung, dass Ride Pooling das Potential zu einer starken Veränderung des urbanen Mobilitätssystems hat:

- » *Meines Erachtens das größte disruptive Potential, wenn Sie sich diese Transportmodi anschauen, hat das Shuttle<sup>22</sup> und wir sprechen hier von einer Gefäßgröße von 8 – 15.* « (Herr B, Berater; Zeile 80-81)
- » *Insofern sagen nicht nur wir, sondern auch die Statistiken, dass das Thema Fahrtbündelung über Ride Sharing<sup>23</sup> das absolut größte Potential hat.* « (Frau E., ODM Provider; Zeile 42-43)

Ein weiterer Experte bezieht das Disruptionspotential auf das Business-Potential der Angebotsform. Er beschreibt, dass die skalierbarsten Modelle mit dem größten disruptiven Potential, dem Ansatz von Uber und lyft folgen, bei dem der Anbieter nicht zwingend eigene Flotten besitzen muss:

- » *Ich sehe auch ehrlich gesagt nicht zwingend diesen Mehrwert, jetzt Flotten selber zu besitzen, weil das kann man kaufen, das Know-how in dem Bereich liegt eher sozusagen in der massiven Kunden-Skalierbarkeit und in der massiven Revenue Optimierung über Algorithmen, also wann setze ich wieder irgendwelche Preise an.* « (Herr A., ODM Provider; Zeile 45-48)

<sup>22</sup> In dieser Arbeit definiert als Microtransit der ODM-Angebotsform Ride Pooling, vgl. Kapitel 2.4.2.5

<sup>23</sup> In dieser Arbeit definiert als Ride Pooling, vgl. Kapitel 2.4.2.5

Neben der Erfassung unterschiedlicher Sichtweisen der Experten zu dem Bereich ODM dient der erste Teil des Interview-Leitfadens auch dazu, ein vertiefendes Verständnis über die zugrunde liegenden Mobilitätspräferenzen bei der Nutzung von ODM-Angeboten zu erlangen. Wie in Abbildung 22 zu sehen ist, sind Zeit, Kosten und die Verlässlichkeit des Angebots, gefolgt von Komfort, Verfügbarkeit, Flexibilität und Erreichbarkeit den Expertenmeinungen zufolge die Hauptkriterien bei der Nutzung von ODM-Angeboten. Convenience, Privatsphäre, Nachhaltigkeit und Erlebniswert des Angebotes werden auch als wichtig eingeschätzt, nehmen aber im Vergleich zu den anderen Kriterien eine untergeordnete Rolle ein. Nachfolgend werden einige Expertenaussagen aufgeführt, um die zugrunde liegende Struktur und die Zusammenhänge besser einordnen zu können.

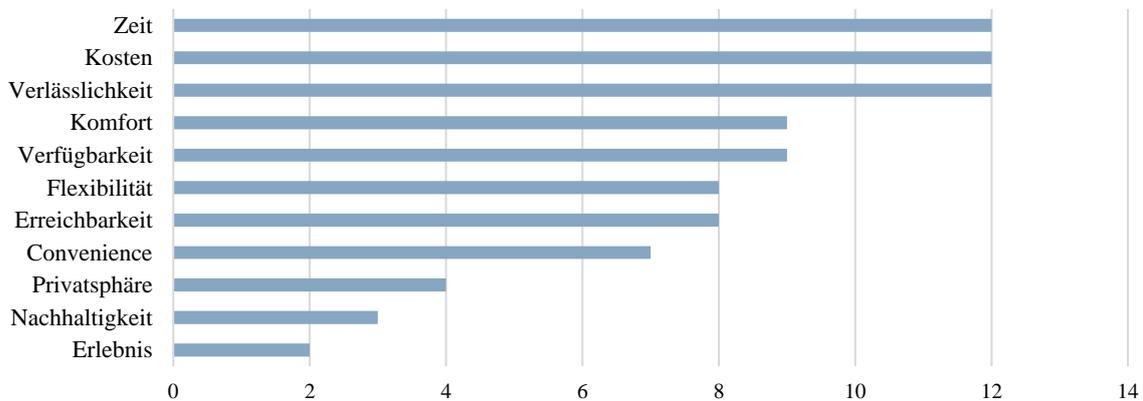


Abbildung 22: Mobilitätspräferenzen bei Nutzung von ODM-Angeboten (eigene Darstellung)

Während insbesondere Zeit und Kosten im direkten Vergleich mit anderen, bestehenden Optionen konkurrieren und für die Nutzer einfach und transparent abrufbar sind, liegt den Meinungen der Experten zufolge zwischen der Verlässlichkeit und der Verfügbarkeit eines Angebots ein enger Zusammenhang zugrunde:

- » *Also für uns ganz klar, und ich glaube das ist auch für jedes On-Demand Modell ein Thema, ist das Thema Verfügbarkeit, also der Kunde entscheidet sich für ein Modell, wo er entweder das Gefühl hat, dass er eine sehr hohe Verfügbarkeit garantiert hat, oder wo er tatsächlich auch eine hohe Verfügbarkeit hat.* « (Herr A., ODM Provider; Zeile 50-53)
- » *Und wenn ich die Erfahrung mache, dass ich dieses Fahrzeug auch immer finde, wenn ich eins brauche. Wo es auch keine Option ist zu sagen, acht- von zehnmal findest du es, und zweimal leider nicht, dann kommst Du eben zu spät zu deinem Meeting oder kannst deine Kinder nicht in die Schule bringen, das ist keine verlässliche Option. Das heißt, da müssen wir hinkommen. Dass wir diese hundertprozentige Verfügbarkeit und Verlässlichkeit gewährleisten.* « (Herr F., Automotive; Zeile 101-106)

Weiterhin stellt die Erreichbarkeit des Angebots für die Experten ein wichtiges Kriterium dar, welche durch die Service-Eigenschaften direkt beeinflusst werden kann:

- » *Wir mussten ein Modell finden, was sich so anfühlt, als ob das Auto vor der Haustür steht und dafür, ob es jetzt das Eigene, oder Irgendeins ist, muss die Größe, oder die Anzahl der Flotte natürlich groß genug sein. Da hat man damals berechnet, naja es fühlt sich etwas bei mir an, wenn es weniger als 300 Meter weg ist. Das kommt ein bisschen aus einer Studie, die man ein bisschen für die Auslegung des ÖPNV genutzt hat. Die besagt, dass die Entfernung zum nächsten Zugangspunkt ganz stark die Akzeptanz des Verkehrsmittels exponentiell beeinflusst und da ist so ein ganz guter Richtwert 300 Meter. Wir haben sozusagen so versucht, die Autos zu platzieren, und die Flottengröße so zu wählen, dass es zumindest statistisch alle 300 Meter da ist. Und das psychologisch nun auch noch zu unterstützen, haben wir auch gesagt, unsere Autos stehen nie in Tiefgaragen oder irgendwo drin, also die müssen sichtbar im Stadtbild sein, damit man das Gefühl hat.* « (Herr G., Automotive; Zeile 93-103)

Dieses Beispiel eines Free-Floating Car Sharing Anbieters kann natürlich nur begrenzt auf die ODM-Angebotsformen des Station-Based Car Sharing, Ride Hailing oder Ride Pooling übertragen werden, da hier keine Fahrzeuge flexibel in einem definierten Geschäftsgebiet abgestellt werden und die Nutzer von Ride Hailing und Ride Pooling das Fahrzeug nicht selber fahren, sondern durch einen Fahrer befördert werden (vgl. Kapitel 2.4.2.4 und 2.4.2.5). Bezogen auf die Verfügbarkeit, Verlässlichkeit und Erreichbarkeit des Angebotes lässt sich aber ableiten, dass die Serviceeigenschaften so ausgewählt werden müssen, dass den Kriterien ausreichend Sorge getragen wird. In der Regel erfolgt dies angebotsübergreifend über die Bestimmung eines geeigneten Geschäftsgebietes und einer hierfür entsprechenden Flottengröße (von Peinen et al., 2018).

Weiterhin werden durch die Experten ein einfacher und komfortabler Zugang zum Angebot sowie in der Durchführung und Nutzung der Services als wichtig angesehen. Hier werden laut Expertenmeinungen klare Vorteile in den ODM-Angeboten im Vergleich zum ÖPNV oder auch dem eigenen Auto gesehen:

- » *Ich habe keine Lust mich zu informieren, wo ein Fahrplan ist. Ich habe keine Lust zu warten, ich habe keine Lust mit 10.000 Leuten in einer schlecht beheizten U-Bahn zu stehen und mir da die Grippe zu holen, ich habe keine Lust unter der Erde rum zu fahren*« (Herr H., Stadt München; Zeile 82-84)
- » *Sie müssen sich um nichts mehr kümmern. Sie müssen sich nicht darum kümmern, dass das Auto, dass die Reifen gewechselt werden, dass man zum TÜV geht, dass man mal wieder eine Schramme ran gefahren hat oder irgendjemand anderes den Spiegel abgefahren hat, dieses ganze Zeug, das man bei dem privaten Auto halt auch an Pflichten hat, das entfällt ja alles in einem On-Demand System komplett.* « (Herr F., Automotive; Zeile 128-132)

Wie schon in der Aussage von Herrn H. (Zeile 82-84) ersichtlich, stellt die Privatsphäre für viele Nutzer der Services ebenfalls einen hohen Mehrwert dar. Einige Experten verstehen das Thema Privatsphäre sogar als Erlebnis:

---

» *Ich finde schon, wenn wir heute über Mobilität sprechen, dass wir viel zu wenig sachlich argumentieren, wir sagen: es ist drei Cent billiger und wir sind zwei Sekunden schneller. Aber Mobilität ist ein Erlebnis und irgendwo allein drin zu sein, für sich allein ist schon ein Erlebnis, also nicht zu sagen, ich stehe da ewig im Stau, ich meine ich habe noch nie im Stau gestanden. Ich habe immer gemütlich gesessen, also wirklich in einem eigenen Auto zu sitzen, wo ich auch eine Telefonkonferenz halten kann, das ist schon was wert, das muss man auch berücksichtigen* « (Herr G., Automotive; Zeile 123-128)

Lediglich bei den Angebotsformen mit mehreren Nutzern in einem Fahrzeug (Car Pooling und Ride Pooling) sehen die Experten Verbesserungspotential in dem Service-Angebot.

» *Selbst, wenn ich den Algorithmus so gut mache, dass ich jetzt nicht irgendwie dreimal stoppe und sich die Reisezeit irgendwie verdoppelt, wie gehe ich trotzdem dann damit um, dass da drei Leute im Auto sitzen, die ich gar nicht kenne, kann ich das inhaltlich so machen, dass es vielleicht gar nicht so schlimm ist? Ja zum Beispiel im Flieger, in der First Class finde ich jetzt auch gar nicht so schlimm und es ist trotzdem Premium, aber das ist so gemacht, ich muss mich für die Leute nicht interessieren* « (Herr G., Automotive; Zeile 129-134)

Das Kriterium der Nachhaltigkeit nimmt den Experten zufolge auch eine zunehmend wichtigere Rolle ein. ODM-Anbieter können hier die Attraktivität ihrer Angebote steigern, indem sie zum Beispiel den Anteil elektrifizierter Fahrzeuge am Flottenbestand erhöhen oder auch auf weitere Nachhaltigkeits-Kriterien Einfluss nehmen:

» *Es gibt noch eine wachsende Gruppe von Leuten, die sich auch dem Thema Nachhaltigkeit verschrieben haben, die halt insbesondere auf dem Thema der Elektromobilität unterwegs sind, ja das sehen wir auch, wir haben eine gewisse Anzahl von Kunden, die quasi nur Elektromobilität nutzen und damit fahren, was ich eigenartig finde und die auch viel fahren vor allen Dingen fast nur elektrisch. Was ich finde, bei zehn Prozent elektrischem Flottenanteil ist das schwierig, zum Teil in so einem Modell, gerade im Free-Floating das zu machen. (...) Ja das schränkt einen ein, aber was ich gerade auch erstaunlich finde, dass Leute dann auch so viel fahren mit Elektrofahrzeugen, weil die müssen dann schon lange Wege dafür in Kauf nehmen, dass sie das machen können. Also die sind wahrscheinlich sehr committed, aber das ist noch eine vergleichsweise kleinere Gruppe, zu der Gesamtheit der Nutzer.* « (Herr A., ODM Provider; Zeile 64-73)

Zusammenfassend ist festzustellen, dass das Mobilitätsverhalten der Bewohner einer Stadt von einer Reihe unterschiedlicher Faktoren abhängt, welche zu einem großen Teil durch die Serviceeigenschaften des Angebotes beeinflusst werden können. Nichtsdestotrotz konkurrieren im urbanen Mobilitätssystem ODM-Angebote immer mit anderen Optionen, wie beispielsweise dem ÖPNV, dem MIV oder auch dem eigenen Fahrrad. Im folgenden Kapitel sollen demzufolge entsprechende Rahmenbedingungen und Einflussfaktoren aus den qualitativen Interviews herausgearbeitet werden, um den Einfluss von externen Faktoren besser verstehen zu können.

### 3.6.2 Externe Einflussfaktoren und Rahmenbedingungen ODM

Der zweite inhaltliche Teil des Interview-Leitfadens (vgl. Anhang 6) bezieht sich auf die externen Einflussfaktoren und Rahmenbedingungen von ODM-Angeboten. Ziel ist es herauszufinden, welche externen Einflussfaktoren eine hohe Auswirkung auf die Entwicklung von ODM-Angeboten haben. Auf Basis der Antworten der Experten konnten vier übergeordnete Kategorien induktiv herausgearbeitet werden (vgl. Kapitel 3.6.4), welche von besonders hoher Relevanz sind. Die folgende Abbildung 23 bietet einen Überblick über die zentralen externen Einflussfaktoren und Rahmenbedingungen. Anschließend erfolgen einige qualitative Sichtweisen und Einschätzungen der Experten, um die vier Kategorien besser einordnen und verstehen zu können.

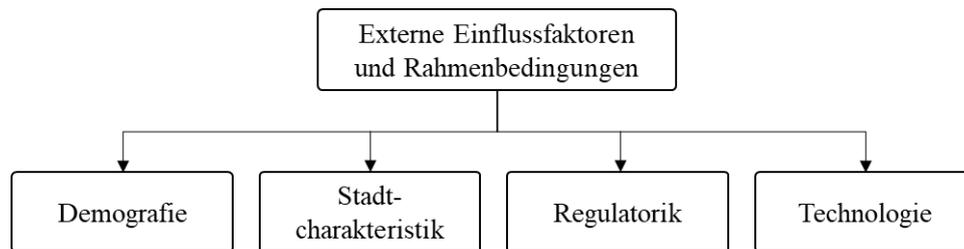


Abbildung 23: Überblick externe Einflussfaktoren und Rahmenbedingungen (eigene Darstellung)

#### *Stadt Charakteristik*

Alle befragten Experten sind eindeutig der Meinung, dass der nachhaltige Erfolg von ODM-Angeboten (essentielles Kriterium für den Betrieb der Dienstleistung) maßgeblich von der Konstellation vorliegender Stadt-Charakteristik abhängt. Hierbei wurden zum einen generelle Stadtfaktoren, wie Bevölkerungsdichte oder Siedlungsstruktur, aber auch konkrete Faktoren des vorliegenden Mobilitätssystems benannt.

- » *Wo man sich dann darüber hinaus die Frage stellt, hat die Stadt denn einen Bedarf an solchen Services? Sprich, wie viele Einwohner leben denn dort? Wie ist denn die Infrastruktur allgemein? « (Frau E., ODM Provider; Zeile 124-126)*
- » *Das heißt dieses Thema Skalierbarkeit geht dann einher mit gewissen Stadteffektoren und das bezieht sich auf eine gewisse Bevölkerungsdichte, Einkommen, Mobilitätsverhalten, Fahrzeugbesitz. « (Herr A., ODM Provider; Zeile 315-317)*

Aufbauend auf der Bevölkerungsdichte und der Siedlungsstruktur stellt sich die Frage, wie hoch die Verkehrsleistung im Untersuchungsgebiet ausfällt, also wie groß der realisierte Bedarf an ÖPNV, MIV, Fuß- und Radverkehr ist. Dieser hängt wiederum signifikant von der vorliegenden Infrastruktur ab. Experten sind der Meinung, dass die Anzahl der verfügbaren Alternativen zum Fahren mit dem eigenen PKW einen großen Einfluss auf den PKW-Besitz und eine hohe Bedeutung für den Erfolg bestehender ODM-Angebote haben. So sind sie der Meinung, dass Städte mit einer gut ausgebauten ÖPNV-Infrastruktur eine höhere Nachfrage nach ODM-Angeboten besitzen:

- 
- » *if you look at cities that have a higher or more established mass transit system. I think you are actually better suited for car sharing [...] or mobility services in general. Because it has to be about options, and sometimes you want to take a train and you don't have to worry about it, or you take the bus. But sometimes you just want to be able to just call and have-a-brake, and to take you where you want to go, while you drive there yourself, and so the more options you have in a city, the more successful on-demand mobility across all those options can be.* « (Herr I., ODM Provider; Zeile 40-46)

Mit Bezug auf die Stadt München prognostizieren die Experten weiterhin einen starken Anstieg der aktuellen Verkehrsleistung, welcher bereits heute das Mobilitätssystem vor große Herausforderungen stellt (vgl. Kapitel 2.3.1). Da dieses Verkehrswachstum aber den Einschätzungen der Experten zufolge kurz- und mittelfristig nur begrenzt mit den traditionellen Verkehrsträgern abgedeckt werden kann, stellen ODM-Angebote eine mögliche Alternative zur Personenbeförderung dar.

- » *Also zum einen wegen dem allgemeinen Trend zum Verkehrswachstum, [...] wir haben so viele Erwerbstätige in Deutschland wie nie zu vor, wir haben so viele Kinder, die zur Kita gehen, wie nie zuvor, das ist gar kein Wunder, dass die Leute sich auch bewegen müssen und zu der Spezialisierung fördert auch nicht das wohnort-nahe Arbeiten. Also der Verkehr wächst sowieso und wenn wir dann eine Verlagerung vom Auto her auf den ÖV bekommen, dann wächst er noch mehr und dann müssen wir Kapazitäten erweitern oder wir sagen halt, naja, dann ist es ja nicht so schlimm, wenn ein Teil der Leute aus dem überlaufenden ÖV auch in Fahrradverleihsysteme, oder ins On-Demand Ride Sharing aufgenommen werden können. Es darf nur nicht dazu führen, dass irgendwann uns der öffentliche Verkehr dann an Fahrgästen verliert und dann noch stärker defizitär wird mit seinen Großgefäßen, auf Routen, auf denen es effizienter ist den öffentlichen Verkehr zu nutzen.* « (Herr C., NGO; Zeile 100-110)

Darüber hinaus wird bei Verbindungen, bei denen die Vorteile des bestehenden ÖPNV Systems nicht zum Tragen kommen, ein großes Potential durch ODM-Angebote gesehen:

- » *Da wird ein öffentlicher Verkehr das niemals alleine leisten können, weil die Effekte des öffentlichen Verkehrs auf großen Achsen zum Tragen kommen, aber in der freien Verteilung, außerhalb dieser großen Achsen, nicht mehr so gut funktionieren. Aber in der Ergänzung des öffentlichen Verkehrs und genau darum geht es [...] uns auch. Wie kann man den öffentlichen Verkehr als privater Anbieter so verschränken, dass es eben keine Konkurrenz gibt und auch keine negativen Rebound-Effekte gibt, da bin ich fest davon überzeugt, das geht nur mit einem guten und holistischen On-Demand Mobilität System.* « (Herr F., Automotive; Zeile 160-167)
- » *Auf der anderen Seite, wenn wir uns jetzt Stadtgebiete anschauen, wo vielleicht die ÖPNV Verbindungen schlecht sind oder umständlich, dann sind es eigentlich Gebiete, wo man sich überlegen muss, ob es vielleicht einfacher ist, schneller und flexibler dort ODM aufzubauen als dort jetzt eine Röhre und einen Tunnel für eine U-Bahn oder S-Bahn zu legen.* « (Herr J., Automotive; Zeile 109-117)

*Regulatorik*

Neben der spezifischen Stadt-Charakteristik sind laut Experten die regulatorischen Rahmenbedingungen die Grundlage für den Betrieb und die Nutzung von ODM-Angeboten. Auf der einen Seite betrifft dies Gesetze und Vereinbarungen, welche einen direkten Einfluss auf ein ODM-Angebot haben, auf der anderen Seite können hierzu auch Gesetze und Verordnungen gezählt werden, welche ODM-Angebote nur indirekt beeinflussen. Weiterhin muss zwischen Gesetzen und Verordnungen unterschieden werden, welche sowohl auf Landes- als auch auf Stadt-Ebene bestehen.

Einen starken direkten Einfluss auf der Landes-Ebene auf die ODM-Angebotsformen Ride Hailing und Ride Pooling besitzt zum aktuellen Zeitpunkt das Personenbeförderungsgesetz. Das Gesetz aus dem Jahr 1990 gilt unter den Experten als stark veraltet (vgl. PBefG, 1990), da es die neuen Entwicklungen nicht mit abbildet und somit bei der Einführung eines neuen ODM-Angebotes zeitlich befristete Ausnahme-Genehmigungen und Erprobungsklauseln herangezogen werden müssen:

» *Das Personenbeförderungsgesetz regelt ja Ride Sharing aktuell noch überhaupt nicht. Also da gibt es keinen einzigen Paragraphen, nachdem das in irgendeiner Form genehmigt werden kann. Also sämtliche Genehmigungen, die wir beispielsweise haben, sind irgendwelche Experimentierklauseln, Erprobungsklauseln oder irgendwelche Mischformen, wo dann die kommunale Behörde gesagt hat ok, wir nehmen den und den und den Paragraphen und bauen das so zusammen, dass wir aus unserer Sicht immer noch genug Distanz zu den anderen Verkehrsanbietern haben und gleichzeitig den Dienst, so wie wir ihn unternehmen auch ermöglicht.* « (Frau E., ODM Provider; Zeile 97-104)

Es liegen bereits einige Gutachten und Empfehlungen zur Reformierung des Personenbeförderungsgesetzes vor (vgl. Karl et al., 2017). Ursprünglich sollte ein erster Vorschlag zur Modernisierung durch den Verkehrsminister Ende 2019 vorliegen. In diesem Vorschlag sollten insbesondere auch Regelungen zur Rückkehrpflicht und Daseinsvorsorge neuartiger Ride Hailing und Ride Pooling Angebote geklärt werden. Weiterhin kursieren zum aktuellen Zeitpunkt sowohl in der Wissenschaft als auch in den Medien zunehmend stärkere Diskussionen zum Reformbedarf, welche den Druck zu einer Anpassung der Gesetzeslage erhöhen.

» *Da [...] in Deutschland bestimmte Rahmenbedingungen gesetzt sind, die aber auch zumindest in der wissenschaftlichen Diskussion stark im Fokus sind. Sodass davon auszugehen ist, dass ähnlich wie bei der Elektromobilität oder Car Sharing, oder [...] autonomen Fahren dann sozusagen während der Entwicklung von solchen Angeboten auch die politisch-juristische Diskussion darüber stattfinden wird und es in irgendeinem Umfang sicherlich auch zur Anpassung kommen wird.* « (Herr C., NGO; Zeile 39-44)

Darüber hinaus müssen bei der Einführung eines ODM-Angebotes auf Stadt-Ebene Vereinbarungen zwischen dem Anbieter und der Stadt getroffen werden, die das ODM-Angebot direkt beeinflussen:

---

» *Am Anfang, klar das Thema Regulatorik, da muss man eine Lösung mit der Stadt finden, das ist natürlich die Grundvoraussetzung, wenn man so einen Service überhaupt anbieten kann. Im Ride Hailing, genauso wie im Car Sharing auch, hier gibt es dann unterschiedliche Modelle und das hat sich über die Zeit ja auch unterschiedlich entwickelt.* « (Herr A., ODM Provider; Zeile 116-120)

Ein ODM Provider beschreibt das Vorgehen dabei wie folgt:

» *Phase 1 ist Parkraum-Vertrag finden mit der Stadt und Phase 2 ist dann Rahmenbedingungen schaffen und das ist im Bereich der Infrastruktur und im Bereich der Parkplatzsituation* « (Herr A., ODM Provider; Zeile 149-150)

Bezogen auf einen Free-Floating Car Sharing Anbieter bedeutet dies, dass genau vereinbart wird, wie viele Fahrzeuge in dem definierten Geschäftsgebiet abgestellt werden dürfen und wie hoch die Kosten hierfür ausfallen. Weiterhin werden dabei eventuelle Vereinbarungen zu privilegiertem Parkraum für die ODM-Angebotsform vereinbart. Vereinbarungen für Station-Based Car Sharing erfolgen analog. Bei den Angebotsformen Ride Hailing und Ride Pooling finden in der Regel ebenfalls detaillierte Vereinbarungen zur Flottenanzahl zwischen der Stadt und dem ODM-Anbieter statt.

Ein großes Problem in diesem städtischen Regulations-Prozess wird, konkret am Beispiel der Stadt München, aktuell bei den Entscheidungsträgern im Stadtrat gesehen. Hier fehlt es einer Expertenmeinung zufolge an notwendigem Know-How und Interesse, um die Themen visionär, pragmatisch und erfolgreich aufzusetzen:

» *Ich halte momentan unsere aktuellen Politiker nicht für in der Lage, solche Themen visionär, pragmatisch, erfolgreich aufzusetzen. Es gibt einzelne, die können das, aber die meisten, jetzt unser Stadtrat zum Beispiel, da ist kein einziger Ingenieur, da ist kein einziger Planer, da ist kein einziger Geograph im Stadtrat. Bei denen, die jetzt das Sagen haben, bei den Grünen schon, aber SPD und CSU gibt es keinen einzigen Verkehrsplaner.* « (Herr H., Stadt München; Zeile 197-202)

Neben Gesetzen, Verordnungen und Vereinbarungen mit einer direkten Auswirkung auf ODM-Angebote können aufgrund komplexer Wirkzusammenhänge auch regulatorische Maßnahmen eine Auswirkung haben, die andere Verkehrsträger des Mobilitätssystems beeinflussen. Hierzu zählen preisliche Regulierungen, wie beispielsweise die Parkraumbewirtschaftung gemäß der Straßenverkehrsordnung (StVO) oder mögliche Gebühren einer City-Maut für den MIV.

Weitere regulatorische Instrumente können auch Verbote in Form von Fahrverboten sein. Diese können auf unterschiedliche Verkehrsträger angewendet werden. Aktuell steht aber der MIV klar im Zentrum solcher Ansätze:

- » *Also wenn ich jetzt eine neue Stadt hätte und ich dürfte die neu planen, quasi von neu aus entwickeln, dann würde ich sagen: Klar von Anfang an die Restriktionen. [...] und das wäre wahrscheinlich auch das Effektivste, wenn man das durch bekommt, also Sperrungen, Restriktionen, Fahrverbote, damit würde man 1.000 mal mehr CO<sub>2</sub> oder NO<sub>x</sub> und alles einsparen als alles andere. Aber das bekommt man politisch nicht durch. Und das gibt einen Aufschrei bei den Bürgern und dann kann es sein, dass das Ganze wieder torpediert wird und das ist nicht die beste Lösung dann, von daher braucht man einen Mix natürlich.* « (Frau K., NGO; Zeile 144-150)

### Technologie

Technologische Entwicklungen und Innovationen haben laut Experten eine essentielle Auswirkung auf den erfolgreichen Betrieb von ODM-Angeboten. Insbesondere das autonome Fahren als Technologie besitzt den Expertenmeinungen zufolge ein disruptives Potential auf die Angebotsstruktur:

- » *Wenn man sich einfach überlegt so ein Auto im Car Sharing kostet den Betreiber pro Stunde so um die zwei bis drei Euro. Ja, und der Fahrer da drin, wenn wir ein solches Modell haben, ist so um die 25 bis 30 Euro. Das heißt, wenn wir diesen Kostenblock eliminieren könnten oder kleiner machen, dann wird man alleine anhand der Größenordnung der Zahlen sehen, was da für ein Potential drin steckt, damit solche Dienstleistungen auch betrieben werden und wirtschaftlich skalierbar sind.* « (Herr G., Automotive; Zeile 177-182)

Weiterhin ist es möglich, dass durch eine autonome Technologie unterschiedliche Angebotsformen ineinander übergehen:

- » *Das Robotaxi ersetzt heutige Taxiflüsse, also wird zunächst mal den heutigen Taxifahrer ersetzen oder vielleicht auch das heutige Car Sharing ersetzen. Dadurch kann man Preise, da gibt es jetzt die unterschiedlichsten Kalkulationen und so weiter, wenn man in Amerika immer sagt, das Taxi kostet 2,5Dollar pro Meile und ein Robotaxi kostet 70 – 80 Cent - so die Größenordnung, wenn es richtig beladen ist. [...] Das heißt Sie müssen überlegen, Sie werden sicherlich eine Integration haben vom heutigen Taxi zum Robotaxi, weil es günstiger ist. Ich denke aber, dass die größte Veränderung darin liegt, dass die Leistung, die Sie in einem Taxi erfahren, und die Leistung, die sie in einem Robotaxi erfahren, wird an und für sich die Gleiche sein* « (Herr B., Berater; Zeile 81-89)

Ein zunehmender elektrischer Betrieb wird von einem Großteil der Experten vorausgesetzt. Lediglich die Betreiber von ODM-Angeboten sehen eine zunehmende Elektrifizierung aus heutiger Sicht aufgrund der existierenden Kostenstrukturen als schwierig an.

Neben dem autonomen Fahren, und der Elektromobilität besitzen Technologien, wie die künstliche Intelligenz, das Potential, eine bestehende Flotte besser zu steuern und auszulasten, was den Anbietern von ODM-Angeboten einen klaren Vorteil gegenüber anderer, weniger digital gesteuerter Mobilitätsoptionen verschafft. Da existierende ODM-Anbieter eigenständig an neuen, innovativen Lösungen in diesem Bereich forschen, wird es in diesem Zusammenhang nicht als externer Einflussfaktor gewertet, sondern vielmehr als Rahmenbedingung, welche durch den ODM-Anbieter selbst beeinflusst werden kann.

---

## Demografie

Die befragten ODM-Anbieter der Studie waren sich einig, dass der Erfolg ihrer Dienstleistung maßgeblich von demografischen Faktoren im entsprechenden Geschäftsgebiet abhängt. Somit haben neben der Bevölkerungsdichte insbesondere auch die Alters-, Einkommens- und Ausbildungsverteilung der Bevölkerung einen signifikanten Einfluss auf die Nutzung von ODM-Angeboten.

» *Dann ist es bei uns natürlich aus unserer Erfahrung so, dass man Städte, wie Berlin und München, die absolut präferierte Städte sind, da man dort eine sehr offene, innovative Zielgruppe trifft. Junge Berufstätige, die einfach genau solche Dienste konsumieren. Aber, für den Erfolg und auch die Profitabilität sind durchaus auch kleine und mittlere Städte, wie beispielsweise Leipzig, sehr interessant, da sie beispielsweise eben nicht dieses perfekte öffentliche Nahverkehrsnetz haben und trotzdem eine relativ hohe Nachfrage.* « (Frau E., ODM Provider; Zeile 126-131)

Zusammenfassend ist bei der Betrachtung externer Einflussfaktoren und Rahmenbedingungen festzustellen, dass nicht nur Einflussfaktoren mit einer direkten Auswirkung auf das ODM-Angebot im Fokus stehen, sondern jegliche Einflussfaktoren und Rahmenbedingungen, welche eine Veränderung des Mobilitätssystems bewirken. So können aufgrund der komplexen Wirkungszusammenhänge und Abhängigkeiten unterschiedlicher Verkehrsträger spezifische Veränderungen an konkreten Teilen des Mobilitätssystems nach einer zeitlichen Verzögerung zu einer Auswirkung an einer anderen Stelle des Systems führen.

### 3.6.3 Nachhaltige urbane Mobilität und die Auswirkung von ODM

Im dritten und letzten Teil der Interviews wurden die Experten zu ihrem Verständnis nachhaltiger urbaner Mobilität sowie ihren Sichtweisen zu den Auswirkungen von ODM-Angeboten auf eine nachhaltige Mobilitätsentwicklung in der Stadt befragt. Übergreifend wurde durch die Experten nachhaltige urbane Mobilität, als eine Art der Mobilität beschrieben, welche ressourcen- und umweltschonend die Bedürfnisse der Bevölkerung nach Mobilität erfüllt, dabei wenig Platz in Anspruch nimmt und nicht zu Lasten der zukünftigen Generationen geht:

» *Nachhaltige Mobilität ist eine Mobilität, die auf der einen Seite die Bedürfnisse der Bevölkerung nach Mobilität erfüllt, die aber auf der anderen Seite was den Energieverbrauch angeht, was den Schadstoffausstoß angeht, ja nicht auf Kosten einer zukünftigen Bevölkerung geht.* « (Herr L., NGO; Zeile, 207-209)

» *Die Mobilität so verfügbar wie möglich zu machen, das Mobilitätsbedürfnis zu erfüllen. Unter Berücksichtigung, eben der Umweltaspekte. Aber auch, ja, nachhaltige Mobilität kann genauso gut heißen, dass unnötige Mobilität eben vermieden wird* « (Herr M., Stadt München; Zeile, 122-125)

Neben der Benennung konkreter Anforderungen an eine nachhaltige urbane Mobilität hinterfragte Herr N. die Möglichkeit, Mobilität wirklich nachhaltig zu gestalten:

- » *Das nicht mehr weggenommen werden darf als nachwächst. Denken Sie sich das aber mal für den städtischen Verkehr, für Luftreinhaltung, für Flächenverbrauch, für Unfälle. Und da ist immer der Fakt da, dass mehr verbraucht wird als tatsächlich ja in irgendeiner Form nachwächst, da müsste man schon, wenn man wirklich nachhaltig wirtschaften wollte und wirklich nachhaltig den Verkehr in den Städten betreiben wollte, müsste man sehr stark wegkommen vom Verbrennungsmotor, sehr stark wegkommen von der Flächennutzung durch Verkehrsmittel* « (Herr N., Wissenschaft; Zeile, 203-209)

Experten aus den Bereichen Automotive sowie Betreiber von ODM-Angeboten heben darüber hinaus den hohen Stellenwert einer ökonomischen Nachhaltigkeit der Dienstleistungen hervor:

- » *Damit solche nachhaltigen Mobilitätskonzepte auch Fuß fassen können, [...] das heißt auch dafür zu sorgen, dass diejenigen die es betreiben, damit auch Geld verdienen können.* « (Herr G., Automotive; Zeile, 206-208)
- » *Deswegen ist die Wirtschaftlichkeit so wichtig an der Stelle der Nachhaltigkeit und ich glaube, das ist auch so der große springende Punkt in der Diskussion, die wir mit den Städten haben, die sehr stark polarisieren und sagen: Uber und BMW, die wollen ja nur Geld verdienen. Wo ich immer sage: Ja, und was ist so schlimm daran? Und dann muss man aber verstehen, nachhaltig ist es nur, wenn man es auch nachhaltig betreiben kann und dazu gehört Geld zu verdienen.* « (Herr G., Automotive; Zeile, 197-202)

Sie betonen, dass es aus privat-wirtschaftlicher Sicht nur Sinn macht, ein ODM-Angebot zu betreiben, wenn es auch nachhaltig ermöglicht damit Geld zu verdienen. Sollte diese Grundlage nicht gegeben sein, wird es langfristig keine privaten Angebote geben. Vertreter von NGOs sehen hingegen die Bezahlbarkeit der Angebote für die Bevölkerung als wichtiges Kriterium an:

- » *Nachhaltigkeit setzt sich zusammen aus den drei Überbegriffen: Ökologie, Ökonomie und Sozial. Insofern also muss es natürlich auch wirtschaftlich nachhaltig sein, das heißt, dass sich auch die ärmeren Bevölkerungsschichten leisten können müssen und somit einen Anteil an der Mobilität bekommen müssen. Also wir haben hier auch eine starke Ungerechtigkeit, da gibt es ja den Begriff der „Gerechtigkeit in den Lebensverhältnissen“.* « (Herr L., NGO; Zeile, 220-224)

Zusammenfassend wird in der Abbildung 24 ein Gesamtüberblick über die angesprochenen Punkte nachhaltiger urbaner Mobilität gegeben. Die Abbildung stellt dabei einen Überblick dar, ohne einzelne Themen zu priorisieren.

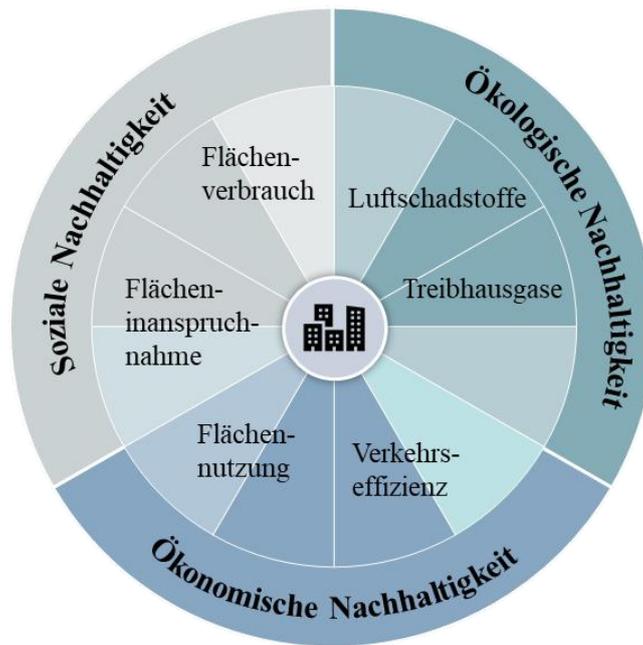


Abbildung 24: Expertenverständnis nachhaltige urbane Mobilität (eigene Darstellung)

Aufbauend auf dem Verständnis nachhaltiger urbaner Mobilität wurden die Experten nach ihren Sichtweisen zu den Auswirkungen von ODM-Angeboten auf eine nachhaltige Mobilitätsentwicklung in der Stadt gefragt. Abbildung 25 führt alle Nachhaltigkeits-Aspekte auf, welche in diesem Zusammenhang durch die Experten genannt wurden. Die Häufigkeit der Nennungen ermöglicht es, die Nachhaltigkeits-Aspekte auf Basis der Expertenmeinungen besser einordnen zu können, stellt jedoch keine Information zu dem Potential der Auswirkungen durch ODM-Angebote dar.

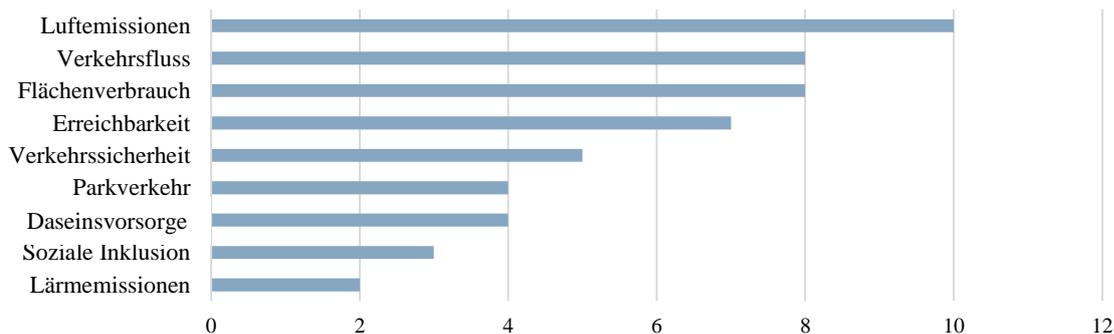


Abbildung 25: Überblick relevanter Nachhaltigkeits Aspekte (eigene Darstellung)

Deutlich erkennbar ist, dass die Luftemissionen am häufigsten durch die Experten genannt wurden, zu diesem Ergebnis könnten auch die starken öffentlichen Diskussionen um die Luftschadstoff- und Treibhausgas-Emissionen beigetragen haben, welche im Zeitraum der Implementierung der Interviews ihren Höhepunkt erreicht hatten. Weiterhin ist festzustellen, dass die drei Nachhaltigkeits-Aspekte mit der häufigsten Nennung mit den Haupt-Herausforderungen des Mobilitätssystems der Städte übereinstimmen (vgl. Inzell-Initiative, 2019).

Insgesamt ist die Einschätzung der Experten zu den Auswirkungen von ODM-Angeboten auf eine nachhaltige Stadtentwicklung recht positiv. Die Ergebnisse der Studie reichen dabei von vollständig überzeugten ODM-Anbietern bis hin zu positiv gestimmten, aber dennoch teils kritischen NGO-Vertretern. Frau E. betonte aus der Sichtweise eines ODM-Anbieters die positive Nachhaltigkeits-Wirkung des ODM-Angebotes wie folgt:

» *Die Firma ist gegründet worden 2015, genau mit der Idee, den innerstädtischen Verkehr und die innerstädtische Mobilität zu verbessern, den Verkehr auf den Straßen zu reduzieren. Dadurch, dass wir Fahrgäste mit ähnlichen Routen über eine App und einen dahinter liegenden Algorithmus zusammenführen, das Ganze ausschließlich nur mit emissionsfreien Fahrzeugen, nämlich elektrisch betriebenen und wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen und damit in vielfacher Hinsicht zu einer Entlastung der Städte beitragen, indem wir den Verkehr reduzieren, Verkehrsbewegungen bündeln, Lärm reduzieren, CO<sub>2</sub> Ausstoß reduzieren – und in die Städte somit wieder mehr Lebensqualität bringen.* « (Frau E., ODM Provider; Zeile 8-15)

Besonders im Fokus stand in vielen Gesprächen die Auswirkung von ODM-Angeboten auf den PKW-Besitz und somit auch auf den Flächenverbrauch und die Flächeninanspruchnahme in einer Stadt. Weiterhin wurde die Auswirkung auf die Verkehrseffizienz sowie soziale und ökonomische Punkte aufgeführt. Der städtische Vertreter Herr H. und Vertreter der NGO, Herr O. befürworteten neue ODM-Angebote vor dem Hintergrund der verfügbaren Fläche in der Stadt, da sie in Kombination mit den bestehenden Systemen die Attraktivität erhöhen und somit die Anzahl und die Nutzung von privaten Fahrzeugen reduziert werden kann:

» *In der Stadt ist es eng und je mehr Platz einer braucht, um von A nach B zu kommen, desto weniger Platz haben wir anderen. Das ist nachdem ein privates Auto 15 Mal mehr verbraucht als eine vollbesetzte Straßenbahn, viermal mehr als ein Radfahrer oder ein Car Sharing Fahrer, 15 Mal mehr als ein Fußgänger, würde ich sagen, die Anzahl und die Nutzung von privaten Fahrzeugen muss reduziert werden. Und alles was dazu dient ist gut und nachhaltig, das ist der öffentliche Verkehr, der Radverkehr, und Sharing* « (Herr H, Stadt München, Zeile 244-249)

» *Es geht natürlich darum, dass die ganze Kombination aus klassischem öffentlichen Verkehr, den bisher bestehenden klassischen Sharing-Angeboten und dieser neuen On-Demand Sharing-Geschichten so attraktiv wird, dass die Leute auf die Nutzung des eigenen Autos verzichten oder sogar im Idealfall auf die Anschaffung eines eigenen Autos verzichten.* « (Herr O, NGO; Zeile 79-83)

Um in diesem Zusammenhang mögliche Rebound-Effekte zu verhindern, meint Herr H. als Vertreter der Stadt München, dass es notwendig ist, durch die Auswirkungen von ODM-Angeboten frei gewordene Verkehrsflächen und insbesondere auch Parkraumflächen unmittelbar planerisch umzuwidmen:

---

» *Wenn die natürlich private Fahrzeuge einsparen, in größerem Umfang, dann müssen die Stellplätze und die Fahrspuren und der Straßenrand, der da frei wird, kassiert werden und planerisch umgenutzt. Weil sonst die Leute sich denken, ah jetzt gibt es wieder etwas mehr Platz, jetzt kaufen wir doch ein eigenes Auto. Das ist jetzt schon beim Car Sharing ein klarer Befund gewesen, dass das DriveNow nur dann drei bis fünf private Fahrzeuge ersetzt, wenn die Parkplätze, die dadurch frei werden, kassiert werden, weil sonst wieder neuer Verkehr induziert wird.* « (Herr H., Stadt München, Zeile 140-146)

Weitere Verbesserungspotentiale werden in der Verkehrs- und Ressourceneffizienz gesehen. Hier werden die Fahrzeugflotten von ODM-Angeboten im Mittel deutlich effizienter eingeschätzt als die bestehenden Privatfahrzeuge:

» *Vor diesem Hintergrund, ja, das ist ganz sicher ein Beitrag zur nachhaltigen Mobilitätsentwicklung. Im Extremfall, selbst wenn [...] es genauso viele gefahrene Kilometer gibt. Diese Fahrzeuge werden effizienter sein, schon alleine weil der Umschlag höher ist, schon alleine weil das Fahrzeug so viele Kilometer im Jahr fährt, dass es nach zwei Jahren auf den Schrott kann und nicht nach 15 Jahren. Und, dass alle Effizienzgewinne sofort in neuen Fahrzeugen umgesetzt werden.* « (Herr O., NGO; Zeile 206-211)

Auswirkungen von ODM-Angeboten auf das Kriterium der sozialen Nachhaltigkeit sehen die Experten vor allem bei einer besseren Erreichbarkeit sowie sozialer Inklusion gewisser Personengruppen. Weiterhin sind Vertreter der Stadt und NGOs der Meinung, dass ODM-Angebote in Zukunft auch einen Beitrag zur Daseinsvorsorge leisten sollten.

» *Marty Walsh, der Bürgermeister von Boston, der relativ klar [...] gesagt hat: The number one reason, why I am pushing new mobility in Boston and autonomous vehicles is social inclusion. [...] Well, currently I have 8 % of people, that are either too young, too old, too poor, or too handicapped, to participate in urban public mobility. And if I am able to send them busses, shuttels, or robotaxis in front of their houses, they will be socially included – that is my number one priority!* « (Herr B., Berater; Zeile, 202-208)

Zusätzlich zu den Auswirkungen unterschiedlicher Angebotsformen wurden mögliche Verlagerungs- und Kannibalisierungseffekte zwischen unterschiedlichen Verkehrsträgern des Mobilitätssystems durch die Experten angesprochen und diskutiert. Zum aktuellen Zeitpunkt sehen die Experten aufgrund der Größe der bestehenden ODM-Angebote noch keine größeren Effekte für den ÖPNV:

» *Ja also, bis jetzt sind diese Angebote alle im Promille- oder im wenigen Prozentbereich. Also sie sind zwar in aller Munde, wenn man die Fachmedien sich anschaut, aber in der Nutzung spielen sie ja tatsächlich noch eine geringe Rolle. Da schließe ich auch Car Sharing mit ein, also wir sind noch in einem sehr speziellen Nutzerbereich und haben bei weitem noch nicht den Großteil der Bevölkerung erreicht mit diesen Angeboten.* « (Herr L., NGO; Zeile 42-46)

ODM-Anbieter untersuchen aber, welche Personen ihr Angebot nutzen und welche Fahrten durch ihr Angebot substituiert werden:

- » *Wir wissen aus Kundenbefragungen [...], dass es die angenehmere Alternative zum öffentlichen Nahverkehr und die günstigere Form zum Taxi ist. Taxi nutzt man im privaten Umfeld oder im privaten Umfeld fast gar nicht. Das sind meistens Geschäftsleute. Und privat, gerade in der Stadt, wenn man sich nicht selber durch den Stadtverkehr quälen will oder man hat vielleicht selber gar kein Auto oder man möchte am Abend noch was trinken und gleichzeitig aber nicht in die zu volle U-Bahn oder den kalten Weg zur Straßenbahn noch machen. Also diese Personen greifen wir dann ab.* « (Frau E., ODM Provider; Zeile 138-145)

Herr M. ist als städtischer Vertreter allerdings der Auffassung, dass es in München aufgrund des starken Verkehrswachstums (vgl. Kapitel 2.3.1) in naher Zukunft nicht zu signifikanten Kannibalisierungseffekten kommen wird:

- » *Also das Niveau hier in München und das Mobilitätsbedürfnis ist so hoch, tatsächlich, in dieser Form, ich kann mir nicht vorstellen, dass so etwas dann kannibalisierend wirken würde.* « (Herr M., Stadt München; Zeile 201-202)
- » *Kann man mit so einem Service den Berufsverkehr abdecken, wenn die halbe Stadt von links nach rechts will? Wahrscheinlich nicht in dieser Form. Da wird man ein anderes Pooling nehmen, nämlich eine größere Form – die U-Bahn. Also wenn man sich vorstellt, wir haben jeden Tag 1,5 Millionen Fahrgäste in München, also ich sage jetzt mal 750.000 Menschen wollen irgendwie von A nach B und auch wieder zurück. Diese Kapazität wird man nur mit großen Gefäßen hinbekommen. In dem Augenblick, in dem es dann in den Nachtverkehr geht oder in den Spätverkehr geht und die Individualisierung für das Ganze etwas zerfaserter ist, da wird das Ganze natürlich schon ein ganzes Stück weiter interessant. Da muss ich auch sagen, abends ist die U-Bahn ein Stück weit leerer, abends ist der Bus ein Stück weit leerer. Da kann man dann drüber nachdenken, kann ich dort etwas anderes anbieten in dieser Form? Das ist immer eine Frage zwischen Preis und Leistung.* « (Herr M., Stadt Vertreter; Zeile 64-74)

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Experten die Auswirkungen von ODM-Angeboten auf unterschiedliche Nachhaltigkeits-Aspekte überwiegend positiv einschätzen. Häufig vermischen sie ihre Aussagen mit dem verbundenen Potential, welches durch ODM theoretisch erreicht werden könnte. Weiterhin belegen sie ihre Meinungen nur selten mit konkreten Beispielen und Belegen. Dies könnte auch dem Neuigkeitsgrad der Angebote geschuldet sein.

#### 3.6.4 Ableitung Modell-Variablen

Neben der Herausarbeitung der qualitativen Sichtweisen der Experten ist es das Ziel dieser Auswertung, geeignete Variablen für die Erstellung eines holistischen Modells zu identifizieren. Durch die qualitative Inhaltsanalyse wurde hierfür eine induktive Methode ausgewählt, welche das transkribierte Datenmaterial in einer Struktur zusammenfasst. Wie im Kapitel 3.5 beschrieben, wurden im Kategorisierungsprozess der Auswertung 415 einzelne Bedeutungseinheiten durch sinnesgemäße Anpassung und Verdichtung in Codes überführt, welche weiterhin entsprechenden Unter- und Haupt-Kategorien zugeordnet wurden. Die identifizierten Unterkategorien sollen im weiteren Verlauf dieser Arbeit die Basis für entsprechende Variablen für die Anwendung in einem Modell bilden (vgl. Kapitel 4).

Als Ergebnis dieses Kategorisierungsprozesses wurden sieben Haupt-Kategorien mit einer zugrundeliegenden Struktur aus 33 Unter-Kategorien und 291 Codes herausgearbeitet. Die transparente Struktur ermöglicht es den Forschungsverlauf von einer einzelnen Bedeutungseinheit bis hin zu einer Haupt-Kategorie nachzuvollziehen. Tabelle 19 gibt einen Überblick über die Haupt-Kategorien mit ihren zugrundeliegenden Unter-Kategorien.

Tabelle 19: Überblick Haupt- und Unter-Kategorien der qualitativen Inhaltsanalyse (eigene Darstellung)

Angebot	Nachfrage	Stadt Charakteristik	Regulatorik	Technologie	Demografie	Nachhaltige Urbane Mobilität
- Fahrzeugflotte - Bediengebiet - Fahrzeuggröße - Betriebskosten - Preis des Services - Auslastung der Flotte - Besetzungsgrad	- Verkehrs-nachfrage - Attraktivität des ODM-Services	- Bevölkerungs-anzahl - Wohndichte der Bevölkerung / Siedlungsstruktur - PKW-Besitz - ÖPNV-Angebot - Modal Split / Modalitätsnachfrage - Infrastruktur - Ladeinfrastruktur	1. Preisliche Regulierungen - Parkkosten (Kurz- / Langzeit-parken) - City-Maut 2. Sonstige Regulierungen - Fahrverbote - Personen-beförderungsgesetz	- Autonomes Fahren - Elektro-mobilität - Künstliche Intelligenz	- Einkommens- verteilung - Ausbildungs- verteilung - Altersverteilung	- Verkehrs- effizienz - Luftemissionen - Flächeninanspruchnahme / -verbrauch - Lärm- emissionen - Nutzung von Ressourcen - Soziale Gerechtigkeit - Verkehrs- sicherheit

Neben der tabellarischen Darstellung der einzelnen Unter- und Haupt-Kategorien werden die Wirkzusammenhänge der einzelnen Haupt-Kategorien in einem stark vereinfachten Modell in Abbildung 26 dargestellt. Den Experten zufolge ist das Zusammenfinden von Angebot und Nachfrage die Grundvoraussetzung für den erfolgreichen Betrieb eines ODM-Angebotes. Die Eigenschaften des ODM-Angebotes werden dabei durch die identifizierten Unter-Kategorien, wie dem Bediengebiet, der Flottengröße, der Kostenstruktur des Services und einem daraus resultierenden Preis für die Nutzung des Services, charakterisiert. Auf der Nachfrageseite ergibt sich auf der Basis der Angebots-Eigenschaften eine Attraktivität des ODM-Angebotes für den Nutzer. Diese Attraktivität ist für jeden Menschen unterschiedlich, da sie neben objektiven Kriterien von sehr subjektiv wahrgenommenen Mobilitätspräferenzen abhängt (vgl. Kapitel 3.6.1).

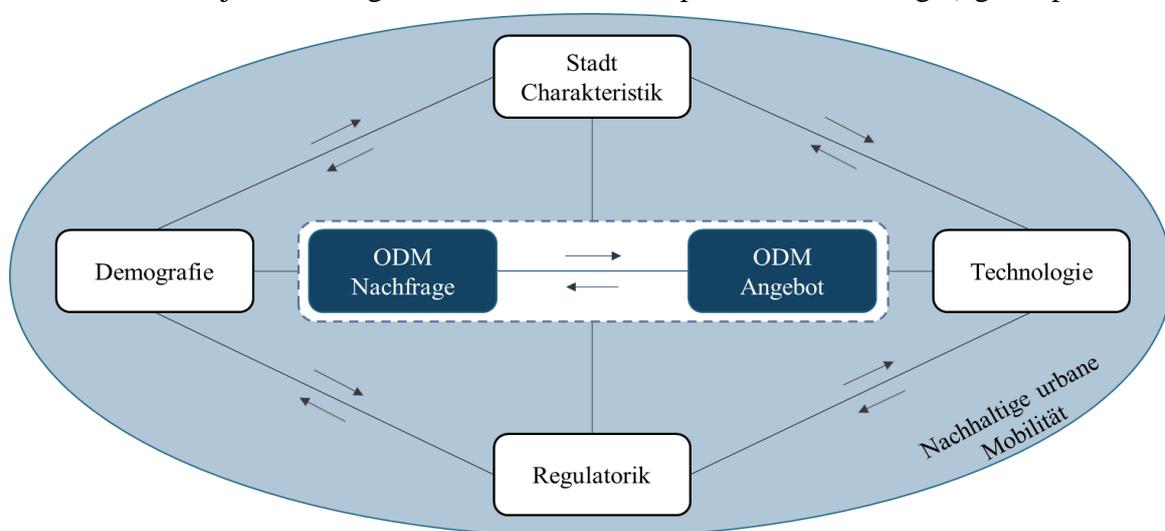


Abbildung 26: Vereinfachte Darstellung der Wirkzusammenhänge der Haupt-Kategorien (eigene Darstellung)

Neben der Wechselwirkung von Angebot und Nachfrage wurden in der Auswertung der Studie externe Einflussfaktoren identifiziert, welche eine bedeutsame Auswirkung auf das Zusammenspiel von Angebot und Nachfrage besitzen. Als besonders ausschlaggebend für den Erfolg eines ODM-Angebotes werden demnach die vorhandene Stadt Charakteristik, die Demografie der Bevölkerung und die bestehende Regulatorik und Technologie angesehen. Das Evaluationskriterium nachhaltiger urbaner Mobilität umschließt diese Wirkzusammenhänge, da es bei dieser Untersuchung Veränderungen im Mobilitätssystem übergreifend analysieren sollte. Eine detailliertere Darstellung der Wirkzusammenhänge der Haupt-Kategorien mit den entsprechenden Unter-Kategorien befindet sich im Anhang 7. Im folgenden Verlauf dieser Arbeit wird auf Basis der identifizierten Unter-Kategorien ein holistisches Modell erarbeitet, welches dazu dient, die bestehenden Wechselwirkungen der einzelnen Kategorien besser zu verstehen und mögliche Feedbackstrukturen beschreiben zu können.

### 3.7 Zusammenfassung und Zwischen-Fazit qualitative Expertenstudie

Die qualitative Expertenstudie verfolgt einen explorativen Ansatz. Ziel der Studie ist es, mehr über die Auswirkungen von ODM-Angeboten auf eine nachhaltige urbane Mobilität zu erfahren und daraus Erkenntnisse für die Modellentwicklung zu gewinnen. Vor diesem Hintergrund wurden die Experten mithilfe eines Interview-Leitfadens zu ihrem allgemeinen Verständnis von ODM und zugrunde liegender Mobilitätspräferenzen der Nutzer, externen Einflussfaktoren und Rahmenbedingungen, nachhaltiger urbaner Mobilität und den Auswirkungen von ODM befragt (vgl. Kapitel 3.2). In der Studie wurden insgesamt 15 Experten aus den Bereichen Automotive, ODM-Anbieter, Stadtverwaltung, NGO, Beratungsunternehmen und Wissenschaft interviewt (Kapitel 3.3).

Neben der Herausarbeitung einer klaren Struktur aus dem transkribierten Datenmaterial war es das Ziel der Studie, die Meinungen und Sichtweisen unterschiedlicher Stakeholder besser verstehen und einordnen zu können. Aus diesem Grund wurde eine zweiteilige Auswertungsmethode angewandt: Auf der einen Seite wurden die Aussagen der Experten gewissenhaft analysiert, was es ermöglicht, die Sichtweisen unterschiedlicher Stakeholder qualitativ einzuordnen und bis dahin unberücksichtigte Aspekte in die Untersuchung mit einzubeziehen. Auf der anderen Seite wurde das transkribierte Datenmaterial durch die Anwendung einer qualitativen Inhaltsanalyse in einem Kategoriensystem organisiert. Die Inhaltsanalyse folgte dabei vier Prozessschritten: der Dekontextualisierung, Rekontextualisierung, Kategorisierung und Zusammenfassung (vgl. Kapitel 3.5). Im Codierungsprozess wurden 415 Bedeutungseinheiten durch sinnesgemäße Anpassung und Verdichtung in Codes überführt und anschließend in 33 Unterkategorien und sieben Haupt-Kategorien organisiert.

---

Zusammenfassend ist festzustellen, dass das allgemeine Verständnis von ODM unter den Experten nicht bedeutend variiert. Ein Großteil der Experten neigt dazu, sich hauptsächlich auf die Angebotsform Ride Pooling zu beziehen, gegebenenfalls da hier in Bezug auf die Zukunft das größte Potential gesehen wird. Den Expertenmeinungen zufolge sind die Hauptkriterien bei der Nutzung von ODM-Angeboten Zeit, Kosten und Verlässlichkeit des Angebots gefolgt von Komfort, Verfügbarkeit, Flexibilität und Erreichbarkeit. Convenience, Privatsphäre, Nachhaltigkeit und Erlebniswert des Angebotes werden auch als wichtig eingeschätzt, nehmen aber im Vergleich zu den anderen Kriterien eine untergeordnete Rolle ein (vgl. Abbildung 22).

Auf Basis der Antworten der Experten konnten vier übergeordnete Kategorien externer Einflussfaktoren und Rahmenbedingungen herausgearbeitet werden, welche von besonders hoher Relevanz sind (vgl. Abbildung 23). Neben der Stadt Charakteristik wird demnach insbesondere auch die bestehende Regulatorik als essentiell angesehen. Weiterhin tragen auch die Demografie der Bevölkerung und technologische Veränderungen als externe Einflussfaktoren zu der zukünftigen Entwicklung von ODM-Angeboten maßgeblich bei (vgl. Kapitel 3.6.3).

Die Auswirkungen von ODM-Angeboten auf eine nachhaltige urbane Mobilität werden durch die Experten überwiegend positiv eingeschätzt. In einigen Fällen ist es aber nicht eindeutig erkennbar, ob es sich bei der Aussage um ein Wunsch-Szenario in der Zukunft handelt, oder eine realistische Entwicklung, da die Experten ihre Aussagen nicht ausreichend mit bestehenden Beispielen belegen. Dieser Punkt könnte der Neuheit und Aktualität der ODM-Angebote geschuldet sein, was eine genaue Abschätzung der zukünftigen Entwicklung erschwert.

Abschließend werden im urbanen Mobilitätssystem ODM-Angebote durch die Experten überwiegend als eine Ergänzung zu den bestehenden Systemen definiert, welche dazu beitragen, den privaten PKW-Besitz und dessen Nutzung mittel- bis langfristig zu beeinflussen:

» *Auch noch einmal mit der Unterstreichung, dass es eine Ergänzung zu den bestehenden Systemen ist und die etwas älteren Systeme hierdurch vielleicht noch weiter verbessert werden. So sehen wir es bei vielen Faktoren, die wir in Folge der digitalen Transformation und der Digitalisierung erleben. Also Dank des Smartphones hat man jetzt einfach den situativen Zugriff auf solche Angebote und die Geschäftsmodelle, die daraus resultieren. In diesem Fall wird das „grüne Ride Sharing“ dazu beitragen, dass hoffentlich viele Leute das Auto nicht nur stehen lassen, sondern und perspektivisch vielleicht komplett darauf verzichten. Das Ganze eingebettet in ein gutes, intaktes Verkehrs-System ist eine Win-Win Situation für die Städte, aber auch für die Menschen, die in den Städten leben.* « (Frau E., ODM Provider; Zeile 150-158)

In diesem Zusammenhang wird auch von einem hohen Potential zur positiven Auswirkung auf die bestehende Mobilitätkultur gesprochen:

» *Zumindest passiert etwas mit der Mobilitätskultur [...], denn wer einmal sagt, ich setze jetzt auf ein solches System, denn ich lasse mich damit von A nach B fahren und nutze ansonsten den klassischen öffentlichen Verkehr, Car Sharing oder Fahrradverleihsysteme, oder was mir gerade passt. Ich habe ja eh schon für alles eine App auf dem Smartphone. Da ist also schon eine multioptionale Mobilität kaum noch wegdenkbar und wenn das dann auch noch dazu kommt, dann habe ich irgendwann ein Gesamtsystem, welches für mich so attraktiv wird, sodass ich einfach auf ein eigenes Fahrzeug verzichte und dann auch andere Strecken nicht mehr mit dem eigenen Auto fahre. Und wenn ich dann doch mal nach Hamburg muss, dann nehme ich mir dafür halt keinen Mietwagen, sondern fahre halt mit dem Zug. Wenn ich jetzt ein eigenes Auto habe, dann schaue ich nur auf die Tank-Rechnung und mach keine Vollkostenrechnung und dann fahre ich natürlich mit dem Auto. Das heißt, es werden durch solche Verkehrsmittel Entscheidungs-Rationalitäten verschoben, die den Verzicht auf das Fahrzeug-Eigentum wahrscheinlicher machen und dadurch dann insgesamt nachhaltigere Mobilitätsmuster ergeben.* « (Herr O, NGO; Zeile 221-229)

Bis zu welchem Maße ODM-Angebote in der Zukunft im urbanen Mobilitätssystem wachsen werden, darüber geben die Experten keine konkrete Entwicklung vor. Sie sind sich aber weitestgehend einig, dass der Anteil solcher Angebote in der Zukunft noch deutlich weiter wachsen wird, und die Systeme auch mittel- und langfristig existieren werden.

---

## 4 System-Modell

Im folgenden Kapitel 4 wird eine systemische Analyse von ODM im Kontext nachhaltiger urbaner Mobilität am Beispiel der Stadt München vorgenommen. Nach einer kurzen Einordnung und Erläuterung der methodischen Grundlagen aus dem Bereich System Thinking und System Dynamics erfolgt zunächst die Erstellung eines qualitativen Modells auf der Grundlage der im Kapitel 3 identifizierten Variablen unter der Anwendung eines Causal-Loop Diagramms. Hierauf aufbauend werden die Variablen durch die Anwendung geeigneter Datenquellen in einem quantitativen Stock-and-Flow Diagramm abgebildet. Mithilfe des quantitativen Modells lassen sich relevante Zukunfts-Szenarien für die Stadt München aufstellen und simulieren, welche abschließend ausgewertet werden.

### 4.1 Methodisches Verständnis und Einordnung

Die angewandte Methode System Thinking / System Dynamics eignet sich dafür, Probleme und Fragestellungen ganzheitlich, systemisch zu betrachten und dabei ein Verständnis der zugrunde liegenden Strukturen und mentalen Modelle zu erlangen. Unter einem *System* wird in diesem Zusammenhang eine Anzahl von Elementen und ihren gegenseitigen Wechselwirkungen verstanden, welche als eine strukturierte Funktionseinheit zusammenwirken (vgl. Meadows, 2009). In der Regel beziehen sich Systeme im Bereich System Thinking / System Dynamics auf eine konkrete Fragestellung oder ein bestehendes Problem. Nach Bossel (1992) ist es weiterhin nicht möglich, ein System zu verkleinern oder zu teilen, ohne dabei die Identität oder die Eigenschaften des Systems zu ändern (vgl. Vester, 2002).

Ursprünglich wurde die Methode hauptsächlich dafür angewandt, in sich geschlossene Systeme und deren zugrunde liegende (materielle, informationelle, soziale, ...) Struktur zu modellieren und besser zu verstehen (vgl. Pruyt, 2013). Unter einem geschlossenen System wird ein System verstanden, bei welchem Veränderungen ausschließlich auf der Grundlage früherer Veränderungen hervorgerufen werden (vgl. Forrester, 1968). Dies bedeutet, dass geschlossene Systeme ihr eigenes Verhalten endogen im Laufe der Zeit erzeugen, weil die Ursachen, die das interessierende Verhalten hervorrufen, innerhalb des Systems liegen (vgl. Forrester, 1994).

In der praktischen Anwendung werden aber zunehmend auch komplexe Probleme der realen Welt in offenen Systemen modelliert. Diese werden dadurch charakterisiert, dass das Verhalten des Systems neben einem geschlossenen, endogenen Vorgang auch durch exogene oder gar externe Ereignisse beeinflusst werden kann. Die Modellierung solcher offenen Systeme stellt in der Umsetzung häufig eine große Herausforderung zwischen dem Einschluss und dem Ausschluss von Elementen dar, weil auf der einen Seite alle wichtigen oder potentiell wichtigen Elemente einbezogen werden sollen, es andererseits aber nicht möglich ist, „die ganze Welt“ zu modellieren (vgl. Pruyt, 2013, S. 33).

In diesem Fall ist es sehr wichtig und notwendig, die System- und Modellgrenzen sorgfältig abzugrenzen. Alle (potentiell) wichtigen Elemente, die andere Teile des Systems beeinflussen und auch signifikant von Elementen des Systems beeinflusst werden, sollten als endogene Variablen modelliert werden. Alle Elemente, die das System ernsthaft beeinflussen (könnten), aber nicht ausreichend vom System beeinflusst werden, werden zu exogenen Variablen. Alle weiteren Elemente sollten ausgelassen werden (vgl. Kapitel 4.2.2.1) (vgl. Pruyt, 2013).

Wissenschaftler im Bereich System Thinking / System Dynamics argumentieren in aller Regel gegen zu enge Modellgrenzen und fördern somit eine ganzheitliche und systemische Sicht der untersuchten Themen: „Erfolgreiches Systemdenken bedeutet, dass man in der Lage ist, das Gesamtbild oder den Kontext einer Situation und ihre Verbindungen zu ihrer Umgebung zu sehen“ (vgl. Wolstenholme, 2003, S. 20). Auf diese Weise helfen dynamische Systeme, „die Grenzen unserer mentalen Modelle zu erweitern, so dass wir uns der Rückkopplungen, die durch unsere Entscheidungen entstehen, bewusst werden und die Verantwortung dafür übernehmen“ (vgl. Sterman, 2002b, S. 505).

Ein nachvollziehbares Beispiel aus der Literatur zur Identifizierung von, einem Ereignis zugrunde liegenden, Verhaltensmustern, Strukturen und mentalen Modellen ist das Eisberg-Modell (vgl. Goodman, 1997). Es zeigt symbolisch auf, dass ein Großteil der Informationen und Einflüsse bei der isolierten Betrachtung eines Ereignisses nicht zum Vorschein kommt, sondern eine genauere, systemische Betrachtung erfordert. Abbildung 27 bietet einen Überblick über das Eisberg-Modell.

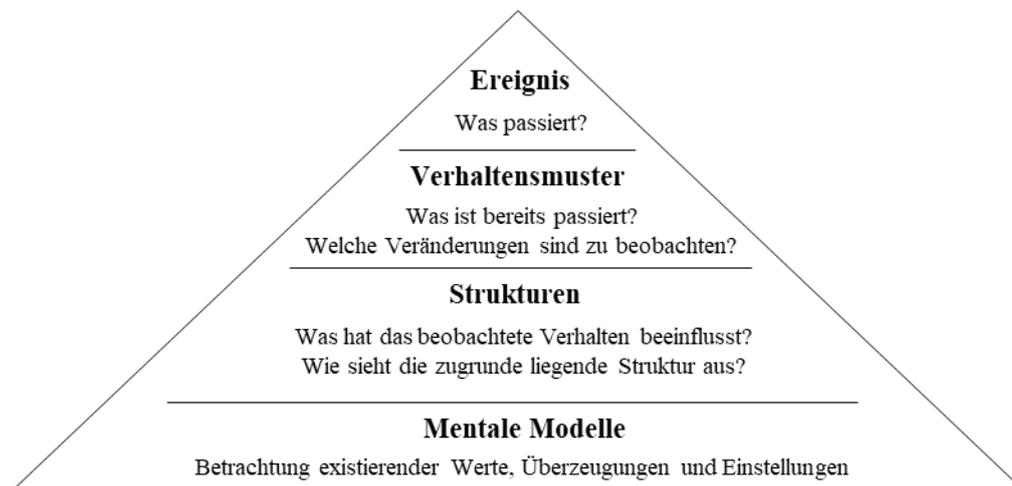


Abbildung 27: System Thinking Eisberg-Modell (eigene Darstellung, in Anlehnung an Goodman, 1997)

#### 4.1.1 Grundlagen und Einordnung System Thinking / System Dynamics

In diesem Kapitel werden die Grundlagen der Methodik erläutert. Hierfür erfolgt neben der Einordnung und Abgrenzung relevanter Begriffe ein grundlegendes Verständnis von Causal-Loop und Stock-and-Flow Diagrammen.

In der Literatur kam es in der Vergangenheit bei der Anwendung der Begriffe System Thinking und System Dynamics teilweise zu Schwierigkeiten bei der genauen Abgrenzung. Jay Forrester schrieb in diesem Zusammenhang: „Systems Thinking has no clear definition or usage. [...] Some use Systems Thinking to mean the same as System Dynamics“ (vgl. Forrester, 1994, S. 10). Haraldsson (2004) definiert System Thinking hingegen als eine übergeordnete Methode und Wissenschaft, „die sich mit der Organisation von Logik und der Integration von Disziplinen zum Verständnis von Mustern und Beziehungen komplexer Probleme befasst“ (vgl. Haraldsson, 2004, S. 4). Haraldsson versteht demnach (wie in der Abbildung 28 dargestellt) im Gegensatz zu Forrester, die System Analyse (Darstellung eines mentalen Modells des Problems) und System Dynamics (mathematische Nachbildung des Problems, um die Vergangenheit zu erklären und die Zukunft zu verstehen) als Bestandteil eines übergeordneten System Thinking.

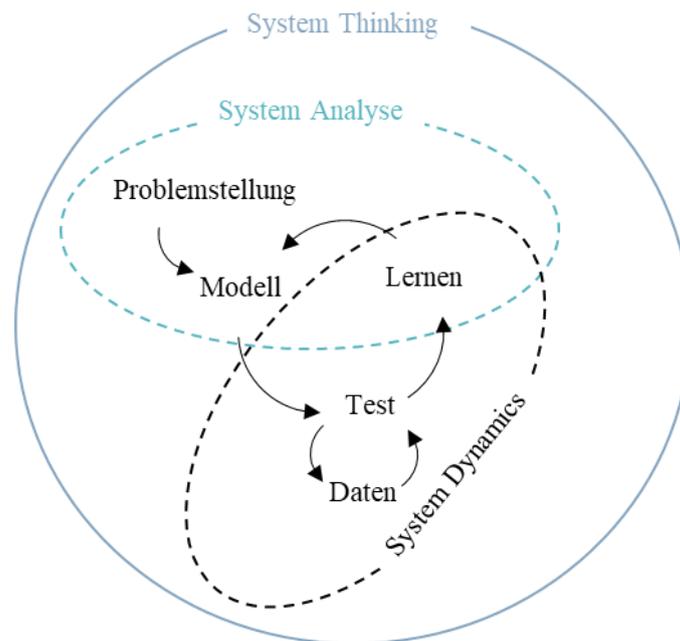


Abbildung 28: Verständnis System Thinking, System Analyse und System Dynamics (eigene Darstellung, in Anlehnung an Haraldsson, 2004)

Weitere Wissenschaftler nutzen übergeordnet den Begriff System Dynamics und unterteilen lediglich zwischen einer qualitativen (Causal-Loop Diagramm) und quantitativen (Stock-and-Flow Diagramm) Ausprägung (vgl. Pruyt, 2013). Um diese teils gravierenden Definitionsunterschiede einordnen zu können und für diese Arbeit eine einheitliche Abgrenzung festzulegen, erfolgt folgend ein kurzer Überblick zum Verständnis der beiden Bereiche System Thinking und System Dynamics.

### *System Thinking*

Der Ansatz von System Thinking (ST) unterscheidet sich maßgeblich von anderen, bestehenden Analyse-Methoden (vgl. Aronson, 2010). Während traditionelle Methoden darauf abzielen, ein Problem oder eine Fragestellung in kleinste Bestandteile zu zerlegen und zu analysieren, zielt ST darauf ab, die zu untersuchende Fragestellung in einem weiteren Rahmen zu beleuchten. Dabei wird die Interaktion des Problems, oder der Fragestellung in einen weiteren systemischen Kontext gestellt. Dies ermöglicht die Entwicklung eines tieferen Verständnisses der zugrunde liegenden Struktur, wodurch zuverlässige Rückschlüsse über das Verhalten gezogen werden können (vgl. Richmond, 1993; Vester, 2002).

In der Literatur existieren unterschiedliche Auffassungen über die genaue Definition von ST. Während einige Wissenschaftler ST als grundsätzlichen Untersuchungsansatz verstehen (vgl. Arnold et al., 2015), sehen andere ausschließlich eine qualitative Ausprägung von System Dynamics, welche in der Regel durch Causal-Loop Diagramme durchgeführt wird (vgl. Pruyt, 2012).

Peter Senge, ein führender Experte auf diesem Gebiet, definiert ST „as a discipline for seeing wholes and a framework for seeing interrelationships rather than things, for seeing patterns of change rather than static snapshots“ (vgl. Senge, 1990, S. 68). Arnold & Wade, (2015) definiert ST auf der Basis einer fundierten Analyse bestehender Definitionen aus der Literatur wie folgt: “Systems Thinking is a set of synergistic analytic skills used to improve the capability of identifying and understanding systems, predicting their behaviors, and devising modifications to them in order to produce desired effects” (vgl. Arnold & Wade, 2015, S. 675). Weiterhin fasst er seine Definition anhand eines einfachen Modells zusammen (vgl. Anhang 8). Sweeney und Sterman, Autoren und Forscher auf dem Gebiet von ST, stellten fest, dass ST die Fähigkeit beinhaltet, dynamische Komplexität (z.B. Verhalten, das aus der Interaktion unterschiedlicher Elemente eines Systems im Laufe der Zeit entsteht) sowohl textlich als auch grafisch darzustellen und zu bewerten (vgl. Sweeney & Sterman, 2000). Weiterhin führten sie spezifische Fähigkeiten auf, welche für ST von hoher Bedeutung sind:

1. Verstehen, wie das Verhalten eines Systems aus der Interaktion seiner Elemente im Laufe der Zeit entsteht (d.h. dynamische Komplexität);
2. Entdecken und Darstellen von Rückkopplungsschleifen (sowohl positive als auch negative), die den beobachteten Verhaltensmustern des Systems zugrunde liegen;
3. Identifizieren von Bestands- und Flussbeziehungen;
4. Erkennen von zeitlichen Verzögerungen und Verstehen ihrer Auswirkungen;
5. Identifizieren von Nichtlinearitäten;
6. Erkennen und Infragestellen der Grenzen mentaler (und formaler) Modelle

---

## *System Dynamics*

System Dynamics (SD) ist eine Methode zur Beschreibung, Modellierung, Simulation und Analyse dynamisch komplexer Sachverhalte hinsichtlich der Prozesse, Informationen, Organisationsgrenzen und Strategien (vgl. Pruyt, 2013). Wie bereits beschrieben, wird bei der Modellierung von SD-Modellen weitestgehend davon ausgegangen, dass das Verhalten eines Systems überwiegend durch seine eigene Struktur verursacht wird. Um unerwünschte Verhaltensweisen zu verbessern, muss daher durch geeignete Prozesse und Maßnahmen die Struktur des Systems verändert werden.

Der SD-Ansatz wurde Ende der 1950er und Anfang der 1960er Jahre von Jay W. Forrester an der *Sloan School of Management* des *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) entwickelt (vgl. Forrester, 1995; Forrester, 1958; Forrester, 1961; Forrester, 2007a; Lane, 2007). Forrester argumentierte, dass die traditionellen Methoden zur Problemlösung ein unzureichendes Verständnis der strategischen Prozesse in komplexen Systemen liefern. In seinen Beiträgen ging er von der Unternehmensebene in *Industrial Dynamics* (vgl. Forrester, 1961) über die Stadtebene in *Urban Dynamics* (vgl. Forrester, 1969) bis zur Weltebene in *World Dynamics* (vgl. Forrester, 1971), mit dem weltbekannten Bericht über die Grenzen des Wachstums (vgl. Meadows et al., 1972), welche vom *Club of Rome* in Auftrag gegeben wurden.

Das Verständnis unterschiedlicher Wissenschaftler zu der Methode SD ist im Vergleich zu ST eher einheitlich. In aller Regel werden unter der Methode quantitative Modelle verstanden, welche beispielsweise durch die Anwendung von Stock-and-Flow Diagrammen Wechselwirkungen zwischen unterschiedlichen Systemelementen auf der Basis geeigneter Daten simulieren.

Heutzutage findet ST und SD in vielen dynamisch komplexen Fragestellungen Anwendung, bei denen mehrere Wirkungsketten parallel ablaufen und somit nicht „intuitiv verstanden werden“ (Jensen & Brehmer, 2003). Wichtige Bereiche sind dabei die „Gesundheitspolitik, Umwelt- und Umweltmanagement, Sicherheit und Schutz, öffentliche Ordnung und Politik, soziale und organisatorische Dynamik, Bildung und Innovation, Wirtschaft und Finanzen, organisatorische und strategische Unternehmensführung, Informationswissenschaften sowie Betriebs- und Lieferkettenmanagement“ (vgl. Pruyt, 2013, S. 1). Generell lässt sich festhalten, dass die Anwendung dieser Methoden für Frage- und Problemstellungen besonders geeignet ist, welche folgende Eigenschaften aufweisen (vgl. Strohhecker, 2008):

- Dynamisches Problem, d.h. die zeitliche Entwicklung ist von Interesse
- Feedbackstrukturen wirken auf das Systemverhalten
- Kurzfristige und langfristige Aspekte sind von Bedeutung
- Es sind (u.U. zeitversetzt eintretende) Ursache-Wirkungs-Ketten aktiv (vgl. von Peinen, 2017)

#### 4.1.1.1 Causal-Loop Diagram

Wie eben beschrieben, verfolgen ST und SD das Ziel, das Verhalten eines Systems auf der Basis der Interaktion ihrer einzelnen Systemelemente besser zu verstehen und dabei mögliche Feedbackstrukturen in die Untersuchung einzubeziehen.

Die Erstellung und Anwendung eines Causal-Loop Diagramms (CLD) zielen genau auf die Identifikation solcher Zusammenhänge ab. Das Konzept von CLD's wurde erstmals in den 1960er Jahren von Jay Forrester diskutiert und später von Forschern, wie Rosnay (1979), Richardson & Pugh (1981), Senge (1990) und Sterman (2000), weiter ausgearbeitet. Die Funktion eines CLD's besteht darin, die Struktur und die Rückkopplungen eines Systems abzubilden, um somit seine Feedbackstrukturen besser zu verstehen. Weiterhin bieten CLD's durch ein vereinfachtes Abbild eines Systems die Möglichkeit, das Systemverhalten besser zu verstehen und darauf aufbauend Strategien entwickeln zu können, um z.B. das Systemverhalten in eine gewünschte Richtung zu steuern.

In der Fachsprache wird der direkte Zusammenhang zwischen zwei Systemelementen als Kausalität bezeichnet, welche in einem CLD durch einen einfachen Pfeil ( $\rightarrow$ ) dargestellt werden (vgl. Abbildung 29a; Tabelle 20). Dieser Pfeil wird entsprechend seiner Wirkrichtung durch ein Plus (+) oder Minus (-) gekennzeichnet. Eine Rückkopplungsschleife besteht aus zwei oder mehr Kausalitäten, welche in einer Schleife erfolgen. Entsprechend der in Abbildung 29 abgebildeten Feedbackstrukturen führt Variable A - nach einiger Zeit - eine Rückkopplung zu sich selbst durch. Das Verhalten dieser Variable wird demnach (teilweise) durch ihr eigenes Verhalten in der Vergangenheit verursacht, wodurch es im Gesamtsystem zu einem nichtlinearen Verhalten kommen kann, auch, wenn alle konstitutiven Kausalitäten linear sind (vgl. Haraldsson, 2004). Hierbei wird zwischen positiven<sup>24</sup> und negativen<sup>25</sup> Rückkopplungsschleifen unterschieden (vgl. Abbildung 29).

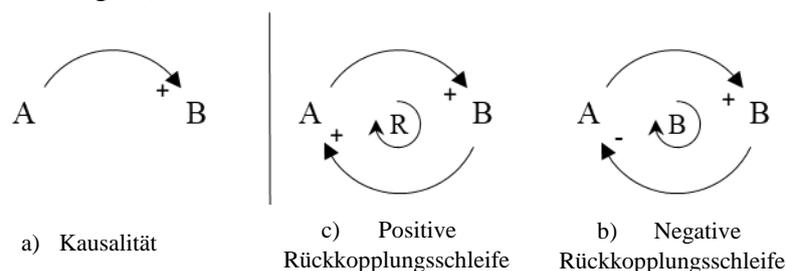


Abbildung 29: Kausalität und Rückkopplungsstrukturen (eigene Darstellung, in Anlehnung an Haraldsson, 2004)

Eine Rückkopplungsschleife wird als positiv (+) oder verstärkend (R) bezeichnet, wenn ein anfänglicher Anstieg der Variablen A - nach einiger Zeit - in einem zusätzlichen Anstieg der Variable A resultiert. Ebenfalls werden Rückkopplungsschleifen als positiv bezeichnet, wenn

<sup>24</sup> Werden in der Literatur auch als Reinforcing Feedback Loops bezeichnet.

<sup>25</sup> Werden in der Literatur auch als Balancing Feedback Loop bezeichnet.

eine anfängliche Reduktion von A, zu einem späteren Zeitpunkt, in einer weiteren Reduktion von A mündet (vgl. Abbildung 29a). Als negativ (-) oder ausgleichend (B) wird eine Rückkopplungsschleife hingegen bezeichnet, wenn ein anfänglicher Anstieg der Variablen A - nach einiger Zeit - zu einer Reduktion von A führt oder, wenn eine anfängliche Abnahme von A in einer Zunahme von A resultiert (vgl. Abbildung 29b). Solche negativen Rückkopplungsschleifen sind essentiell für das Systemgleichgewicht, da sie die sich selbst verstärkenden, positiven Rückkopplungsschleifen ausgleichen. Ein System ohne negative Rückkopplungen ist langfristig nicht überlebensfähig (vgl. Vester, 2002). In der Tabelle 20 werden alle Elemente eines CLD's noch einmal zusammengefasst.

Tabelle 20: Beschreibung der Symbole eines Causal-Loop Diagramms (eigene Darstellung)

Bezeichnung	Symbol	Bedeutung
Pfeil		Ein Pfeil repräsentiert eine Kausalität zwischen zwei Systemelementen (vgl. Zaim et al., 2013).
Plus	+	Das Plus am Pfeil verdeutlicht eine positive Wirkungsbeziehung, die Ursache löst bei der Empfängervariablen einen vermehrenden Effekt aus (vgl. Zaim et al., 2013). Dieser Effekt kann verstärkend oder abschwächend wirken, muss in seiner Wirkrichtung aber identisch zur Ursache-Variablen verlaufen (vgl. Haraldsson, 2004).
Minus	-	Das Minus am Pfeil stellt hingegen einen negativen Wirkungszusammenhang im Sinne einer Reduktion dar (vgl. Zaim, 2013, S. 550) bzw. kann es auch bedeuten, dass sich eine Änderung in einer Variablen konträr zur Änderung der Empfänger-Variable entwickelt (vgl. Haraldsson, 2004).
Rückkopplungsschleife (Feedback Loop)		Rückkopplungsschleifen beschreiben Veränderungen, welche ihren Ursprung betreffen (vgl. Iandolo et. al, 2018).
Positive Rückkopplungsschleife (Reinforcing Feedback Loop)		Ein Reinforcing Feedback Loop ist eine positive Rückkopplung, welche sich durch das Systemverhalten im zeitlichen Verlauf von selbst verstärkt (vgl. Iandolo et. al, 2018).
Negative Rückkopplungsschleife (Balancing Feedback Loop)		Ein Balancing Feedback Loop ist eine negative Rückkopplung, welche sich im zeitlichen Verlauf abschwächt und das System im Ausgleich hält (vgl. Iandolo et. al, 2018).

Die Erstellung eines CLD's kann in Einzelarbeit, aber auch unter der Beteiligung relevanter Stakeholder erfolgen. Haraldson formulierte einen Prozess mit sieben relevanten Schritten für die Erstellung eines CLD's (vgl. Haraldsson, 2004):

1. Definition des Problems und Bestimmung der Systemgrenzen
2. Aufstellung der Problem- / Fragestellung und Herausarbeitung des konkreten Ziels
3. Identifikation der Haupt-Elemente und Auflistung in hierarchischer Reihenfolge
4. Erstellung des CLD's
5. Aufzeichnen des Systemverhaltens durch Reference Behaviour Pattern<sup>26</sup> (RBP) und

<sup>26</sup> RBP's bieten eine grafische Darstellung des zeitlichen Verhaltens einer oder mehrerer Variablen in den untersuchten Rückkopplungsschleifen (vgl. Haraldsson, 2004)

Observed Behaviour Pattern<sup>27</sup> (OBP)

## 6. Lernen und Überarbeitung

## 7. Schluss und Zusammenfassung

Aus den Prozessschritten geht eindeutig hervor, dass die Definition des Problems und die Herausarbeitung einer eindeutigen Fragestellung für die erfolgreiche Erstellung eines CLD's von zentraler Bedeutung sind. Nur, wenn die Ziele von Anfang an eindeutig feststehen ist es möglich, die Systemgrenzen sinnvoll festzulegen und somit alle relevanten Systemelemente im CLD zu verankern. Weiterhin ist es wichtig, ein erstelltes CLD wiederkehrend zu hinterfragen und ggf. Anpassungen vorzunehmen.

Das CLD ermöglicht es, komplexe Zusammenhänge vereinfachend darzustellen und somit auf einem verständlichen Aggregationsniveau mit den betreffenden Akteuren und Stakeholdern zu diskutieren. Es bietet folglich neben der Identifikation von Zusammenhängen und Wechselwirkungen einen hohen visuellen und kommunikativen Mehrwert (vgl. Haraldsson, 2004). Gängige Softwarelösungen für die Anwendung von CLD's sind zum Beispiel Vensim, iModeller oder auch Vesters Sensitivitätsmodell.

## 4.1.1.2 Stock-and-Flow Diagramm

In der heutigen Zeit sind Stock-and-Flow Diagramme (SFD) ein elementarer Bestandteil bei der praktischen Umsetzung von SD. Häufig liegt der quantitativen SFD Modellierung ein qualitatives CLD zugrunde, welches die relevanten Systemelemente und ihre gegenseitigen Wechselwirkungen sowie die konkrete Problemstellung beschreibt. Haraldsson beschreibt in diesem Zusammenhang in seinem Buch sechs Schritte, die bei der Transformation und Weiterentwicklung eines CLD's in ein SFD zu beachten sind (vgl. Haraldsson, 2004).

Besonders kennzeichnend bei der Erstellung eines SFD's sind neben der Quantifizierung aller Kausalitäten die Anwendung unterschiedlicher Grundelemente für die einzelnen Systemvariablen sowie unterschiedliche Möglichkeiten zur Verknüpfung dieser. Wie in Abbildung 30 zu sehen ist, wird in der modernen SFD Modellierung im Wesentlichen in vier verschiedene Grundelemente unterschieden:

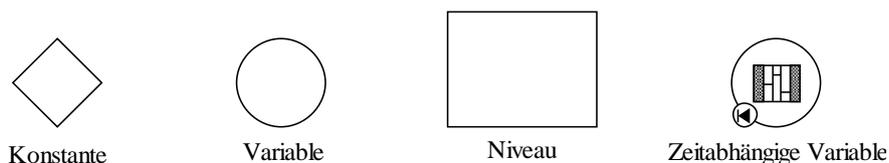


Abbildung 30: Grundelemente eines Stock-and-Flow Diagramms (eigene Darstellung)

<sup>27</sup> OBP's werden angewandt, um historische Zustände der Variablen an einer bestimmten Periode anzuzeigen (vgl. Haraldsson, 2004)

Das einfachste Grundelement bei einer SFD Modellierung ist die *Konstante*, welche durch ein Quadrat dargestellt wird (vgl. Abbildung 30). Obwohl es in der Praxis nur wenige reale Konstanten gibt, existieren viele Variablen, von denen angenommen werden kann, dass sie über einen Simulationslauf für einen bestimmten Zeithorizont innerhalb eines Modells etwa konstant bleiben (vgl. Pruyt, 2013). In diesem Zusammenhang werden für eine Konstante der Wert und die Einheit über die gesamte Simulationsdauer als konstant angenommen. Konstanten besitzen demnach keine Abhängigkeiten von anderen Systemelementen und werden nicht im zeitlichen Verlauf des Modells berechnet (vgl. Arndt, 2008). Aufgrund dieser Eigenschaften eignen sich Konstanten beispielsweise für die Modellierung statischer Rahmenbedingungen und externer Faktoren.

Ein weiteres Grundelement ist die *Variable*, welche durch einen Kreis dargestellt wird (vgl. Abbildung 30). Eine Variable wird in der Regel aus einer oder aus mehreren anderen Systemvariablen wie Konstanten, zeitabhängigen Variablen oder Niveaus berechnet. Die Berechnung erfolgt, sofern nicht anders definiert, in jedem Zeitabschnitt der Simulation (Arndt, 2008). Variablen können auch zeitabhängig auftreten (vgl. Abbildung 30). In diesem Fall kann ihnen ein Wert zugewiesen werden, welcher in Abhängigkeit zur Simulationszeit steht. Verwenden abhängige Variablen bei ihrer Berechnung zeitabhängige Variablen, so werden sie ebenfalls zeitabhängig.

Das vierte Grundelement ist das *Niveau* (englischsprachig Stock), welches im Modell berechnet wird (vgl. Abbildung 30). Im Gegensatz zu Variablen werden Niveaus ausschließlich durch einen Zu- und Abfluss (englischsprachig In- und Outflow) beeinflusst (Meadows, 2009). Der Wert des Niveaus  $x$  wird demnach, wie in Formel 10 dargestellt, über eine Integralgleichung durch den entsprechenden Zufluss  $ax$  und Abfluss  $bx$  sowie den gegebenen Anfangswert  $x_0$  beim Start der Simulation berechnet.

$$x = x_0 + \int_{t_0}^t (+ax - bx) dt \quad (\text{Formel 10})$$

Die in Abbildung 30 aufgeführten Grundelemente eines SFD's können durch unterschiedliche Verknüpfungsarten mit einander in Beziehung gesetzt werden. Eine Darstellung der beiden gängigen Verknüpfungsarten erfolgt in Abbildung 31.

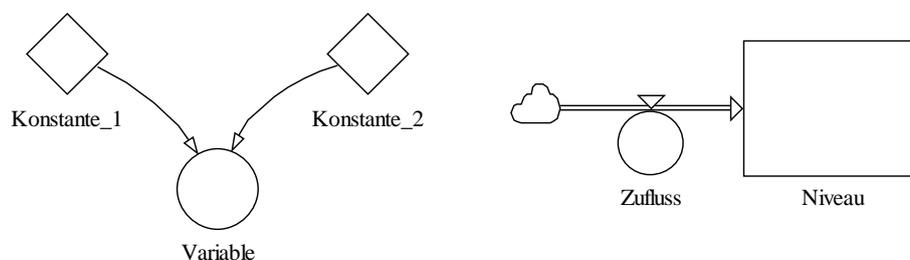


Abbildung 31: Verknüpfungen verschiedener Elemente eines Stock-and-Flow Diagramms (eigene Darstellung)

Bei der Verlinkung von Konstanten und / oder Variablen mit weiteren Systemelementen kommt in der Regel ein einfacher Verbindungspfeil zum Einsatz (vgl. Abbildung 31). Dieser symbolisiert, wie auch in einem CLD, eine Kausalität zwischen zwei Systemelementen, welche in einem SFD durch eine mathematische Differenz- oder Differentialgleichung beschrieben wird (vgl. Arndt, 2008).

Wie bereits erklärt, können Niveaus während eines Simulationslaufes nur durch Zu- und Abflüsse beeinflusst werden, welche die Einheit des Niveaus mal  $\frac{1}{\text{Zeit}}$  aufweisen (vgl. Abbildung 31). Diese Zu- und Abflüsse stellen die einzige Verbindung eines Niveaus mit anderen Elementen des Systems dar (wobei diese auch durch einen vom Niveau ausgehenden Verbindungspfeil beeinflusst werden können). Ein Verbindungspfeil kann im Zusammenhang mit einem Niveau nur für die Festsetzung des Startwertes genutzt werden. In diesem stellt er einen konstanten Startwert zur Verfügung, weshalb er in einigen Programmen gestrichelt angezeigt wird.

Die quantitative Berechnung innerhalb eines SFD's erfolgt auf der Basis der bestehenden Verknüpfungen (Verbindungen, Einflüsse und Ausflüsse) und kann im einfachsten Fall als eine Visualisierung von Differenz- und Differentialgleichungen betrachtet werden (vgl. Bradl, 2004). Einfache Verbindungen zwischen den Variablen oder Konstanten stellen dabei eine Differentialgleichung nullter Ordnung dar, bei der keine Abhängigkeit von  $a$  zu  $\dot{a}$  existiert. Bei einem Niveau mit Zu- und Abflüssen handelt es sich um ein Differentialgleichungssystem erster Ordnung, denn es existiert eine Abhängigkeit  $\phi$  ( $\dot{\phi}$ ). Denkbar wären auch Gleichungssysteme höherer Ordnung, etwa indem der Zufluss  $\dot{\phi}$  zu einem Niveau  $\phi$  von einem weiteren Niveau  $Q$  mit Zufluss  $\dot{Q}$  abhängt. Da in diesem Fall der Zufluss  $\dot{\phi} = Q$  ist, handelt es sich, wie in Formel 11 und 12 dargestellt, um eine Differentialgleichung zweiter Ordnung:

$$\phi = \phi(\dot{\phi}) = \phi(Q(\dot{Q})) \quad (\text{Formel 11})$$

$$= \phi(\ddot{Q}) \quad (\text{Formel 12})$$

Differentialgleichungssysteme höherer Ordnung stellen in der Praxis allerdings die Ausnahme dar. Die Lösung dieser Differentialgleichungssysteme erfolgt auf numerische Art. Dafür wird vor Beginn einer Simulation ein ausreichend kleiner Zeitschritt festgelegt. Durch die schrittweise Integration ergibt sich bei der Berechnung eines Niveaus im Vergleich zur Berechnung einer Variablen (Variablen werden der Natur nach sofort berechnet) eine Verzögerung um einen Zeitschritt. „Verzögerungseffekte als solche können aber auch bewusst genutzt werden, etwa wenn ein System mit verzögerter Reaktion  $\phi(t) = \phi(\dot{\phi}(t - t_0))$  modelliert werden soll“ (vgl. von Peinen, 2017, S. 18). In modernen SD Programmen können neben der klassischen Euler-Integrationsmethode auch genauere Methoden, wie beispielsweise Runge-Kutta, ausgewählt werden. Bekannte Softwarelösungen für die Anwendung von SFD's sind unter anderem Vensim, Stella, PowerSim oder auch Anylogic.

---

#### 4.1.2 Qualitative versus quantitative System-Modellierung

Auch, wenn die explorative Methode zur Erstellung von qualitativen CLD's in der Wissenschaft insbesondere als vorgeschaltete Phase bei der Erstellung eines quantitativen SFD's eine breite Anwendung findet (vgl. Kapitel 4.2.1), so gibt es einige Wissenschaftler, welche die qualitative Modellierung auf Basis eines CLD's der quantitativen SD-Modellierung vorziehen. Die Befürworter einer rein qualitativen Modellierung argumentieren dabei, dass die Analyse auf die qualitative Ebene beschränkt werden sollte, wenn die Erkenntnisse aus dem CLD bereits überzeugend und anwendbar sind oder, wenn „ein quantifiziertes Modell solche Unsicherheiten und Ungenauigkeiten enthalten kann, sodass sich der Aufwand für den Aufbau nicht lohnt" (vgl. Coyle et al., 1997, S. 206). Ein weiteres Argument für eine qualitative Modellierung ist die einfache Anwendung der Methode, welche auch als ein Instrument zur Problemstrukturierung und -entdeckung verstanden wird, mit dem Menschen ihre mentalen Modelle und Annahmen externalisieren und teilen können (vgl. Wolstenholme, 1999). Vester (2002) verwies in diesem Zusammenhang darauf, dass es unwissenschaftlich sei, wichtige Zusammenhänge aus dem Mangel an verfügbaren Daten nicht in die Untersuchung einzubeziehen:

» *Die Scheu, mit ‚weichen‘ Daten umzugehen, ist weit verbreitet. [...] Man fürchtet durch die Einbeziehung qualitativer Faktoren wie subjektiver Meinungen, Antipathie, Prestige, Attraktivität, Schönheit, Konsensfähigkeit, Sicherheitsgefühl und Ähnlichem den ‚sicheren‘ Boden wissenschaftlicher Betrachtung zu verlassen. Dabei wird vergessen, dass Aussagen über ein System, die wesentliche Teile von ihm unberücksichtigt lassen, weit unwissenschaftlicher sind.* « (vgl. Vester, 2002, S.21)

Es existieren in der Wissenschaft jedoch auch Ansichten gegen eine rein qualitative Modellierung. Hier wird argumentiert, dass Rückkopplungssysteme aufgrund ihrer Komplexität häufig unterschiedlich interpretiert oder auch als irreführend wahrgenommen werden (vgl. Richardson, 1999) und somit nicht zu den zuverlässigen Methoden der Verhaltensschlussfolgerung zählen (vgl. Homer & Olivia, 2001; Richardson, 1996; Pruyt, 2013). Weiterhin ermöglicht eine rein qualitative Darstellung keine Abschätzung der Auswirkungen oder der Geschwindigkeit einer Veränderung (vgl. Richardson, 1999; Warren & Langley, 1999).

Die meisten Wissenschaftler im Bereich ST und SD argumentieren, dass eine quantitative Simulation fast immer einen Mehrwert bringt (vgl. Homer & Olivia, 2001), aber eine tiefere und rigorosere Analyse mit einem deutlich höheren Zeit- und Ressourcenaufwand erfordert als eine rein qualitative Analyse (vgl. Wolstenholme, 1999).

#### 4.1.3 Überblick System Thinking / System Dynamics im Kontext Mobilität und Transport

Heutzutage existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Methoden und Anwendungen für Probleme und Fragestellungen im Zusammenhang mit dem urbanen Mobilitätssystem. Neben traditionellen Methoden, wie beispielsweise der klassischen Verkehrsmodellierung, Landnutzungsmodellen, diskreten Simulationen oder auch agenten-basierten- und mikroskopischen-Simulationen,

gewinnt die Anwendung von holistischen, interdisziplinären Methoden wie ST und SD zunehmend an Bedeutung (vgl. Shepherd & Emberger, 2010). Die Bearbeitung von Fragestellungen durch die Anwendung von ST und SD gilt im Bereich Mobilität und Transport als anerkannt. Insbesondere wird ein Vorteil darin gesehen, dass diese Modelle methodisch in der Lage sind, unterschiedliche Zeitverzögerungen und Reaktionen in Form von Interaktionen und Rückkopplungseffekten zu berücksichtigen und in einem zeitlichen Verlauf abzubilden (vgl. Kapitel 4.1.1.1 und 4.1.1.2). Weiterhin ist für viele Fragestellungen eine ganzheitliche Perspektive und Analyse des komplexen Mobilitätssystems erforderlich. Ziel dieses Kapitels ist es nicht, eine vollständige Auflistung aller bestehenden Veröffentlichungen mit der Anwendung von ST oder SD im Zusammenhang mit Mobilität und Transport abzubilden. Vielmehr werden vereinzelte Projekte ausgewählt, welche im Zusammenhang mit der Problemstellung dieser Arbeit als relevant angesehen werden.

Vester nutzte die Methoden von ST bereits in den 1980er Jahren für die Bearbeitung komplexer Fragestellungen im Bereich Mobilität und Transport. Neben seinen Werken, wie *Ausfahrt Zukunft* oder *Crashtest Mobilität*, entwickelte er seinerzeit eine eigene Software zur semi-quantitativen Modellierung von Systemzusammenhängen (vgl. Vester, 1990; Vester, 1996; Vester, 2002). Später nutzten unter anderem auch Wulfhorst (2003), Wulfhorst et al. (2013), Wolf et al. (2012) und Harrer et al. (2018) die von Vester entwickelte Sensitivitätssoftware für ihre Untersuchungen.

Shepherd et al. etablierte 2010 ein Special-Issue im *System Dynamics Review* für Fragestellungen im Bereich Mobilität und Transport (vgl. Shepherd, 2010). 2014 führte er ebenfalls eine umfassende Analyse bestehender Projekte durch, mit dem Ziel, mehr Transparenz von ST und SD im Bereich Mobilität und Transport zu erzeugen (vgl. Shepherd, 2014). Bekannte, ausgereifte Modelle und Projekte im Bereich SD sind beispielsweise das *Metropolitan Activity Relocation Simulator* (MARS) Modell oder das *ASsessment of TRANsport Strategies* (ASTRA) Modell. Während das MARS-Modell als strategisches Flächennutzungs- und Verkehrsinteraktionsmodell in ausgewählten europäischen Städten eingesetzt wird, simuliert das ASTRA-Modell die Zusammenhänge zwischen Verkehrsnachfrage, Wirtschaft, Fahrzeugflotte und Umweltauswirkungen auf europäischer Ebene (vgl. Pfaffenbichler et al., 2008; Fiorello et al., 2002).

## 4.2 Modellbildung

Das folgende Kapitel beschreibt den Prozess bei der Bildung eines quantitativen Modells zur Untersuchung der Auswirkungen von ODM im Untersuchungsgebiet München. Der Autor eignete sich im Rahmen dieser Arbeit insbesondere über Online-Tutorials, Konsultationen, einen einwöchigen Besuch bei einer SD Summer School in Island und zahlreichen Workshops die notwendigen Fähigkeiten zur Modellierung und Simulation von SD Modellen an.

Der Prozess bei der Erstellung eines SD Modells erfolgt hierbei nicht linear, sondern wird in der Regel iterativ und interaktiv durchgeführt. Dies bedeutet, dass bereits kleine Zwischenschritte bei der Modellierung regelmäßig überprüft werden und zu kontinuierlichen Anpassungen am Modell führen (vgl. Homer, 1996). In der Wissenschaft wird die Modellierung weiterhin als ein explorativer Prozess der Wissensgenerierung verstanden (vgl. Richardson & Pugh, 1981). Im Folgenden wird zunächst ein kurzer Überblick über den allgemeinen Prozess-Ablauf gegeben, woran sich eine detaillierte Erläuterung der Erstellung des zugrunde liegenden qualitativen CLD's und des quantitativen SFD's anschließt.

#### 4.2.1 Überblick über den Modellbildungsprozess

In der Literatur existieren unterschiedliche Ausprägungen zum Prozess der Modellentwicklung (vgl. Randers, 1980; Richardson & Pugh, 1981; Forrester, 1994; Wolstenholme, 1994; Sterman, 2000). Die nachfolgende Abbildung 32 zeigt einen Vergleich der beschriebenen Prozesse von Richardson & Pugh (1981) und Forrester (1994). Auch, wenn sich bestimmte Prozessschritte in beiden Modellen wiederfinden, so existieren dennoch vereinzelt Unterschiede in deren Definition und in der Interaktion der einzelnen Schritte.

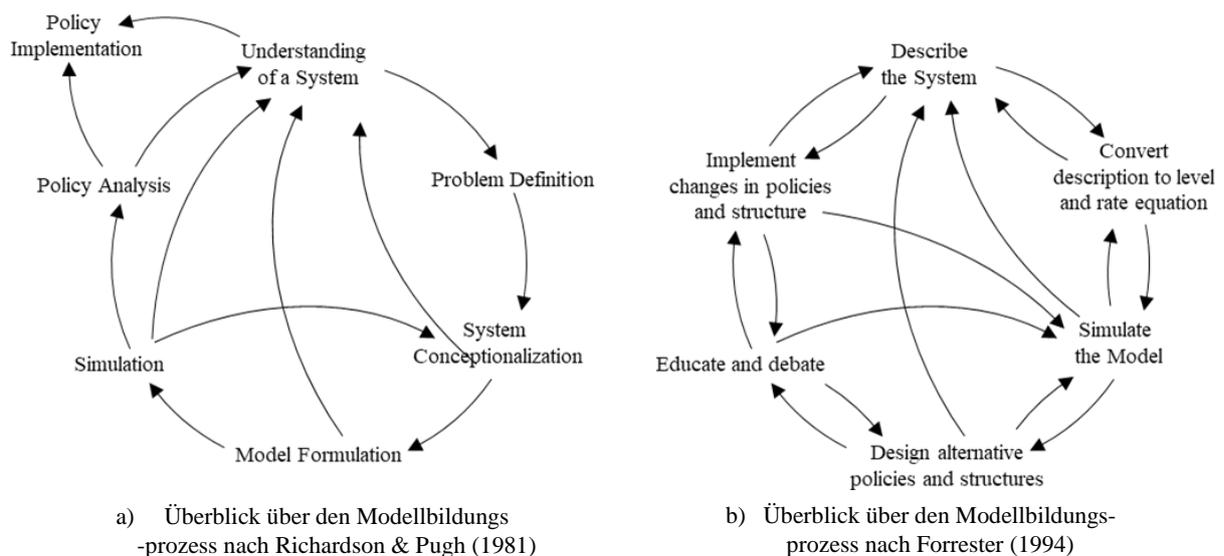


Abbildung 32: Prozesse der Modellbildung nach Richardson und Forrester (eigene Darstellung)

Die beiden Prozesse drücken zwar den iterativen Charakter eines SD-Prozesses aus, zeigen aber nach Pruyt nicht einmal annähernd, wie iterativ die Modellierung in der praktischen Umsetzung wirklich verläuft. „In der Praxis wird jede dieser Phasen während eines SD-Modellierungsprojekts mehrmals wiederholt, beginnend mit einem kleinen Modell, das allmählich erweitert wird, bis es für den vorliegenden Zweck gut genug ist“ (vgl. Pruyt, 2013, S. 47). Forrester ist sogar der Auffassung, dass der Erkenntnisgewinn aus Sicht des Lernens bei dem eigentlichen SD-Modellierungsprozess höher und wertvoller ist als die resultierenden Modelle (vgl. Forrester, 1985).

Pruyt (2013) fasst auf Basis aller in der Literatur bestehenden Prozessbeschreibungen zur Etablierung von SD Modellen den Prozess in folgende fünf Phasen zusammen:

1. „Problemerkennung: Identifizierung und Artikulation des zu behandelnden Problems;
2. Modellkonzeptualisierung: Entwicklung einer kausalen Theorie über das Problem;
3. Modellformulierung: Formulierung eines SD-Simulationsmodells der Kausaltheorie;
4. Modellprüfung: Prüfung des Modells, um zu beurteilen, ob es für den Zweck geeignet ist;
5. Verwendung von Modellen, häufig modellgestützte Szenario-Analyse: Verwendung des Modells zur Bewertung von Maßnahmen („what-if“ Analysen<sup>28</sup>) um potentielle Lösungswege des Problems aufzuzeigen“ (vgl. Pruyt, 2013, S. 46).

Phase 1 und Phase 2 des von Pruyt aufgestellten Prozesses stimmen mit den bereits genannten Phasen der Aufstellung eines CLD's überein (vgl. Kapitel 4.1.1.1). Die dritte Phase bezieht sich konkret auf die Überführung der Kausalitäten eines CLD's in ein SD-Simulationsmodell. Die Phasen 4 und 5 konzentrieren sich auf die Plausibilisierung und Prüfung des entstandenen Modells sowie die Anwendung in unterschiedlichen Szenarien zur Identifizierung möglicher Handlungsalternativen in Bezug auf die dargestellte Problemstellung.

#### *Praktische Prozessanwendung in dieser Arbeit*

Das Forschungsdesign dieser Arbeit orientiert sich zielgerichtet an der in der Einleitung beschriebenen Problemstellung: Welche Auswirkungen haben zukünftige ODM-Angebote auf eine nachhaltige Entwicklung in der Stadt? Wie in Kapitel 1.3 dargestellt, wurde diese übergeordnete Fragestellung anhand von vier konkreten Forschungsfragen operationalisiert, welche am Beispiel der Stadt München untersucht werden.

Die in Kapitel 3 durchgeführte explorative Expertenstudie wurde dem Modellbildungsprozess vorgelagert, um ein tieferes Verständnis über potentielle Systemelemente und ihre strukturellen Abhängigkeiten zu erlangen. Wie im Kapitel 3.6.4 dargestellt, wurden durch einen aufwendigen Kategorisierungsprozess, 33 Unter-Kategorien und sieben Haupt-Kategorien aus dem qualitativen Datenmaterial herausgearbeitet, welche als relevante Modellelemente in einem bedeutsamen Zusammenhang zur übergeordneten Problemstellung stehen.

Durch einen stetigen Abgleich mit der Literatur (Kapitel 2) werden die identifizierten Systemelemente in einem wiederkehrenden, iterativen Prozess in einen kausalen Zusammenhang gebracht. Als Ergebnis dieser Phase entsteht ein CLD, welches alle Kausalitäten und Rückkopplungsschleifen zwischen den relevanten Systemvariablen beschreibt (vgl. Kapitel 4.2.2.3). Bei

---

<sup>28</sup> Durch eine What-If Analyse lassen sich Einflüsse verschiedener Parametern auf andere Kennzahlen oder Parameter simulieren.

---

der Auswahl der finalen Systemelemente muss also zwingend sichergestellt werden, dass das CLD für die Beantwortung der Forschungsfragen richtig ausgelegt und konzeptualisiert ist.

Aufbauend auf dem CLD erfolgt (auf Basis der von Pruyt formulierten Richtlinien) in der vierten Prozessphase eine Weiterführung in ein SFD (vgl. Kapitel 4.2.3). Eine besondere Herausforderung stellt neben einer geeigneten Datengrundlage die Quantifizierung aller Kausalitäten dar. Die Erstellung des SFD's erfolgt analog zur Erstellung des CLD's als iterativer Prozess, bei dem bereits kleine Zwischenschritte und Teilsysteme regelmäßig überprüft werden und zu kontinuierlichen Anpassungen führen.

Die fünfte Phase der Anwendung des Modells erfolgt im Rahmen dieser Arbeit durch die Auswertung der in Kapitel 4.3 aufgestellten Zukunfts-Szenarien. Hierbei ist es wichtig, dass die Ergebnisse der unterschiedlichen Simulationsläufe eine Vergleichbarkeit untereinander aufweisen und mit einem Referenz-Szenario verglichen werden. Die Auswertung und Bewertung der quantitativen Ergebnisse aus den Simulationsläufen des SFD's, mit Bezug auf die in Kapitel 1.3 aufgestellten Forschungshypothesen, erfolgt in Kapitel 4.4.

#### 4.2.2 Erstellung eines qualitativen Causal-Loop Diagramms

Das folgende Kapitel fasst die Umsetzung zur Aufstellung eines für die Problemstellung geeigneten CLD's zusammen. Nach einer Erläuterung der Variablen erfolgt eine Analyse der zugrundeliegenden Wirkzusammenhänge und Feedbackstrukturen, welche abschließend in einem holistischen CLD zusammengeführt werden.

##### 4.2.2.1 Variablensatz

Als Grundlage für die im CLD berücksichtigten Variablen dienen die 33 Unter-Kategorien, welche in der qualitativen Expertenbefragung identifiziert wurden (vgl. Kapitel 3.6.4). Da es bei der Aufstellung des CLD's vordergründig darum geht, den Gesamtzusammenhang der vorliegenden Problemstellung aufzuzeigen und vorhandene Feedbackstrukturen zu identifizieren, konnten einige Variablen in dem finalen CLD unberücksichtigt bleiben. Somit konnte durch die Konzentration auf einen holistischen Gesamtzusammenhang und die Fokussierung auf die dafür notwendigen Variablen bei der Erstellung des finalen CLD's Komplexität eingespart werden. Das erstellte CLD ist somit übersichtlicher und nutzbarer im Kontext der zentralen Problemstellung. Abbildung 33 fasst alle im finalen CLD berücksichtigten Variablen sowie die angewandten Hilfsvariablen zusammen.



bilität: Verkehrsfluss und Durchschnitts-Geschwindigkeit; Flächeninanspruchnahme und Flächenverbrauch sowie Luftschadstoff- und Treibhausgas-Emissionen. Eine Zusammenfassung aller identifizierten Rückkopplungsschleifen für die Aufstellung des finalen CLD's erfolgt in Tabelle 21.

### Feedbackstrukturen zur Attraktivität unterschiedlicher Transport-Modes

Eine elementare Funktionsweise des vorliegenden Modells besteht in dem Wirkzusammenhang zwischen der Verkehrsnachfrage nach einem Transport-Mode und der Attraktivität dieses Modes für die (potentiellen) Nutzer. Basierend auf den Grundlagen der klassischen Verkehrsnachfragemodellierung (vgl. Schiller, 2010), wird analog jedem Transport-Mode eine Attraktivität zugewiesen, welche, wie in der Abbildung 34a dargestellt, in einer direkten Konkurrenzsituation untereinander stehen.

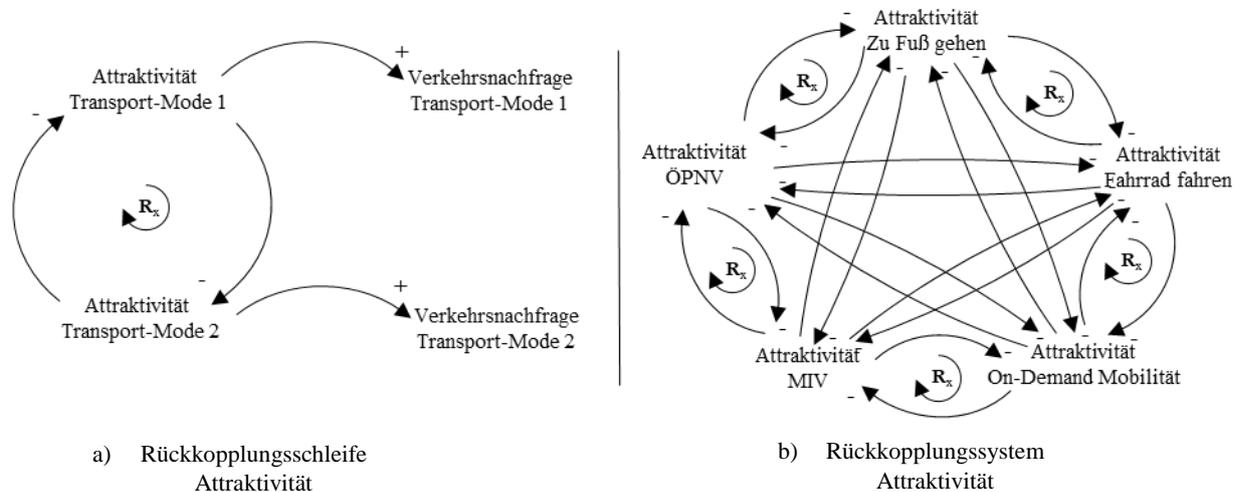


Abbildung 34: Rückkopplungsschleife Attraktivität und Verkehrsnachfrage (1/2) (eigene Darstellung)

Die in Abbildung 34a dargestellte, positive Rückkopplungsschleife impliziert, dass eine Erhöhung der Attraktivität eines Transport-Modus eine Reduzierung der Attraktivität der anderen Transport-Modus zur Folge hat. Durch diese Funktionsweise des Rückkopplungssystems wird die absolute Summe der Attraktivität auch unter sich verändernden Attraktivitäten der einzelnen Transport-Modus konstant gehalten.

Es wird also übergeordnet davon ausgegangen, dass eine Verschiebung innerhalb unterschiedlicher Attraktivitäten in der Summe nicht zu einem Anstieg oder zu einer Reduzierung der Gesamt-Attraktivität führen (vgl. Kapitel 4.5.1). Die einzelnen Attraktivitäten stehen somit in einer Konkurrenzsituation zueinander, bei der die Summe aller Attraktivitäten als konstant angenommen wird. Da die Verkehrsnachfrage in einer direkten Beziehung zur Attraktivität steht, impliziert das Modell ebenfalls, dass Veränderungen innerhalb der einzelnen Attraktivitäten und Verkehrsnachfragen in der Summe zu keiner Veränderung der Gesamt-Verkehrsnachfrage führen. In der Realität auftretende Effekte wie beispielsweise der „induzierte Verkehr“ (siehe unter FGSV, 2005) werden somit in den dargestellten CLD's nicht berücksichtigt (vgl. Kapitel

4.5.1). Abbildung 35 verbindet das vorliegende Rückkopplungssystem aus Abbildung 34b mit den einzelnen Verkehrsnachfragen.

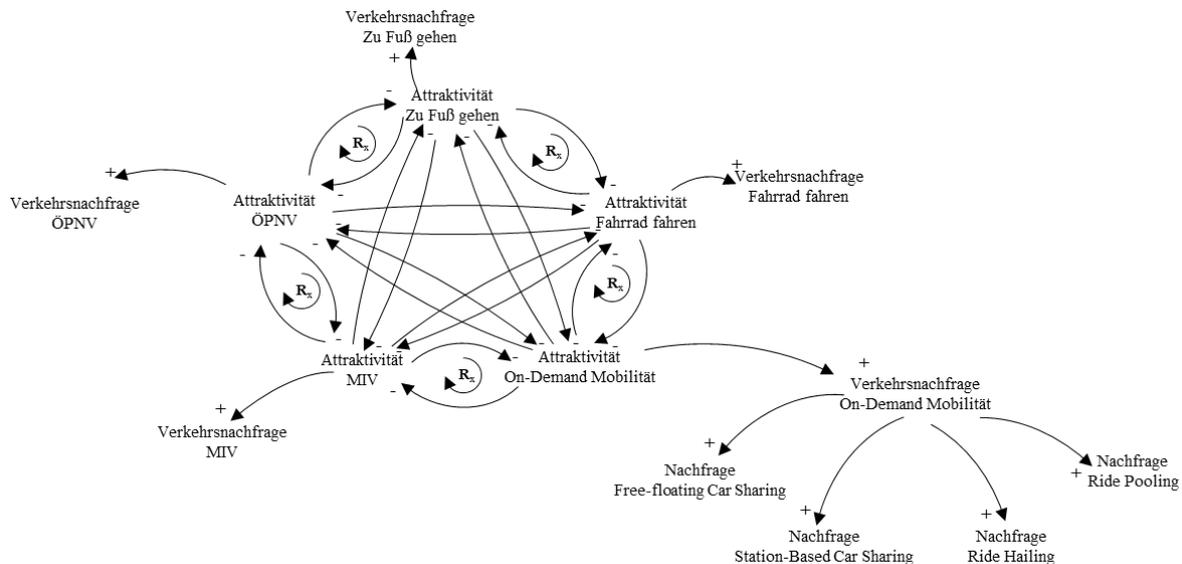


Abbildung 35: Rückkopplungssystem Attraktivität und Verkehrsnachfrage (2/2) (eigene Darstellung)

Wie in der Abbildung 35 dargestellt ist, wird in dem Modell zwischen den unterschiedlichen Transport-Moden ÖPNV, MIV, Zu Fuß gehen, Rad Fahren und ODM unterschieden, wobei sich ODM in einem weiteren Unterteilungsschritt, in die für diese Arbeit relevanten Angebotsformen Free-Floating und Station-Based Car Sharing, Ride Hailing und Ride Pooling unterscheiden lässt (vgl. Kapitel 2.4). Die Zusammenfassung aller vier unterschiedlichen Angebotsformen in einer übergeordneten Attraktivität ist aus Gründen der Komplexität durchaus sinnvoll, stellt aber im weiteren Verlauf der Arbeit eine als kritisch anzusehende Vereinfachung dar (vgl. Kapitel 4.5.1).

#### *Feedbackstrukturen zum Indikator Verkehrsfluss und Durchschnitts-Geschwindigkeit*

Die Verkehrseffizienz ist in Bezug auf das Gesamtsystem ein Teil einer elementaren Rückkopplungsschleife, welche das Mobilitätssystem, bedingt durch die kapazitiv-limitierte Infrastruktur in einer Stadt, in Balance hält. Es handelt sich demnach um eine negative Rückkopplungsschleife ( $B_{C1}$ ).

Wie in Abbildung 36 dargestellt, resultiert durch einen Anstieg in der Attraktivität des MIV's eine gesteigerte Verkehrsnachfrage nach diesem Verkehrsmittel, was zu einer Erhöhung der Fahrzeugkilometer durch MIV beiträgt. Ein Anstieg der MIV Fahrzeugkilometer führt zu einem direkten Anstieg der Gesamt-Fahrzeugkilometer, was durch die begrenzte Infrastruktur zu erhöhter Verkehrsüberlastung und Stau führt und demnach zu einer Reduktion der durchschnittlichen Geschwindigkeit im Untersuchungsgebiet beiträgt. Eine verminderte Durchschnitts-Geschwindigkeit wirkt sich wiederum auf die Attraktivität des MIV aus und schließt somit die

Rückkopplungsschleife  $B_{C1}$  zu einem insgesamt negativen, das Modell in Balance haltenden, Feedbackmechanismus (vgl. auch Tabelle 21).

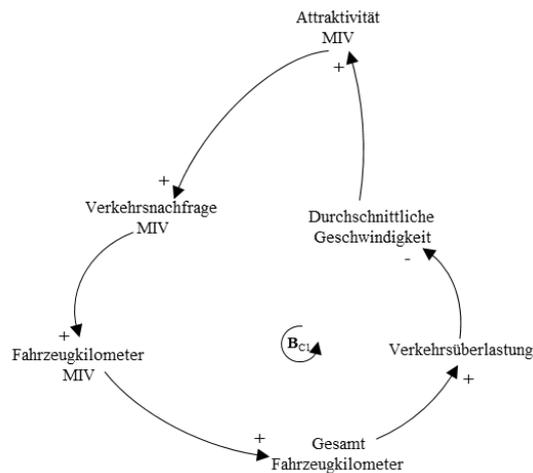


Abbildung 36: Rückkopplungsschleife Verkehrsfluss und Durchschnitts-Geschwindigkeit (1/2)  
(eigene Darstellung)

Neben dem MIV führen auch weitere Transport-Moden, wie der ÖPNV und ODM, durch die Nutzung der zur Verfügung stehenden Straßeninfrastruktur zu einer Verkehrsüberlastung und Stau. Auch, wenn der ÖPNV nur dann eine Auswirkung auf den Verkehr besitzt, wenn er in der Ausprägungsform von Bus oder der Straßenbahn auf der Straßeninfrastruktur durchgeführt wird, so besitzen die in dieser Arbeit untersuchten Ausprägungsformen von ODM (die sich alle auf motorisierte Fahrzeuge im Straßenverkehr fokussieren) einen direkten Einfluss auf das Verkehrsaufkommen und die Verkehrseffizienz. Einen Überblick über die durch den MIV, den ÖPNV und ODM erzeugten Gesamt-Fahrzeugkilometer, bietet die Abbildung 37. Eine Auflistung aller identifizierten Rückkopplungsschleifen  $B_{C1}$ ,  $B_{C2}$ ,  $B_{C3}$ ,  $R_{C1}$  und  $R_x$  erfolgt nachfolgend in der Tabelle 21.

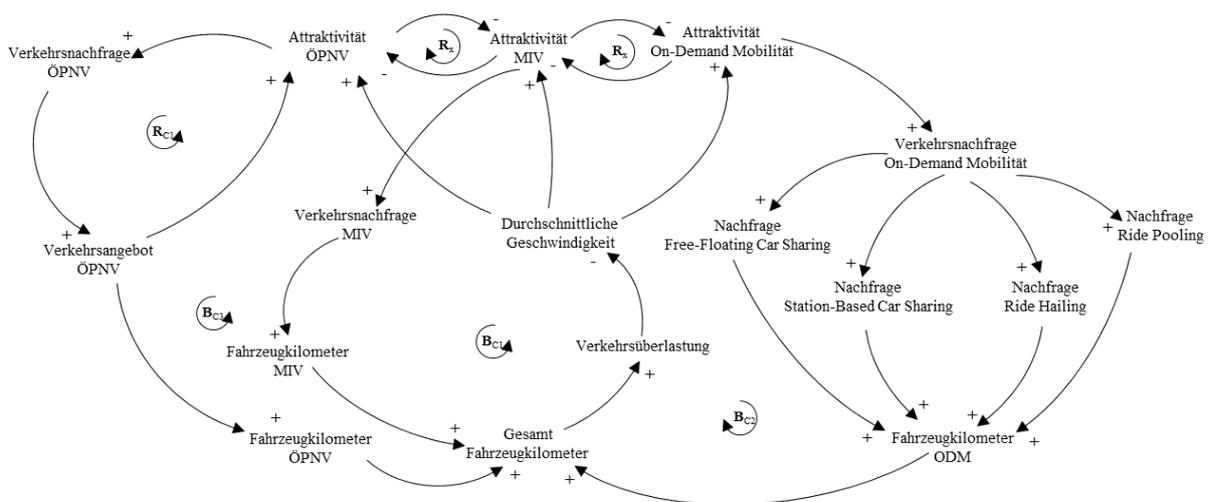


Abbildung 37: Rückkopplungssystem Verkehrsfluss und Durchschnitts-Geschwindigkeit (2/2)  
(eigene Darstellung)

### Feedbackstrukturen zum Indikator Flächeninanspruchnahme und Flächenverbrauch

Ein weiterer wesentlicher Feedbackmechanismus basiert auf der Knappheit des öffentlichen Raums und den daraus resultierenden öffentlichen Parkplätzen im Untersuchungsgebiet. Die identifizierte Rückkopplungsschleife  $B_{P1}$  impliziert, dass eine erhöhte Verkehrsnachfrage einen Anstieg am privaten PKW Besitz zur Folge hat. Dieser Anstieg wirkt sich auch auf die Anzahl der im öffentlichen Raum parkenden Fahrzeuge aus, welche durch die Kapazität der gegebenen Infrastruktur limitiert wird. Durch eine Erhöhung der Parknachfrage, bei gleichbleibendem Parkflächenangebot, kommt es zu einem erhöhten Parkdruck- und Parksuchverkehr. Die Personen, welche ihr Fahrzeug im öffentlichen Raum parken, benötigen dementsprechend im Durchschnitt einen höheren Zeitaufwand um einen Parkplatz zu finden, was sich negativ auf die Attraktivität des MIV's auswirkt. Die Rückkopplungsschleife  $B_{P1}$  hält sich demnach selbst in Balance und wird durch die zur Verfügung stehende Infrastruktur in Form von öffentlichen Parkplätzen limitiert. Für ein besseres Verständnis ist die aufgeführte Rückkopplungsschleife in Abbildung 38 aufgeführt.

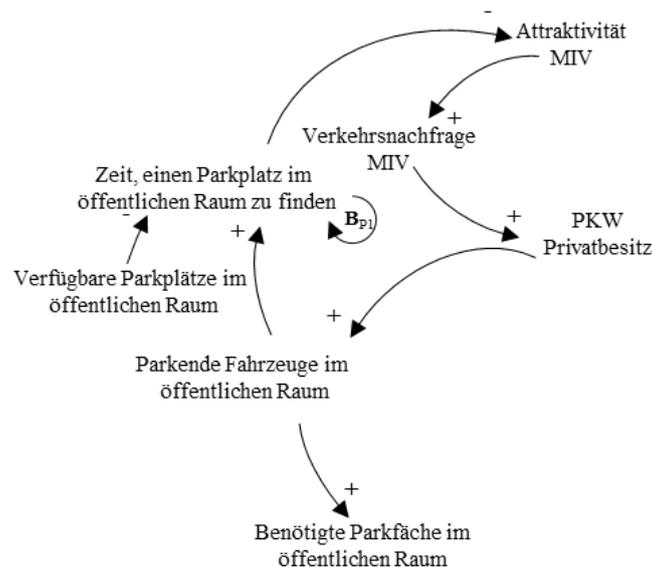


Abbildung 38: Rückkopplungsschleife Flächeninanspruchnahme und Flächenverbrauch (1/2)  
(eigene Darstellung)

Neben dem MIV wird der zur Verfügung stehende Parkraum auch durch ODM-Angebote beeinflusst. Insbesondere bei Free-Floating und Station-Based Car Sharing Angeboten werden die Fahrzeuge ausschließlich im öffentlichen Raum abgestellt, was den Parkraum weiter belastet (vgl. Rückkopplungsschleife  $B_{P2}$  und  $B_{P3}$ ). Darüber hinaus wurden in der Literatur aber positive Effekte von Car Sharing auf den privaten PKW Besitz identifiziert, welche sich in unterschiedlichem Ausmaß auswirken (vgl. Tabelle 14). Wie in Abbildung 39 dargestellt, treten diese Effekte in Form von sich verstärkenden Rückkopplungsschleifen ( $R_{P1}$  und  $R_{P2}$ ) auf.

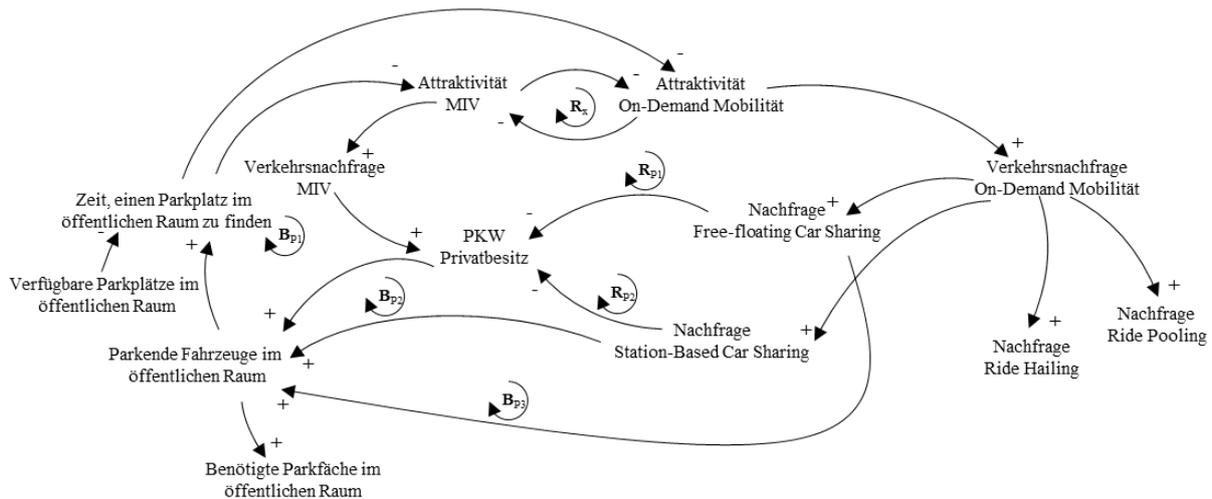


Abbildung 39: Rückkopplungssystem Flächeninanspruchnahme und Flächenverbrauch (2/2)  
(eigene Darstellung)

Für die ODM-Angebotsformen Ride Hailing und Ride Pooling wird davon ausgegangen, dass sie die zur Verfügung stehenden Stellplatz-Flächen im öffentlichen Raum nicht bedeutsam beeinflussen. Auch bezüglich der Auswirkungen von Ride Hailing und Ride Pooling auf den privaten PKW Besitz existieren zum aktuellen Zeitpunkt keine belastbaren Erkenntnisse in der Literatur (vgl. Tabelle 15 und 16). Demnach besteht im Modell kein direkter Wirkzusammenhang zwischen den beiden Angebotsformen und dem privaten PKW Besitz oder der Anzahl der parkenden Fahrzeuge im öffentlichen Raum.

#### *Feedbackstrukturen zum Indikator Luftschadstoff- und Treibhausgas-Emissionen*

Analog zum Rückkopplungssystem Verkehrsfluss und Durchschnitts-Geschwindigkeit werden im Modell die Summe der ausgestoßenen Emissionen auf Basis der Anzahl der Gesamt-Fahrzeugkilometer ermittelt. Wie im Kapitel 2.3.2.3 ausführlich beschrieben, stehen im Rahmen dieses Modells die freigesetzten Luftschadstoff-Emissionen für NO<sub>x</sub> und PM sowie die kumulierten Treibhausgas-Emissionen in CO<sub>2äqu</sub> im Fokus.

Im Gegensatz zu den bisherigen Rückkopplungssystemen handelt es sich bei dieser Feedbackstruktur nicht um einen direkt geschlossenen, sich selbst verstärkenden oder abschwächenden Feedbackmechanismus, da eine Erhöhung der Luftschadstoff- und Treibhausgas-Emissionen in einem realen System keine direkte Konsequenz in Bezug auf die anderen Systemelemente ausübt. Vielmehr bedarf es einer (politischen) Entscheidung von außerhalb, durch welche beispielsweise bei einem starken Anstieg der Emissionen Gegenmaßnahmen eingeleitet werden. In der vorliegenden Feedbackstruktur wird somit der politische Druck auf eine nachhaltige Entwicklung als endogene Hilfsvariable eingeführt, welche durch einen Anstieg der betrachteten Emissionswerte positiv beeinflusst wird. Auch, wenn die Entscheidung für eine konkrete Maßnahme in dem quantitativen Stock-and-Flow Modells außerhalb der Systemgrenze getroffen wird (vgl. Kapitel 4.2.3), so werden in Abbildung 40 mögliche Maßnahmen in Form

einer Erweiterung der Infrastruktur für den ÖPNV, oder den Rad- und Fußverkehr sowie preisliche und sonstige Regulierungen für den MIV aufgeführt, welche sich in einer geschlossenen Rückkopplungsschleife auf die entsprechenden Attraktivitäten auswirken.

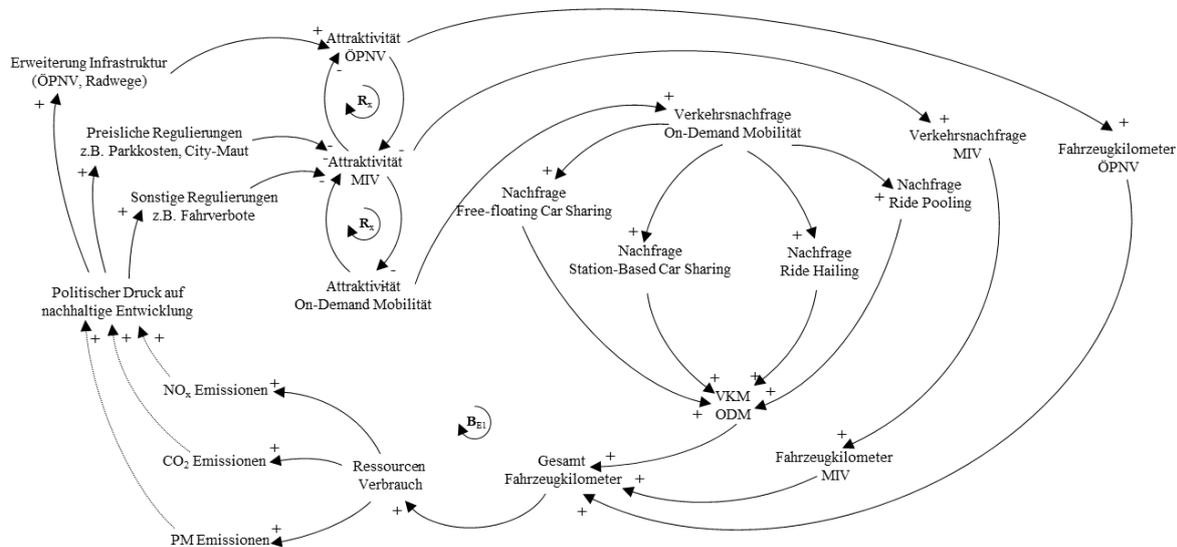


Abbildung 40: Rückkopplungssystem für Luftschadstoff- und Treibhausgas-Emissionen (eigene Darstellung)

Die nachfolgende Tabelle 21 fasst alle identifizierten Rückkopplungsschleifen für einen besseren Systemüberblick noch einmal zusammen.

Tabelle 21: Überblick Rückkopplungsschleifen des CLD's (eigene Darstellung)

Loop	Ausprägung	Beschreibung
R <sub>x</sub>	Reinforcing	Attraktivität Transport-Mode 1 → <sup>+</sup> Attraktivität Transport-Mode 2 → <sup>-</sup> Attraktivität Transport-Mode 1
B <sub>C1</sub>	Balancing	Attraktivität MIV → <sup>+</sup> Verkehrsnachfrage MIV → <sup>+</sup> Fahrzeugkilometer MIV → <sup>+</sup> Gesamt-Fahrzeugkilometer → <sup>+</sup> Verkehrsüberlastung → <sup>-</sup> Durchschnittliche Geschwindigkeit → <sup>+</sup> Attraktivität MIV
B <sub>C2</sub>	Balancing	Attraktivität ODM → <sup>+</sup> Verkehrsnachfrage ODM → <sup>+</sup> Nachfrage FF / SB Car Sharing; Ride Hailing; Ride Pooling → <sup>+</sup> Fahrzeugkilometer ODM → <sup>+</sup> Gesamt-Fahrzeugkilometer → <sup>+</sup> Verkehrsüberlastung → <sup>-</sup> Durchschnittliche Geschwindigkeit → <sup>+</sup> Attraktivität ODM
B <sub>C3</sub>	Balancing	Attraktivität ÖPNV → <sup>+</sup> Verkehrsnachfrage ÖPNV → <sup>+</sup> Verkehrsangebot ÖPNV → <sup>+</sup> Fahrzeugkilometer ÖPNV → <sup>+</sup> Gesamt-Fahrzeugkilometer → <sup>+</sup> Verkehrsüberlastung → <sup>-</sup> Durchschnittliche Geschwindigkeit → <sup>+</sup> Attraktivität ÖPNV
R <sub>C1</sub>	Reinforcing	Attraktivität ÖPNV → <sup>+</sup> Verkehrsnachfrage ÖPNV → <sup>+</sup> Verkehrsangebot ÖPNV → <sup>+</sup> Attraktivität ÖPNV
B <sub>P1</sub>	Balancing	Attraktivität MIV → <sup>+</sup> Verkehrsnachfrage MIV → <sup>+</sup> PKW Privatbesitz → <sup>+</sup> Parkende Fahrzeuge im öffentlichen Raum → <sup>+</sup> Zeit, einen Parkplatz im öffentlichen Raum zu finden → <sup>-</sup> Attraktivität MIV
B <sub>P2</sub>	Balancing	Attraktivität ODM → <sup>+</sup> Verkehrsnachfrage ODM → <sup>+</sup> Nachfrage FF Car Sharing → <sup>+</sup> Parkende Fahrzeuge im öffentlichen Raum → <sup>+</sup> Zeit, einen Parkplatz im öffentlichen Raum zu finden → <sup>-</sup> Attraktivität ODM
B <sub>P3</sub>	Balancing	Attraktivität ODM → <sup>+</sup> Verkehrsnachfrage ODM → <sup>+</sup> Nachfrage SB Car Sharing → <sup>+</sup> Parkende Fahrzeuge im öffentlichen Raum → <sup>+</sup> Zeit, einen Parkplatz im öffentlichen Raum zu finden → <sup>-</sup> Attraktivität ODM
R <sub>P1</sub>	Reinforcing	Attraktivität ODM → <sup>+</sup> Verkehrsnachfrage ODM → <sup>+</sup> Nachfrage FF Car Sharing → <sup>-</sup> PKW Privatbesitz → <sup>+</sup> Parkende Fahrzeuge im öffentlichen Raum → <sup>+</sup> Zeit, einen Parkplatz im öffentlichen Raum zu finden → <sup>-</sup> Attraktivität ODM
R <sub>P2</sub>	Reinforcing	Attraktivität ODM → <sup>+</sup> Verkehrsnachfrage ODM → <sup>+</sup> Nachfrage SB Car Sharing → <sup>-</sup> PKW Privatbesitz → <sup>+</sup> Parkende Fahrzeuge im öffentlichen Raum → <sup>+</sup> Zeit, einen Parkplatz im öffentlichen Raum zu finden → <sup>-</sup> Attraktivität ODM
B <sub>E1</sub>	Balancing	Attraktivität MIV → <sup>+</sup> Verkehrsnachfrage MIV → <sup>+</sup> Fahrzeugkilometer MIV → <sup>+</sup> Gesamt Fahrzeugkilometer → <sup>+</sup> Ressourcen Verbrauch → <sup>+</sup> NO <sub>x</sub> ; PM und CO <sub>2</sub> Emissionen → <sup>+</sup> Politischer Druck auf nachhaltige Entwicklung → <sup>+</sup> preisliche / Sonstige Regulierungen → <sup>-</sup> Attraktivität MIV

---

#### 4.2.2.3 Causal Loop-Diagramm

Basierend auf dem Variablensatz in Kapitel 4.2.2.1 und den identifizierten Wirkzusammenhängen und Feedbackstrukturen aus Kapitel 4.2.2.2 erfolgt in diesem Kapitel die Darstellung aller für die Problemstellung relevanten, kausalen Zusammenhänge in einem finalen CLD. Wie bereits beschrieben lag der Fokus in der Darstellung des holistischen Gesamtzusammenhanges und der Fokussierung auf die hierfür notwendigen, relevanten Variablen.

Bei einer detaillierten Betrachtung des vorliegenden CLD's ist erkennbar, dass alle negativen Rückkopplungsschleifen, welche das System in Balance halten, in der Regel durch kapazitiv-limitierende Systemelemente begrenzt werden. Hierunter zählt zum Beispiel die vorhandene Straßeninfrastruktur, welche nur für eine gewisse Verkehrskapazität ausgelegt ist, oder auch der zur Verfügung stehende öffentliche Parkraum, welcher durch die gegebene Infrastruktur in einer Stadt limitiert wird. Bei Übersteigerung der Kapazität dieser begrenzenden Systemelemente kommt es demnach zu Überlastungseffekten, welche sich stark auf die Attraktivität der entsprechenden Transport-Modes auswirken.

Positive Rückkopplungsschleifen existieren überwiegend in Form von positiven Effekten auf die Attraktivität eines Transport-Modes. Wie beispielsweise in der Rückkopplungsschleife  $R_{P2}$  dargestellt, wirkt die erhöhte Nutzung von Car Sharing negativ auf den privaten PKW-Besitz, wodurch der Parkdruck reduziert wird und dementsprechend die Attraktivität von Car Sharing Angeboten aufgrund einer erhöhten Stellplatz-Verfügbarkeit steigt.

Das finale CLD wird folgend in Abbildung 41 dargestellt. Externe Einflussfaktoren, welche nicht endogen aus dem Systemverhalten entstehen, jedoch eine starke Auswirkung auf das zukünftige Systemverhalten besitzen, werden in dem CLD in Form von gestrichelten Pfeilen dargestellt.

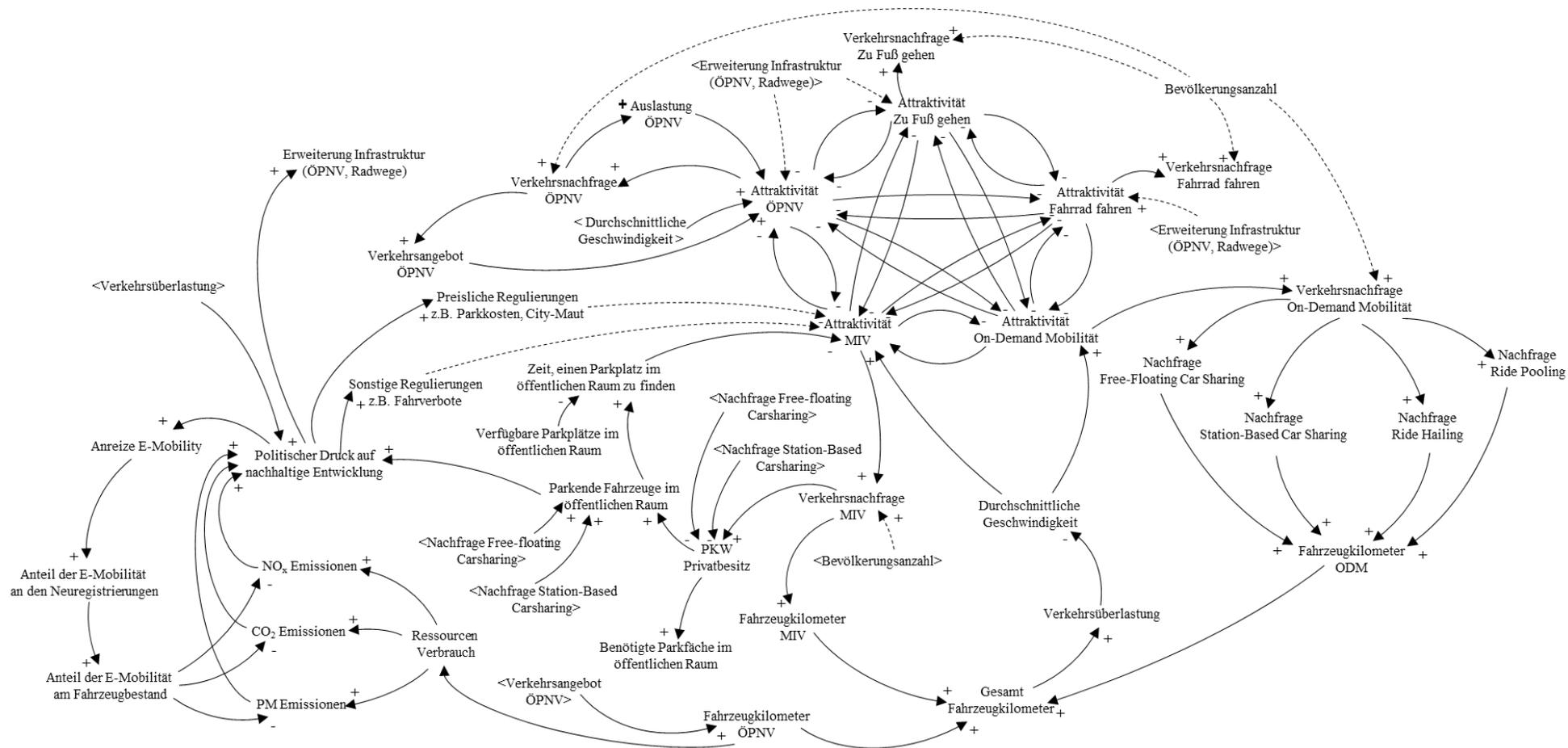


Abbildung 41: CLD ODM im Kontext nachhaltiger urbaner Mobilität (eigene Darstellung)

#### 4.2.3 Erstellung eines quantitativen Stock-and-Flow Diagramms

Aufbauend auf dem in Kapitel 4.2.2 dargestellten CLD umfasst dieses Kapitel die Erstellung eines geeigneten SFD's. Hierbei erfolgt neben der Erläuterung der Datengrundlage für die quantitative Erstellung des SFD's ein Überblick über die angewandten Variablen. Weiterhin werden der modulare Aufbau des Gesamt-SFD's vorgestellt und die mathematische Funktionsweise des SFD's exemplarisch auf Basis eines Submodells zum MIV Fahrzeugbesitz erläutert.

##### 4.2.3.1 Datengrundlage der quantitativen Modellierung

Wie in Kapitel 4.1 beschrieben, stellt eine geeignete quantitative Datengrundlage bei der Erstellung und Anwendung eines SFD's eine besondere Bedeutung dar, da die Verfügbarkeit und Qualität der Daten eine direkte Auswirkung auf die Güte und Validität der Modelergebnisse besitzen. Da in einem SFD alle berücksichtigten Kausalitäten in Form eines quantitativen Zusammenhangs beschrieben werden müssen, ist eine hohe Verfügbarkeit von Daten für die Erstellung eines belastbaren Modells notwendig. Im vorliegenden Modell wurden aus diesem Grund unterschiedliche Daten zur quantitativen Grundlage herangezogen, um System-Kausalitäten oder -module quantitativ abbilden zu können.

Als zentrale Grundlage für das Mobilitätsverhalten der Münchner Bevölkerung wurde der Vertiefungs-Datensatz der aktuellen Befragung der Mobilität in Deutschland für das Untersuchungsgebiet der Stadt München herangezogen (vgl. Follmer & Belz, 2018). Hierbei handelt es sich um eine repräsentative Befragung Münchner Haushalte (> 7.000 Haushalte) nach dem stichtagsbezogenen Mobilitätsverhalten der einzelnen Personen im Haushalt. Neben Informationen zum Modal Split der Münchner Bevölkerung, liefert der Datensatz unter anderem auch Informationen zur Nutzung unterschiedlicher Verkehrsmittel, durchschnittlichen Wegelänge oder auch täglichen Anzahl an Wegen. Wie in Abbildung 42 dargestellt, lassen sich durch den Datensatz auch tägliche Verläufe analysieren, welche für die weitere Berechnung im Modell notwendig sind und als valide Grundlage herangezogen werden.

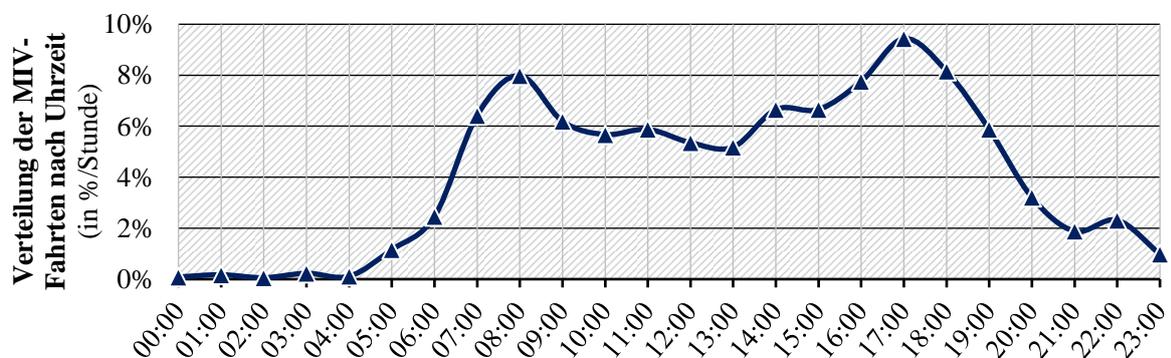


Abbildung 42: Tagesverlauf der Startzeitpunkte der MIV-Fahrten an Wochentag im Untersuchungsgebiet (eigene Darstellung, in Anlehnung an Follmer & Belz, 2018)

Weiterhin bietet der Datensatz die Möglichkeit, das Mobilitätsverhalten auf der Basis demografischer Faktoren der Münchner Bevölkerung auszuwerten. Da bei einer quantitativen SFD Modellierung insbesondere die zeitlichen Verläufe sich ändernder Systemelemente von Interesse sind, wurden neben dem aktuellen Datensatz der Erhebung aus dem Jahr 2017 auch die Datensätze aus den Jahren 2002 und 2008 ausgewertet, um historische Veränderungen im Mobilitätsverhalten der Münchner Bevölkerung zu identifizieren und bei der Modellierung berücksichtigen zu können (vgl. LHM, 2004; Follmer & Belz, 2018).

Aktuelle Daten zur Bevölkerungsanzahl sowie weitere München-spezifische Daten, wie beispielsweise die Anzahl der registrierten Fahrzeuge, wurden über die Landeshauptstadt München bezogen (vgl. LHM 2019d; 2019c). Sich im zeitlichen Verlauf ändernde Systemelemente, wie die prognostizierte Bevölkerungsanzahl für das Jahr 2030, wurden ebenfalls aus einer Prognose-Studie der Landeshauptstadt München entnommen (vgl. LHM, 2019a).

Daten zur durchschnittlichen Geschwindigkeit des Straßenverkehrs im Untersuchungsgebiet wurden über das Online-Tool *Roadway-Analytics* der Firma INRIX bezogen und ausgewertet. Der zugrunde liegende Datensatz umfasst räumlich und zeitlich aufbereitete Geschwindigkeitsdaten aus Navigationssystemen und bietet somit die Möglichkeit, über die kumulierte Anzahl der Fahrten eine aggregierte Durchschnitts-Geschwindigkeit für einen Tag oder einen definierten Zeitraum im Modell zu berechnen (vgl. INRIX, 2020). Nachfolgend ist exemplarisch der Tagesverlauf der Durchschnitts-Geschwindigkeit für einen durchschnittlichen Montag im Monat Februar 2019 sowie für den 9. Juli 2019 im Untersuchungsgebiet abgebildet. Am 9. Juli 2019 kam es aufgrund eines regionalen Streikes der MVG zu massiven Verkehrsproblemen im Untersuchungsgebiet, welche sich wie in der Abbildung 43 dargestellt, insbesondere während der Stoßzeiten signifikant auf die Durchschnitts-Geschwindigkeit auswirkten (vgl. Rencken et al., 2019).

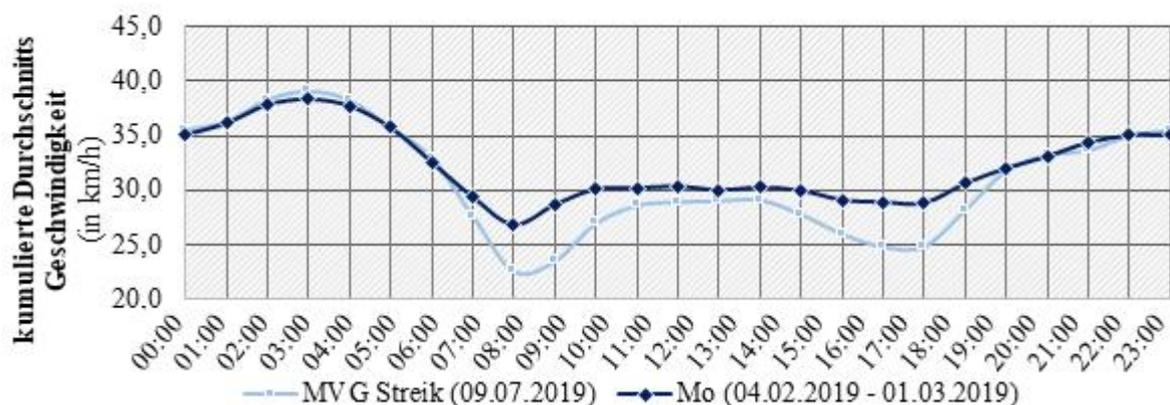


Abbildung 43: Tagesverlauf der Durchschnitts-Geschwindigkeit im Untersuchungsgebiet (eigene Darstellung, in Anlehnung an INRIX, 2020)

Für die Berechnung der Emissionsinventare wurden die Daten zu den Emissionsfaktoren aus der aktuellen Version der HBEFA 3.3 ausgelesen, welche eine zeitliche Prognose der Faktoren für CO<sub>2</sub>, PM und NO<sub>x</sub> bis in das Jahr 2030 zulassen (vgl. Keller et al., 2017).

Neben den aufgeführten Datenquellen wurde während der Modellierung des SFD's zusätzlich auf Zusammenhänge aus der Literatur und den in Kapitel 3 beschriebenen Experteneinschätzungen zurückgegriffen. Bei der Modellierung von Kausalitäten, für welche keine entsprechende Datengrundlage zur Verfügung stand, wurde darauf geachtet, möglichst plausible Annahmen zugrunde zu legen.

#### 4.2.3.2 Variablensatz

Die Modellierung der kausalen Zusammenhänge des SFD's erfolgt, wie in Kapitel 4.1.1.2 dargestellt, auf der Basis unterschiedlicher Systemelemente. Zeitlich konstante Systemelemente oder auch der Import von Daten erfolgen in der Regel über eine *Konstante*, welche weiterführend in einer *Variable* mit anderen Systemelementen verrechnet werden. Ein *Niveau* dient im Modell als Zählinheit und kann nur durch einen Zu- oder Abfluss beeinflusst werden (vgl. Formel 10). Die Kausalitäten zwischen den unterschiedlichen Systemelementen werden graphisch durch einen einfachen Pfeil abgebildet, welcher im Modell einen direkten mathematischen Zusammenhang zwischen den Systemelementen kennzeichnet. Zum besseren methodischen Verständnis werden die grundlegenden Systemelemente in ihrer typischen Abfolge in Abbildung 44 aufgeführt (vgl. auch Abbildung 30).

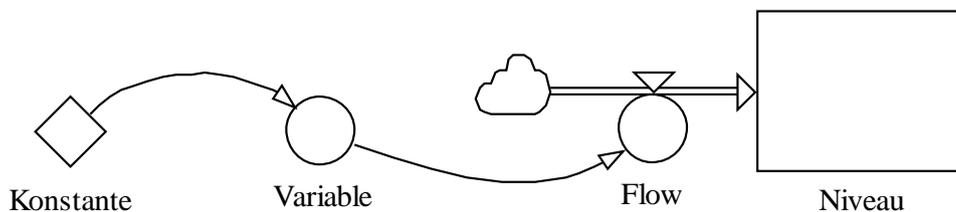


Abbildung 44: Überblick relevanter Systemvariablen (eigene Darstellung)

Bei der Modellierung unterschiedlicher Systemelemente musste durchgehend darauf geachtet werden, welchen Zweck das jeweilige Systemelement verfolgt und in welcher Wechselwirkung es mit anderen Teilen des Modells steht. Systemelemente, welche zu einem bestimmten Zeitpunkt einen konkreten, zählbaren Wert aufweisen, der im Verlauf der Simulation durch einen Zu- oder Abfluss beeinflusst wird, wurden im Modell als *Niveau* modelliert. Beispiele hierfür sind die Anzahl der Fahrzeuge (ICE<sup>29</sup>, BEV<sup>30</sup>, PHEV<sup>31</sup>) im Bereich MIV und ODM oder die kumulierten Emissionen für CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> und PM. (Berechnungs-)Variablen, welche unterschiedliche Wechselwirkungen im Modell berücksichtigen und dabei andere Konstanten oder auch

<sup>29</sup> Internal Combustion Engine (ICE)

<sup>30</sup> Battery Electric Vehicle (BEV)

<sup>31</sup> Plug-In-Hybrid Electric Vehicle (PHEV)

Variablen einbeziehen, wurden im Modell als *Variablen* modelliert. Konkrete Beispiele sind die Attraktivität und die Verkehrsnachfrage der im Modell modellierten Transport-Modes, der Elektrifizierungsanteil an Fahrzeugen unterschiedlicher ODM-Flotten oder die berechnete Durchschnitts-Geschwindigkeit im Untersuchungsgebiet. Systemelemente, welche als starre Konstante angenommen werden oder als Inputgröße in das Modell einfließen, wurden im Modell als *Konstante* modelliert. Die durchschnittlichen Wegelängen unterschiedlicher Verkehrsmittel, die durchschnittlich benötigte Stellplatz-Fläche pro Fahrzeug im öffentlichen Raum oder die sich im zeitlichen Verlauf verändernden Emissionsfaktoren, welche als Inputgröße in das Modell konstant integriert werden, sind hier als Beispiele zu nennen. Die nachfolgende Abbildung 45 gibt einen weitreichenden Überblick über die relevantesten Systemelemente des SFD's.

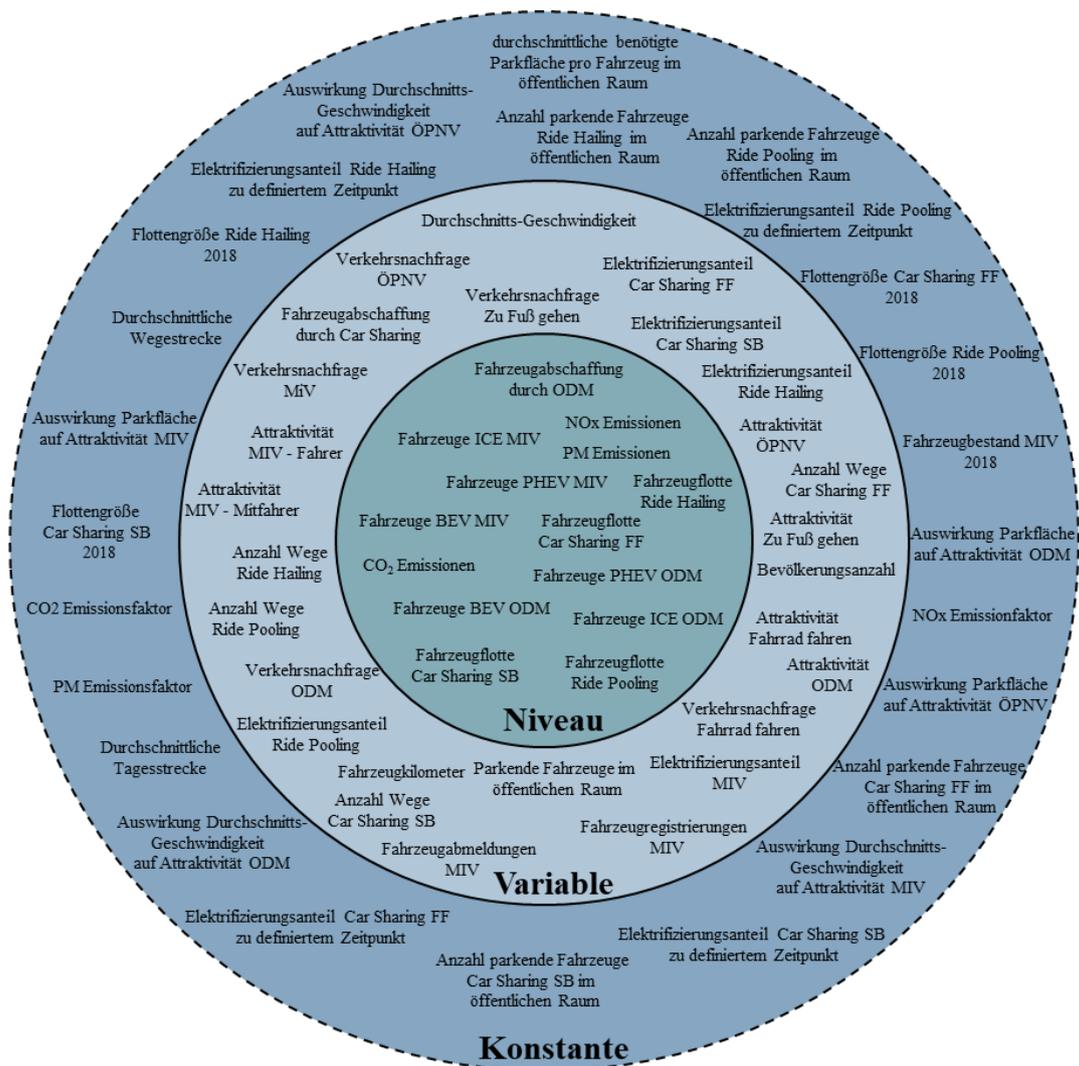


Abbildung 45: Überblick ausgewählter SFD Variablen (eigene Darstellung)

Neben den aufgeführten Systemelementen existiert noch eine Vielzahl unterschiedlicher Hilfs-Systemelemente, welche zur konkreten Berechnung und Kalibrierung des Modells als notwendig identifiziert wurden. Einen vollständigen Überblick über alle modellierten Systemelemente bietet der Anhang 9.

#### 4.2.3.3 Modularer Aufbau des Stock-and-Flow Diagramms

Aufgrund der hohen Modellkomplexität wurde bei der System-Modellierung ein modularer Ansatz gewählt. Die einzelnen Module dienen als Sub-Modell und können demnach als abgeschlossene Funktionseinheit angesehen werden (vgl. Kapitel 4.1), welche über eindeutige Schnittstellen mit den weiteren Sub-Modellen in Wechselwirkung steht. Abbildung 46 gibt einen Überblick über die entsprechenden Sub-Modelle sowie ihre gegenseitigen Schnittstellen und Wechselwirkungen zu den Ergebnis-Zielgrößen (vgl. Kapitel 2.3.2).

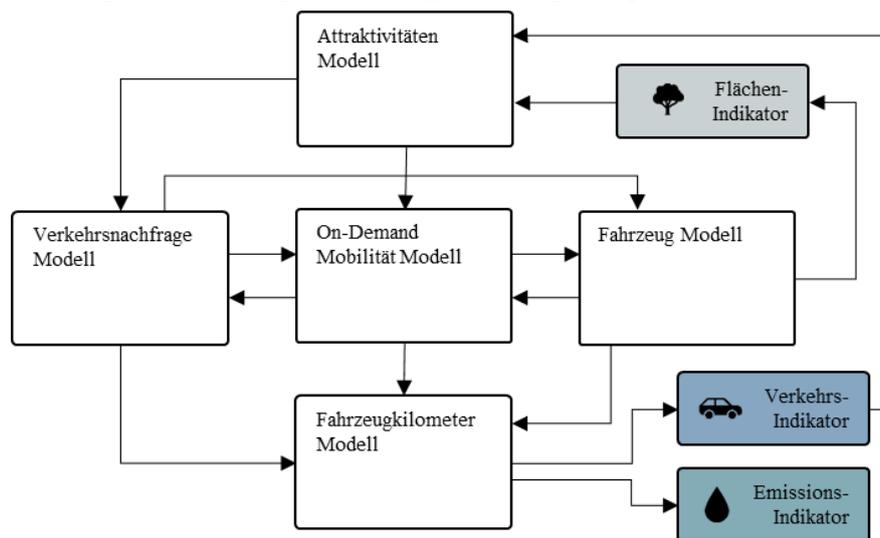


Abbildung 46: Modularer Aufbau des SFD's (eigene Darstellung)

Wie in Abbildung 46 dargestellt, wurden insgesamt acht unterschiedliche Sub-Modelle modelliert, welche über mehrere, gegenseitige Wechselwirkungen verfügen. Durch die Modellierung dieser modularen Modellstruktur konnten die Anwendbarkeit, die Übersichtlichkeit und dementsprechend auch die Nutzbarkeit des Modells verbessert werden. Insbesondere für die Plausibilisierung von Simulationsergebnissen bietet die Struktur große Vorteile gegenüber eines komplexen Gesamtsystems ohne die Untergliederung in Subsysteme. Für ein erweitertes Modellverständnis siehe auch Anhang 9.

#### 4.2.3.4 Exemplarischer Aufbau Stock-and-Flow Fahrzeug Modell MIV

Für ein besseres Verständnis der zugrunde liegenden SFD Modellierungsstruktur wird in diesem Kapitel exemplarisch ein Ausschnitt des Fahrzeug Modells für den Bereich MIV erläutert. Neben der Modellierung der MIV Fahrzeuge erfolgt in dem ausgewählten Subsystem auch die Modellierung der ODM-Fahrzeuge aller im Modell berücksichtigten ODM-Angebotsformen (Free-Floating und Station-Based Car Sharing, Ride Hailing und Ride Pooling), auf welche aus Komplexitätsgründen in dieser exemplarischen Darstellung verzichtet wird.

Die Abbildung 47 bietet einen Überblick über einen Teil des SFD MIV Fahrzeug Modells. In der Abbildung sind zwei Niveaus erkennbar, welche ihre Werte ausschließlich über entspre-

chende Zu- und Abflüsse im zeitlichen Verlauf der Simulation verändern können. Die Gesamtanzahl der MIV Fahrzeuge (*Vehicles MIV*) ergibt sich demnach aus einem Anfangsbestand an Fahrzeugen in München zum Startzeitpunkt der Simulation (*Number of Vehicles in Munich in 2018*) einem Zufluss, welcher durch die Registrierung neuer Fahrzeuge (*New Vehicle Registration*) sowie einem Abfluss, welcher durch die abgemeldeten Fahrzeuge (*Vehicle Deregistration*) im zeitlichen Verlauf beeinflusst wird. Die Berechnung der registrierten Fahrzeuge während eines Simulationslaufes erfolgt durch die Bevölkerungsanzahl in München (*Population Munich*), die durchschnittliche Fahrzeugbesitzquote zum Startzeitpunkt der Simulation (*Average private Vehicle Ownership Munich 2018*) und das durchschnittliche Fahrzeugalter (*Average Age Vehicle Munich*). Die im Verlauf der Simulation abgeschafften Fahrzeuge ergeben sich im Modell durch das durchschnittliche Fahrzeugalter sowie durch die Auswirkung von ODM auf den Besitz von privaten Fahrzeugen (*Abolition caused by ODM*). Der Wert für die, durch ODM abgeschafften, MIV Fahrzeuge berechnet sich über die Flottengröße unterschiedlicher ODM-Angebotsformen (*Fleet Size Car Sharing SB Total*; *Fleet Size Car Sharing FF Total*) und die zugrunde liegenden Fahrzeugabschaffungsraten (*Vehicle Abolition Car Sharing SB*; *Vehicle Abolition Car Sharing FF*). Diese werden im Niveau *Vehicle Abolition ODM* kumuliert aufgeführt.

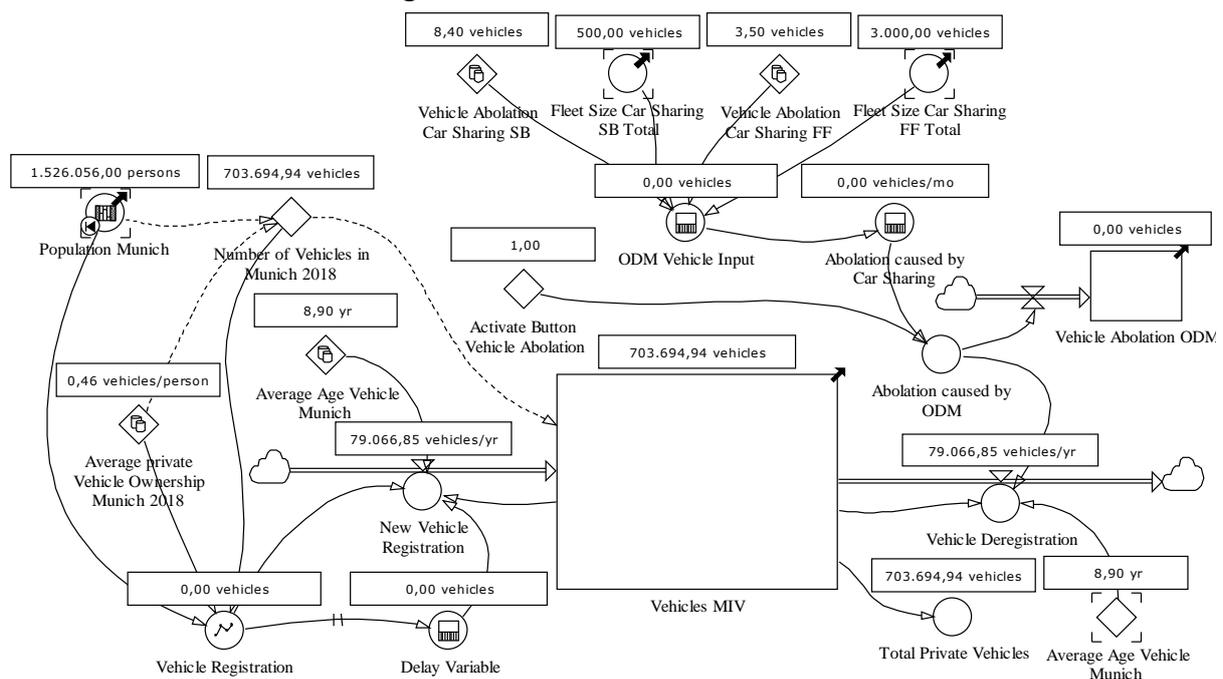


Abbildung 47: SFD Fahrzeuge MIV (eigene Darstellung)

In dem abgebildeten SFD werden die Werte zum Startzeitpunkt der Simulation angezeigt, welche sich im zeitlichen Verlauf der Simulation entsprechend ihrer kausalen Wechselwirkungen verändern. Für ein besseres Verständnis werden nachfolgend die zugrunde liegenden Differenz- und Differentialgleichungen der dargestellten Systemelemente in der Tabelle 22 aufgeführt. Die dargestellten Gleichungssysteme entsprechen der in PowerSim Studio (SD Software) hinterlegten, quantitativen SFD Modellierung.

Tabelle 22: Zugrunde liegende Differenz- und Differentialgleichungssysteme des SFD Fahrzeuge MIV (eigene Darstellung)

SFD Systemelement	Zugrunde liegende Differenz- und Differentialgleichungssysteme	Einheit	Grundelement
- Average private Vehicle Ownership Munich 2018	= XLDATA("C://Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R52C4")<<vehicle/person>>	Fahrzeuge/ Person	Konstante (Input)
- Average Age Vehicle Munich	= XLDATA("C://Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R48C4")<<yr>>	Jahre	Konstante (Input)
- Vehicle Abolition Car Sharing SB	= XLDATA("C://Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R49C4")<<vehicle>>	Fahrzeuge	Konstante (Input)
- Vehicle Abolition Car Sharing FF	= XLDATA("C://Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R50C4")<<vehicle>>	Fahrzeuge	Konstante (Input)
- Number of vehicles in Munich 2018	= INIT('Population Munich')*INIT('Average private Vehicle Ownership Munich 2018')	Fahrzeuge	Konstante
- Vehicle Registration	= ('Population Munich'*'Average private Vehicle Ownership Munich 2018'-'Number of Vehicles in Munich 2018')	Fahrzeuge	Variable
- Delay Variable	= DELAYPPL('Vehicle Registration';1<<mo>>;0<<vehicle>>)	Fahrzeuge	Variable
- Population Munich	= '0-17 Years'+ '18-29 Years'+ '30-49 Years'+ '49-64 years'+ '65-74 Years'+ 'older 74 Years'	Personen	Variable
- Abolition caused by ODM	= IF('Activate Button Vehicle Abolition'=1;'Abolition caused by Car Sharing';0<<vehicles/mo>>)	Fahrzeuge/ Monat (MIV)	Variable
- ODM Vehicle Input	= (('Fleet Size Car Sharing FF Total'-INIT('Fleet Size Car Sharing FF Total'))*'Vehicle Abolition Car Sharing FF'*1<<1/vehicle>>)+ (('Fleet Size Car Sharing SB Total'-INIT('Fleet Size Car Sharing SB Total'))*'Vehicle Abolition Car Sharing SB'*1<<1/vehicle>>)	Fahrzeuge/ (ODM) Fahrzeuge	Variable
- Fleet Size Car Sharing SB Total	= 'FleetSize Car Sharing SB 1'+ 'Fleet Car Sharing SB'	Fahrzeuge	Variable
- Fleet Size Car Sharing FF Total	= 'FleetSize Car Sharing FF 1'+ 'Fleet Car Sharing FF'	Fahrzeuge	Variable
- New Vehicle Registration	= 'Vehicles MIV'/'Average Age Vehicle Munich'+ IF('Vehicle Registration'-'Delay Variable'<0<<vehicle>>;0<<vehicle>>;'Vehicle Registration'-'Delay Variable')/1<<mo>>	Fahrzeuge/ Monat	Zufluss Variable
- Abolition caused by Car Sharing	= ('ODM Vehicle Input'-DELAYPPL('ODM Vehicle Input';1<<mo>>))*1<<1/mo>>	Fahrzeuge/ Monat	Zufluss Variable
- Vehicle Deregistration	= ('Vehicles MIV'/'Average Age Vehicle Munich')+ 'Abolition caused by ODM'	Fahrzeuge/ Monat	Abfluss Variable
- Vehicles MIV	= 'Number of Vehicles in Munich 2018'	Fahrzeuge	Niveau
- Vehicle Abolition ODM	= 0<<vehicle>>	Fahrzeuge	Niveau

Wie aus der Tabelle 22 hervorgeht, werden bei der Beschreibung der Zusammenhänge mittels geeigneter Differenz- und Differentialgleichungen unterschiedliche mathematische Funktionen angewandt, die im zeitlichen Verlauf der Simulation das Systemverhalten beeinflussen. In den abgebildeten Gleichungen kommt es demnach zur Anwendungen der folgenden Funktionen: XLDATA<sup>32</sup>, INIT<sup>33</sup>, DELAYPPL<sup>34</sup> und IF<sup>35</sup>.

<sup>32</sup> Die XLDATA-Funktion gibt die Werte eines Bereichs in einem Excel-Arbeitsblatt als Skalar, Vektor, zweidimensionales oder dreidimensionales Array zurück.

<sup>33</sup> Die INIT-Funktion gibt den Anfangswert des ausgewählten Systemelementes zu Beginn der Simulation wieder.

<sup>34</sup> Die DELAYPPL-Funktion gibt den Wert nach einer vorgegebenen Verzögerungszeit wieder.

<sup>35</sup> Die IF-Funktion gibt den Wert A zurück, wenn die Bedingung ‚TRUE‘ ergibt, andernfalls wird der Wert B ausgegeben.

Neben der in Abbildung 47 dargestellten Modellierung des Gesamt-Fahrzeugbestandes MIV (*Vehicles MIV*) wird im entsprechenden Submodell auch der Anteil an BEV und PHEV Fahrzeugen modelliert. Einen Überblick über die SFD Modellierung zum Startzeitpunkt der Simulation bietet die Abbildung 48. Die zugrunde liegenden Differenz- und Differentialgleichungssysteme werden in der Tabelle 23 dargestellt.

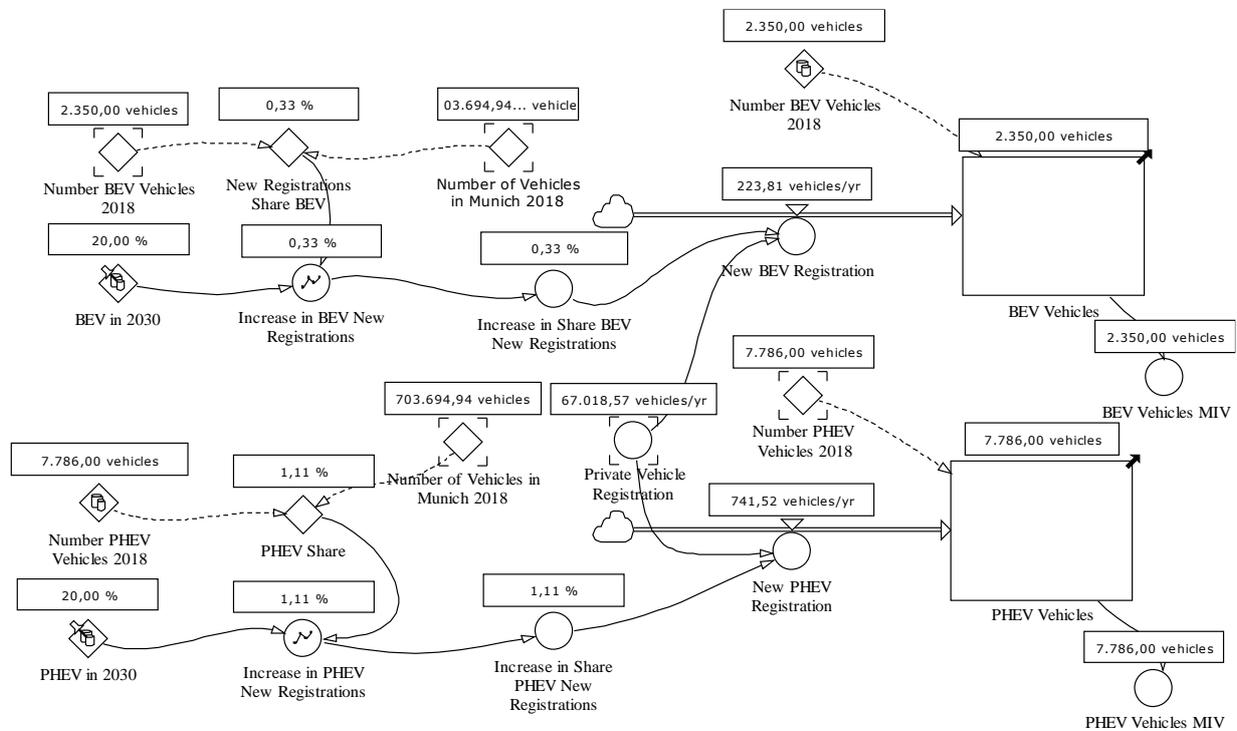


Abbildung 48: SFD Fahrzeuge MIV BEV/PHEV (eigene Darstellung)

Tabelle 23: Zugrunde liegende Differentialgleichungssysteme des SFD Fahrzeuge MIV (eigene Darstellung)

SFD Systemelement	Zugrunde liegende Differenz- und Differentialgleichungssysteme	Einheit	Systemelement
- PHEV in 2030	= XLDATA("C:// Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R55C4")<<%>>	%	Konstante (Input)
- BEV in 2030	= XLDATA("C:// Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R53C4")<<%>>	%	Konstante (Input)
- Number PHEV Vehicles 2018	= XLDATA("C:// Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R54C4")<<vehicle>>	Fahrzeuge	Konstante (Input)
- Number BEV Vehicles 2018	= XLDATA("C:// Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R51C4")<<vehicle>>	Fahrzeuge	Konstante (Input)
- Increase in BEV New Registrations	= GRAPH(TIME;DATE(2018;1;1);13<<yr>>;{'New Registrations Share BEV';('BEV in 2030')*100<<%>>}/Min:-5;Max:20//)	%	Variable
- Increase in PHEV New Registrations	= GRAPH(TIME;DATE(2018;1;1);13<<yr>>;{'PHEV Share';('PHEV in 2030')*100<<%>>}/Min:-5;Max:20//)	%	Variable
- PHEV Share	= 'Number PHEV Vehicles 2018'/Number of Vehicles in Munich 2018'	%	Variable
- New Registrations Share BEV	= ('Number BEV Vehicles 2018'/Number of Vehicles in Munich 2018)*100<<%>>	%	Variable
- New PHEV Registration	= 'Private Vehicle Registration'*Increase in PHEV New Registrations'	Fahrzeuge/ Monat	Zufluss Variable
- New BEV Registration	= 'Private Vehicle Registration'*Increase in BEV New Registrations'	Fahrzeuge/ Monat	Zufluss Variable
- BEV Vehicles	= 'Number BEV Vehicles 2018'	Fahrzeuge	Niveau
- PHEV Vehicles	= 'Number PHEV Vehicles 2018'	Fahrzeuge	Niveau

---

Wie in der Abbildung 48 ersichtlich, erfolgt die Berechnung der Anzahl der BEV und PHEV Fahrzeuge (*BEV Vehicles*; *PHEV Vehicles*) auf Basis der Höhe ihres Anfangswertes (*Number PHEV Vehicles 2018*; *New BEV Registration*) sowie des Anteils, der elektrifizierten Fahrzeuge an den neuen Registrierungen im zeitlichen Verlauf der Simulation (*Private Vehicle Registration*). Für die korrekte Darstellung der mathematischen Zusammenhänge wurden bei der Modellierung weitere Funktionen, wie die GRAPH-<sup>36</sup>, TIME-<sup>37</sup> und DATE-Funktionen<sup>38</sup>, angewandt (vgl. Tabelle 23), welche eine gewünschte Funktion zu einem definierten Zeitpunkt der Simulation abbilden können und das Systemverhalten somit beeinflussen. Wie in der Abbildung 48 dargestellt, besitzen die Niveaus (*BEV Vehicles*; *PHEV Vehicles*) keinen gesonderten Abfluss. Dies bedeutet, dass die Anzahl der elektrifizierten Fahrzeuge im Modell ausschließlich durch einen negativen Zufluss reduziert werden kann. Dies stellt aus Gründen der Komplexitätsreduzierung eine Vereinfachung der Realität dar, welche in den Limitationen des Modells kritisch reflektiert wird (vgl. Kapitel 4.5.1). Die Berechnung der konventionell betriebenen Fahrzeuge (ICE) im Bereich MIV berechnet sich aus den BEV und PHEV Fahrzeugen, sowie der insgesamt zur Verfügung stehenden Fahrzeuganzahl.

Auch, wenn das beschriebene exemplarische Submodell für Fahrzeuge im MIV kein in sich geschlossenes Rückkopplungssystem beinhaltet, so ermöglicht es die Simulation, das Systemverhalten über einen definierten Zeitraum abzubilden und dabei auch zeitliche Veränderungen unterschiedlicher Systemelemente zu berücksichtigen, was durch lineare Berechnungen, wie beispielsweise in Microsoft Excel, nicht möglich ist.

#### 4.2.3.5 Stock-and-Flow Diagramm

Auf Basis des in Kapitel 4.2.3.2 abgebildeten Variablensatzes und der Anwendung der in Kapitel 4.2.3.1 beschriebenen Datengrundlage wurde eine umfassende Modellierungsphase der identifizierten Kausalitäten vorgenommen. Die Modellierungsphase des Modells erfolgte in Form eines iterativen Prozesses, bei dem selbst kleinste Veränderungen an der Modellstruktur ständig überprüft wurden, um eine korrekte Funktionsweise der Modelleigenschaften sicherzustellen (vgl. Pruyt, 2013).

Insgesamt basiert die Modellierung der acht Sub-Modelle auf 622 unterschiedlichen Systemelementen, von denen 74 Konstanten, 416 Variablen, 60 Niveaus und 72 Zu- und Abflüsse sind. Unter diesen befinden sich 84 Hilfs-Systemelemente, welche eine korrekte mathematische

---

<sup>36</sup> Die GRAPH-Funktion gibt tabellarische Werte für bestimmte Eingabewerte zurück. Wenn der Eingabewert keinem der tabellierten Werte entspricht, berechnet GRAPH einen Wert basierend auf Interpolation und / oder Extrapolation.

<sup>37</sup> Die TIME-Funktion gibt die aktuelle Uhrzeit der Simulation wieder.

<sup>38</sup> Die DATE-Funktion gibt das aktuelle Datum der Simulation wieder.

Funktionsweise des Modells sicherstellen und somit zur Kalibrierung eines plausiblen Modellverhaltens beitragen. Die nachfolgend aufgeführte Tabelle 24 beinhaltet alle (in den Sub-Modellen) berechneten Systemelemente sowie ihre für die Berechnung benötigten Inputs (vgl. Abbildung 46).

Tabelle 24: Zusammenfassung der Berechnungs-Systemelemente in SFD Sub-Modellen (eigene Darstellung)

<b>Sub-Modell</b>	<b>Berechnung relevanter Systemelemente</b>	<b>Input Sub-Modell</b>
Verkehrsnachfrage Modell	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bevölkerungsanzahl im Untersuchungsgebiet</li> <li>- Anzahl an Wegen je Transport-Mode</li> <li>- Verteilung Modal Split je Transport-Mode</li> <li>- Verteilung Verkehrsleistungen je Transport-Mode</li> <li>- Gesamt-Anzahl Wege / Verkehrsleistung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bevölkerungszuwachs</li> <li>- Prognostizierter Modal Split</li> </ul>
Attraktivitäten Modell	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Attraktivität je Transport-Mode als zeitlicher Verlauf basierend auf Rückkopplungseffekten der Modellierung</li> <li>- Sensitivitäten der Auswirkungen von Rückkopplungseffekten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Feedbackauswirkungen Stellplatz-Fläche, Verkehrsfluss und Regulierung MIV</li> </ul>
On-Demand Mobilität Modell	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Anzahl der Fahrten je ODM-Angebotsform</li> <li>- Personenkilometer und Verkehrsleistung je ODM-Angebotsform</li> <li>- Flottengröße je ODM-Angebotsform</li> <li>- Auslastung der Fahrzeuge je ODM-Angebotsform</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Substitutions- und Verlagerungseffekte ODM</li> <li>- Verteilung ODM-Angebote</li> <li>- Flottengröße zum Startzeitpunkt der Simulation</li> <li>- Anteil Umwege / Leerfahrten / Relokationen</li> </ul>
Fahrzeug-Kilometer Modell	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gesamt-Fahrzeugkilometer MIV</li> <li>- Gesamt-Fahrzeugkilometer ÖPNV (Bus und Straßenbahn)</li> <li>- Gesamt-Fahrzeugkilometer ODM</li> <li>- Gesamt-Fahrzeugkilometer</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Durchschnittliche Auslastung ÖPNV (Bus, Straßenbahn)</li> <li>- Verkehrsleistung ODM, MIV, ÖPNV</li> </ul>
Fahrzeug Modell	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Anzahl Fahrzeuge MIV ICE, BEV, PHEV</li> <li>- Fahrzeugabschaffungen MIV durch ODM</li> <li>- Anzahl Fahrzeuge ODM Car Sharing FF ICE, BEV, PHEV</li> <li>- Anzahl Fahrzeuge ODM Car Sharing SB ICE, BEV, PHEV</li> <li>- Anzahl Fahrzeuge ODM Ride Hailing ICE, BEV, PHEV</li> <li>- Anzahl Fahrzeuge ODM Ride Pooling ICE, BEV, PHEV</li> <li>- Gesamt-Anzahl Fahrzeuge</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Abschaffungsraten Fahrzeuge MIV durch ODM</li> <li>- Elektrifizierungsanteile Fahrzeugzulassungen MIV, ODM</li> <li>- Fahrzeuganzahl MIV, ODM zum Startzeitpunkt der Simulation</li> </ul>
Emissions-Indikator	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Emissionsinventare MIV (CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, PM)</li> <li>- Emissionsinventare ÖPNV (CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, PM)</li> <li>- Emissionsinventare ODM (CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, PM)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Emissionsfaktoren ICE für CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> und PM</li> <li>- Anteil elektrischer Fahrweise PHEV MIV, ODM</li> </ul>
Verkehrs-Indikator	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Durchschnitts-Geschwindigkeit Straßenverkehr im Untersuchungsgebiet</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gesamt-Fahrzeugkilometer</li> </ul>
Flächen-Indikator	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Anzahl der im öffentlichen Raum parkenden Fahrzeuge</li> <li>- Benötigter Parkraum im öffentlichen Raum</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gesamt-Anzahl Fahrzeuge</li> <li>- Stellplatz-Fläche pro Fahrzeug</li> </ul>

Eine vollständige Liste der einzelnen Systemelemente und ihren zugrundeliegenden Differenz- und Differentialgleichungen befindet sich im Anhang 10.

#### 4.3 Aufstellung relevanter Zukunfts-Szenarien zur Simulation des Systemverhaltens

Im folgenden Kapitel werden geeignete Szenarien zur Untersuchung des Systemverhaltens entwickelt. Die hierbei angewandte Szenario-Technik wurde im Rahmen dieser Untersuchung als geeignete Methode ausgewählt, da sie den Gesamt-Fokus auf ein Themenfeld legt und dabei komplexe Vernetzungen des zugrunde liegenden Systems berücksichtigt. Nach einer kurzen Erläuterung zur methodischen Vorgehensweise bei der Aufstellung der Szenarien, werden drei konkrete Zukunfts-Szenarien für die weitere Modelluntersuchung vorgestellt.

### 4.3.1 Methodische Anwendung der Szenario-Technik

Bei der Szenario-Technik handelt es sich um eine Methode, mit welcher isolierte Vorstellungen über positive und negative Veränderungen unterschiedlicher Entwicklungsfaktoren in der Zukunft zu umfassenden Bildern und Modellen zusammengefasst werden können (vgl. Weinberger, 1994). In der Regel werden bei der Aufstellung eines Szenarios empirisch-analytische mit kreativ-intuitiven Elementen verknüpft, um komplexe Sachverhalte vereinfachend abzubilden (vgl. König, 1988). Für ein besseres Verständnis der zugrunde liegenden Methode dient die Darstellung des Szenario-Trichters in der Abbildung 49.

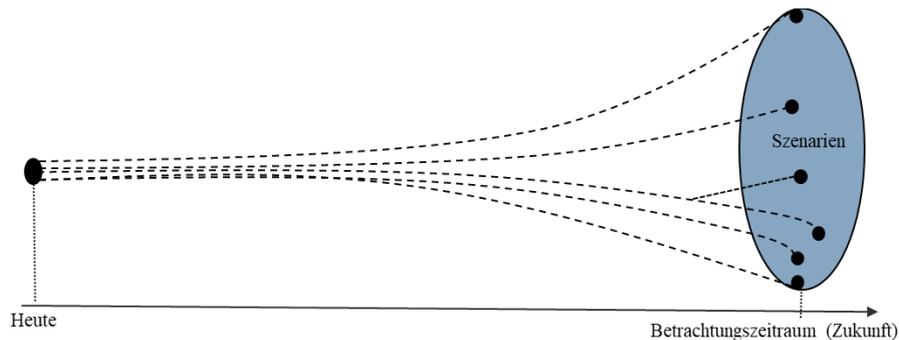


Abbildung 49: Szenario-Trichter möglicher Zukunfts-Entwicklungen (eigene Darstellung, in Anlehnung an: Geschka & Hammer, 1999)

Der Trichter symbolisiert den Anstieg der Ungewissheit und Komplexität unterschiedlicher Entwicklungsfaktoren in der Zukunft (vgl. Reibnitz, 1991). Die Schnittfläche des Trichters bezeichnet dabei die Summe aller theoretisch denkbaren Zukunfts-Situationen zu einem definierten Betrachtungszeitpunkt. Für die Abbildung dieser Zukunfts-Situationen werden in der Regel ein positives und ein negatives Extremszenario der zukünftigen Entwicklung aufgestellt. Die beiden Extremszenarien liegen dabei möglichst nah an der Außenseite des Trichters und umspannen somit alle theoretisch denkbaren Zukunfts-Entwicklungen (vgl. Weinberger, 2019).

Vor der Aufstellung geeigneter Szenarien sind eine gründliche Analyse der gegenwertigen Situation sowie ein Verständnis der vorliegenden Wirkzusammenhänge unterschiedlicher Entwicklungsfaktoren von hoher Bedeutung (vgl. Kapitel 3 und Kapitel 4). Szenarien stellen somit eine multidimensionale Methode dar, die vernetztes, systemisches und interdisziplinäres Denken ermöglicht und sich dabei nicht nur auf kausalanalytische Ursache-Wirkungs-Beziehungen beschränkt (vgl. Weinberger, 2019). An dieser Stelle wird die starke Verknüpfung der Szenario-Technik und der Systemanalyse erkennbar. Für die Aufstellung möglichst relevanter Szenarien ist es somit essentiell, den zugrunde liegenden Systemzusammenhang „vom Ganzen zum Detail“ zu verstehen (vgl. Vester, 1990).

Besonders wichtig bei der Aufstellung sind darüber hinaus die Stimmigkeit, Konsistenz und Widerspruchsfreiheit der unterschiedlichen Entwicklungsfaktoren innerhalb eines Szenarios

(vgl. Reibnitz, 1991). Weiterhin sollten Szenarien ganzheitlich aufgestellt werden, was bedeutet, dass alle relevanten Entwicklungsfaktoren der vorliegenden Problemstellung mit berücksichtigt werden, auch wenn diese teilweise eine hohe Unsicherheit im zukünftigen Entwicklungsverlauf mit sich bringen. Für Einflussfaktoren mit unsicherer Zukunfts-Entwicklung müssen in diesem Fall möglichst plausible Annahmen getroffen werden (vgl. Geschka & Hammer, 1999). Für weitere, vertiefende Informationen zur Aufstellung von Szenarien entwickelte das Institut für Mobilitätsforschung (ifmo) gemeinsam mit der Geschka & Partner Unternehmensberatung einen siebenstufigen Prozess der Szenario-Technik (Geschka & Hammer, 1992; 1999).

#### 4.3.2 Aufstellung Szenarien

Ziel dieser Arbeit ist es, durch die Formulierung gezielter Zukunfts-Szenarien, das Systemverhalten des in Kapitel 4.2.3 aufgestellten, quantitativen SFD Modells hinsichtlich der in Kapitel 2.3.2 operationalisierten Nachhaltigkeits-Indikatoren zu untersuchen. Der zeitliche Verlauf der Simulation läuft dabei über insgesamt 13 Jahre vom 01.01.2018 bis zum 31.12.2030. Als Grundlage für die Untersuchung werden drei Haupt-Szenarien (*Evolution*, *Revolution* und *Disruption*) aufgestellt, die eine unterschiedliche Entwicklung von ODM-Angeboten im zeitlichen Verlauf der Simulation abbilden. Weiterhin werden in entsprechenden Unter-Szenarien (analog zum in Abbildung 49 eingeführten Szenario-Trichter) unterschiedliche Projektionen relevanter Entwicklungsfaktoren untersucht. Für ein besseres Verständnis der Haupt- und Unter-Szenarien dient die Abbildung 50.

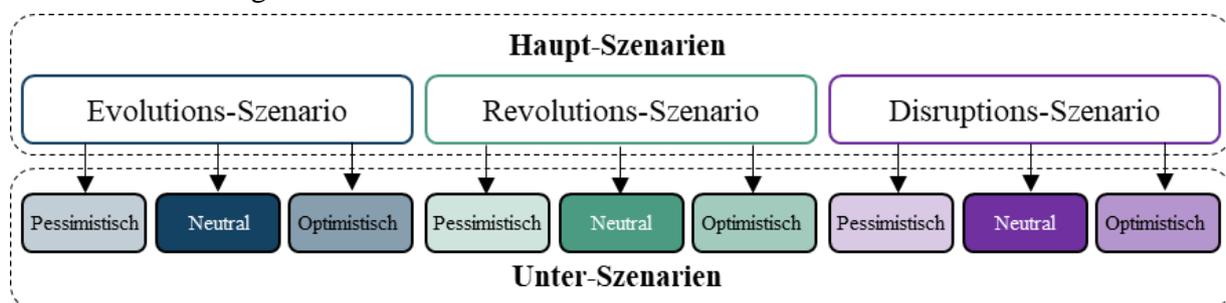


Abbildung 50: Überblick Szenarien-Struktur (eigene Darstellung)

#### *Erläuterungen zu den Haupt-Szenarien Evolution, Revolution und Disruption*

Als elementare Kenngröße für die Unterteilung der Haupt-Szenarien wurde der prozentuale Anteil an der Gesamtheit aller Wege (Modal Split) durch ODM im Untersuchungsgebiet München identifiziert. Das aufgestellte *Evolutions-Szenario* dient bei der Untersuchung im Vergleich zu den weiteren Szenarien als Basis-Szenario. Basierend auf einer linearen Trendextrapolation des Modal Split Anteils in München konnte, wie in der Abbildung 51 dargestellt, für das Jahr 2030 ein Anteil von ODM am Modal Split von  $\sim 1,5\%$ <sup>39</sup> prognostiziert werden.

<sup>39</sup> Eigene Hochrechnung auf Basis der ODM-Anbieter und Modal-Split Daten (Datensatz MiD 2002, 2008 und 2017) für die Stadt München (vgl. Abbildung 16)

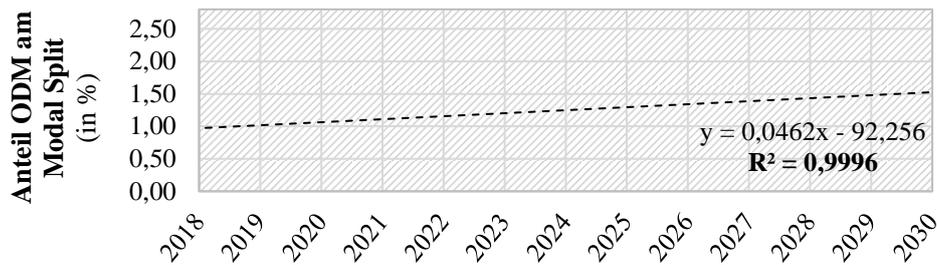


Abbildung 51: Lineare Trendextrapolation des Anteils von ODM im Evolutions-Szenario (eigene Darstellung)

Dieser ermittelte Wert schreibt eine evolutionäre Entwicklung der vergangenen Jahre in der Zukunft fort und wird daher als prognostizierter Input-Wert für das *Evolutions*-Szenario angewandt. Im *Revolutions*-Szenario wird mit ~ 5 % ein deutlich höherer Anteil am Modal Split durch ODM im Jahr 2030 angenommen. Der Anstieg wird dabei analog zum *Evolutions*-Szenario als linear unterstellt. Das *Disruptions*-Szenario übersteigt das *Revolutions*-Szenario weiterhin um das Dreifache und unterstellt ein lineares Wachstum des Anteils von ODM am Modal Split in München auf ~ 15 % im Jahr 2030.

Diese prognostizierten Verläufe des Anteils am Modal Split durch ODM dienen für das im Kapitel 4.2.3 beschriebene SFD Modell als Eingangsgrößen, welche im zeitlichen Verlauf der Simulation durch entsprechende Rückkopplungen beeinflusst werden. Der im SFD Modell simulierte Endwert variiert demnach je nach Stärke und Ausprägung der berücksichtigten Rückkopplungsschleifen.

Neben der Betrachtung des prognostizierten Anteils am Modal Split durch ODM werden in den Haupt-Szenarien weitere Entwicklungsfaktoren berücksichtigt, welche eine Auswirkung auf das Systemverhalten besitzen. Für den simulierten Zeitraum wird auf der Basis der Prognosen der Stadt München (vgl. LHM, 2019a) für alle drei Hauptszenarien ein Bevölkerungszuwachs von 200.000 Personen unterstellt. Dies bringt einen Anstieg der Nachfrage nach Mobilität mit sich.

Weitere Entwicklungsfaktoren werden über den zeitlichen Verlauf der Szenarien als konstant angesehen, um eine Vergleichbarkeit unter den entsprechenden Szenarien zu ermöglichen:

- Durchschnittliche Wegelänge pro Transport-Mode
- Durchschnittliche Tagesstrecke pro Person
- Anteil mobiler Bevölkerung pro Tag
- Durchschnittliche Auslastung des ÖPNV's

#### *Erläuterungen zu den Unter-Szenarien Pessimistisch, Neutral und Optimistisch*

Neben den drei aufgeführten Haupt-Szenarien, welche sich ausschließlich durch den Anteil von ODM am Modal Split in München unterscheiden, werden in den jeweiligen Unter-Szenarien

weitere Entwicklungsfaktoren variiert. Die pessimistischen und optimistischen Unter-Szenarien liegen dabei, wie in Kapitel 4.3.1 beschrieben, an der jeweiligen Außenseite des Szenario-Trichters, während das neutrale Unter-Szenario einen möglichst realistischen Mittelwert abbildet. Im Folgenden werden die Entwicklungsfaktoren aufgeführt und es wird erläutert, welche von ihnen in den Unter-Szenarien variiert werden.

### *Verlagerungs- und Substitutionseffekte*

Für eine ganzheitliche Analyse der Auswirkungen von ODM im Kontext nachhaltiger urbaner Mobilität ist es zwingend erforderlich, die durch einen Anstieg des Modal Splits von ODM entstehenden Wechselwirkungen unterschiedlicher Transport-Modes im Detail zu berücksichtigen. Insbesondere für eine gezielte Betrachtung der ausgestoßenen Treibhaus- und Luftschadstoff-Emissionen sowie der auf den Gesamt-Fahrzeugkilometern basierenden Durchschnittsgeschwindigkeit im Straßenverkehr ist eine Betrachtung der Verlagerungseffekte zwingend erforderlich.

Basierend auf der in Kapitel 2.4.6 untersuchten Literatur zu den Auswirkungen von ODM konnten bereits relevante Studien identifiziert werden, welche Verlagerungseffekte unterschiedlicher Transport-Modes berücksichtigen (vgl. Tabelle 14-16). Da es sich bei den hier aufgeführten Studien fast ausschließlich um amerikanische Studien handelt, die sich überwiegend mit den Auswirkungen von TNC's in amerikanischen Metropolen auseinandersetzen (vgl. Schaller, 2017; 2018; Clewlow & Mishra, 2017; Henao, 2017; Circella & Alemi, 2018), ist eine Übertragung auf unterschiedliche ODM Angebotsformen im Münchner Untersuchungsgebiet nicht direkt möglich. Aus diesem Grund werden für die Unter-Szenarien plausible Annahmen zu den Verlagerungseffekten getroffen, welche für ein besseres Verständnis in der Abbildung 52 dargestellt werden.

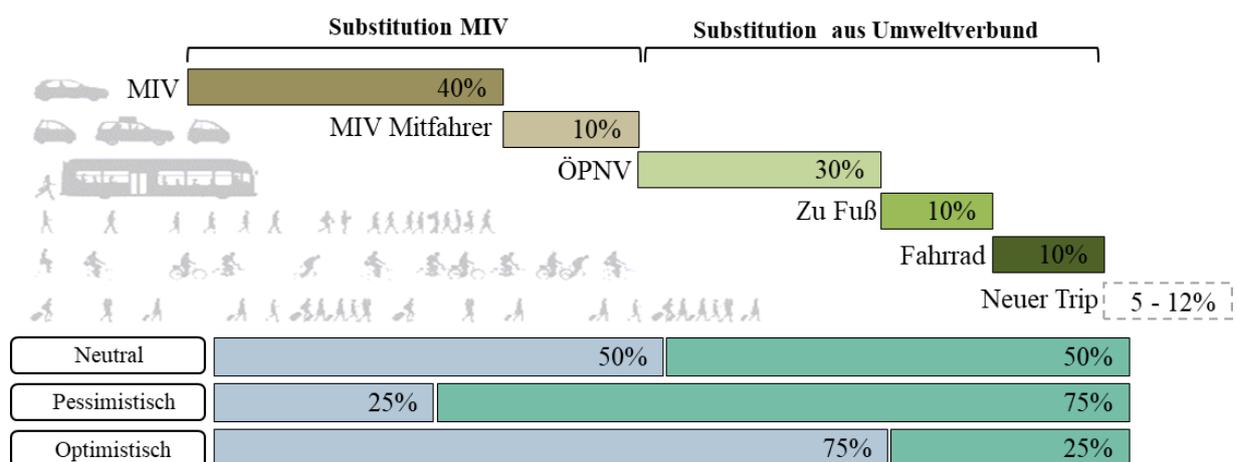


Abbildung 52: Zugrundeliegende Substitutionseffekte Unter-Szenarien (eigene Darstellung, in Anlehnung an Tabelle 15)

---

Neue Trips, die zu induziertem Verkehr führen und durch die Nutzung eines neuen ODM-Angebotes entstehen können, liegen in dieser Untersuchung außerhalb der Systemgrenzen und werden demnach in den Szenarien nicht mit berücksichtigt (vgl. Kapitel 4.5.1).

#### *Besetzungsgrade, Umwege, Relokationen und Leerfahrten von ODM*

Neben der Variation unterschiedlicher Verlagerungseffekte unter den Transport-Moden, werden in den Unter-Szenarien die Besetzungsgrade unterschiedlicher ODM-Angebotsformen sowie die insgesamt anfallenden Fahrstrecken durch mögliche Umwege, Relokationen und Leerfahrten variiert. Da eine valide Datengrundlage für die entsprechenden ODM-Angebotsformen im Untersuchungsgebiet München nicht verfügbar ist, werden (auf der Basis bestehender Daten aus der Literatur) plausible Annahmen für die Untersuchung getroffen.

Der Besetzungsgrad wird durch das Verhältnis der zurückgelegten Personenkilometer und der bei dieser Fahrt entstandenen Fahrzeugkilometer ermittelt. Besonders wichtig bei der Ermittlung ist demnach die durchschnittliche Anzahl an Personen pro Fahrzeug. Der durchschnittliche Besetzungsgrad für den MIV in München liegt bei 1,5 Personen und variiert insbesondere zwischen Pendelfahrten zum Arbeitsplatz unter der Woche und Freizeitfahrten am Wochenende (vgl. Follmer & Belz, 2018).

Beim Station-Based Car Sharing wurde einer Studie zufolge ein durchschnittlicher Besetzungsgrad von 1,94 Personen identifiziert (vgl. Best & Hasenheit, 2018). Als möglicher Grund hierfür wird die fast ausschließliche Nutzung für Freizeitfahrten gesehen. Beim Free-Floating Car Sharing liegt der durchschnittliche Besetzungsgrad eigenen Recherchen zufolge bei circa 1,7 Personen und ist somit zwar signifikant höher als beim MIV, kommt jedoch nicht an das Niveau des Station-Based Car Sharing heran. Die ODM Angebotsform Ride Hailing, welche in Deutschland aufgrund des bestehenden Personenbeförderungsgesetzes überwiegend aus dem traditionellen Taxi-Geschäft besteht, kommt einer Studie zufolge während der gebuchten Zeit zu einem durchschnittlichen Besetzungsgrad von 1,5 Personen (Statistikamt Nord, 2015). Ride Pooling findet in Deutschland bis zum aktuellen Zeitpunkt nur unter der Auflage von Sondergenehmigungen im kleinen Maßstab Anwendung. Für eine erfolgreiche Bündelung von Fahrten ist aber eine kritische Nachfragedichte zwingend erforderlich, die als solche im Untersuchungsgebiet bislang noch nicht erreicht werden konnte. Aus diesem Grund werden basierend auf einer theoretischen Untersuchung und in Abhängigkeit des Anteils von ODM am Modal Split unterschiedliche Ride Pooling Besetzungsgrade in den vorliegenden Unter-Szenarien unterschieden (Bilali et al., 2019a).

Je nach ODM-Angebotsform fällt der Anteil zusätzlich anfallender Fahrstrecke durch Umwege, Leerfahrten, oder auch Relokations- und Servicefahrten an der Gesamt-Fahrleistung unter-

schiedlich stark ins Gewicht. Während beim Station-Based und Free-Floating Car Sharing lediglich ein kleiner Anteil durch Relokations- und Servicefahrten, sowie durch die Suche eines Parkplatzes im stark verdichteten Innenstadtbereich zu zusätzlich anfallender Fahrstrecke führen kann, besitzen beim Ride Hailing und Ride Pooling Leerfahrten und Umwege das Potential, die Gesamt-Fahrleistung deutlich zu erhöhen. Einer Studie des Statistikamtes Nord zufolge, ist ein traditionelles Taxi beispielsweise nur circa 45,8 % seiner Gesamt-Fahrleistung im Kundenauftrag unterwegs, was bedeutet, dass der Anteil von Leerfahrten sogar die eigentliche Beförderung von Kunden übersteigt und somit zu einer deutlichen Reduzierung des Besetzanteils der Gesamt-Fahrleistung führen kann (Statistikamt Nord, 2015). Ein Überblick über die in zugrunde liegenden Entwicklungsfaktoren ist im Anhang 11 zu sehen.

#### *Elektrifizierungsanteile ODM-Fahrzeugflotten*

Im zeitlichen Verlauf der Simulation wird ein Anstieg des Anteils an elektrifizierten Fahrzeugen im MIV Fahrzeugbestand unterstellt. Eigenen Recherchen zufolge soll der Anteil bei neu zugelassenen Fahrzeugen im Jahr 2030 bei circa 40 % (BEV, PHEV) liegen. Im SFD Modell wird demnach ein linearer Anstieg der Elektrifizierungsanteile bei Neuzulassungen angenommen (vgl. Abbildung 47-48).

Analog zum MIV Fahrzeugbestand werden für die unterschiedlichen ODM-Angebotsformen steigende Elektrifizierungsanteile bei Fahrzeugneuzulassungen angenommen, welche sich positiv auf den Elektrifizierungsanteil der Fahrzeugflotten auswirken. Für ODM-Angebotsformen mit einem starken Fokus des Geschäftsgebietes auf dem Innenstadt-Bereich (Free-Floating Car Sharing und Ride Pooling) wird eine ansteigende Regulierung unterstellt, sodass ab 2025 ausschließlich elektrifizierte Fahrzeuge in den Flotten zum Einsatz kommen. Für Station-Based Car Sharing und Ride Hailing Angebote werden ebenfalls unterschiedlich hohe Elektrifizierungsanteile bei den Neuzulassungen untersucht. Einen Überblick über die zugrunde liegenden Elektrifizierungsanteile der Fahrzeugneuzulassungen bietet die Tabelle im Anhang 11.

#### *Auswirkung ODM auf Fahrzeugbesitz MIV*

Da in der Fachliteratur große Unterschiede bei den Auswirkungen von ODM-Angeboten auf den privaten Fahrzeugbesitz festzustellen sind (vgl. Tabelle 14), werden die Effekte ebenfalls für die ODM-Angebotsformen Free-Floating und Station-Based Car Sharing in den Unter-Szenarien variiert. Da in Deutschland für Ride Hailing und Ride Pooling Angebote bislang keine Auswirkungen auf den privaten Fahrzeugbesitz nachgewiesen werden konnten, werden diese potentiellen Effekte bei der Simulation der Unter-Szenarien nicht berücksichtigt. Analog zu den bereits erläuterten Entwicklungsfaktoren der Unter-Szenarien erfolgt ein Überblick der Auswirkungen von ODM auf den privaten Fahrzeugbesitz in der Tabelle im Anhang 11.

#### 4.3.2.1 Evolutions-Szenario

Das Haupt-Szenario Evolution wird charakterisiert durch einen prognostizierten Anteil von 1,5 % ODM am Modal Split im Jahr 2030. Weiterhin wird ein linearer Anstieg der Münchner Bevölkerung um 200.000 Personen im zeitlichen Verlauf unterstellt.

Die nachfolgende Tabelle 25 bietet einen Überblick über die Variation der Entwicklungsfaktoren in den drei Unter-Szenarien. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden die drei Unter-Szenarien des Evolutions-Szenarios durch die Abkürzungen SE-1, SE-2 und SE-3 beschrieben.

Tabelle 25: Entwicklungsfaktoren der Unter-Szenarien des Haupt-Szenarien Evolution (eigene Darstellung)

<b>Unter-Szenario</b>	<b>Pessimistisch (SE-1)</b>	<b>Neutral (SE-2)</b>	<b>Optimistisch (SE-3)</b>	<b>Einheit</b>
<b>Verlagerungseffekte durch ODM</b>				
Zu Fuß gehen	12,5	5	0	%
Fahrrad fahren	12,5	5	0	%
Öffentlicher Personennahverkehr	50	40	25	%
Motorisierter Individualverkehr - Fahrer	20	40	70	%
Motorisierter Individualverkehr - Mitfahrer	5	10	5	%
<b>Besetzungsgrade, Umwege, Relokationen und Leerfahrten von ODM</b>				
Besetzungsgrad Car Sharing FF	1,3	1,7	1,8	-
Besetzungsgrad Car Sharing SB	1,7	1,9	2,1	-
Besetzungsgrad Ride Hailing	1,3	1,5	1,7	-
Besetzungsgrad Ride Pooling	1,7	2,0	2,3	-
zusätzliche Fahrleistung Car Sharing FF	15	10	5	%
zusätzliche Fahrleistung Car Sharing SB	10	5	0	%
zusätzliche Fahrleistung Ride Hailing	55	45	35	%
zusätzliche Fahrleistung Ride Pooling	50	40	20	%
<b>Elektrifizierungsanteil Fahrzeugneuzulassungen 2030</b>				
MIV BEV	15	15	15	%
MIV PHEV	25	25	25	%
Car Sharing FF BEV (2025)	50	70	90	%
Car Sharing FF PHEV (2025)	50	30	10	%
Car Sharing SB BEV	10	25	50	%
Car Sharing SB PHEV	30	35	50	%
Ride Hailing FF BEV	20	35	60	%
Ride Hailing FF PHEV	20	25	40	%
Ride Pooling FF BEV (2025)	50	70	90	%
Ride Pooling FF PHEV (2025)	50	30	10	%
<b>Auswirkung ODM auf Fahrzeugbesitz MIV</b>				
Fahrzeugabschaffungen durch Car Sharing SB	5	8	13	Fahrzeuge
Fahrzeugabschaffungen durch Car Sharing FF	1	3	5	Fahrzeuge

Während das Szenario SE-1 basierend auf den Entwicklungsfaktoren das negative Extremszenario des *Evolution* Haupt-Szenarien darstellt, unterstellt das Szenario SE-3 optimistische Verlagerungseffekte, Besetzungsgrade, zusätzlich anfallende Fahrleistung und zugrunde liegende Elektrifizierungsanteile, und bildet somit das bestmögliche Szenario (vgl. Abbildung 49). Das Szenario SE-2 charakterisiert einen neutralen Entwicklungsverlauf.

## 4.3.2.2 Revolutions-Szenario

Das Haupt-Szenario Revolution wird charakterisiert durch einen prognostizierten Anteil von > 5,0 % ODM am Modal Split im Jahr 2030. Weiterhin wird übereinstimmend zum Evolutions-Szenario ein linearer Anstieg der Münchner Bevölkerung um 200.000 Personen im zeitlichen Verlauf unterstellt.

Die Tabelle 26 zeigt die drei Unter-Szenarien (SR-1, SR-2, SR-3) des *Revolutions*-Szenarien und bietet dabei einen Überblick über die zugrunde liegenden Entwicklungsfaktoren.

Tabelle 26: Entwicklungsfaktoren der Unter-Szenarien des Haupt-Szenarien Revolution (eigene Darstellung)

<b>Unter-Szenario</b>	<b>Pessimistisch (SR-1)</b>	<b>Neutral (SR-2)</b>	<b>Optimistisch (SR-3)</b>	<b>Einheit</b>
<b>Verlagerungseffekte durch ODM</b>				
Zu Fuß gehen	12,5	5	0	%
Fahrrad fahren	12,5	5	0	%
Öffentlicher Personennahverkehr	50	40	25	%
Motorisierter Individualverkehr - Fahrer	20	40	70	%
Motorisierter Individualverkehr - Mitfahrer	5	10	5	%
<b>Besetzungsgrade, Umwege, Relokationen und Leerfahrten von ODM</b>				
Besetzungsgrad Car Sharing FF	1,3	1,7	1,5	-
Besetzungsgrad Car Sharing SB	1,7	1,9	2,1	-
Besetzungsgrad Ride Hailing	1,3	1,5	1,7	-
Besetzungsgrad Ride Pooling	1,9	2,3	2,5	-
zusätzliche Fahrleistung Car Sharing FF	15	10	5	%
zusätzliche Fahrleistung Car Sharing SB	10	5	0	%
zusätzliche Fahrleistung Ride Hailing	50	40	30	%
zusätzliche Fahrleistung Ride Pooling	40	30	15	%
<b>Elektrifizierungsanteil Fahrzeugneuzulassungen 2030</b>				
MIV BEV	15	15	15	%
MIV PHEV	25	25	25	%
Car Sharing FF BEV (2025)	50	70	90	%
Car Sharing FF PHEV (2025)	50	30	10	%
Car Sharing SB BEV	10	25	50	%
Car Sharing SB PHEV	30	35	50	%
Ride Hailing FF BEV	20	35	60	%
Ride Hailing FF PHEV	20	25	40	%
Ride Pooling FF BEV (2025)	50	70	90	%
Ride Pooling FF PHEV (2025)	50	30	10	%
<b>Auswirkung ODM auf Fahrzeugbesitz MIV</b>				
Fahrzeugabschaffungen durch Car Sharing SB	5	10	15	Fahrzeuge
Fahrzeugabschaffungen durch Car Sharing FF	2	4	8	Fahrzeuge

Für eine bessere Vergleichbarkeit der Szenarien untereinander, werden die einzelnen Entwicklungsfaktoren überwiegend konstant gehalten. Lediglich für den durchschnittlichen Besetzungsgrad der ODM-Angebotsform Ride Pooling wird aufgrund der stark ansteigenden Nachfrage ein Anstieg unterstellt. Weiterhin reduzieren sich die zusätzlich anfallenden Fahrleistungen für Ride Hailing und Ride Pooling aufgrund des erhöhten Anteils von ODM am Modal Split. Darüber hinaus wird ein leichter Anstieg der Fahrzeugabschaffungsraten durch ODM im Vergleich zum Evolutions-Szenario prognostiziert.

### 4.3.2.3 Disruptions-Szenario

Das Haupt-Szenario Disruption wird charakterisiert durch einen prognostizierten Anteil von > 15,0 % ODM am Modal Split und einen linearen Anstieg der Münchner Bevölkerung um 200.000 Personen bis zum Ende des Jahres 2030. Die Entwicklungsfaktoren für die drei Unter-Szenarien (SD-1, SD-2, SD-3) werden in der Tabelle 27 zusammengefasst.

Tabelle 27: Entwicklungsfaktoren der Unter-Szenarien des Haupt-Szenarien Disruption (eigene Darstellung)

<b>Unter-Szenario</b>	<b>Pessimistisch (SD-1)</b>	<b>Neutral (SD-2)</b>	<b>Optimistisch (SD-3)</b>	<b>Einheit</b>
<b>Verlagerungseffekte durch ODM</b>				
Zu Fuß gehen	12,5	5	0	%
Fahrrad fahren	12,5	5	0	%
Öffentlicher Personennahverkehr	50	40	25	%
Motorisierter Individualverkehr - Fahrer	20	40	70	%
Motorisierter Individualverkehr - Mitfahrer	5	10	5	%
<b>Besetzungsgrade, Umwege, Relokationen und Leerfahrten von ODM</b>				
Besetzungsgrad Car Sharing FF	1,3	1,7	1,5	-
Besetzungsgrad Car Sharing SB	1,7	1,9	2,1	-
Besetzungsgrad Ride Hailing	1,3	1,5	1,7	-
Besetzungsgrad Ride Pooling	2,2	2,6	3,0	-
zusätzliche Fahrleistung Car Sharing FF	15	10	5	%
zusätzliche Fahrleistung Car Sharing SB	10	5	0	%
zusätzliche Fahrleistung Ride Hailing	40	30	20	%
zusätzliche Fahrleistung Ride Pooling	30	20	10	%
<b>Elektrifizierungsanteil Fahrzeugneuzulassungen 2030</b>				
MIV BEV	15	15	15	%
MIV PHEV	25	25	25	%
Car Sharing FF BEV (2025)	50	70	90	%
Car Sharing FF PHEV (2025)	50	30	10	%
Car Sharing SB BEV	10	25	50	%
Car Sharing SB PHEV	30	35	50	%
Ride Hailing FF BEV	20	35	60	%
Ride Hailing FF PHEV	20	25	40	%
Ride Pooling FF BEV (2025)	50	70	90	%
Ride Pooling FF PHEV (2025)	50	30	10	%
<b>Auswirkung ODM auf Fahrzeugbesitz MIV</b>				
Fahrzeugabschaffungen durch Car Sharing SB	5	10	15	Fahrzeuge
Fahrzeugabschaffungen durch Car Sharing FF	2	4	8	Fahrzeuge

Durch den starken Anstieg des Anteils von ODM am Modal Split wird im *Disruptions*-Szenario eine Erhöhung des durchschnittlichen Besetzungsgrades der ODM-Angebotsform Ride Pooling prognostiziert. Darüber hinaus wird eine weitere Reduzierung der zusätzlich anfallenden Fahrleistungen für Ride Hailing und Ride Pooling im Vergleich zu den Evolutions- und Revolutions-Szenarien vorhergesagt. Bei den Fahrzeugabschaffungsraten wird im Vergleich zu dem *Revolutions*-Szenario keine Veränderung unterstellt. Einen zusammenfassenden Überblick über alle zugrunde liegenden Annahmen und Inputfaktoren bei der Modellierung der unterschiedlichen Szenarien bietet die Tabelle 11 im Anhang.

#### 4.4 Auswertung der Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die Simulationsergebnisse der in Kapitel 4.3.2 beschriebenen Szenarien dargestellt. Hierbei wird gezielt auf die zeitliche Entwicklung des Modellverhaltens relevanter Kennzahlen eingegangen. In diesem Zusammenhang werden nach einem kurzen Überblick zur unterstellten Bevölkerungsentwicklung die Ergebnisse zum Modal Split, zur Verkehrsleistung, zu den Fahrzeugkilometern, zum MIV Fahrzeugbesitz sowie zum Verlauf der in Kapitel 2.3.2 aufgestellten Verkehrs-, Flächen- und Emissions-Indikatoren aufgezeigt.

##### 4.4.1 Bevölkerungszuwachs und Entwicklung der Verkehrsnachfrage

Allen untersuchten Szenarien wurde ein Anstieg der Bevölkerung im Untersuchungsgebiet von 200.000 Personen unterstellt. Wie in Abbildung 53 dargestellt, verläuft dieser Anstieg linear über den Simulationsverlauf hinweg.

Basierend auf den Eingabedaten der Stadt München betrug die Bevölkerungsanzahl am 01.01.2018 im Untersuchungsgebiet 1.526.056 Personen (vgl. LHM, 2019c). Das vorliegende Modell berechnet den Entwicklungsverlauf von diesem Zeitpunkt bis zum 31.12.2030. Da in der Abbildung 53 nur Simulationswerte bis zum 01.01.2030 abgebildet werden, kommt es zu einer entsprechenden Differenz von 15.386 Personen, was dem unterstellten Bevölkerungszuwachs innerhalb des Jahres 2030 entspricht.

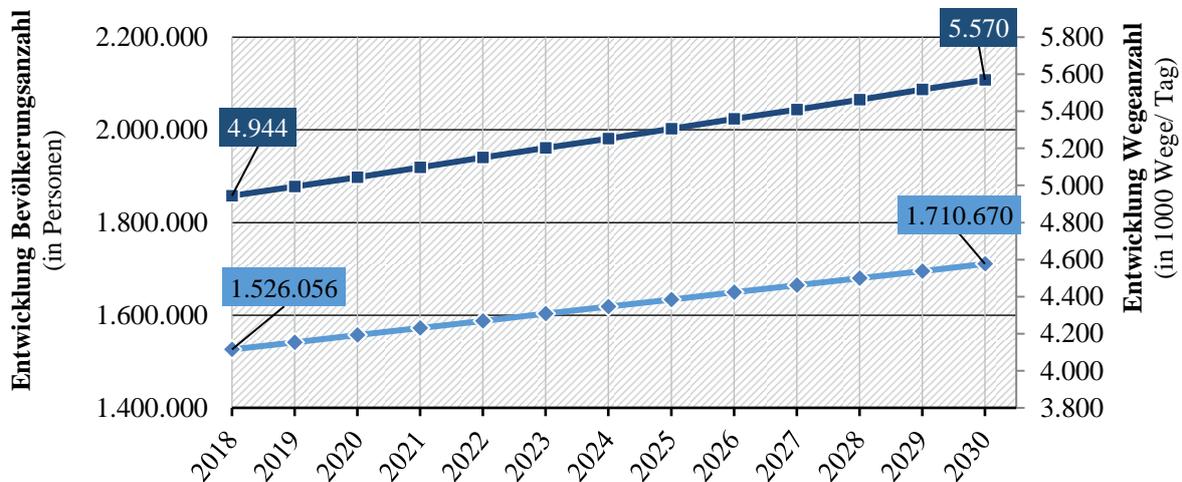


Abbildung 53: Entwicklung Bevölkerungsanzahl und Anzahl an Wegen (eigene Darstellung)

Zusätzlich zu der dargestellten Bevölkerungsentwicklung bietet die Abbildung 53 einen Überblick über die Entwicklung der Anzahl der Wege, welche proportional zur Bevölkerungsentwicklung dem Modellverhalten zu folge auf circa 5,57 Mio. Wege pro Tag ansteigt. Dies entspricht einer Zunahme der Gesamtanzahl an Wegen von circa 12,7 % im Vergleich zum Startzeitpunkt der Simulation im Jahr 2018. Bezogen auf die Bevölkerungsanzahl ergibt sich dem Modellverhalten zufolge auch im Jahr 2030 eine durchschnittliche Anzahl von Wegen der betrachteten Personen von circa 3,2 Wegen pro Tag.

#### 4.4.2 Verteilung der Anzahl der Wege und Verkehrsleistung

Basierend auf dem prognostizierten Bevölkerungszuwachs und der Berücksichtigung historischer Trends bei der Betrachtung des Modal Splits im Untersuchungsgebiet (auf Basis einer Auswertung der MiD-Daten der Jahre 2002, 2008 und 2017) berechnet das Modell die Verteilung der Anzahl der Wege im zeitlichen Verlauf. Die nachfolgende Abbildung 54 zeigt dabei die drei neutralen Szenarien (SE-2, SR-2 und SD-2) auf. Wie weiterhin dargestellt, weisen alle Szenarien im Jahr 2018 mit 44.958 ODM-Wege pro Tag denselben Startwert auf. Dieser basiert auf der in Kapitel 2.4.4.2 ermittelten Gesamtanzahl an Wegen für die ODM-Angebotsformen Free-Floating und Station-Based Car Sharing, Ride Hailing und Ride Pooling.

Im zeitlichen Simulationsverlauf berechnet das Modell in den drei dargestellten Szenarien eine unterschiedlich starke Durchdringung von ODM-Angeboten. Während im *Evolutions*-Szenario SE-2 die Anzahl der Wege von ODM im Jahr 2030 auf 78.680 Wege pro Tag ansteigt, kommt es im *Revolutions*- und *Disruptions*-Szenario (SR-2 und SD-2) entsprechend der zugrunde liegenden Eingabedaten mit 255.262 und 761.098 ODM-Wege pro Tag zu deutlich stärkeren Anstiegen. Wie in Abbildung 54c dargestellt, haben diese starken Anstiege Auswirkungen auf die Anzahl der Wege des MIV's.

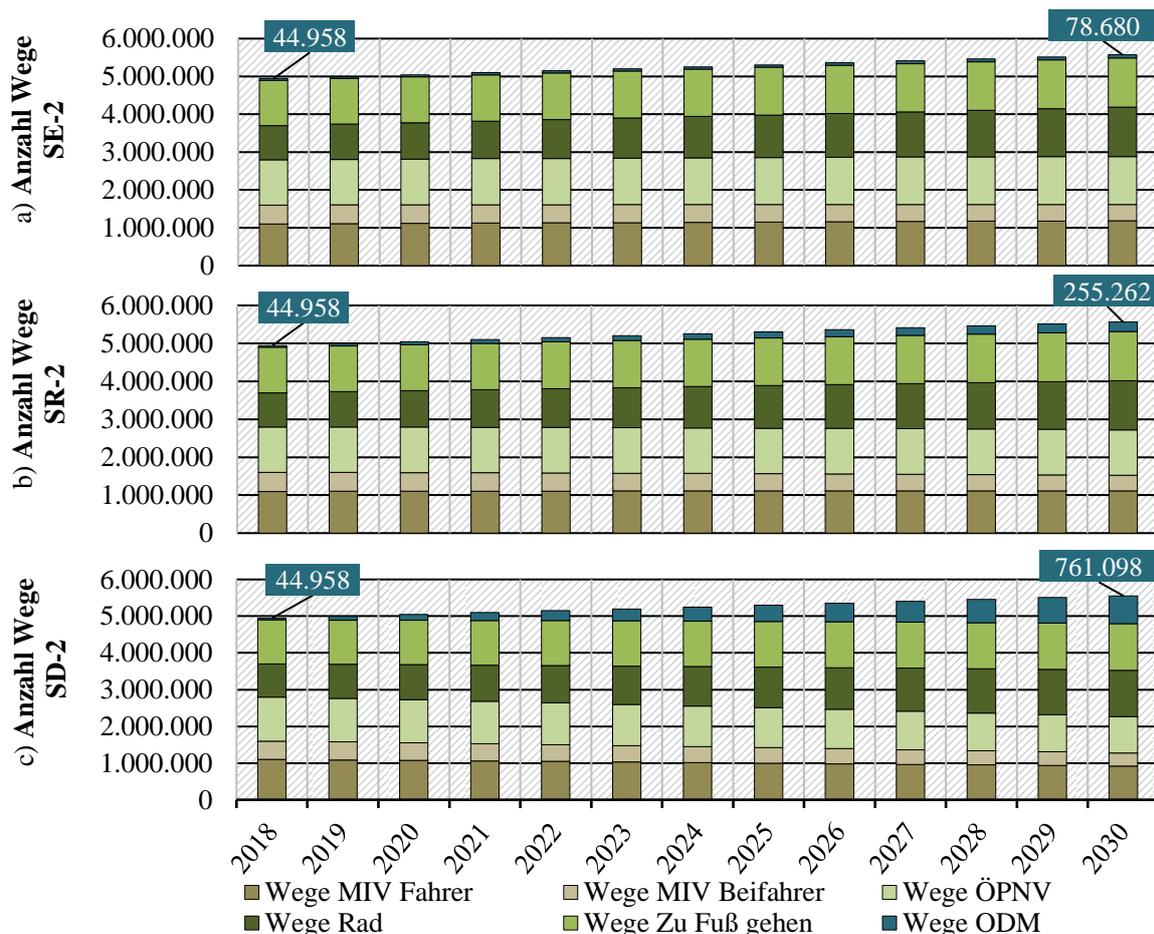


Abbildung 54: Simulationsergebnisse Anzahl Wege SE-2, SR-2, SD-2 (eigene Darstellung)

Neben der Anzahl der Wege berechnet das Modell basierend auf einer durchschnittlichen Wegelänge der unterschiedlichen Transport-Modos auch die Verkehrsleistung in PKM. Da das vorliegende Modell eine konstante Verkehrsleistung pro Person und Tag unterstellt, ist es mathematisch erforderlich, bei dynamischen Veränderungen des Modal Splits die durchschnittlichen Wegelängen durch die Anwendung eines Kalibrierungsfaktors im zeitlichen Verlauf der Simulation anzupassen. In allen untersuchten Szenarien betrug der Wert des Kalibrierungsfaktors maximal 1,09 (Disruptions-Szenario mit größter zeitlicher Veränderung des Modal Splits).

In der nachfolgenden Abbildung 55 ist der Verlauf der Verkehrsleistungen unterschiedlicher Transport-Modos abgebildet. Die Verkehrsleistung von ODM entwickelt sich dabei je nach Szenario unterschiedlich stark. Fußgänger- und Radverkehr fallen bei der Betrachtung der Verkehrsleistung nicht so stark ins Gewicht, da die durchschnittlichen Wegelängen im Vergleich zu den anderen Transport-Modos deutlich geringer ausfallen.

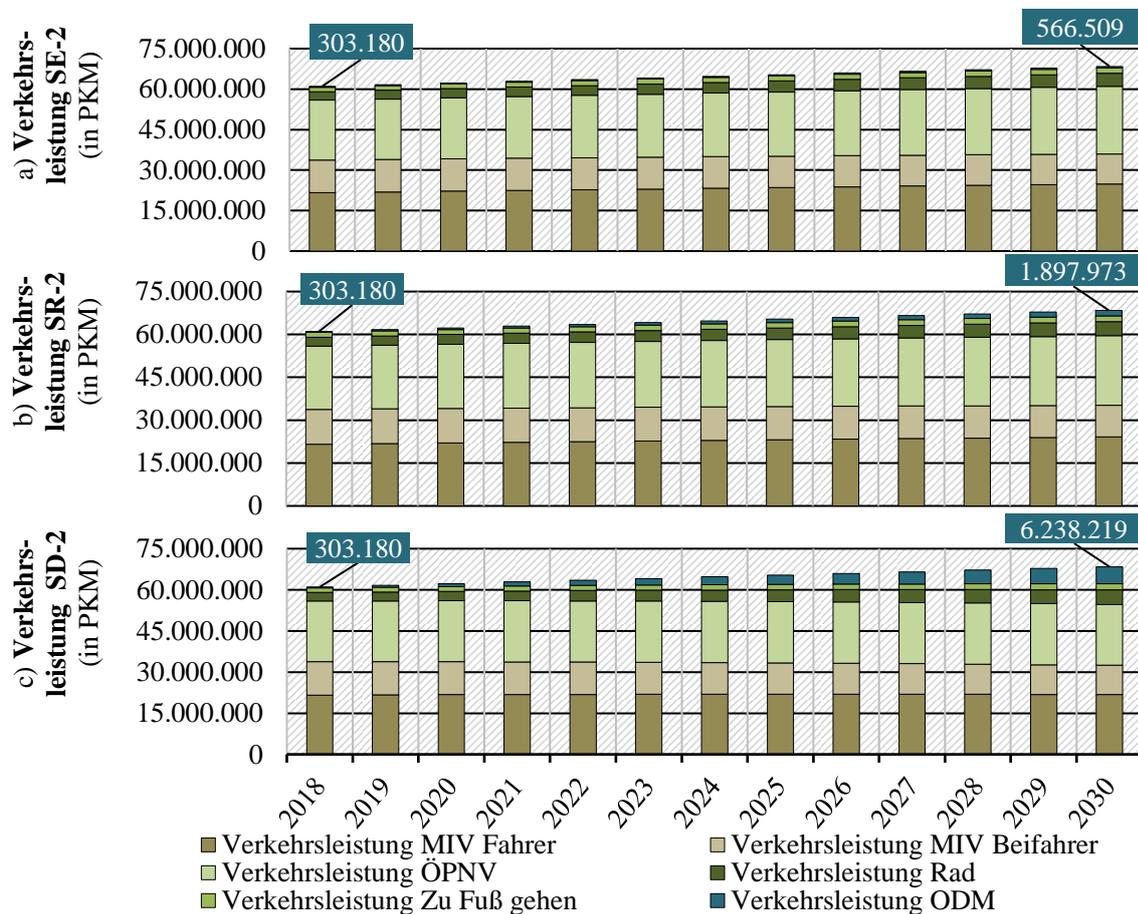


Abbildung 55: Simulationsergebnisse Verkehrsleistung SE-2, SR-2, SD-2 (eigene Darstellung)

#### 4.4.3 Fahrzeugkilometer und MIV Fahrzeugbestand

Basierend auf der ermittelten Verkehrsleistung werden unter der Berücksichtigung entsprechender Flottengrößen und Besetzungsgrade (vgl. Tabelle 24) die anfallenden Fahrzeugkilometer im Modell berechnet. Die folgende Abbildung 56 zeigt die Simulationsergebnisse zu den durch MIV und ODM anfallenden Fahrzeugkilometern. Durch die Berücksichtigung unterschiedlicher Eingabedaten (vgl. Anhang 11), welche für den Simulationsverlauf konstant unterstellt werden, kommt es im Jahr 2018 zu einer Abweichung der ODM-Fahrzeugkilometer unter den untersuchten Szenarien von rund 11 %. Diese sind insbesondere auf unterschiedliche Annahmen zur Effizienz der ODM-Flottenauslastung und damit verbundenen Mehrkilometraufwendungen zurückzuführen.

Über den zeitlichen Verlauf der Simulation sind, wie in der Abbildung 56 dargestellt, eindeutige Unterschiede bei den Fahrzeugkilometern durch ODM zu erkennen. Während im *Evolutions-*Szenario SE-2 die Fahrzeugkilometer im zeitlichen Verlauf der Simulation auf 486.707 VKM pro Tag moderat ansteigen, kommt es im SR-2 und SD-2 Szenario zu einer deutlich stärkeren Zunahme der ODM-Fahrzeugkilometer auf 1.496.383 bzw. 4.096.231 VKM pro Tag.

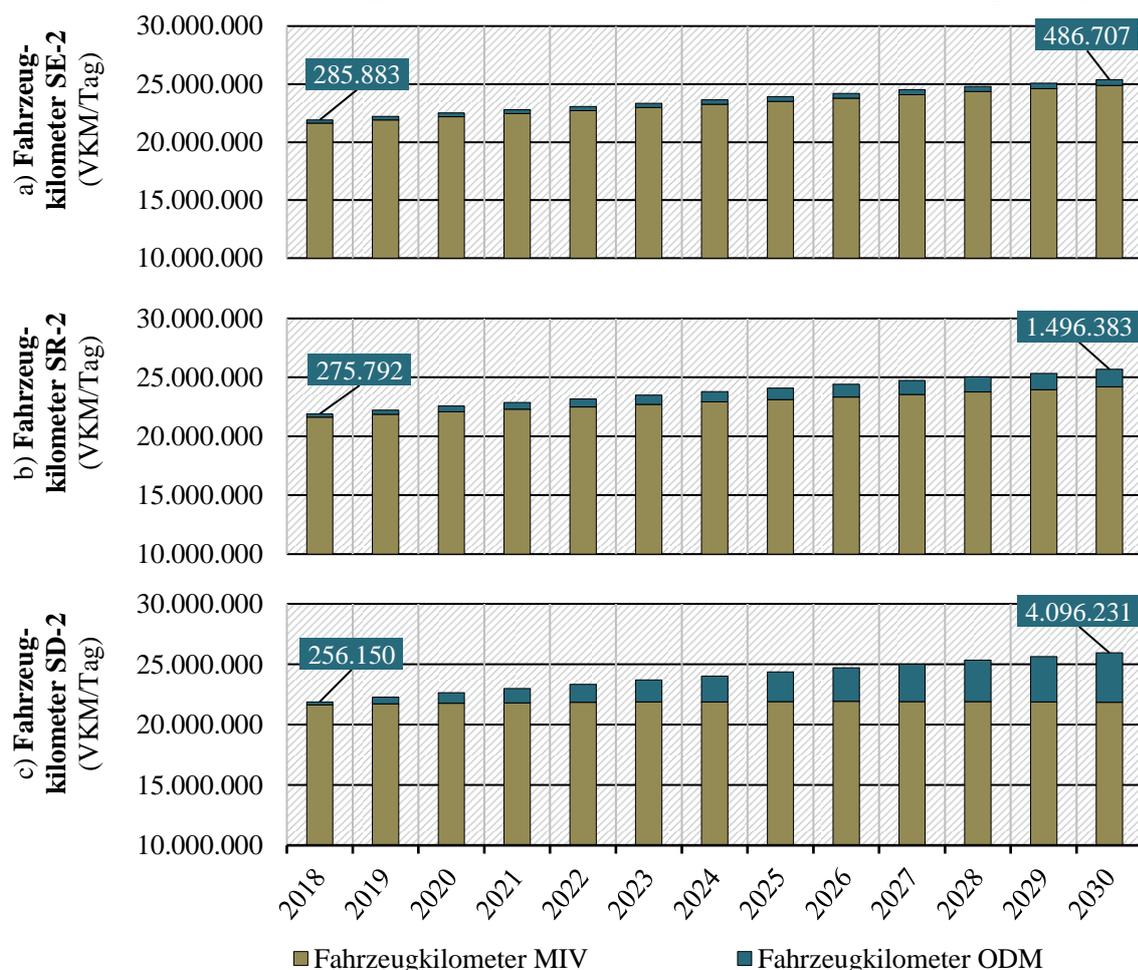


Abbildung 56: Simulationsergebnisse der ODM und MIV Fahrzeugkilometer SE-2, SR-2, SD-2 (eigene Darstellung)

Bei der Betrachtung optimistischer und pessimistischer Unter-Szenarien sind teils bedeutsame Unterschiede zu den neutralen Szenarien erkennbar. In diesem Zusammenhang kommt es beispielsweise im optimistischen SD-3 Szenario zu einer signifikanten Reduktion der Fahrzeugkilometer durch ODM und MIV im zeitlichen Verlauf (vgl. Abbildung 57). Weiterhin weisen auch die berechneten Fahrzeugkilometer von ODM im Vergleich zum neutralen *Disruptions*-Szenario SD-2 eine eindeutige Reduktion auf.

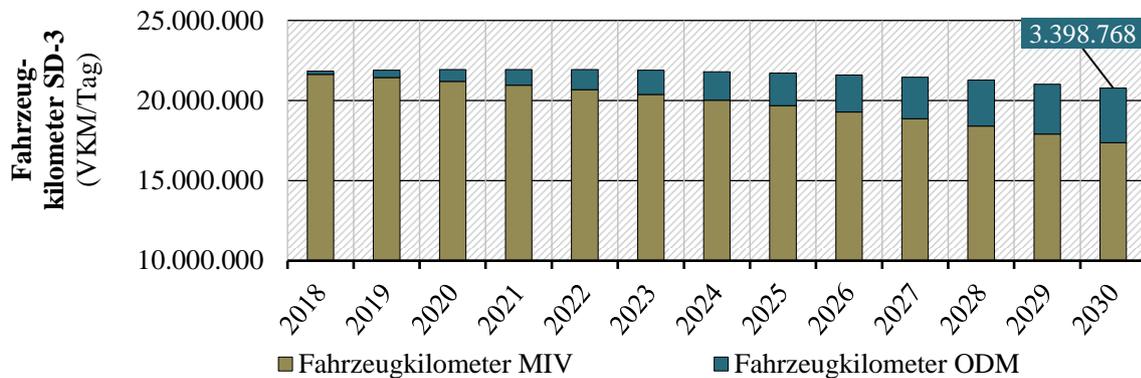


Abbildung 57: Simulationsergebnisse der ODM und MIV Fahrzeugkilometer SD-3 (eigene Darstellung)

Für die Berechnung der Gesamt-Fahrzeugkilometer werden in dem vorliegenden Modell ebenfalls die durch den ÖPNV anfallenden Fahrzeugkilometer berücksichtigt. Einen Überblick über die Simulationsergebnisse der Gesamt-Fahrzeugkilometer aller untersuchten Szenarien bietet die Abbildung 58.

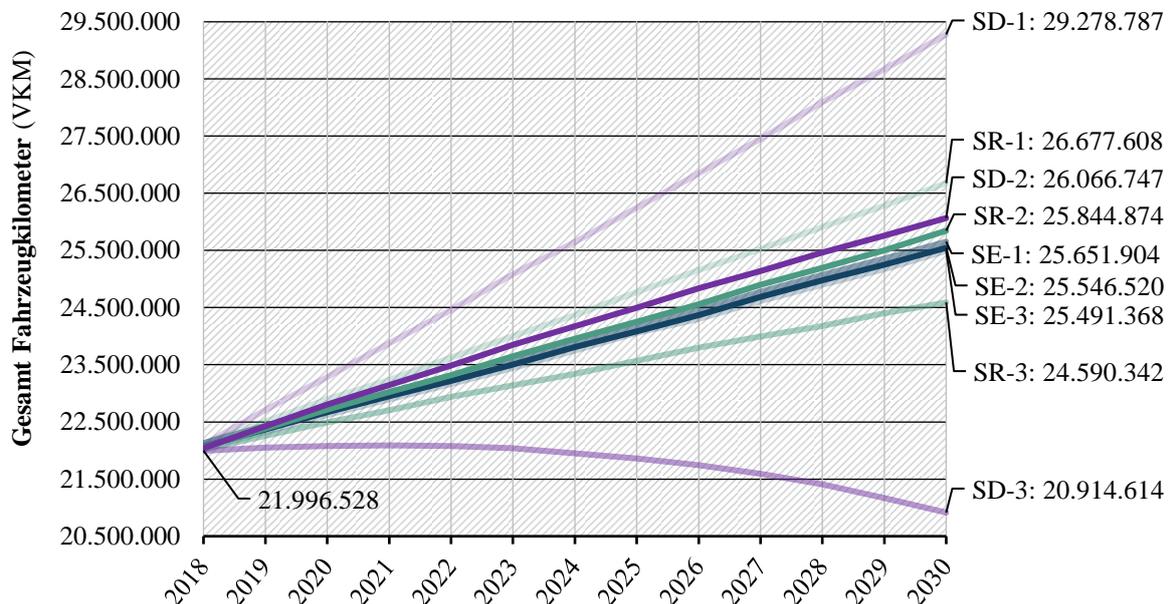


Abbildung 58: Simulationsergebnisse Gesamt Fahrzeugkilometer (eigene Darstellung)

Wie aus der Abbildung 58 hervorgeht, steigt die Streuung mit dem zunehmenden Anteil von ODM aufgrund der steigenden Unsicherheiten im zeitlichen Verlauf deutlich an. Während die Simulationsergebnisse der *Evolutions*-Szenarien alle verhältnismäßig nah beieinander liegen,

steigt in diesem Zusammenhang die Varianz der *Revolutions*- und insbesondere auch der *Disruptions*-Szenarien um ein Vielfaches an. Eine Reduzierung der Gesamt-Fahrzeugkilometer im Vergleich zum Startzeitpunkt der Simulation konnte nur im optimistischen *Disruptions*-Szenario SD-3 ermittelt werden.

Neben der Verkehrsleistung werden im vorliegenden Modell der Fahrzeugbestand aller MIV Fahrzeuge in München sowie die Entwicklung der ODM-Fahrzeugflotten untersucht. Der Fahrzeugbestand des MIV's wird, wie in Kapitel 4.2.3.4 dargestellt, durch die Bevölkerungsanzahl und die durchschnittliche Fahrzeugbesitzquote ermittelt. Darüber hinaus werden in den betrachteten Szenarien unterschiedliche Elektrifizierungsraten für neue Fahrzeugregistrierungen unterstellt (vgl. Anhang 11), die zu einem Anstieg des Anteils von elektrifizierten Fahrzeugen im zeitlichen Verlauf führen.

In Abbildung 59 werden exemplarisch für die Entwicklung des MIV Fahrzeugbestandes die Simulationsergebnisse des *Evolutions*-Szenarios SE-2 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Anzahl der MIV Fahrzeuge im zeitlichen Verlauf um weitere 83.638 Fahrzeuge auf insgesamt 787.333 Fahrzeuge ansteigt. Hauptgrund hierfür ist der Anstieg der Bevölkerung im Untersuchungsgebiet, da die Fahrzeugbesitzquote als Eingabegröße in die Simulation als konstant unterstellt wurde. Potentielle Auswirkungen von ODM Angeboten auf den MIV Fahrzeugbesitz wurden in den dargestellten Ergebniswerten bereits berücksichtigt (vgl. Kapitel 4.2.3.4).

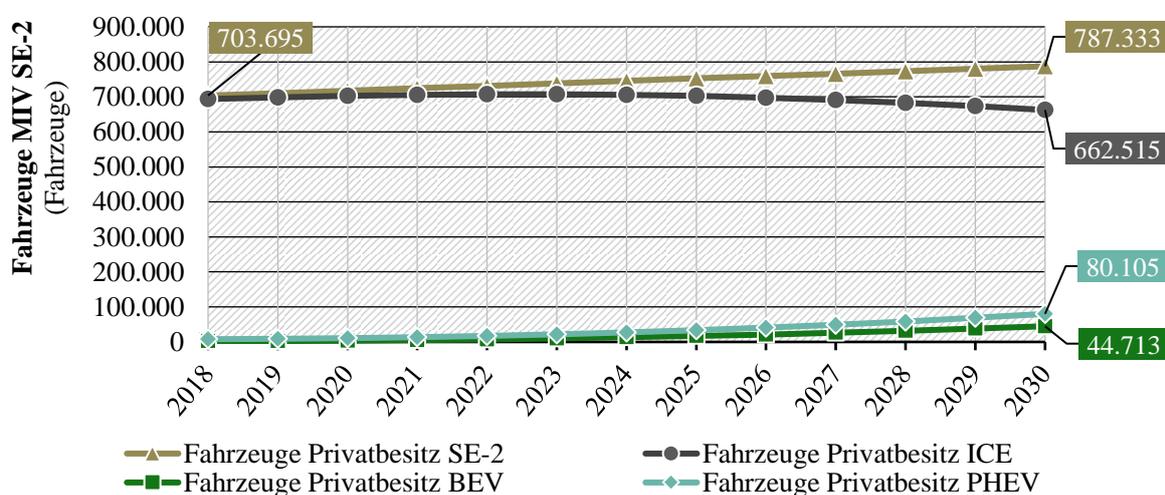


Abbildung 59: Simulationsergebnisse Fahrzeuge MIV SE-2 (eigene Darstellung)

Weiterhin ist zu erkennen, dass der Anteil an elektrifizierten Fahrzeugen im Verlauf der Simulation einem starken Anstieg unterliegt. Im Jahr 2030 befinden sich den Simulationsergebnissen zufolge 80.105 PHEV und 44.713 BEV Fahrzeuge im MIV Bestand. Dies entspricht einem elektrifizierten Anteil am MIV Fahrzeugbestand von circa 15,8 %. Die folgende Abbildung 60 zeigt die Simulationsergebnisse des MIV Fahrzeugbestandes aller untersuchten Szenarien auf.

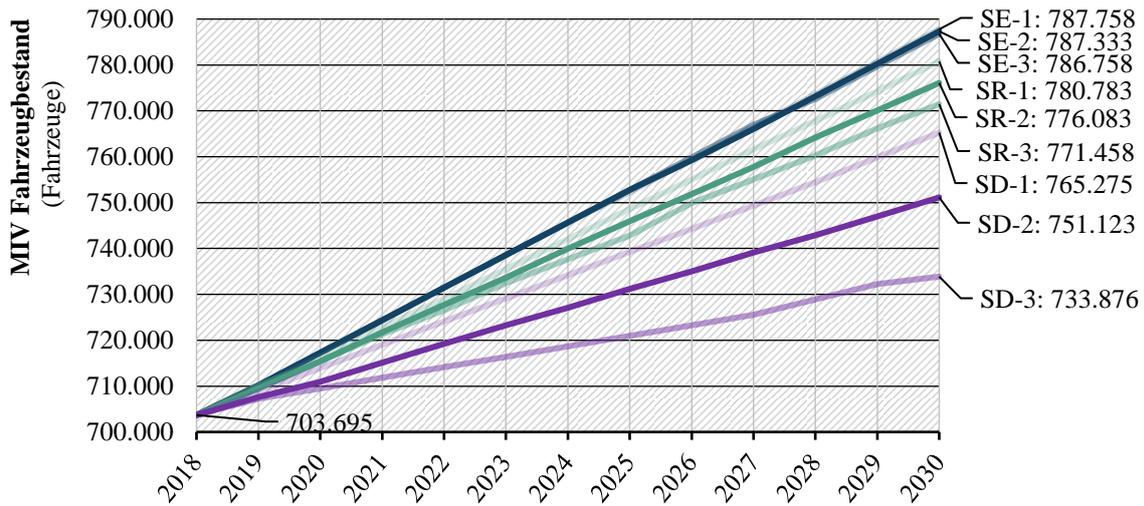


Abbildung 60: Simulationsergebnisse Fahrzeuge MIV (eigene Darstellung)

Wie aus der Abbildung 60 hervorgeht, steigt die Anzahl an MIV Fahrzeugen in allen untersuchten Szenarien im zeitlichen Verlauf an. Darüber hinaus ist zu erkennen, dass eine steigende Durchdringung von ODM zu einer Verminderung der MIV Fahrzeuge im Untersuchungsgebiet führt. Eine gezielte Analyse des MIV Fahrzeugbestandes und der Auswirkungen auf die im öffentlichen Raum parkenden Fahrzeuge erfolgt in Kapitel 4.4.5.

Die Betrachtung der Elektrifizierung der ODM-Fahrzeugflotten erfolgt in dem vorliegenden Modell anhand unterschiedlicher Eingabedaten (vgl. Anhang 11). Für ein besseres Verständnis werden auf Basis der Simulationsergebnisse des *Evolutions*-Szenarios SE-2 die zeitlichen Verläufe der ODM-Fahrzeugflotten in der Abbildung 61 dargestellt und erläutert.

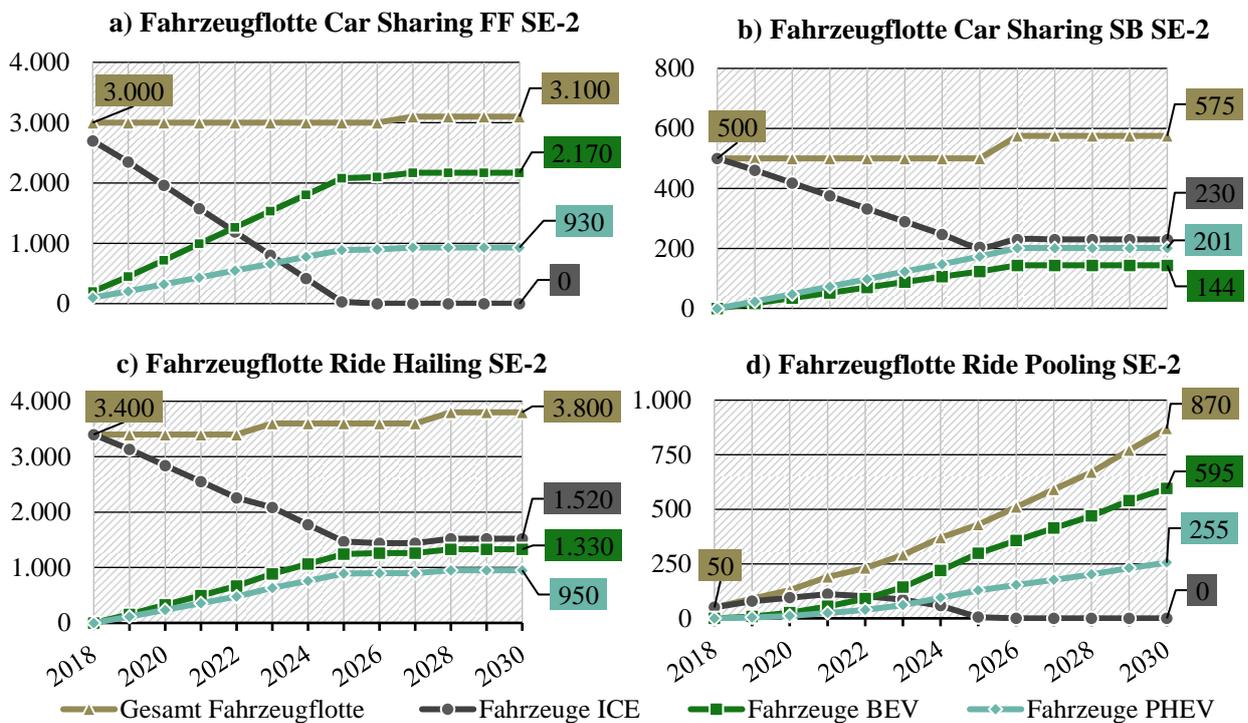


Abbildung 61: Simulationsergebnisse ODM Fahrzeugflotte SE-2 (eigene Darstellung)

Wie in der Abbildung 61 zu erkennen ist, steigt die Anzahl an Fahrzeugflotten für alle betrachteten ODM-Angebotsformen im zeitlichen Verlauf der Simulation im Vergleich zum Startzeitpunkt im Jahr 2018 an. Das stärkste Wachstum erfolgt bei der ODM-Angebotsform Ride Pooling (vgl. Abbildung 61d). Hier wächst die Flottengröße im zeitlichen Verlauf auf insgesamt 870 Fahrzeuge an. Kumuliert über alle betrachteten ODM-Angebotsformen kommt es über den gesamten Simulationsverlauf zu einem Anstieg von 1.395 ODM-Fahrzeugen.

Für innenstadtnah betriebene ODM-Angebote, wie Free-Floating Car Sharing und Ride Pooling, wurde in allen betrachteten Unter-Szenarien die Annahme unterstellt, dass die Fahrzeugflotten ab dem Jahr 2025 zu 100 % elektrifiziert werden (vgl. Kapitel 4.3.2). Für Station-Based Car Sharing und Ride Hailing wurden ebenfalls signifikante Elektrifizierungsanteile angenommen, die jedoch nur in den optimistischen Unter-Szenarien eine vollständige Elektrifizierung erreichen. Alle zugrunde liegenden Elektrifizierungsannahmen der betrachteten Unter-Szenarien werden im Anhang 11 zusammengefasst.

#### 4.4.4 Auswertung Verkehrs-Indikator: Verkehrsfluss und Durchschnitts-Geschwindigkeit

Die Berechnung des in Kapitel 2.3.2.2 aufgestellten Verkehrs-Indikators erfolgt im Modell vereinfacht auf Basis einer räumlich und zeitlich aggregierten Durchschnitts-Geschwindigkeit (vgl. Formel 2). Diese wird als Durchschnitts-Wert für einen Tag ermittelt und kann somit über den zeitlichen Verlauf der Simulation abgebildet werden. Als Grundlage für die Berechnung einer Durchschnitts-Geschwindigkeit dienen die zeitlichen Verläufe der in Abbildung 58 dargestellten Gesamt-Fahrzeugkilometer. Die folgende Abbildung 62 bietet einen Überblick über den zeitlichen Verlauf der Durchschnitts-Geschwindigkeit aller untersuchten Szenarien.

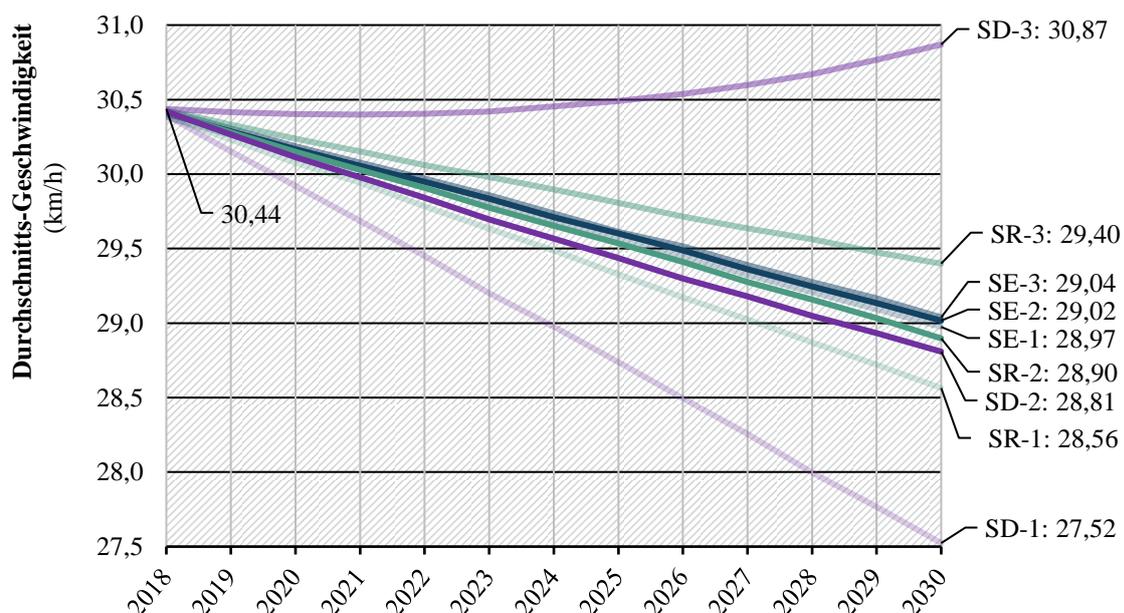


Abbildung 62: Simulationsergebnisse Durchschnitts-Geschwindigkeit (eigene Darstellung)

Wie in der Abbildung 62 erkennbar ist, variiert die Entwicklung der Durchschnitts-Geschwindigkeit unter den Szenarien teils deutlich. Fast alle Szenarien weisen über den zeitlichen Verlauf der Simulation hinweg eine Reduktion der Durchschnitts-Geschwindigkeit auf. Ausschließlich bei dem *Disruptions*-Szenario SD-3 kommt es zu einer Erhöhung der Durchschnitts-Geschwindigkeit um  $\sim 0,43$  km/h. Einen Überblick über die Simulationsergebnisse zum Endzeitpunkt der Simulation bietet auch die folgende Tabelle 28.

Tabelle 28: Simulationsergebnisse Durchschnitts-Geschwindigkeit 2030 (eigene Darstellung)

<b>Szenario</b>	<b>Durchschnitts-Geschwindigkeit 2030</b> (in km/h)	<b>Differenz zu SE-2</b> (in km/h)	<b>Differenz zu SE-2</b> (in %)	<b>Differenz zu 2018</b> (in km/h)	<b>Differenz zu 2018</b> (in %)
SE-1	28,97	0,050	0,17 %	$\sim -1,47$	$\sim -5,07$ %
SE-2	29,02	0,000	0,00 %	$\sim -1,42$	$\sim -4,89$ %
SE-3	29,04	-0,020	-0,07 %	$\sim -1,40$	$\sim -4,82$ %
SR-1	28,56	0,460	1,61 %	$\sim -1,88$	$\sim -6,58$ %
SR-2	28,90	0,120	0,42 %	$\sim -1,54$	$\sim -5,33$ %
SR-3	29,40	-0,380	-1,29 %	$\sim -1,04$	$\sim -3,54$ %
SD-1	27,52	1,500	5,45 %	$\sim -2,92$	$\sim -10,61$ %
SD-2	28,81	0,210	0,73 %	$\sim -1,63$	$\sim -5,66$ %
SD-3	30,87	-1,850	-5,99 %	$\sim 0,43$	$\sim +1,39$ %

Wie die Abbildung 58 bereits darstellte, kommt es durch ODM in den untersuchten Szenarien überwiegend zu einer Erhöhung der betrachteten Gesamt-Fahrzeugkilometer und dementsprechend im Modellverhalten zu einer Reduktion der Durchschnitts-Geschwindigkeit. Lediglich unter stark optimistischen Annahmen im *Disruptions*-Szenario SD-3 konnten eine Reduktion der Gesamt-Fahrzeugkilometer und ein daraus resultierender Anstieg der Durchschnitts-Geschwindigkeit im Untersuchungsgebiet beobachtet werden. Eine kritische Diskussion der Simulationsergebnisse erfolgt in Kapitel 5. Die zugrunde liegenden Eingangsdaten werden in Kapitel 4.5.1 kritisch hinterfragt.

#### 4.4.5 Auswertung Flächen-Indikator: Flächeninanspruchnahme und Flächenverbrauch

Wie in Kapitel 2.3.2.2 beschrieben, wurde im Rahmen dieser Arbeit der Flächen-Indikator als die benötigte Gesamtfläche für parkende Fahrzeuge im öffentlichen Raum der Stadt München definiert (vgl. Formel 3). Das vorliegende Modell berechnet somit über den zeitlichen Verlauf der Simulation auf Basis des MIV Fahrzeugbestandes und der ODM-Fahrzeugflotten die Anzahl der parkenden Fahrzeuge im Untersuchungsgebiet. Über die durchschnittliche Fläche eines parkenden Fahrzeugs ist es weiterhin möglich, die benötigte Gesamtfläche zu berechnen (vgl. Formel 4).

Um die Auswirkungen von ODM auf die Fläche zu untersuchen ist es notwendig, die durch ODM abgeschafften MIV Fahrzeuge in die Untersuchung einzubeziehen. Wie in der Abbildung 63 dargestellt ist, wurden in dem Modell auf Basis unterschiedlicher Fahrzeugabschaffungs-raten (vgl. Tabelle 14) die durch ODM abgeschafften MIV Fahrzeuge berechnet.

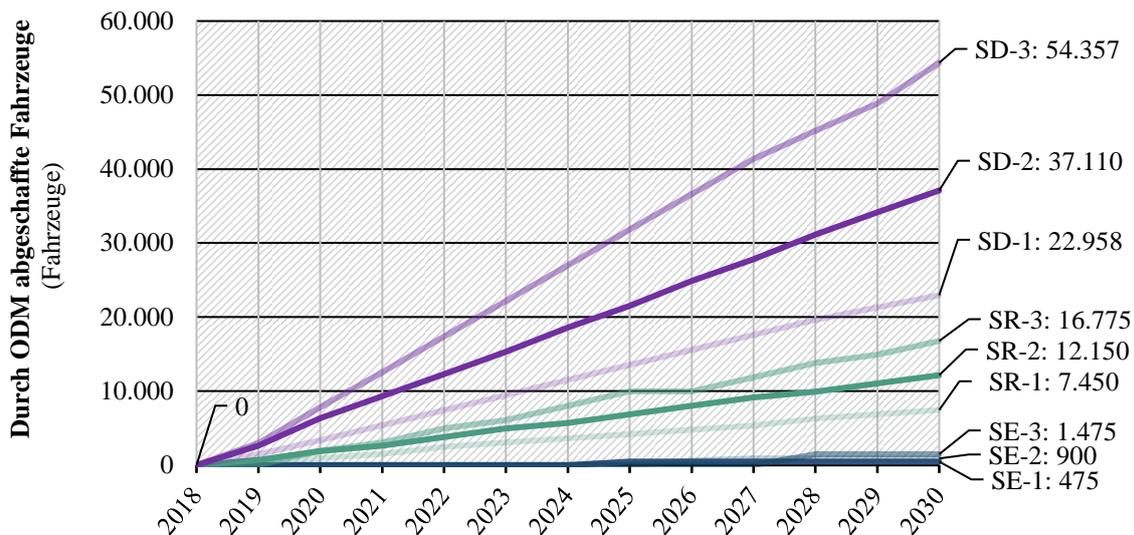


Abbildung 63: Simulationsergebnisse durch ODM abgeschaffte MIV Fahrzeuge (eigene Darstellung)

Zum Startzeitpunkt der Simulation existieren laut den Simulationsergebnissen noch keine durch ODM abgeschafften Fahrzeuge. Erst durch die Entwicklung unterschiedlicher ODM-Fahrzeugflotten kommt es dem Modellverhalten zufolge zu einem Anstieg an abgeschafften MIV Fahrzeugen. In diesem Zusammenhang führen die untersuchten *Disruptions*-Szenarien zu der höchsten Anzahl abgeschaffter MIV Fahrzeuge. Die *Revolutions*-Szenarien besitzen zwar, wie in der Abbildung 63 erkennbar, eine stärkere Auswirkung als die *Evolutions*-Szenarien, liegen jedoch deutlich unter den *Disruptions*-Szenarien.

Für die Inanspruchnahme von Stellplatz-Flächen durch ODM-Fahrzeuge wurden je nach ODM-Angebotsform unterschiedliche Annahmen unterstellt. Während Free-Floating und Station-Based Car Sharing Fahrzeuge den Modellannahmen zufolge in den neutralen Unter-Szenarien ausschließlich im öffentlichen Parkraum abgestellt werden, blockieren Ride Hailing und Ride Pooling Fahrzeuge nur zu 20 % dauerhaft Stellplatz-Fläche im öffentlichen Raum. Alle dem Modell zugrunde liegenden Flächeninanspruchnahmen der unterschiedlichen ODM-Angebotsformen befinden sich in der Tabelle im Anhang 11. Die folgende Abbildung 64 fasst die Simulationsergebnisse zu den im öffentlichen Raum parkenden Fahrzeugen zusammen.

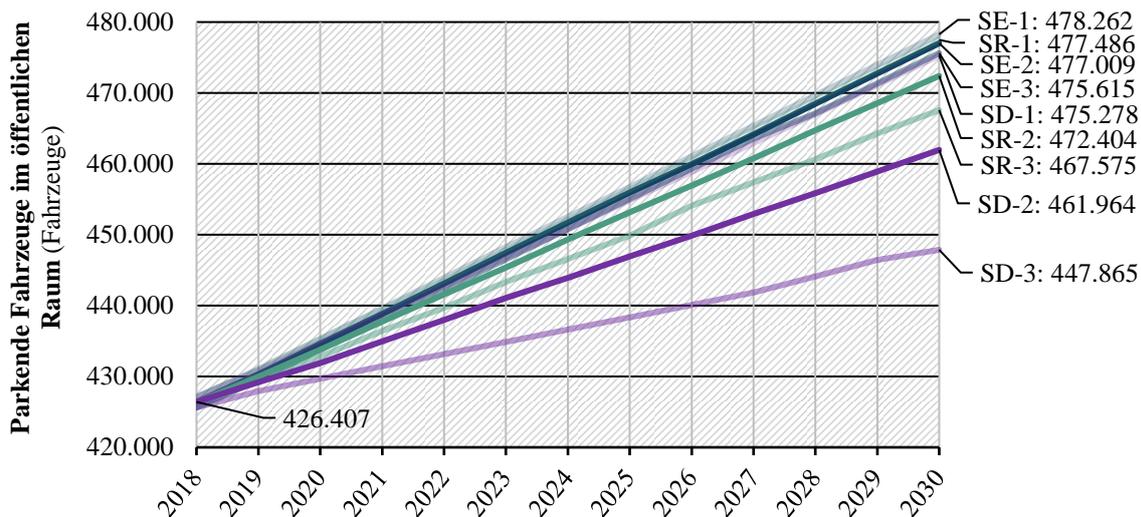


Abbildung 64: Simulationsergebnisse Parkende Fahrzeuge im öffentlichen Raum (eigene Darstellung)

Abbildung 65 stellt basierend auf den Ergebnissen aus der vorangegangenen Abbildung die benötigte Gesamtfläche für parkende Fahrzeuge im öffentlichen Raum dar. Hierbei wurde allen Szenarien unterstellt, dass die durchschnittlich okkupierte Fläche für ein parkendes Fahrzeug im öffentlichen Raum bei  $15 \text{ m}^2$  liegt<sup>40</sup>.

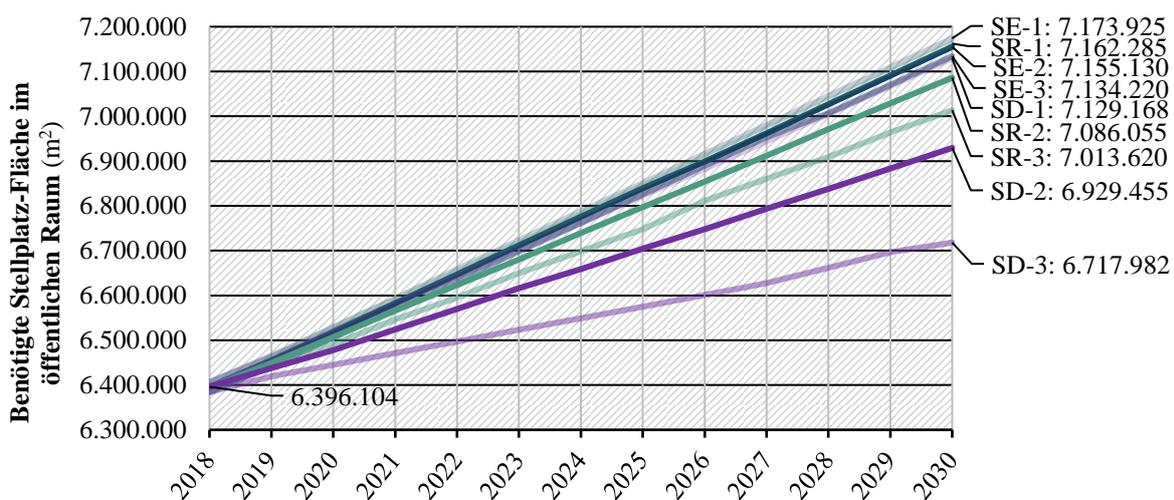


Abbildung 65: Simulationsergebnisse benötigte Stellplatz-Fläche im öffentlichen Raum (eigene Darstellung)

Wie in der Abbildung 65 zu erkennen ist, steigt die benötigte Stellplatz-Fläche im öffentlichen Raum in allen untersuchten Szenarien im Vergleich zum Startzeitpunkt der Simulation im Jahr 2018 an. Hauptgrund hierfür ist die weitere Zunahme an Neuregistrierungen von MIV Fahrzeugen aufgrund der steigenden Bevölkerung im Untersuchungsgebiet. Insbesondere die ODM-Angebotsformen Free-Floating und Station-Based Car Sharing haben eine dämpfende Wirkung auf den MIV Fahrzeugbestand, da sie sich positiv auf den Besitz von privaten Fahrzeugen auswirken (vgl. Tabelle 14). Ride Hailing und Ride Pooling haben dem Modellverhalten zufolge

<sup>40</sup> Breite eines durchschnittlichen Stellplatzes von 2,00 – 2,50m bei einer Länge zwischen 5,50 – 7,30m (Bräutigam-Ernst, 2007)

fast keine Auswirkungen auf den Besitz von privaten Fahrzeugen, blockieren aber im Vergleich zu Car Sharing Fahrzeugen kaum Parkraum in der Innenstadt des Untersuchungsgebietes.

An den zeitlichen Verläufen der Abbildung 65 ist weiterhin zu sehen, dass die untersuchten Szenarien mit einer höheren ODM-Durchdringung (SD-x und SR-x) zu einer Reduzierung der benötigten Stellplatz-Fläche führen, was eine positive Auswirkung von ODM auf den untersuchten Flächen-Indikator schlussfolgern lässt. Bei dem neutralen *Revolutions*-Szenario SR-2 ist die benötigte Stellplatz-Fläche im öffentlichen Raum zum Endzeitpunkt der Simulation im Jahr 2030 beispielsweise um 69.075 m<sup>2</sup> geringer als beim *Evolutions*-Szenario SE-2. Dies entspricht einer Flächeneinsparung von circa 0,97 %. Das *Disruptions*-Szenario SD-2 kommt im Vergleich zum *Evolutions*-Szenario SE-2 sogar zu einer Einsparung von 3,15 %. Einen Überblick über die benötigte Fläche im Vergleich zum Basis-Szenario SE-2 bietet die folgende Tabelle 29. Eine Diskussion der Simulationsergebnisse erfolgt im Kapitel 5.

Tabelle 29: Simulationsergebnisse benötigte Stellplatz-Fläche im öffentlichen Raum 2030 (eigene Darstellung)

Szenario	Stellplatz-Fläche	Differenz zu	Differenz zu	Differenz zu	Differenz zu
	2030 (in m <sup>2</sup> )	SE-2 (in m <sup>2</sup> )	SE-2 (in %)	2018 (in m <sup>2</sup> )	2018 (in %)
SE-1	7.173.925	18.795	0,26 %	777.821	12,16 %
SE-2	7.155.130	0	0,00 %	759.026	11,87 %
SE-3	7.134.220	-20.910	-0,29 %	738.116	11,54 %
SR-1	7.162.285	7.155	0,10 %	766.181	11,98 %
SR-2	7.086.055	-69.075	-0,97 %	689.951	10,79 %
SR-3	7.013.620	-141.510	-1,98 %	617.516	9,65 %
SD-1	7.129.168	-25.962	-0,36 %	733.064	11,46 %
SD-2	6.929.455	-225.675	-3,15 %	533.351	8,34 %
SD-3	6.717.982	-437.148	-6,11 %	321.878	5,03 %

Bezogen auf die benötigte Stellplatz-Fläche zum Startzeitpunkt der Simulation kommt es aufgrund der zunehmenden Anzahl an Fahrzeugen zu einem Anstieg je nach Szenario zwischen 5,03 – 12,16 %. Werden ausschließlich die neutralen Szenarien betrachtet, so ist bei steigender ODM-Durchdringung eine leichte Reduzierung der benötigten Stellplatz-Fläche zu verzeichnen, was ebenfalls eine positive Auswirkung von ODM auf die benötigte Stellplatz-Fläche im öffentlichen Raum des Untersuchungsgebietes kennzeichnet.

#### 4.4.6 Auswertung Emissions-Indikator: Luftschadstoff- und Treibhausgas-Emissionen

Die Emissionen werden, wie in Kapitel 2.3.2.3 beschrieben, in Form von Emissionsinventaren basierend auf den ermittelten Fahrleistungen im Modell berechnet. Als Datengrundlage dient die Version 3.3 der HBEFA, welche es ermöglicht, Emissionsfaktoren für den urbanen Raum bis zum Jahr 2030 unter Berücksichtigung des Fahrzeugbestandes und entsprechender Fahrleistungen abzubilden. Weiterhin wurde der, sich über den zeitlichen Verlauf der Simulation än-

dernde, Anteil von elektrifizierten Fahrzeugen bei der Berechnung der Emissionsinventare berücksichtigt. Im Folgenden werden die Simulationsergebnisse zu den CO<sub>2</sub> Treibhausgas-Emissionen sowie den PM und NO<sub>x</sub> Luftschadstoffemissionen dargestellt.

### CO<sub>2</sub> Emissionen

Wie in Abbildung 66 dargestellt, kommt es in allen untersuchten Szenarien trotz eines Anstiegs der Gesamt-Fahrzeugkilometer (vgl. Abbildung 58, ausgenommen Szenario SD-3) zu einer signifikanten Reduktion der CO<sub>2</sub> Emissionen über den zeitlichen Verlauf der Simulation hinweg.

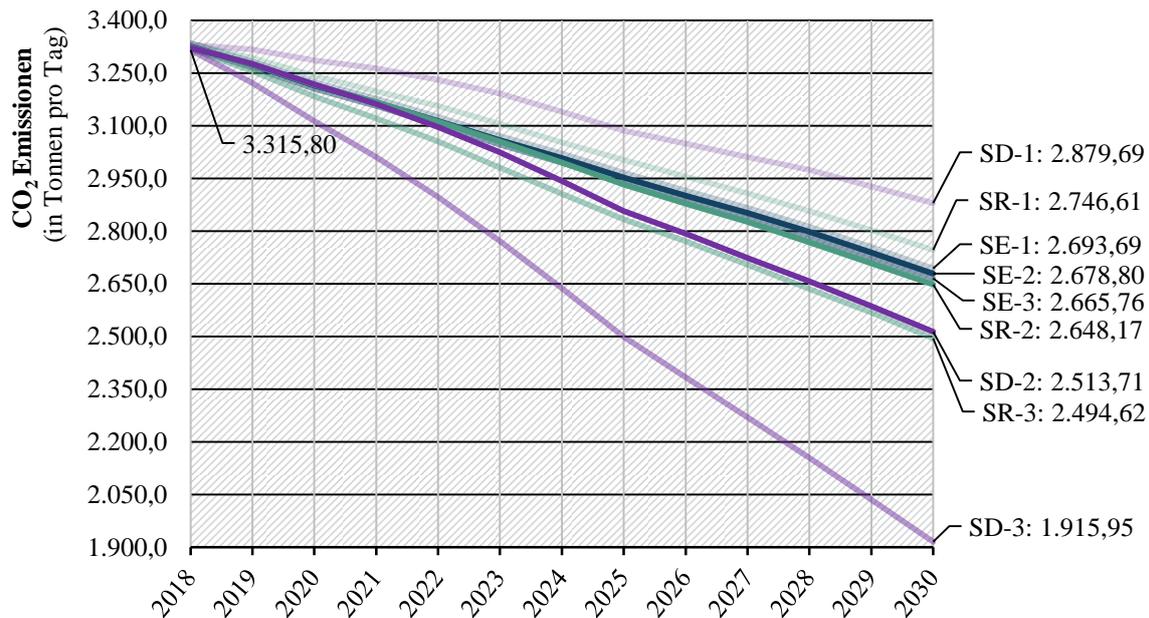


Abbildung 66: Simulationsergebnisse CO<sub>2</sub> Emissionen (eigene Darstellung)

Deutlich zu erkennen ist weiterhin eine zunehmende Varianz über den zeitlichen Verlauf. Für eine bessere Einordnung der Simulationsergebnisse dient die nachfolgende Tabelle 30.

Tabelle 30: Simulationsergebnisse CO<sub>2</sub> Emissionen (eigene Darstellung)

Szenario	CO <sub>2</sub> Emissionen	Differenz zu	Differenz zu	Differenz zu	Differenz zu
	2030	SE-2	SE-2	2018	2018
	(in Tonnen CO <sub>2</sub> )	(in Tonnen CO <sub>2</sub> )	(in %)	(in Tonnen CO <sub>2</sub> )	(in %)
SE-1	2.693,69	14,890	0,56 %	-622,11	-18,76 %
SE-2	2.678,80	0,000	0,00 %	-637,00	-19,21 %
SE-3	2.665,76	-13,040	-0,49 %	-650,04	-19,60 %
SR-1	2.746,61	67,810	2,53 %	-569,19	-17,17 %
SR-2	2.648,17	-30,630	-1,14 %	-667,63	-20,13 %
SR-3	2.494,62	-184,180	-6,88 %	-821,18	-24,77 %
SD-1	2.879,69	200,890	7,50 %	-436,11	-13,15 %
SD-2	2.513,71	-165,090	-6,16 %	-802,09	-24,19 %
SD-3	1.915,95	-762,850	-28,48 %	-1.399,85	-42,22 %

Die im Modell berechneten CO<sub>2</sub> Emissionen können im Vergleich zum Startwert der Simulation über den zeitlichen Verlauf hinweg zwischen 13,15 – 42,22 % reduziert werden. Innerhalb der unterschiedlichen Szenarien kommt es dabei zur größten Varianz bei den *Disruptions*-Szenarien. Bei einer reinen Betrachtung der neutralen Szenarien ist bei einer steigenden Durchdringung von ODM eine Reduktion der ausgestoßenen CO<sub>2</sub> Emissionen erkennbar. Daraus lässt

sich schlussfolgern, dass ODM eine positive Auswirkung auf die CO<sub>2</sub> Emissionen im Untersuchungsgebiet besitzt.

### NO<sub>x</sub> Emissionen

Wie in Abbildung 67 dargestellt, kommt es in allen untersuchten Szenarien zu einer deutlichen Reduktion der NO<sub>x</sub> Emissionen. Im Vergleich zum Startzeitpunkt der Simulation reduziert sich der Ausstoß an NO<sub>x</sub> über den zeitlichen Verlauf je nach Szenario zwischen 67,56 – 77,75 %.

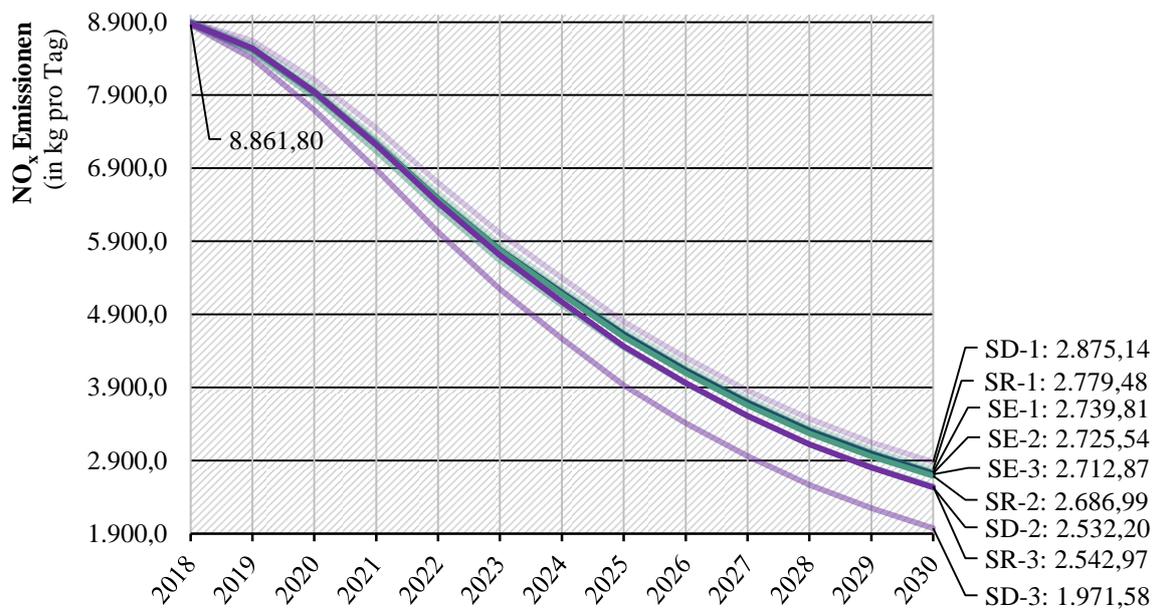


Abbildung 67: Simulationsergebnisse NO<sub>x</sub> Emissionen (eigene Darstellung)

Die vergleichsweise geringe Varianz der unterschiedlichen Simulationsergebnisse impliziert, dass die Auswirkungen von ODM-Angeboten verhältnismäßig gering ausfallen. Wie in der Tabelle 31 dargestellt, lässt sich bei der Betrachtung unterschiedlicher ODM-Szenarien zwar bei steigender ODM-Durchdringung eine geringe Zunahme der Reduktion von NO<sub>x</sub> Emissionen erkennen, bezogen auf die insgesamt ausgestoßene Menge an NO<sub>x</sub> ist dieser Anteil jedoch nur sehr gering.

Tabelle 31: Simulationsergebnisse NO<sub>x</sub> Emissionen (eigene Darstellung)

Szenario	NO <sub>x</sub> Emissionen 2030 (in kg NO <sub>x</sub> )	Differenz zu SE-2 (in kg NO <sub>x</sub> )	Differenz zu SE-2 (in %)	Differenz zu 2018 (in kg NO <sub>x</sub> )	Differenz zu 2018 (in %)
SE-1	2.739,81	14,270	0,52 %	-6121,99	-69,08 %
SE-2	2.725,54	0,000	0,00 %	-6136,26	-69,24 %
SE-3	2.712,87	-12,670	-0,46 %	-6148,93	-69,39 %
SR-1	2.779,48	53,940	1,98 %	-6082,32	-68,64 %
SR-2	2.686,99	-38,550	-1,41 %	-6174,81	-69,68 %
SR-3	2.542,97	-182,570	-6,70 %	-6318,83	-71,30 %
SD-1	2.875,14	149,600	5,49 %	-5986,66	-67,56 %
SD-2	2.532,20	-193,340	-7,09 %	-6329,60	-71,43 %
SD-3	1.971,58	-753,960	-27,66 %	-6890,22	-77,75 %

### PM Emissionen

Wie in Abbildung 68 dargestellt, kommt es auch bei der Betrachtung der PM Emissionen in allen untersuchten Szenarien zu einer deutlichen Reduktion der ausgestoßenen PM Emissionen. Den Simulationsergebnissen zufolge ist eine Reduktion zwischen 36,89 – 57,89 % im Vergleich zum Startwert im Jahr 2018 zu erwarten.

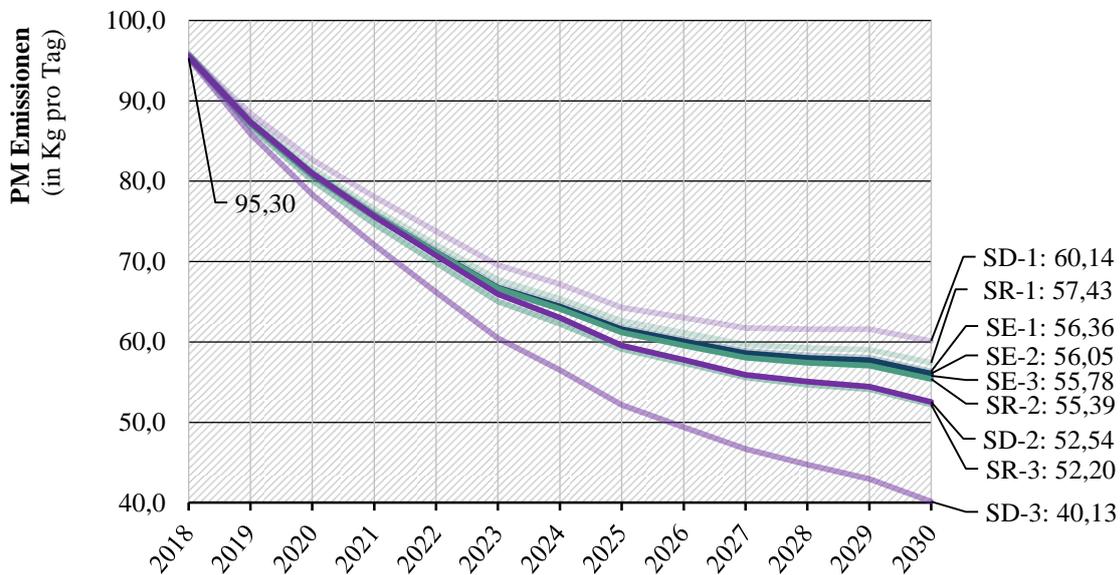


Abbildung 68: Simulationsergebnisse PM Emissionen (eigene Darstellung)

Während die Simulationsergebnisse der *Evolutions*-Szenarien auch im Jahr 2030 sehr nah bei einander liegen, steigt mit zunehmender ODM-Durchdringung auch die Varianz erkennbar an. Die stärkste Streuung ist dabei zwischen den *Disruptions*-Szenarien SD-1 und SD-3 zu verzeichnen.

Tabelle 32: Simulationsergebnisse PM Emissionen (eigene Darstellung)

Szenario	PM Emissionen	Differenz zu	Differenz zu	Differenz zu	Differenz zu
	2030	SE-2	SE-2	2018	2018
	(in kg PM)	(in kg PM)	(in %)	(in kg PM)	(in %)
SE-1	56,36	0,310	0,55 %	-38,94	-40,86 %
SE-2	56,05	0,000	0,00 %	-39,25	-41,19 %
SE-3	55,78	-0,270	-0,48 %	-39,52	-41,47 %
SR-1	57,43	1,380	2,46 %	-37,87	-39,74 %
SR-2	55,39	-0,660	-1,18 %	-39,91	-41,88 %
SR-3	52,20	-3,850	-6,87 %	-43,10	-45,23 %
SD-1	60,14	4,090	7,30 %	-35,16	-36,89 %
SD-2	52,54	-3,510	-6,26 %	-42,76	-44,87 %
SD-3	40,13	-15,920	-28,40 %	-55,17	-57,89 %

Bei ausschließlicher Betrachtung der neutralen Szenarien ist analog zu den CO<sub>2</sub>- und NO<sub>x</sub> Emissionen bei zunehmender ODM-Durchdringung eine steigende Reduktion der PM Emissionen zu verzeichnen. Dies lässt eine positive Auswirkung von ODM auf die ausgestoßenen PM Emissionen im Untersuchungsgebiet schlussfolgern.

---

#### 4.5 Validierung des Modells

Der Literatur zufolge ist eine umfassende Validierung eines SD Modells schlicht nicht möglich (vgl. Forrester, 1961). John Sterman, einer der bekanntesten Wissenschaftler auf dem Gebiet von ST und SD, beschreibt in seinem Buch:

» *Many modelers speak of model “validation” or claim to have “verified” a model. In fact, validation and verification of models is impossible.* « (vgl. Sterman, 2000, S. 846)

Weiterhin zitiert er Greenberger et al. (1976), welche ihre Ansichten zur Validierung von SD Modellen wie folgt beschreiben:

» *No model has ever been or ever will be thoroughly validated. . . “Useful,” “illuminating”, “convincing,” or “inspiring confidence” are more apt descriptors applying to models than “valid.”* « (vgl. Greenberger, 1976, S. 70-71)

Wozu dient also überhaupt dieses Kapitel? Der Nutzen eines Modells besteht in seiner Anwendung für einen konkreten Zweck. Sterman zufolge findet ein Modell dann seine berechnete Anwendung, wenn es die Problemstellung, für welche es geschaffen wurde, ausreichend gut beschreibt und somit für den Nutzer einen Vorteil gegenüber anderen Methoden und Modellen bietet (vgl. Sterman, 2000).

In diesem Zusammenhang besteht der Mehrwert des in dieser Arbeit geschaffenen Modells insbesondere in dem ganzheitlichen, systemischen Ansatz der zugrunde liegenden Problemstellung und dem Erkennen systemrelevanter Rückkopplungssysteme, sowie ihren Stellhebeln. Für die quantitative Ergebnisberechnung des in Kapitel 4.2.3 vorgestellten SFD Modells besteht neben allen existierenden Limitationen und methodischen Einschränkungen natürlich der Anspruch, möglichst fundierte Simulationsergebnisse durch die Szenarien zu berechnen.

Die Genauigkeit der Simulationsergebnisse hängt dabei im Wesentlichen von zwei Faktoren ab. Auf der einen Seite handelt es sich bei einem Modell um eine Annäherung an die Realität, wodurch es bereits bei der Modellentwicklung und -konzeption notwendig ist, die dominanten Kausalitäten der vorliegenden Problemstellung zu berücksichtigen und weniger signifikante Effekte entsprechend in der Modellstruktur zu vernachlässigen (vgl. Hürlimann, 2009). Weiterhin kann die zugrunde liegende Methode des Modells entsprechende Limitationen beinhalten, welche ein möglichst genaues Abbild der Realität begrenzen. Auf der anderen Seite stellen die Verfügbarkeit und die Güte einer geeigneten quantitativen Datengrundlage ein erforderliches Kriterium eines möglichst robusten Modells dar (vgl. Pruyt, 2013). Für das vorliegende Modell wird davon ausgegangen, dass der Modellfehler im Vergleich zu der Ungenauigkeit durch fehlerhafte Eingabegrößen verhältnismäßig gering ist. In den Natur- und Ingenieurwissenschaften findet in diesem Zusammenhang das Lineare- sowie das Gauß'sche Fehlerfort-

pflanzungsgesetz häufig Anwendung, um die Ungenauigkeit der Simulationsergebnisse aufgrund fehlerhafter Eingabedaten zu bestimmen (vgl. Papula, 2000). Da es sich bei den Eingabedaten des vorliegenden Modells jedoch nicht um Messgrößen mit einer eindeutig quantifizierten Fehlervariation handelt, sondern ein großer Teil der Eingabedaten auf der Basis von Experteneinschätzungen und plausibel getroffenen Annahmen beruht, ist eine Fehlerabschätzung nach dem Linearen- oder dem Gauß'schen Fehlerfortpflanzungsgesetz an dieser Stelle nicht umsetzbar.

Aufgrund der hohen Unsicherheit bei der Berechnung der Simulationsergebnisse ist es mit dem vorliegenden Modell nicht möglich, eine valide quantitative Vorhersage zu treffen. Vielmehr ermöglicht das Modell die Untersuchung konkreter (qualitativer) Fragestellungen und die Abschätzung der zeitlichen Entwicklung. Aus diesem Grund wurde, wie in Kapitel 4.3 dargestellt, eine Szenario-basierte Vorgehensweise ausgewählt, welche es zulässt, entscheidende Eingabegrößen zu variieren und sowohl mögliche positive als auch negative Entwicklungen im zeitlichen Verlauf zu berücksichtigen. Die Variation entscheidender Modellparameter in den entsprechenden Unter-Szenarien hat gezeigt, dass die Simulationsergebnisse nicht um mehrere Größenordnungen auseinander liegen (vgl. Kapitel 4.4.3 – 4.4.5). Daraus kann geschlussfolgert werden, dass durch das vorliegende Modell keine fehlerbehafteten Abweichungen um mehrere Größenordnungen produziert werden (vgl. Kapitel 4.5.4).

Für ein besseres Verständnis der methodischen Vorgehensweise zur Validierung und Plausibilisierung der Simulationsergebnisse wird in den folgenden Unterkapiteln zunächst intensiv auf die bestehenden Limitationen bei der methodischen Entwicklung und Konzeption einer SD Modellstruktur eingegangen. Weiterhin werden bei der Modellierung komplexitäts-reduzierende Entscheidungen und die quantitative Datengrundlage des Modells kritisch diskutiert (vgl. Kapitel 4.5.1), die gängigen Methoden zur Validierung von SD Modellen in der Wissenschaft aufgezeigt (vgl. Kapitel 4.5.2) und ihre Anwendung konkret in Bezug auf die Struktur des vorliegenden Modells erläutert (vgl. Kapitel 4.5.3). Abschließend wird die Anwendung gängiger Methoden zur Plausibilisierung des Modellverhaltens (vgl. Kapitel 4.5.4), wie beispielsweise die Durchführung eines Expertenworkshops, beschrieben.

#### 4.5.1 Limitationen des System Dynamics Stock-and-Flow Modells

Wie bereits in Kapitel 4.2.3.1 beschrieben, kommt es bei der Anwendung von SFD Modellen neben Limitationen der Datenverfügbarkeit und -güte auch zu Beschränkungen, welche sich aus der Methode, sowie durch die eigentliche Modellstruktur ergeben. Im Folgenden werden in diesem Zusammenhang alle bedeutungsvollen Limitationen der angewandten Methode sowie des konkret vorliegenden Modells und der quantitativen Datengrundlage aufgeführt.

---

### *Generelle methodische Limitationen bei der Anwendung von System Dynamics Modellen*

Neben vielen methodischen Vorteilen, wie der Möglichkeit zur Simulation des Systemverhaltens über einen zeitlichen Verlauf unter der Berücksichtigung möglicher Rückkopplungssysteme, bringt die Anwendung von SD Modellen auch einige Limitationen mit sich.

Eine wesentliche Limitation besteht bereits in dem strukturellen Ansatz, durch ein SD Modell eine Annäherung der Realität abbilden zu wollen. Dabei stellen die festgelegten Systemgrenzen eine komplexitäts-reduzierende Vereinfachung dar, welche von der Realität abweicht (vgl. Sterman, 2000). Weiterhin werden bei der Modellierung in der Regel nur dominante Kausalitäten endogen berücksichtigt, welche eine signifikante Auswirkung auf das Systemverhalten mit sich bringen (vgl. Pruyt, 2013). Häufig werden in diesem Zusammenhang Variablen, welche gegebenenfalls in der Realität im zeitlichen Verlauf einer Schwankung unterliegen, in Form einer exogen festgelegten Konstante modelliert. Zwei mögliche Beispiele aus dem hier vorliegenden SD Modell stellen eine als konstant angenommene Auslastung des ÖPNV's oder die Unterstellung einer konstanten Mobilitätsnachfrage pro Person im zeitlichen Verlauf der Simulation dar. Die Systemelemente werden über den gesamten Simulationsverlauf als konstant angenommen, obwohl diese in einem realen System regelmäßigen Schwankungen unterliegen.

Ein elementarer Unterschied im Vergleich zu herkömmlichen Modellierungs-Ansätzen im Bereich Mobilität und Transport ist die fehlende räumliche Komponente bei der Anwendung. Klassische SD Modelle haben keine räumliche Differenzierung und beziehen sich demnach auf ein aggregiertes Gebiet, in dem entsprechende Durchschnitts-Werte (wie beispielsweise Bevölkerungsdichte, Wegelänge, Fahrzeugbesitzquote) unterstellt werden, welche sich entsprechend nur durch die Wechselwirkung zu anderen Systemelementen im zeitlichen Verlauf der Modellierung verändern können.

Eine klare Limitation, die sich aus dieser Eigenschaft für die hier angewandte Problemstellung ergibt, ist die fehlende Möglichkeit verkehrliche Auswirkungen, wie Verkehrsüberlastungen oder auch erhöhte Luft-Emissionswerte, räumlich differenziert zu betrachten. In diesem Zusammenhang wirken sich beispielsweise die im Modell berechneten Fahrzeugkilometer auch dann negativ auf den Verkehr aus, wenn sie in einem Agenten-basierten- oder makroskopischen Modellierungsansatz aufgrund ihrer räumlichen Differenzierung nicht zu einer negativen Auswirkung beigetragen hätten. In der Praxis existieren bereits vereinzelte Software-Lösungen, wie *Anylogic*, oder *Spatial Modeling Environment (SME)* bei denen klassische SD Modelle um eine räumliche Komponente erweitert werden können (vgl. Voinov, 2008).

Neben den genannten strukturellen Limitationen und Vereinfachungen eines SD Modells stellt die Modellierung zeitlich wirkender Verzögerungseffekte eine große Herausforderung dar. In der Regel werden gewünschte Verzögerungs-Effekte in einem SD Modell durch eine starre

mathematische Funktion modelliert, welche für den Verlauf der Simulation als konstant unterstellt wird. Dies stellt ebenfalls eine starke Vereinfachung der Modellstruktur im Vergleich zur Realität dar und kann eine limitierende Wirkung auf die Aussagekraft und Robustheit des Modells mit sich bringen.

#### *Limitationen der zugrunde liegenden System Dynamics Modellstruktur*

Bei der Konzeption und Entwicklung des in dieser Arbeit vorliegenden SD Modells mussten komplexitäts-reduzierende Entscheidungen getroffen werden, um die Größe und Komplexität des Modells in einem sinnvollen Rahmen zu halten. Folgende vereinfachende Annahmen wurden demnach bei der Modellierung getroffen:

- Keine Berücksichtigung des in das Untersuchungsgebiet einpendelnden Verkehrs
- Keine Berücksichtigung von Durchgangsverkehr
- Keine Berücksichtigung des Lieferverkehrs
- Keine Berücksichtigung von Tourismus- und Geschäftsreisen
- Keine Berücksichtigung von Wetterschwankungen oder Jahreszeiten
- Modellierung ausschließlich eines durchschnittlichen Wochentages, keine Berücksichtigung unterschiedlicher Wochentage oder Wochenendtage im zeitlichen Verlauf
- Keine Berücksichtigung einer zeitlich schwankenden Nachfrage-Verteilung unterschiedlicher ODM-Angebotsformen
- Keine Berücksichtigung von zusätzlich induzierten Wegen/ induziertem Verkehr durch die Steigerung von ODM-Angeboten
- Keine Berücksichtigung möglicher Konkurrenzsituationen innerhalb unterschiedlicher ODM-Anbieter

Die unterstellten Annahmen resultieren im Vergleich zu einem realen System in einer vereinfachenden Modellstruktur und führen demnach zu einer Limitation der Robustheit und Aussagefähigkeit des Modells. So entsprechen beispielsweise die im Modell berechneten, verkehrlichen Auswirkungen ohne der Berücksichtigung von Pendlerverkehr, Lieferverkehr oder auch Business- und Tourismusreisen einer stark vereinfachten Darstellung der realen Wirkzusammenhänge.

Eine weitere komplexitäts-reduzierende Vereinfachung der Modellstruktur, liegt in der gebündelten Modellierung einer Attraktivität für alle im Modell betrachteten ODM Angebotsformen (vgl. Abbildung 40). Insbesondere bei unterschiedlich wirkenden Rückkopplungseffekten, wie beispielsweise der Auswirkung von benötigter Stellplatz-Fläche auf die Attraktivität von ODM, kommt es im Modell aufgrund seiner Modellstruktur zu Schwierigkeiten bei der Abbildung des realen Systems.

Weiterhin führt eine fehlende differenzierte Betrachtung unterschiedlicher Nachfrage-Verteilungen der ODM-Angebotsformen und des MIV's zu einer tendenziellen Überbewertung der verkehrlichen Auswirkungen durch ODM. Wie in der Abbildung 69 dargestellt, variiert die Nutzung der ODM-Angebotsform Free-Floating Car Sharing im Vergleich zum MIV in München über einen durchschnittlichen Tagesverlauf signifikant. Zum Zeitpunkt der Untersuchung werden Free-Floating Car Sharing Angebote überwiegend am späten Nachmittag, Abend oder auch während der Nachtstunden genutzt<sup>41</sup>, wohingegen sich der Tagesverlauf für die Nutzung des MIV's eindeutig an den Stoßzeiten des klassischen Berufsverkehrs orientiert<sup>42</sup>.

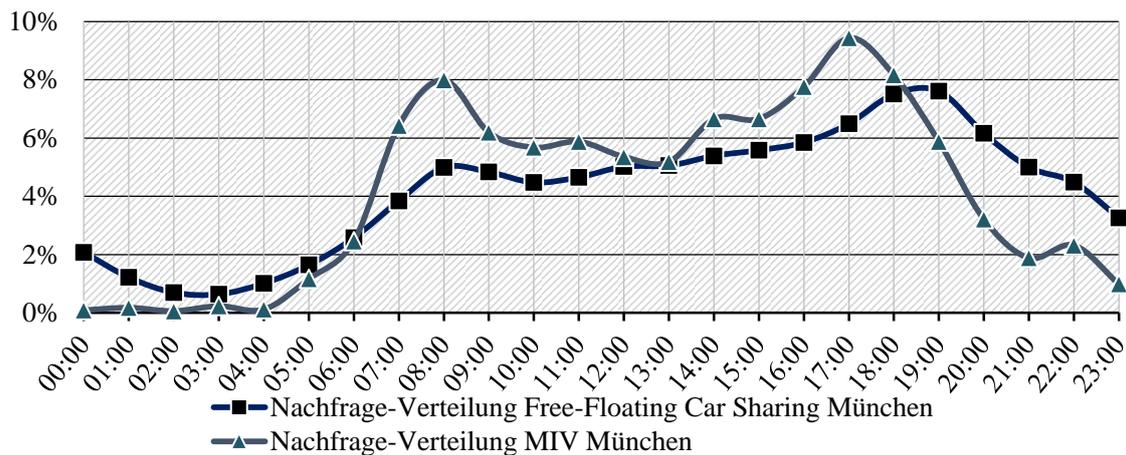


Abbildung 69: Zeitlich-schwankende Nachfrage-Verteilungen (eigene Darstellung, in Anlehnung an Follmer & Belz, 2018)

Mit einer zunehmenden Durchdringung von ODM-Angeboten ist Expertenmeinungen zufolge eine Verlagerung der Nachfrage-Verteilungen in Richtung der MIV-Verteilung zwar durchaus denkbar, zum aktuellen Zeitpunkt sind aber wie in Abbildung 69 dargestellt eindeutige Unterschiede in der Nachfrage-Verteilung erkennbar, welche keine Berücksichtigung in der Modellstruktur finden.

Eine weitere Herausforderung der vorliegenden SD Modellstruktur ist die Einbeziehung und Quantifizierung qualitativ geprägter Systemelemente, wie im vorliegenden Modell beispielsweise die Attraktivität eines Verkehrsmittels. Eine Quantifizierung eines qualitativen Systemelements durch eine mathematische Differenz- oder Differentialgleichung stellt vor dem Hintergrund einer fehlenden Kalibrierung eine große Herausforderung dar, welche maßgebliche Auswirkungen auf die Robustheit und Aussagefähigkeit des Modells haben und das Modell somit limitieren kann.

<sup>41</sup> Auf Basis: DriveNow Datensatzes im Geschäftsgebiet München 2017

<sup>42</sup> Auf Basis: Startzeitpunkt der Wege, MID (2017) Vertiefungsdatensatz der Stadt München

Eine weitere Vereinfachung des Modells im Vergleich zur Realität liegt in der Modellierung von Wettbewerbssituationen unterschiedlicher ODM-Angebote. Das vorliegende Modell berechnet die Anzahl der Flottenfahrzeuge basierend auf einer durchschnittlichen Fahrzeugauslastung, ohne dabei eine Konkurrenzsituation unterschiedlicher Anbieter in Betracht zu ziehen. Insbesondere für die ODM-Angebotsform Ride Pooling stellt eine mögliche Konkurrenzsituation zwischen unterschiedlichen Anbietern, eine starke Limitierung der Möglichkeiten zum erfolgreichen Pooling unterschiedlicher Fahrtanfragen dar, weil die Pooling-Wahrscheinlichkeit stark von der Nachfragedichte abhängt (vgl. Bilali et al., 2019b).

#### *Limitationen der quantitativen Datengrundlage*

Die Verfügbarkeit und die Güte einer angemessenen Datengrundlage stellt bei der quantitativen Modellierung eines SD Modells neben der klaren Abgrenzung einer geeigneten Problemstellung und einer hierfür zutreffenden Modellstruktur ein essentielles Kriterium dar (vgl. Pruyt, 2013). Für das vorliegende Modell wurden, wie in Kapitel 4.2.3.1 erläutert, unterschiedliche Datensätze für die weitere Verarbeitung entsprechend aufbereitet und als Eingabegrößen in Form von Konstanten oder zeitlich abhängigen Variablen in das Modell importiert.

Als Grundlage für das Mobilitätsverhalten in München dient in diesem Zusammenhang der Vertiefungsdatensatz der Stadt München aus der aktuellen Haushaltsbefragung der Mobilität in Deutschland (Follmer & Belz, 2018). Der Datensatz beschreibt das Mobilitätsverhalten der Münchner Bevölkerung und bietet auf Basis der Größe der Stichprobe repräsentative Informationen. Da der Datensatz auch Wege berücksichtigt, welche in München gestartet werden, aber außerhalb der Stadt enden, kann nicht davon ausgegangen werden, dass alle aufgeführten Wege vollständig im Untersuchungsgebiet durchgeführt werden. Weiterhin sind im Datensatz keine Wege enthalten, welche außerhalb des Untersuchungsgebietes starten und in der Stadt München enden, wodurch keine Aussage über die insgesamt im Untersuchungsgebiet realisierten Wege getroffen werden kann.

Der Datensatz aus dem Online-Tool *Roadway-Analytics* der Firma INRIX bietet für das Modell die Grundlage für die Berechnung einer durchschnittlichen Geschwindigkeit im Straßenverkehr. Der im Online-Tool hinterlegte Datensatz beinhaltet auf der Basis von Navigationssystemdaten exakte Geschwindigkeitsverläufe aller im Stadtgebiet befindlichen Straßen über einen definierten zeitlichen Verlauf. Dabei werden alle im Straßenverkehr tatsächlich stattgefundenen Fahrten berücksichtigt, auch wenn diese, wie beispielsweise der Pendler- oder Lieferverkehr, in der Modellbetrachtung nicht weiter berücksichtigt werden.

Die für die Berechnung der Emissionsinventare herangezogenen Emissionsfaktoren aus der HBEFA berücksichtigen eine Verbesserung der traditionellen Motoren- und Abgastechnologie in den Fahrzeugen im zeitlichen Verlauf der Simulation, betrachten aber keine zunehmende

---

Durchdringung von elektrisch betriebenen Fahrzeugen (BEV, PHEV), wie sie im Modellverlauf in den Szenarien unterstellt werden.

Die drei aufgeführten Beispiele zu den Dateninputs des Modells zeigen eindeutig auf, dass es bei der SD Modellierung eines komplexen Sachverhaltes eine große Herausforderung darstellt, geeignete, verfügbare Daten entsprechend aufzubereiten und in das Modell zu importieren, welche eine aufeinander abgestimmte Bezugsgröße aufweisen und ohne entsprechende Einschränkungen ihre Anwendung finden können.

Die in diesem Kapitel aufgezeigten strukturellen Vereinfachungen und Limitationen verdeutlichen, dass es sich bei einem SD Modell immer um eine Annäherung an die Realität handelt. Da es sich bei den Simulationsergebnissen um eine Zukunfts-Prognose einer (potentiellen) technologischen Marktdurchdringung handelt, welche in teils disruptiven Szenarien untersucht wird, ist auch eine Kalibrierung des Gesamtmodells durch bereits vorhandene Modelle laut Expertenmeinungen<sup>43</sup> als solches nicht möglich (vgl. Sterman, 2002). Im Folgenden werden bestehende Methoden aus der Literatur zur Validierung und Plausibilisierung von SD Modellen aufgeführt und ihre Anwendung bei der Modellierung des vorliegenden Modells erläutert.

#### 4.5.2 Methoden zur Validierung und Plausibilisierung von System Dynamics Modellen

In der Fachliteratur existiert eine Vielzahl spezifisch entwickelter Test-Verfahren, um Fehler in der Modellstruktur zu erkennen und das Modellverhalten auf Plausibilität zu überprüfen. John Sterman äußerte in diesem Zusammenhang erneut Kritik an dem grundlegenden Verständnis zur Möglichkeit der Validierung eines SD Modells und legt den Fokus bei der Überprüfung eines Modells auf den Nutzen für den Anwender.

» *Unfortunately, testing is often designed to “prove” the model is “right,” an approach that makes learning difficult and ultimately erodes the utility of the model and the credibility of the modeler.* « (Sterman, 2000, S. 845-846)

Die folgende Abbildung 70 bietet einen Überblick über anerkannte Test-Verfahren aus der Wissenschaft zur Überprüfung der Modellstruktur sowie des Modellverhaltens. Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen SD Test-Verfahren ist unter anderem hier zu finden: Forrester, 1973; Forrester & Senge, 1980; Sterman, 2000; Barlas, 1989, 1990, 1996; Peterson & Eberlein, 1994; Schruben, 1980 und Balci, 1994.

---

<sup>43</sup> Vorstellung und Diskussion des SD Modells im Rahmen des internationalen System Dynamics Society Workshops der Special-Interest-Group für Transportation (SDS T-SIG) im April 2019 an der University of Leeds (UK) sowie im Rahmen der Internationalen System Dynamics Society Konferenz (ISDS) im August 2018 in Reykjavik (Island)

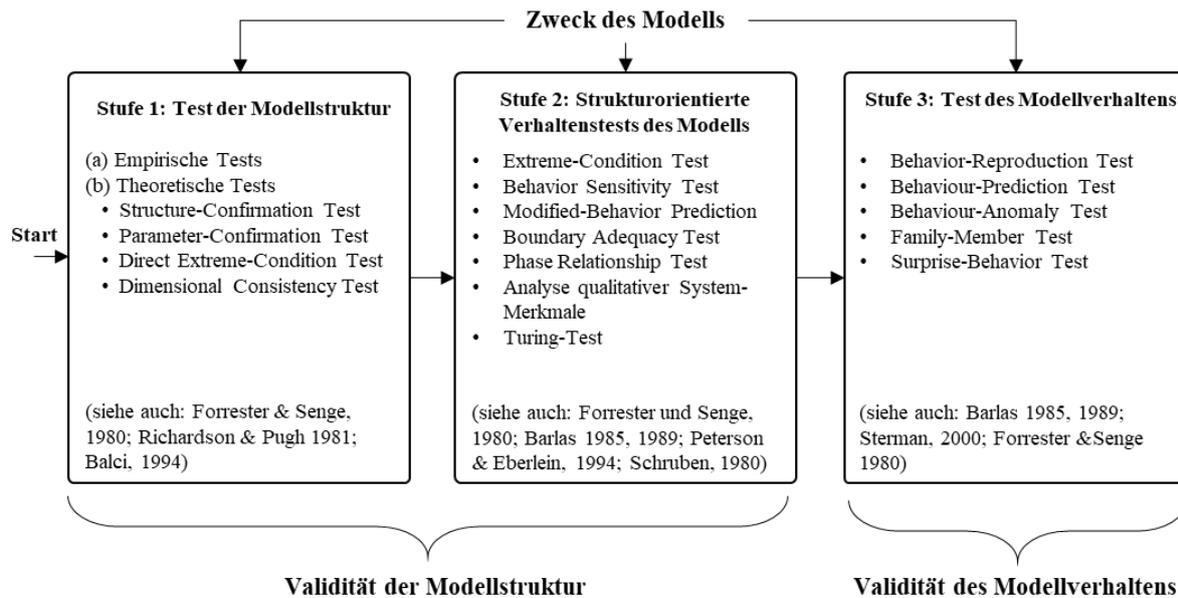


Abbildung 70: Überblick über traditionelle Test-Verfahren zur Validierung von SD Modellen (eigene Darstellung, in Anlehnung an Barlas, 1996)

Wie in der Abbildung 70 dargestellt, wird in der Fachliteratur zwischen der Validität der zugrunde liegenden Modellstruktur und dem Modellverhalten unterschieden. Die Reihenfolge der drei abgebildeten Validierungs-Stufen impliziert, dass eine Untersuchung der Validität des Modellverhaltens erst dann sinnvoll durchführbar ist, wenn durch entsprechend vorangestellte Test-Verfahren bereits ausreichend Vertrauen in der Modellstruktur vorliegt.

In der ersten Validierungs-Stufe erfolgt ausschließlich ein Test der Modellstruktur. Bei diesem Prozess wird jede modellierte Kausalität durch einen direkten Vergleich mit dem verfügbaren Wissen über das reale System untersucht (vgl. Barlas, 1996). Diese Form der Modellvalidierung erfolgt ohne die eigentliche Simulation bzw. Betrachtung des Modellverhaltens. Grundsätzlich lassen sich Tests der Modellstruktur in empirische und theoretische Tests unterscheiden. Während empirische Strukturtests die Modellstruktur mit Informationen (quantitativ oder qualitativ) vergleichen, die direkt aus dem zu modellierenden, realen System gewonnen werden, basieren theoretische Strukturtests auf vorhandenem, verallgemeinertem Wissen über das System aus der Literatur (vgl. Barlas, 1996).

Nach erfolgreichem Test der Modellstruktur erfolgen nach Barlas (1996) in der zweiten Validierungs-Stufe strukturorientierte Verhaltenstests des Modells. Diese dienen ebenfalls zur Validierung der Modellstruktur, basieren aber auf Simulationen und können sowohl auf das gesamte Modell als auch auf isolierte Teilmodelle angewendet werden. Es handelt sich demnach um „starke“ Verhaltenstests, die dem Modellierenden helfen können, strukturelle Fehler im Modell aufzudecken (vgl. Barlas, 1996).

In der dritten Validierungs-Stufe erfolgen nach ausreichender Überprüfung der Robustheit der Modellstruktur entsprechende Tests zum eigentlichen Modellverhalten. Diese Tests dienen der Untersuchung, wie genau das Modell die wichtigsten Verhaltensmuster des realen Systems reproduzieren kann (vgl. Barlas, 1996). Für diese Form der Plausibilisierung des Modellverhaltens wird es als hilfreich angesehen, inhaltliche Fachexperten in den Prozess einzubinden und das Modellverhalten mit den entsprechenden Simulationsverläufen zu diskutieren (vgl. Sterman, 2000). Weiterhin ist es wichtig festzuhalten, dass alle drei Stufen der Modellvalidierung in Abhängigkeit des eigentlichen Zwecks des Modells betrachtet werden müssen. Aus diesem Grund ist es zwingend erforderlich, bereits vor Beginn der Modellkonzeption und –entwicklung den Zweck des Modells und die zugrunde liegende Problemstellung eindeutig abzugrenzen und festzulegen.

Die drei Stufen der Modellvalidierung sind nicht als linearer Prozess zu verstehen. Vielmehr gestaltet sich der Validierungsprozess in der Realität als ein stark iterativer Prozess mit zahlreichen Schleifen und Modellrevisionen, bei dem bereits kleinste Veränderungen an der Modellstruktur regelmäßig überprüft werden. Wie in der Abbildung 71 zu sehen ist, ist es erst sinnvoll die nächste Validierungs-Stufe zu beginnen, wenn basierend auf dem Zweck des Modells ausreichend Vertrauen in dem aktuellen Validierungsschritt vorherrscht. Anderenfalls muss die Validierungs-Stufe entsprechend eines iterativen Prozesses wiederholt werden.

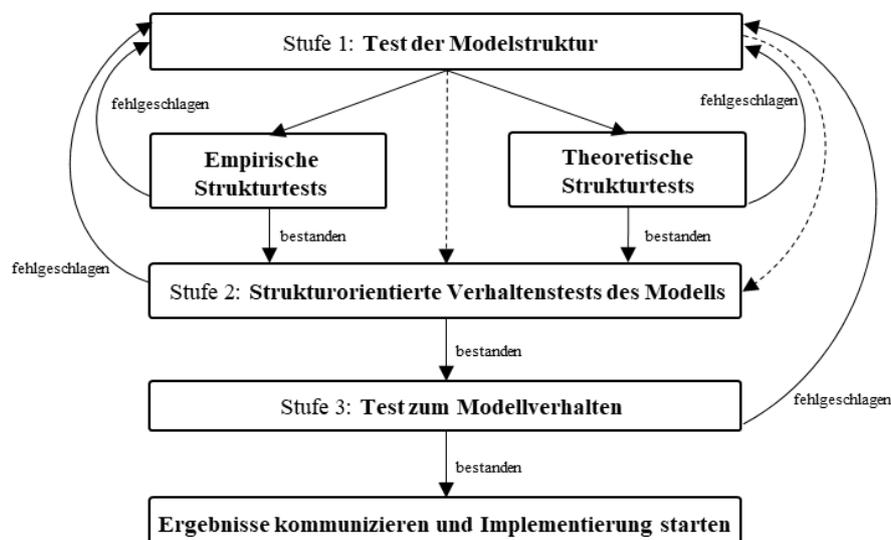


Abbildung 71: Iterativer Prozess der unterschiedlichen Validierungs-Stufen (eigene Darstellung, in Anlehnung an: Barlas, 1996)

Der hier beschriebene Validierungs-Prozess bietet eine Grundlage zum Vorgehen sowie zu hierfür anwendbaren Methoden bei der Überprüfung von SD Modellen. Ein Qualitätsstandard zur Validierung und Plausibilisierung von SD Modellen existiert jedoch nicht und wäre auch nicht zielführend, da der entsprechende Anspruch für jedes Modell durch seinen eigentlichen Zweck und die zugrunde liegende Problemstellung definiert wird. Eine Übersicht und Erläuterung der geläufigen Test-Verfahren für SD Modelle befindet sich im Anhang 12.

### 4.5.3 Überprüfung der Modellstruktur

Die Validierung und Plausibilisierung der in dieser Arbeit entstandenen SD Modellstruktur orientiert sich an den in Kapitel 4.5.2 beschriebenen, ersten zwei Validierungs-Stufen. Bereits vor Beginn des iterativen Modellierungsprozesses wurde, basierend auf der vorliegenden Problemstellung und Zielsetzung dieser Arbeit, SD als geeignete Methode ausgewählt, um in einem hierfür angemessenen, ganzheitlichen Modell konkrete Zukunfts-Szenarien und deren zeitliche Entwicklung quantitativ untersuchen zu können (vgl. Kapitel 1.4).

Wie ausführlich in Kapitel 4.2.2 beschrieben, basiert das quantitative SFD Modell auf einem qualitativen CLD, welches in einem schrittweisen Prozess entwickelt wurde. Hierbei wurden zunächst nur eine kleine Anzahl der bedeutendsten Systemelemente berücksichtigt und bereits kleinste Veränderungen regelmäßig überprüft. Die Auswahl der zugrunde liegenden Systemelemente und die daraus resultierende Systemgrenze wurden, wie in Kapitel 3 beschrieben, durch die Einbeziehung von Experten durchgeführt. Das ausgearbeitete CLD wurde weiterhin einer Vielzahl unterschiedlicher, iterativer Schleifen unterzogen und in diesem Zusammenhang bei wissenschaftlichen Kolloquien und Konferenzen sowie in bilateralen Gesprächen mit Fachkollegen und Wissenschaftlern aus dem Bereich ST und SD kontinuierlich diskutiert und verbessert.

Basierend auf einem robusten, für den Zweck der Untersuchung plausiblen, CLD startete der quantitative Modellierungsprozess zunächst analog zu dessen Erstellung mit einer stark reduzierten Anzahl ausgewählter Systemelemente. Während des fortlaufenden Modellierungsprozesses, welcher sich über mehrere Monate erstreckte, konnten Erweiterungen und Veränderungen an der Modellstruktur somit regelmäßig überprüft werden. In zahlreichen bilateralen Konsultationen mit fachverwandten (wissenschaftlichen) Kollegen wurden dabei die mathematischen Kausalitäten der quantitativen Modellstruktur kontrolliert und weiterentwickelt. Auch die zur Errichtung des komplexen Modells notwendigen Modellierungs-Kompetenzen konnten im Verlauf des Modellierungsprozesses durch die Teilnahme an einer einwöchigen SD Summer School, diversen internationalen Workshops und durch die Nutzung von online Modellierungs-Communities fortlaufend gesteigert werden.

Zusätzlich zu dem beschriebenen iterativen Modellentwicklungsprozess wurden konkrete Test-Verfahren zur Untersuchung der Modellstruktur ausgeführt, um die Robustheit zu überprüfen und die Einschränkungen des Modells besser zu verstehen. Eine Zusammenfassung der durchgeführten Test-Verfahren<sup>44</sup> zur Untersuchung der Modellstruktur bietet die Tabelle 33.

---

<sup>44</sup> Für eine ausführliche Beschreibung der Test-Verfahren siehe unter: Sterman, 2000; Barlas, 1996 oder Pruyt 2013

Tabelle 33: Überblick angewandter Test-Verfahren zur Validierung der Modellstruktur (eigene Darstellung, in Anlehnung an Serman, 2000 und Barlas, 1996)

<b>Test-Verfahren</b>	<b>Ziel des Test-Verfahrens</b>	<b>Konkrete Anwendung des Test-Verfahrens</b>
1. Boundary Adequacy	Test zur Sicherstellung angemessener Systemgrenzen des Modells - Kann die zugrunde liegende, relevante Problemstellung innerhalb der Systemgrenzen ausreichend beantwortet werden? - Ändert sich das Verhalten des Modells signifikant, wenn sich die Systemgrenze verändert?	- Test-Verfahren wurde während des Modellierungsprozesses regelmäßig wiederholt, um Zweck des Modells ausreichend abbilden zu können - Modifizierung des Modells, sodass es eine plausible Struktur aufweist
2. Structure Assessment	Test-Verfahren zur Sicherstellung, ob die Modellstruktur der Realität entspricht - Entspricht das Modell grundlegenden physikalischen Gesetzen wie z.B. den physikalischen Erhaltungssätzen?	- Regelmäßige Überprüfung der mathematischen Differenz- und Differentialgleichungen und empirischer sowie theoretischer Abgleich
3. Dimensional Consistency	Test-Verfahren zur Überprüfung der Einheiten in mathematischen Funktionen	- Überprüfung der Einheiten aller Systemelemente automatisch durch Modellierungs-Software
4. Face Validation	Test-Verfahren, welches durch den Einbezug von Experten die Modellstruktur und die zugrunde liegenden mathematischen Funktionen im Hinblick auf den beabsichtigten Zweck des Modells überprüft	- Regelmäßige Konsultationen mit fachverwandten (wissenschaftlichen) Kollegen zur Überprüfung der Modellstruktur
5. Extreme Conditions	Test-Verfahren ohne Modellsimulation zur Sicherstellung, ob die Strukturen und mathematischen Funktionen unter angenommenen extremen Bedingungen sinnvoll / plausibel sind Test-Verfahren auch durch Modellsimulation anwendbar: Reagiert das Modell plausibel, wenn es extremen Parameterschwankungen ausgesetzt ist?	- Untersuchung, ob jede Gleichung plausibel ist, auch wenn ihre Eingaben extreme Werte annehmen - Testen des Modellverhaltens auf die Extremwerte jeder Eingabe, allein und in Kombination - Ziehung von Rückschlüssen auf die Modellstruktur
6. Integration Error	Test-Verfahren zur Überprüfung der Abhängigkeit der Simulationsergebnisse nach der Wahl des Zeitintervalls sowie der numerischen Integrationsmethode	- Überprüfung des Modellverhaltens unter Variation des integrierten Zeitschritts sowie der Anwendung verschiedener Integrationsmethoden. - Keine Anpassungen erfolgt

Die Durchführung der einzelnen Test-Verfahren erfolgte zu einem großen Teil unmittelbar während des eigentlichen Modellierungsprozesses und führte somit zu einer ständigen Anpassung und Weiterentwicklung der Modellstruktur.

#### 4.5.4 Plausibilisierung des Modellverhaltens

Basierend auf einer, für den Zweck des Modells ausreichend robusten, Modellstruktur erfolgt in diesem Kapitel eine Beschreibung der Vorgehensweise zur Untersuchung des Modellverhaltens. Wie bereits in Kapitel 4.5.1 beschrieben, ist es methodisch nicht möglich, zeitliche Simulationsverläufe, denen teils disruptive Zukunfts-Annahmen unterstellt werden, anhand geeigneter Modelle oder Daten aus der Vergangenheit ganzheitlich zu validieren (vgl. Forrester, 1961 und Serman, 2000).

Um mit dem entwickelten Modell jedoch möglichst nachvollziehbare, stichhaltige Simulationsergebnisse zu erreichen, wurden unterschiedliche Methoden zur Sicherstellung eines plausiblen Modellverhaltens angewandt. Neben der Anwendung von konkreten Szenarien, Sensitivitäts-

analysen und speziellen Test-Verfahren aus der Literatur zur Untersuchung des Modellverhaltens wurden im Rahmen eines Plausibilisierungs-Workshops auch Experten in den Prozess eingebunden. Nachfolgend werden die Inhalte der aufgeführten Plausibilisierungs-Methoden überblicksartig aufgeführt.

#### *Anwendung der Szenario-Technik*

Um die starken Unsicherheiten der Eingabegrößen in den Simulationsverläufen sinnvoll berücksichtigen zu können, wurde die Szenario-Technik ausgewählt. Wie in Kapitel 4.3.1 aufgeführt, ermöglicht es die Anwendung der Szenario-Trichter Methode, positive und negative Extremszenarien einer zukünftigen Entwicklung abzubilden und dabei unterschiedliche Modellparameter (Entwicklungsfaktoren) entsprechend zu variieren. Auf Basis dieser Methode wurde das Modellverhalten für pessimistische, neutrale und optimistische Unter-Szenarien analysiert (vgl. Kapitel 4.3.2.1 – 4.3.2.3). Die zugrunde liegenden Annahmen basieren dabei überwiegend auf Experteneinschätzungen und werden zur Überprüfung der Plausibilität des Modellverhaltens transparent dargestellt (vgl. Anhang 11).

#### *Anwendung spezieller Test-Verfahren aus der Literatur*

Für eine möglichst umfassende Plausibilisierung des Modellverhaltens wurde analog zur Modellstruktur auf bestehende Test-Verfahren<sup>45</sup> aus der Literatur zurückgegriffen. Einen Überblick über hierbei angewandte Verfahren bietet die folgende Tabelle 34.

Tabelle 34: Überblick angewandter Test-Verfahren zur Validierung des Modellverhaltens (eigene Darstellung, in Anlehnung an Sterman, 2000 und Barlas, 1996)

<b>Test-Verfahren</b>	<b>Ziel des Test-Verfahrens</b>	<b>Konkrete Anwendung des Test-Verfahrens</b>
1. Extreme Conditions	Test-Verfahren zur Überprüfung des Modellverhaltens basierend auf der Eingabe von Extremwerten	- Untersuchung des Modellverhaltens unter der Eingabe extremer Werte - Anpassung ausgewählter Modell-Stellhebel, um Modell auf plausibles Verhalten zu limitieren
2. Behavior Reproduction	Reproduziert / erzeugt das Modell die verschiedenen Verhaltensweisen, die in einem realen System beobachtet werden?	- Untersuchung der qualitativen Repräsentanz des Verhaltens ausgewählter Modellelemente
3. Behavior Anomaly	Kommt es zu anomalem Verhalten, wenn Annahmen des Modells verändert werden?	- Untersuchung der Modellsimulationen auf unplausibles, anomales Verhalten
4. Family Member	Plausibilitäts-Check des Modellverhaltens mit fachfremden Personen	- Präsentation und Diskussion des Modellverhaltens mit fachfremden Personen
5. Surprise Behavior	Erzeugt das Modell bisher unbeobachtetes oder unerkanntes Verhalten? Kann das Modell die Reaktion des Systems auf neue Bedingungen erfolgreich vorhersehen?	- Intensive Dokumentation und Aufzeichnung der Modellsimulationsergebnisse - Dokumentation von mentalen Modellen vor Beginn der Modellierung

<sup>45</sup> Für eine ausführliche Beschreibung der Test-Verfahren siehe unter: Sterman, 2000; Barlas, 1996 oder Pruyt, 2013

---

### *Anwendung von Sensitivitätsanalysen*

Zur Untersuchung des Modellverhaltens eignet sich bei der Modellierung qualitativ geprägter Systemelemente insbesondere auch die Anwendung von Sensitivitätsanalysen. Für das vorliegende Modell wurden für Kausalitäten, bei denen die Stärke der Wirkrichtung aufgrund von qualitativen Eigenschaften nicht eindeutig quantifizierbar ist und die Auswirkungen auf das Modellverhalten in Form von Sensitivitätsanalysen untersucht. Untersuchungsbeispiele hierfür sind die Auswirkungen der im Modell endogen berechneten Durchschnitts-Geschwindigkeit auf die Attraktivität des MIV (Fahrer und Mitfahrer), sowie die Attraktivität zur Nutzung von ODM. Ebenfalls wurden Sensitivitäten zu den Auswirkungen der zur Verfügung stehenden Stellplatz-Fläche im öffentlichen Raum auf die Attraktivitäten des MIV und ODM untersucht. Basierend auf dem Ergebnis der durchgeführten Sensitivitätsanalysen wurden die untersuchten Kausalitäten in dem SD Modell so angepasst, dass das Gesamt-Modellverhalten auf Basis der bereits diskutierten Test-Verfahren einen möglichst plausiblen Verlauf angenommen hat. Darüber hinaus hat der Anwender des Modells die Möglichkeit, die modellierten Sensitivitäten der Auswirkungen durch entsprechend integrierte Schieberegler im SFD Modell vor jedem Simulationslauf anzupassen und daraus resultierende Veränderungen im Modellverhalten zu untersuchen.

### *Durchführung eines Expertenworkshops zur Plausibilisierung der Simulationsergebnisse*

Als vierte Methode zur Plausibilisierung des Modellverhaltens wurde ein Expertenworkshop mit unterschiedlichen Stakeholdern durchgeführt. Das Ziel des Workshops bestand darin, die Simulationsergebnisse einem Expertenpublikum zu präsentieren und anschließend intensiv zu diskutieren. Insbesondere durch die in der Diskussion aufkommenden Fragen der Experten sollte die Aussagekraft des Modellverhaltens und die zugrunde liegende Robustheit der Modellstruktur überprüft werden.

Der Verlauf des Workshops lässt sich vereinfachend in drei inhaltliche Teile untergliedern. Im ersten Präsentationsteil des Workshops wurde der Kontext der Arbeit vorgestellt, die konkret vorliegende Problemstellung erläutert und das Untersuchungsfeld abgegrenzt. Im Anschluss an diesen ersten Präsentationsteil wurden die Experten spontan nach ihren Einschätzungen zu den Auswirkungen von ODM-Angeboten auf die in dieser Arbeit festgelegten Nachhaltigkeits-Indikatoren befragt.

In einem zweiten Präsentationsteil wurde ausführlich auf das vorliegende SD Modell, die zugrunde liegende Methode (vgl. Kapitel 4.2.2 und 4.2.3) und die berechneten Simulationsergebnisse eingegangen. Ziel dieses zweiten Präsentationsteils war es, alle Experten vor Beginn der Diskussion auf den gleichen Wissensstand zu bringen, auch wenn einige der Experten bereits intensiv in den Prozess der Modellentwicklung und –konzeption involviert waren.

In dem anschließenden dritten Teil des halbtägigen Workshops konnten durch alle Teilnehmenden umfassende Fragen zu der Modellstruktur und dem Modellverhalten gestellt werden. Besonders intensiv wurden die Datenbasis der quantitativen Modellierung sowie die, den Szenarien zugrunde liegenden, Annahmen hinterfragt. Konkreter Überarbeitungsbedarf wurde durch die Experten bei den Modellannahmen zur Elektrifizierung des privaten Fahrzeugbestandes und der ODM-Fahrzeuge gesehen. Weiterhin konnten durch die Diskussion Meinungsverschiedenheiten zwischen den Experten bei der Berücksichtigung von CO<sub>2</sub> Emissionen durch elektrifizierte ODM-Fahrzeuge im Modell aufgedeckt werden. Bezüglich der Modellstruktur wurde (wie bereits in Kapitel 4.5.1 ausführlich beschrieben) kritisiert, dass dem SD Modell teils Datenquellen unterschiedlicher Bezugsgrößen zugrunde liegen. So basieren die Geschwindigkeitsdaten der Firma INRIX beispielsweise auf dem realen Gesamtverkehr im Untersuchungsgebiet, während der Datensatz zum Mobilitätsverhalten in München ausschließlich in München lebende Personen berücksichtigt.

Neben den aufgeführten Verbesserungsvorschlägen wurden das Modellverhalten und die zugrunde liegende Modellstruktur durch die vertretenen Experten als plausibel eingeordnet. Auch die aufgezeigten Simulationsergebnisse standen nicht im Widerspruch zu den spontan abgefragten Expertenmeinungen zu Beginn des Workshops. Abschließend konnte die Robustheit des Modellverhaltens durch eine Anpassung der im Workshop identifizierten Modellannahmen verbessert werden. Eine kritische Reflexion der angewandten Methode, bei der auch die Einbeziehung unterschiedlicher Experten diskutiert wird, erfolgt in Kapitel 6.

#### 4.6 Zusammenfassung und Zwischen-Fazit System-Modell

Im vorliegenden Kapitel wurde die zugrunde liegende Problemstellung dieser Arbeit durch die Anwendung der Methoden ST und SD systemisch untersucht. Nach einer Erläuterung der methodischen Grundlagen wurde zunächst der Modellbildungsprozess ausführlich beschrieben (vgl. Kapitel 4.2). Hierbei wurde intensiv sowohl auf die Erstellung des qualitativen CLD's als auch des quantitativen SFD's eingegangen. Für eine gezielte Analyse des Modellverhaltens hinsichtlich der zu untersuchenden Problemstellung wurden in Kapitel 4.3 geeignete Szenarien aufgestellt. Diese wurden in unterschiedlichen Simulationsläufen am Modell erforscht und im Kapitel 4.4 ausgewertet. Eine umfassende Validierung der Modellstruktur und Plausibilisierung der Ergebnisse erfolgte in Kapitel 4.5.

Der ausgewählte methodische Ansatz, die vorliegende Problemstellung durch die Entwicklung eines geeigneten System-Modells zu untersuchen, konnte sich im Verlauf der Untersuchung als geeignet herausstellen. In diesem Zusammenhang konnte durch die ganzheitliche, explorative Betrachtung ein systemisches Verständnis der zugrunde liegenden Strukturen erlangt werden. Auch, wenn die Modellierung eines realen Systems in der praktischen Umsetzung einige Limitationen in der Modellstruktur und im Modellverhalten mit sich bringt (vgl. Kapitel 4.5.3

---

und 5.4), kann das Modell durch ein geeignetes Aggregationsniveau und entsprechende Modellergebnisse für seine Nutzer einen zentralen Mehrwert gegenüber bestehenden Analyse- und Prognosemethoden bieten. Insbesondere die Möglichkeit, das Modellverhalten über einen zeitlichen Verlauf hinweg untersuchen zu können, stellt im Vergleich zu traditionellen Methoden für die zu erforschende Problemstellung einen wichtigen Mehrwert dar.

Neben der Erstellung des qualitativen CLD's, welches bereits entscheidende Erkenntnisse der Modellstruktur und ihren zugrunde liegenden Rückkopplungssystemen aufdeckt und somit bereits einen erheblichen Mehrwert bietet, wird die Erstellung des quantitativen SFD Modells, welches einen deutlich höheren Zeit- und Ressourcenaufwand erfordert, dennoch als sinnvoll für die Untersuchung der vorliegenden Problemstellung angesehen. Auch, wenn das quantitative Modell nur eine Annäherung eines realen Systems mit gewissen Unsicherheiten und Ungenauigkeiten darstellt bietet es die Möglichkeit zeitliche Dynamiken abzubilden und die Auswirkungen von Feedbackstrukturen auf das Systemverhalten abzuschätzen.

Eine wesentliche Herausforderung des Modellbildungsprozesses bestand darin, eine geeignete Systemgrenze aufzustellen. Hierbei sollten alle wichtigen, oder potentiell wichtigen Elemente einbezogen werden, ohne dabei zu versuchen, „die ganze Welt“ zu modellieren (vgl. Pruyt, 2013). Weiterhin stellte die Quantifizierung aller Kausalitäten der SFD Modellstruktur eine große Herausforderung dar, weil die Verfügbarkeit und die Qualität entsprechender Daten eine direkte Auswirkung auf die Güte und Validität der Modellergebnisse besitzen.

Die vorliegenden Modellergebnisse der untersuchten Szenarien bieten eine Evaluation des gesamten Mobilitätssystems unter Berücksichtigung zeitlicher Effekte. Eine umfassende inhaltliche Zusammenfassung und Diskussion der Modellergebnisse erfolgt in Kapitel 5.

## **5 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse**

Die vorliegende Arbeit untersucht die Auswirkungen von ODM-Angeboten auf ausgewählte Nachhaltigkeits-Indikatoren am Beispiel der Stadt München. Für die Untersuchung wurde ein Forschungsansatz ausgewählt, welcher qualitative und quantitative Methoden miteinander kombiniert und die übergeordnete Problemstellung der Arbeit dabei stets in einem systemischen Zusammenhang betrachtet.

In einer fundierten Literaturanalyse konnte der aktuelle Stand der Forschung zu den Untersuchungsfeldern nachhaltiger urbaner Mobilität und ODM aufgearbeitet werden. Basierend auf der Auswertung relevanter Studien zur Operationalisierung nachhaltiger urbaner Mobilität (vgl. Tabelle 5) konnten für diese Arbeit drei Indikatoren (Verkehrsfluss, Flächeninanspruchnahme und Emissionen) identifiziert werden, welche im weiteren Verlauf in einem systemischen Zusammenhang betrachtet wurden. Die ausgewählten Indikatoren (vgl. Tabelle 17) haben dabei nicht den Anspruch, die gesamte Bandbreite nachhaltiger urbaner Mobilität abzubilden, sondern bieten, basierend auf dem Forschungsdesign dieser Arbeit, die Möglichkeit, potentielle Auswirkungen von ODM-Angeboten auf das Mobilitätssystem gezielt zu analysieren und quantitativ zu beschreiben.

Bei der Analyse existierender Studien der entsprechenden Fachliteratur wurde festgestellt, dass für die Operationalisierung nachhaltiger urbaner Mobilität teilweise eine Vielzahl unterschiedlicher, theoretischer Indikatoren aufgestellt werden, welche sich häufig aufgrund mangelnder Datenverfügbarkeit für eine praktische Anwendung nicht eignen. Für die in dieser Arbeit aufgestellten Indikatoren wurde explizit auf eine entsprechende Datengrundlage geachtet. Zudem wurde berücksichtigt, dass die Indikatoren eine verkehrsträgerübergreifende, holistische Perspektive abbilden und dabei Wechselwirkungen unterschiedlicher Verkehrsträger auf Stadtebene berücksichtigt werden können (vgl. Kapitel 2.3.2).

Im zweiten Untersuchungsfeld der vorliegenden Literaturanalyse wurde im Anschluss an eine eindeutige Begriffsdefinition (vgl. Tabelle 18) eine umfassende Analyse des ODM-Marktes in München durchgeführt und gezielt Fachliteratur zu den Auswirkungen von ODM-Angeboten auf Nachhaltigkeits-Kriterien untersucht. Bei der Analyse wurde festgestellt, dass die existierenden Angebotsformen in der Literatur sowie bei den ODM-Anbietern selbst, bis zum aktuellen Zeitpunkt nicht eindeutig definiert und begrifflich zugeordnet wurden. Insbesondere Begriffe, wie Ride Sharing oder E-Hailing, finden somit in der Literatur für unterschiedliche Angebotsformen ihre Anwendung.

Basierend auf einer umfassenden Marktanalyse (vgl. Kapitel 2.4.4) konnte der Status-Quo aller bestehenden ODM-Angebotsformen in München untersucht werden. Die Analyse bestätigt ei-

---

nen starken Anbieterzuwachs in München in den vergangenen Jahren mit einer besonders hohen Anbieterdichte bei den Angebotsformen Car Sharing und Mikro Mobilität (vgl. Abbildung 15). Weiterhin konnte durch die Analyse des bestehenden Marktes festgestellt werden, dass existierende ODM-Angebotsformen teilweise ineinander übergehen und nicht immer trennscharf differenziert werden können (vgl. Angebote der Anbieter Sixt, FREENOW, JUMP). Darüber hinaus wurde beobachtet, dass zunehmend auch öffentliche Anbieter, wie beispielsweise die MVG mit dem MVG Rad oder dem Ride Pooling Service IsarTiger, in den ODM-Markt eintreten und somit eine pauschale Differenzierung zwischen ODM und dem ÖPNV erschweren.

Auf Basis der bestehenden Flottengrößen, der durchschnittlichen Auslastungen der Flotten sowie der Besetzungsgrade der ODM-Angebotsformen Free-Floating und Station-Based Car Sharing, Ride Hailing und Ride Pooling (vgl. Tabelle 11 - 12) erfolgte eine Abschätzung des Anteils an der Verkehrsleistung sowie am Modal Split in München (vgl. Kapitel 2.4.4.2). Die in diesem Zusammenhang ermittelten Werte stellen aufgrund der hohen Marktdynamik und starken Wettbewerbssituation eine Abschätzung dar, bei der wegen mangelnder belastbarer Datenverfügbarkeit teilweise auf Daten aus vergleichbaren Städten, in Verbindung mit plausiblen Annahmen, zurückgegriffen werden musste. Den Abschätzungen zufolge beträgt der Anteil der Verkehrsleistung der genannten ODM-Angebotsformen circa 0,50 % der Gesamt-Verkehrsleistung. Der Anteil am Modal Split fällt mit 0,91 % vergleichsweise etwas höher aus (vgl. Kapitel 2.4.4.2). Bei der Betrachtung wurden die ermittelten ODM-Fahrleistungen ins Verhältnis zu der Anzahl der Wege und zu den Verkehrsleistungen der Münchner Bevölkerung gesetzt. Dies ist insofern kritisch zu beurteilen, dass die Nutzung von ODM-Angeboten bekanntermaßen zu einem signifikanten Anteil durch Geschäfts- und Tourismuspersonen erfolgt, welche in den zugrunde liegenden Daten keine Berücksichtigung finden (vgl. Kapitel 2.4.4.2).

In einer gezielten Analyse zahlreicher relevanter Studien zu den Auswirkungen von ODM-Angeboten auf Nachhaltigkeits-Kriterien, wurde überwiegend ein positives Potential der untersuchten Services bestätigt. Durch eine detaillierte Betrachtung der Studien konnte weiterhin festgestellt werden, dass die Ergebnisse der Studien teilweise deutlich auseinanderliegen (vgl. Tabelle 14 – 16). Als Gründe hierfür wurden vor allem Unterschiede bei den angewandten Methoden und den betrachteten Untersuchungsgebieten angesehen (vgl. Kapitel 2.4.6). Darüber hinaus ist festzuhalten, dass ein Großteil der existierenden Studien aus Nord-Amerika stammt und somit eine direkte Übertragung der Ergebnisse auf das Untersuchungsgebiet München nicht als sinnvoll betrachtet wird. Während in der Fachliteratur zu den potentiellen Auswirkungen unterschiedlicher ODM-Angebotsformen überwiegend Einigkeit herrscht, existieren zum aktuellen Zeitpunkt kaum fundierte Analysen über realisierte oder in Zukunft zu erwartende Auswirkungen bestehender Angebote. Aktuelle Prognosen bestehen in der Regel in Form von Si-

mulationen und Modellierungen, die teilweise auf wirklichkeitsfernen Annahmen zur Marktdurchdringung beruhen. Eine systemische Betrachtung der Auswirkungen von ODM-Angeboten auf das gesamte urbane Mobilitätssystem existierte eigenen Recherchen zufolge zum Zeitpunkt der Bearbeitung nicht und unterstützt somit die Entscheidung, die vorliegende Problemstellung durch die Entwicklung eines System-Modells ganzheitlich zu untersuchen.

Die in dieser Arbeit durchgeführte qualitative Expertenstudie verfolgte mit einem explorativen Ansatz das Ziel, mehr über die Auswirkungen von ODM-Angeboten auf eine nachhaltige urbane Mobilität zu erfahren. In der Studie wurden insgesamt 15 Experten aus den Bereichen Automotive, ODM-Anbieter, Wissenschaft, NGO, Beratung und städtische Vertreter interviewt, um ihr Verständnis von nachhaltiger urbaner Mobilität und den Auswirkungen von ODM sowie relevanter Einflussfaktoren und Rahmenbedingungen besser zu verstehen. In einem aufwendigen Auswertungsprozess erfolgte, unter Anwendung einer qualitativen Inhaltsanalyse, die sinnesgemäße Anpassung und Verdichtung des transkribierten Datenmaterials in ein Kategoriensystem mit 33 Unter-Kategorien und sieben Haupt-Kategorien (vgl. Kapitel 3.6.4). Auf Basis der Antworten konnten vier Haupt-Kategorien zu den externen Einflussfaktoren und Rahmenbedingungen herausgearbeitet werden, welche von besonders hoher Relevanz angesehen wurden. Neben der Stadt Charakteristik werden demnach insbesondere auch die bestehende Regulatorik, die Demografie der Bevölkerung und technologische Veränderungen als maßgebliche Einflussfaktoren für die zukünftige Entwicklung von ODM-Angeboten gesehen.

Zusammenfassend für die qualitative Expertenstudie ist festzustellen, dass die Auswirkungen von ODM-Angeboten auf nachhaltige urbane Mobilität durch die Experten überwiegend positiv eingeschätzt werden und das allgemeine Verständnis von ODM dabei nicht bedeutsam variiert. Ein Großteil der Experten neigt jedoch dazu, sich bei seinen Aussagen hauptsächlich auf eine konkrete ODM-Angebotsform (Ride Pooling) zu beziehen. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass in Bezug auf eine zukünftige Entwicklung bei dieser Angebotsform das größte Potential gesehen wird. Kritisch anzumerken ist weiterhin, dass bei einigen Aussagen nicht eindeutig erkennbar ist, ob es sich um ein potentiell „Wunsch-Szenario“ in der Zukunft handelt oder eine stichhaltige, realistische Entwicklung beschrieben wird.

Die auf dem aktuellen Stand der Forschung und der qualitativen Expertenstudie aufbauende System-Modellierung unterteilt sich, wie in Kapitel 4 ausführlich beschrieben, in die Entwicklung eines qualitativen und quantitativen Modells sowie eine szenario-basierte Auswertung des quantitativen Modellverhaltens. Durch die methodische Anwendung von ST und SD ermöglicht dieser Ansatz eine ganzheitliche, systemische Betrachtung der Problemstellung unter Berücksichtigung möglicher Rückkopplungseffekte.

---

Die Entwicklung eines umfassenden qualitativen CLD's ermöglicht es, die komplexe Struktur des realen Systems auf ein anschauliches Aggregationsniveau zu heben (vgl. Abbildung 41). Basierend auf den Ergebnissen der Expertenstudie konnten die Systemgrenzen so ausgewählt werden, dass alle wichtigen oder potentiell wichtigen Elemente im Modell ihre Berücksichtigung finden. Das CLD bietet durch die Darstellung des holistischen Gesamt-Zusammenhangs entscheidende Erkenntnisse zur Modellstruktur und zugrunde liegenden Rückkopplungssystemen, wie beispielsweise der Rückkopplungsschleife zum Verkehrsfluss und der Durchschnittsgeschwindigkeit (vgl. Tabelle 21) und stellt somit für die betrachtete Problemstellung, im Vergleich zu traditionellen Methoden, einen zentralen methodischen Mehrwert dar.

Die deutlich zeit- und ressourcenaufwändigere Erstellung des quantitativen SFD Modells ermöglicht es, neben einem besserem Verständnis der Systemzusammenhänge, zeitliche Dynamiken zwischen den betrachteten Systemelementen zu untersuchen und die Auswirkung der Rückkopplungsschleifen auf das Systemverhalten quantitativ abzuschätzen. Auf Basis des zugrunde liegenden qualitativen CLD Modells wuchs das SFD Modell während eines iterativen Modellentwicklungsprozesses zu einem komplexen Modell mit acht Sub-Modellen, bestehend aus 622 einzelnen Systemelementen, an. Nach Charles (2012) stehen zu aufwändige und komplexe Modelle in der Kritik, da die Überprüfung und Evaluation des Modells mit zunehmender Komplexität nahezu unmöglich werden.

» *The tendency to build unnecessarily large models to address 'big' problems is another aspect of modelling that draws criticism (Forrester, 2007b; Barlas, 2007). Barlas (2007) explores several reasons why large models is an issue, stating that large models 'are not only difficult to build, they are also nearly impossible to understand, test, and evaluate critically* « (vgl. Charles, 2012)

Weiterhin stellte die Quantifizierung aller Kausalitäten einer komplexen SFD Modellstruktur eine große Herausforderung dar, weil die Verfügbarkeit und Qualität entsprechender Daten eine direkte Auswirkung auf die Güte und Validität der Modellergebnisse besitzen (vgl. Kapitel 4.2.3.1 und 5).

Für das vorliegende SFD Modell wurde zur Untersuchung des Modellverhaltens auf konkrete Szenarien zurückgegriffen, die mögliche Zukunftsverläufe vom Jahr 2018 bis zum Ende des Jahres 2030 abbilden (vgl. Kapitel 4.3). Die ermittelten Simulationsergebnisse der untersuchten Szenarien liefern neben Informationen zur Entwicklung der Anzahl der Wege und der Verkehrsleistung auch Auskünfte über die Entwicklung der Fahrzeugkilometer und des Fahrzeugbestandes sowie der drei in dieser Arbeit aufgestellten Nachhaltigkeits-Indikatoren im Untersuchungsgebiet.

Die Entwicklung des Verkehrs-Indikators zeigt in allen untersuchten Szenarien (ausgenommen Szenario SD-3) eine Reduktion der Durchschnitts-Geschwindigkeit im betrachteten Untersuchungsgebiet. Diese Reduktion ist neben einer Zunahme der Münchner Bevölkerung (vgl. Abbildung 53) und einem daraus resultierenden Anstieg der Gesamt-Fahrzeugkilometer (vgl. Abbildung 58) auch auf die Zunahme von ODM-Angeboten zurückzuführen. Dem Modellverhalten zufolge ist eine Abnahme der Durchschnitts-Geschwindigkeit auch bei zunehmender ODM-Durchdringung erkennbar. Aus einem Vergleich der untersuchten Szenarien lässt sich demnach schlussfolgern, dass ODM dem holistischen Modellverhalten zufolge, nicht zu einer Verbesserung der Verkehrssituation führt. Die in Kapitel 1.3 aufgestellte Hypothese H1 gilt demzufolge auf Basis des beobachteten Modellverhaltens unter den betrachteten Szenarien als widerlegt. Lediglich unter stark optimistischen Annahmen und einer hohen Marktdurchdringung von ODM ist im betrachteten Szenario SD-3 eine signifikante Erhöhung der Durchschnitts-Geschwindigkeit im Vergleich zum Referenz-Szenario SE-2 und zum Startwert der Simulation im Jahr 2018 erkennbar.

Der aufgestellte Flächen-Indikator berechnet auf Basis des MIV Fahrzeugbestandes sowie der ODM-Fahrzeugflotten die benötigte Stellplatz-Fläche im öffentlichen Raum. Für alle untersuchten Szenarien ist im zeitlichen Verlauf der Simulation ein Anstieg der benötigten Stellplatz-Fläche zu verzeichnen. Dieser Anstieg resultiert insbesondere aus dem prognostizierten Bevölkerungszuwachs (vgl. Abbildung 53) und dem sich daraus ergebenden Anstieg des MIV Fahrzeugbestandes (vgl. Abbildung 60). Beim Vergleich der untersuchten Szenarien ist mit einer zunehmenden ODM-Durchdringung eine Reduktion der benötigten Stellplatz-Fläche zu verzeichnen, wodurch die in Kapitel 1.3 aufgestellte Hypothese H2 als bestätigt angesehen werden kann. Den Simulationsergebnissen zufolge führt ODM im Untersuchungsgebiet zu einer Reduktion der Flächeninanspruchnahme durch parkende Fahrzeuge im öffentlichen Raum.

Für die Berücksichtigung der zeitlichen Veränderungen von Luftschadstoffen und Treibhausgasemissionen wurde der Emissions-Indikator aufgestellt. Auf Basis der im Modell errechneten Fahrzeugkilometer (vgl. Abbildung 58) wurden für alle untersuchten Szenarien die ausgestoßenen Emissionen für CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> und PM untersucht. Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Emissionen für alle drei betrachteten Emissionsformen über den zeitlichen Verlauf der Simulation hinweg deutlich abfallen. Dieser Effekt ist insbesondere auf die zugrunde liegenden Emissionsfaktoren der ICE Fahrzeuge sowie eines steigenden Elektrifizierungsanteils zurückzuführen. Bei einer detaillierten Betrachtung der Simulationsergebnisse ist darüber hinaus festzustellen, dass die Szenarien mit einer höheren ODM-Durchdringung, über den zeitlichen Verlauf hinweg zu geringeren Emissionswerten führen (vgl. Abbildung 66 - 68). Die in Kapitel 1.3 aufgestellte Hypothese H3 gilt auf Basis dieser Simulationsergebnisse als bestätigt. ODM führt demnach auch bei einer ganzheitlichen Untersuchung des Mobilitätssystems zu einer Reduzierung der betrachteten Luftemissionen.

Bei der Auswertung der quantitativen Simulationsergebnisse lässt sich feststellen, dass die zeitlichen Verläufe (vgl. Abbildung 58 – 65) eher einer linearen Entwicklung folgen als dynamisch wirkende Feedbackmechanismen abzubilden. Zwar finden in dem zugrunde liegenden SFD Modell zeitlich wirkende Rückkopplungssysteme ihre Berücksichtigung, allerdings überlagern exogen wirkende Effekte in der vorliegenden Modellstruktur das endogene Systemverhalten. Diesem unerwünschten Verhalten könnte entgegengewirkt werden, indem die Systemgrenzen weiter gefasst und bisweilen exogene Elemente als endogene Systemelemente in die Modellstruktur integriert werden (vgl. Kapitel 6). Der zentrale Mehrwert bei der Anwendung von SD, zeitlich versetzte, gegebenenfalls gegenläufige Rückkopplungseffekte über einen zeitlichen Verlauf dynamisch simulieren zu können, konnte durch die vorliegende Modellstruktur nicht vollständig ausgeschöpft werden. Nichtsdestotrotz bieten die Simulationsergebnisse gegenüber einer rein qualitativen Betrachtung einen deutlichen Erkenntnisgewinn, da sie die Auswirkungen der zugrunde liegenden Problemstellung quantitativ im zeitlichen Verlauf abschätzen und somit Ursachen für das Systemverhalten aufdecken und erklären. Die Abbildung 72 bietet einen Überblick über identifizierte, zentrale Ursachen des Modellverhaltens.

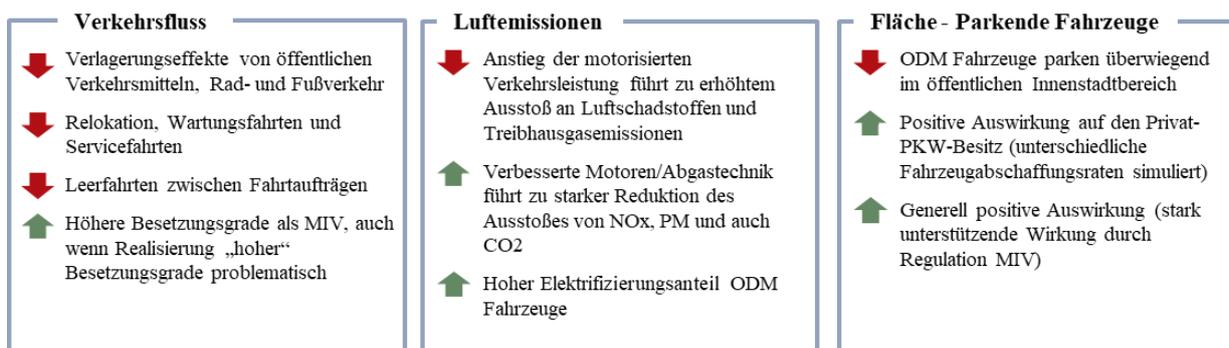


Abbildung 72: Identifizierte Ursachen des Modellverhaltens (eigene Darstellung)

Für die Quantifizierung aller Kausalitäten musste während des Modellentwicklungsprozesses neben der Anwendung geeigneter Datenquellen auch eine Vielzahl plausibler Annahmen getroffen werden. Wie bereits ausführlich in Kapitel 4.5.1 beschrieben, unterliegen die angewandten Inputdaten gewissen Limitationen, welche sich auf die Aussagefähigkeit der Modellergebnisse auswirken. John Sterman betonte in diesem Zusammenhang intensiv die Unmöglichkeit, ein Modell in seiner Gesamtheit zu validieren. Vielmehr verwies er auf den eigentlichen Nutzen eines Modells:

- » *The word validation should be struck from the vocabulary of modelers. All models are wrong, so no models are valid or verifiable in the sense of establishing their truth. The question facing clients and modelers is never whether a model is true but whether it is useful. The choice is never whether to use a model. The only choice is which model to use. Selecting the most appropriate model is always a value judgment to be made by reference to the purpose. Without a clear understanding of the purpose for which the model is to be used, it is impossible to determine whether you should use it as a basis for action* « (vgl. Sterman, 2000, S. 890)

In diesem Zusammenhang besteht der Mehrwert des entwickelten Modells nicht in der exakten quantitativen Vorhersage zukünftiger Entwicklungen, sondern in einem ganzheitlichen Verständnis der Systemstruktur und ihrer zugrunde liegenden Rückkopplungssysteme sowie in einer quantitativen Abschätzung der Auswirkungen von ODM auf das gesamte Mobilitätssystem im Untersuchungsgebiet.

---

## 6 Kritische Reflexion der methodischen Vorgehensweise und weiterer Forschungsbedarf

Während der überwiegende Anteil der bestehenden Forschungsarbeiten auf klassischen Untersuchungsmethoden (wie zum Beispiel der Modellierung in makroskopischen Verkehrsnachfragemodellen) basiert, wurde in der vorliegenden Arbeit, durch die Entwicklung und Anwendung eines SFD Modells, ein bislang eher unkonventioneller Ansatz ausgewählt.

Der angewandte Forschungsansatz kombiniert dabei qualitative und quantitative Methoden zur Erforschung des Untersuchungsgegenstandes. Dieses Vorgehen, welches in der Fachliteratur häufig auch als *Triangulation* oder *Mixed-Methods* bezeichnet wird (vgl. Kuckartz, 2014; Flick et al., 2014), erwies sich im Forschungsverlauf als wertvoll, da durch die unterschiedlichen Methoden das zugrunde liegende Verständnis des Untersuchungsgegenstandes, sowie die Robustheit und Aussagekraft der Ergebnisse anhaltend gesteigert werden konnte. Studien zur politischen Entscheidungsfindung belegen in diesem Zusammenhang beispielsweise, dass politische Entscheidungen in der Regel mit Verweis auf die Ergebnisse einer quantitativen Studie begründet werden (vgl. Li et al., 2015). Auch, wenn qualitative Studien detaillierte Informationen über individuelle Teilnehmerperspektiven, sowie zugrunde liegender Zusammenhänge bieten können (welche in der quantitativen Forschung nicht erfasst werden), sind politische Entscheider oft wenig geneigt, sich bei der „Formulierung, Umsetzung, Bewertung und Überarbeitung von Maßnahmen allein auf qualitative Befunde zu verlassen“ (vgl. Li et al., 2015, S. 31). Weiterhin können durch die Kombination qualitativer und quantitativer Forschungsansätze Einschränkungen einzelner Methoden ausgeglichen werden. Ein besseres Verständnis qualitativer Zusammenhänge ermöglicht beispielsweise die Wiederlegung oder Plausibilisierung von quantitativen Korrelationen, welche einschlägigen Theorien zuwiderlaufen (vgl. Döring et al., 2016).

Das zugrunde liegende Forschungsdesign kann als eine explorative Untersuchung verstanden werden, bei der zunächst qualitative Daten in der Form von Experteninterviews erhoben und analysiert wurden, um basierend auf diesen Ergebnissen das quantitative Vorgehen weiter zu entwickeln. Durch die Kombination qualitativer und quantitativer Elemente des methodischen Forschungsansatzes konnte die Robustheit und Tiefe des entwickelten SFD Modells bedeutsam gesteigert werden. Darüber hinaus zielt die methodische Vorgehensweise auf eine Annäherung des Forschungsgegenstandes aus unterschiedlichen Blickwinkeln ab und ermöglicht somit eine fundierte, ganzheitliche Betrachtung der Problemstellung. In diesem Zusammenhang konnten in der durchgeführten qualitativen Expertenstudie (vgl. Kapitel 3), die Erkenntnisse aus der Literatur durch die Einschätzungen und Meinungen der Experten besser einordnen werden. Insbesondere auch zur Bestimmung einer geeigneten Systemgrenze der qualitativen und quantitativen Modellierung, sowie zur Identifikation relevanter Systemvariablen bietet die Expertenstudie zentrale Erkenntnisse. Darüber hinaus erwies sich die Expertenstudie im weiteren Forschungsverlauf vor dem Hintergrund der hohen Anzahl an zu treffenden Annahmen als geeignete Grundlage für die Modellentwicklung und –konzeption.

Das auf Basis der Literatur und Expertenmeinungen entwickelte, qualitative CLD ermöglicht es, durch ein geeignetes Aggregationsniveau und eine einfache bildliche Darstellung die komplexen Modellzusammenhänge verständlich abzubilden. Weiterhin kann diese explorativ geprägte Form des qualitativen Modellierungsprozesses bestehende Rückkopplungsschleifen in der Modellstruktur identifizieren und ist somit für das vorliegende Forschungsdesign von außerordentlich hoher Bedeutung.

Die quantitative Modellierung der Systemzusammenhänge bietet die Möglichkeit, zeitlich versetzte, gegebenenfalls auch gegenläufige Rückkopplungseffekte über den Untersuchungszeitraum dynamisch zu simulieren. Das auf Basis des qualitativen CLD's entwickelte SFD Modell wuchs im Modellierungsprozess mit über 600 unterschiedlichen Systemelementen zu einem sehr komplexen Modell heran (vgl. Kapitel 4.2.3.5). Aufgrund dieser hohen Komplexität, welche sich eines einfachen, linearen Verständnisses widersetzt, konnte im Forschungsverlauf ein zunehmendes Misstrauen von Personen ohne methodisches Vorwissen dem SFD Modell gegenüber festgestellt werden. Auch, wenn die Eingabedaten in Form von verständlichen Tabellen aufbereitet vorlagen, wurde das Modell bei Präsentationen und Diskussionen überwiegend als eine „Black Box“ wahrgenommen.

Um diesen Effekt zu minimieren, hätte bei der methodischen Vorgehensweise intensiver darauf geachtet werden müssen, alle beteiligten Stakeholder stärker in den Modellierungsprozess einzubeziehen. John Sterman empfiehlt diesbezüglich in seinem Buch, so viele Personen wie möglich an der Modellkonzeption teilhaben zu lassen, um das methodische Verständnis der Stakeholder von Anfang an zu erweitern.

» *Open the modeling process to the widest range of people you can. Implementation success requires changing the clients' mental models. To do so the clients must become partners with you in the modeling process. Ultimately, your chances of success are greatest when you work with your clients to find the limitations of your models, mental and formal, then work together to correct them. In this fashion you and your clients gradually develop a deep understanding of the system and the confidence to use that understanding to take action.* « (vgl. Sterman, 2000, S. 891)

In diesem Zusammenhang hätte eine Reihe von interaktiven Workshops eine geeignete Möglichkeit dargestellt, um relevante Stakeholder an dem Modellierungsprozess intensiv teilhaben zu lassen und ein gemeinsames methodisches Verständnis zu entwickeln. Sterman wies zudem darauf hin, dass die Integration relevanter Stakeholder und die Abstimmung eines gemeinsamen Modellverständnisses für den Erfolg der Untersuchung von essentieller Bedeutung sind.

» *Models rarely fail because the modelers used the wrong regression technique or because the model didn't fit the historical data well enough. Models fail because [...] the modelers failed to include important stakeholders in the modeling process.* « (vgl. Sterman, 2000, S. 890)

---

Im vorliegenden Forschungsdesign wurden auf Basis der finalen Modellstruktur szenario-basierte Simulationsergebnisse in einem Workshop mit relevanten Stakeholdern vorgestellt (vgl. Kapitel 4.5.4). Hierbei konnte festgestellt werden, dass für die beteiligten Stakeholder die Ergebnisse im absoluten Vordergrund standen. Auch bei zahlreichen anderen Präsentationen und Diskussionen der Modellergebnisse mit methodenfremden Personen konnte in diesem Zusammenhang festgestellt werden, dass quantitative Ergebnisse fast immer den Anspruch erwecken, 100 % valide sein zu müssen. Wie in Kapitel 4.5 ausführlich beschrieben, gestaltet sich dies bei der Anwendung eines SFD Modells durchaus als schwierig, da die Modellierung nur eine Annäherung an das reale Systemverhalten darstellt und starken Limitationen unterliegt.

Auch, wenn mit der Entwicklung des SFD Modells in dieser Arbeit ein intensiver Arbeitsaufwand verbunden war und die Ergebnisse bei relevanten Stakeholdern teilweise kritisch hinterfragt wurden, wird die Anwendung der Methode dennoch als wertvoll angesehen, da sie eine ganzheitliche Abschätzung möglicher Zukunftsverläufe zulässt. Weiterhin bietet die Methode im Vergleich zu klassischen Verkehrsmodellen die Möglichkeit die Ursachen für das Systemverhalten zu identifizieren und somit Rückschlüsse über das Systemverhalten zu ziehen.

Ein Verbesserungspotential wird bei der quantitativen Modellierung der identifizierten Rückkopplungsschleifen gesehen, welche in den vorliegenden Modellergebnissen der SFD Modellierung kaum ersichtlich wurden. Grund hierfür sind Überlagerungen von exogenen Effekten, welche die im Modell modellierten, endogenen Effekte überlagern. In zukünftigen Forschungsarbeiten sollte demnach versucht werden, die Systemgrenze so auszuwählen, dass ausschließlich endogene Effekte modelliert werden und das Systemverhalten nicht durch exogene Effekte maßgeblich beeinflusst wird.

Weiterer Forschungsbedarf wird insbesondere bei der Untersuchung der Auswirkungen zukünftiger ODM-Angebote auf das Mobilitätsverhalten gesehen. In diesem Zusammenhang könnten Stated-Preference- oder Conjoint-Befragungen Verhaltensänderungen in der Zukunft untersuchen und somit wertvolle Erkenntnisse für die Modellierung solcher Systemzusammenhänge beitragen. Bezogen auf das in dieser Arbeit vorliegende Modell könnten einzelne Systemzusammenhänge auf Basis solcher Untersuchungen kalibriert werden.

Auch die Anwendung von SD Modellen in Kombination mit räumlichen Modellen unterliegt weiterem Forschungsbedarf, welcher es ermöglichen würde, auch räumliche Einflussfaktoren und Auswirkungen in den Modellen besser zu berücksichtigen. Zum aktuellen Zeitpunkt existieren aufgrund der Komplexität nur vereinzelt Modelle, die räumliche Strukturen berücksichtigen (vgl. Kapitel 4.1.3).

## **7 Ableitung von Handlungsempfehlungen**

Folgend werden konkrete Handlungsempfehlungen in Bezug auf die in Kapitel 1.3 aufgestellten Forschungsfragen gegeben, welche zu einer Verbesserung der Auswirkungen von ODM auf die in dieser Arbeit untersuchten Nachhaltigkeits-Indikatoren beitragen.

Da in dem vorliegenden Modell die Verkehrs- und Emissions-Indikatoren auf Basis der Gesamt-Fahrzeugkilometer errechnet werden, besitzen die Substitutions- und Verlagerungseffekte zwischen den betrachteten Verkehrsmitteln eine zentrale Bedeutung für die Simulationsergebnisse. Eine Reduzierung der Gesamt-Fahrzeugkilometer und demzufolge eine positive Auswirkung auf den Verkehrs- und Emissions-Indikator sind nur dann möglich, wenn bei der Implementierung des ODM-Angebotes externe Effekte weitestgehend minimiert und ein Großteil der ODM-Fahrten durch den MIV substituiert werden. Um dies zu erreichen, sollten folgende Handlungsempfehlungen berücksichtigt werden:

### ***Minimierung externer Effekte durch Leerfahrten, Umwege und Relokationsfahrten***

Um den Anteil von ODM an den Gesamt-Fahrzeugkilometern so gering wie möglich zu halten ist es zwingend erforderlich, den Anteil von Leerfahrten, Umwegen und Relokationsfahrten im Vergleich zu der eigentlichen Beförderung von Personen zu minimieren. In diesem Zusammenhang sollte durch eine kontinuierliche Verbesserung der technologischen Lösungen (wie beispielsweise intelligenter Matching-Algorithmen) sichergestellt werden, dass die ODM-Angebote so effizient wie möglich arbeiten.

### ***Entwicklung eines für MIV Fahrer attraktiven ODM Angebots***

Um einer hohen Anzahl an MIV Fahrern eine attraktive Alternative zum eigenen Fahrzeug bieten zu können, sollten sich die ODM-Angebote durch ihre funktionalen und emotionalen Produkteigenschaften sowie eine entsprechende Positionierung im Mobilitätssystem nah am MIV orientieren. Insbesondere Angebotseigenschaften, wie die Verfügbarkeit, Verlässlichkeit, aber auch der Komfort, die Privatsphäre und der Erlebniswert des Angebotes, sollten so gestaltet werden, dass das Angebot MIV Fahrer anspricht und eine Alternative bietet.

### ***Nachhaltige Verkehrsstrategie zur Beeinflussung der Attraktivität des MIV***

Neben der Entwicklung eines für MIV Fahrer attraktiven Angebotes könnten regulatorische Maßnahmen, wie beispielsweise die Einführung eines Road-Pricing oder wirksame Parkraumbepreisung, die Attraktivität des MIV beeinflussen und eine Mobilitäts-Verhaltensveränderung vom MIV hin zu ODM und anderen stadtverträglichen Mobilitätsformen unterstützen.

---

### ***Preisliche Differenzierung von ODM zum ÖPNV***

Da die Einführung eines attraktiven Mobilitätsangebotes grundsätzlich Nachfrage von unterschiedlichen Verkehrsmitteln auf sich zieht, sollte durch eine geeignete Preisdifferenzierung zum klassischen ÖPNV eine starke Verlagerung zwischen dem ÖPNV und ODM unterbunden werden.

Neben den Auswirkungen auf den Verkehrs-Indikator konnten die Simulationsergebnisse eindeutig aufzeigen, dass ODM in den untersuchten Szenarien bereits zu einer Verbesserung der Flächeninanspruchnahme im öffentlichen Raum (durch parkende Fahrzeuge) sowie der ausgestoßenen Luftemissionen im Untersuchungsgebiet beitragen (vgl. Kapitel 4.4). Um die Auswirkungen weiterhin verbessern zu können, werden folgende Handlungsempfehlungen aufgestellt:

### ***Vollständige Elektrifizierung von ODM-Flotten***

Um die Auswirkungen von ODM auf die ausgestoßenen Emissionen im Untersuchungsgebiet weiterhin zu verbessern, sollten möglichst alle ODM-Fahrzeuge elektrifiziert werden. Durch eine ganzheitliche Elektrifizierung der ODM-Fahrzeuge könnten die negativen Effekte der Emissionen vollständig beseitigt werden.

### ***Parken von ODM-Fahrzeugen auch „Offstreet“ ermöglichen***

Auch wenn den Simulationsergebnissen zufolge ODM bereits eine positive Auswirkung auf die Flächeninanspruchnahme durch parkende Fahrzeuge im öffentlichen Raum besitzen, parkt dennoch ein Großteil insbesondere der Car Sharing Fahrzeuge im öffentlichen Straßenraum des hoch-verdichteten Innenstadtbereichs. Um die beanspruchte Fläche der ODM-Fahrzeuge weiter zu reduzieren, sollte überprüft werden, in welchem Umfang ODM-Fahrzeuge auch auf (privaten) Stellplatz-Anlagen (z.B. Parkhäuser, Tiefgaragen) abseits der Stellplätze im öffentlichen Straßenraum abgestellt werden können.

Auf Basis der in Kapitel 1 aufgestellten Forschungsfragen wurden in dieser Arbeit die Auswirkungen von ODM im Untersuchungsgebiet München anhand von drei Indikatoren systemisch untersucht. Ziel der Arbeit war es, dabei eine modellbasierte Abschätzung der Auswirkungen unter relevanten Zukunftsszenarien vornehmen zu können. Eine detaillierte Betrachtung von ODM in einem übergeordneten, ordnungspolitischen Rahmen ist dabei nicht Teil dieser Untersuchung. Zweifellos besitzt ODM auf Basis seiner Angebotseigenschaften aber das Potential, die strukturelle Angebotslücke zwischen dem MIV und dem klassischen ÖPNV zu schließen und somit das Angebotsportfolio des Mobilitätssystems zu verbessern und für viele Menschen mit heterogenen Mobilitätspräferenzen eine attraktive Alternative zum privaten Fahrzeug darzustellen.

**Literaturverzeichnis**

- Agrawal, S., Mani, D., Telang, R. (2019). The Impact of Ride-hailing Services on Congestion: Evidence from Indian Cities.
- Agua, F. M. (2016). Study of a Shared Autonomous Vehicle Based Mobility Solution for Munich - Investigation of Operational and Economic Feasibility. Masterarbeit. Technische Universität München. München.
- Alexander, L. P., González, M. C. (2015). Assessing the Impact of Real-time Ridesharing on Urban Traffic using Mobile Phone Data. *Urban Computing 15*. Sydney, Australia.
- Alonso-Mora, J., Samaranayakeb, S., Wallara, A., Frazzolic, E., Rus, R. (2017). On-demand high-capacity ride-sharing via dynamic trip-vehicle assignment. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 114 (3). S. 462–467.
- Arndt, H. (2008). Supply Chain Management. Optimierung logistischer Prozesse (4. Auflage). Wiesbaden: GWV Fachverlag.
- Arnold, R. D., Wade, J. P. (2015). A Definition of Systems Thinking: A Systems Approach. *Procedia Computer Science* 44. S. 669–678.
- Aronson, D. (2010). Overview of System Thinking. Zuletzt aufgerufen am 13.10.2019 unter <http://www.thinking.net>.
- Arthur D.Little. (2011). The Future of Mobility - Towards networked. Multimodal cities of 2050. Arthur D.Little Future Lab.
- Arthur D.Little. (2016). Global Automotive Mobility Study. Multimodal cities of 2050. Arthur D.Little Future Lab.
- Atasoy, B., Ikeda, T., Ben-Akiva, M. E. (2015). Optimizing a flexible mobility on demand system. *Journal of the Transportation Research Board* 2536. S. 76–85.
- Atasoy, B., Ikeda, T., Ben-Akiva, M. E. (2015). The concept and impact analysis of a flexible mobility on demand system. *Transportation Research Part C* 56. S. 373–392.
- ATKearney (2019). The Demystification of Car Sharing - "What it is, what it's not, and what it could be" - An in-depth analysis of customer perspective, underlying economics, and secondary effects.
- Balci, O. (1994). Validation, Verification and Testing Techniques Throughout the Life Cycle of A Simulation Study. *Annals of OR* 53.
- Balding, M., Whinery, T., Leshner E., Womeldorff, E. (2019). Estimated TNC Share of VMT in Six US Metropolitan Regions. SF19-1016.
- Banister, D. (2008). The sustainable mobility paradigm. *Transport Policy* 15 (2). S. 73–80.
- Barlas Y. (1989). Multiple tests for validation of system dynamics type of simulation models. *European Journal of Operational Research* 42 (1). S. 59–87.
- Barlas Y. (1990). An autocorrelation function-test for output validation. *Simulation* 55 (1). S. 7–16.

- 
- Barlas, Y. (1996). Formal aspects of model validity and validation in system dynamics. *System Dynamics Review* 12 (3). S. 183–210.
- Barlas, Y. (2007). Leverage points to march upward from the aimless plateau. *System Dynamics Review* 23 (4). S. 469–473.
- Barrios, J., Hochberg, Y. V., Yi, H. (2019). The Cost of Convenience - Ride hailing and Traffic fatalities. University of Chicago Booth School of Business.
- Bartz, F. M. (2015). Mobilitätsbedürfnisse und ihre Satisfaktoren. Die Analyse von Mobilitätstypen im Rahmen eines internationalen Segmentierungsmodells. Dissertation. Universität zu Köln.
- Basselier, R., Langenus, G., Walravens, L. (2018). The rise of the sharing economy. *Economic Review* (3). S. 57–78.
- Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU). (2019). Lufthygienischer Jahreskurzbericht 2018 - Lufthygienisches Landesüberwachungssystem Bayern (LÜB).
- Becker, U. (2016). Grundwissen Verkehrsökologie. oekom-Verlag, München.
- Becker, U., Gerike, R., Winter, M. (2009). Grundwissen Verkehrsökologie. Dresdner Institut für Verkehr und Umwelt e.V., Dresden.
- Bengtsson, M. (2016). How to plan and perform a qualitative study using content analysis. *Nursing Plus Open* 2. S. 8–14.
- Berylls Strategy Advisors. (2018). The Revolution of urban Mobility.
- Best, A., Hasenheit, M. (2018). Car Sharing in Germany - A Case Study on the Circular Economy. Project founded by the European Union.
- Bilali, A., Dandl, F., Fastenrath, U., Bogenberger, K. (2019a). Impact of service quality factors on ride sharing in urban areas. Conference Paper at the *6th International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS)*. Krakau, Polen.
- Bilali, A., Dandl, F., Fastenrath, U., Bogenberger, K. (2019b). An Analytical Model for On-Demand Ride Sharing to Evaluate the Impact of Reservation, Detour and Maximum Waiting Time. Conference Paper at the *2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference - ITSC*.
- BImSchG. (2019). Bundes-Immissionsschutzgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Mai 2013 (BGBl. I S. 1274), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 8. April 2019 (BGBl. I S. 432) geändert worden ist.
- Bisschoff, J., Maciejewski, B. (2016). Simulation of city-wide replacement of private cars with autonomous taxis in Berlin. *Precedia Computer Science* 83. S. 238–244.
- BMW AG, DLR, DB Rent GmbH, Landeshauptstadt München, Universität der Bundeswehr München, Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt (2016): Wirkung von E-Car Sharing Systemen auf Mobilität und Umwelt in urbanen Räumen (WiMobil). WiMobil Ergebnisbericht.

- Bogenberger, K., Weikl, S., Schmöller, S., Müller, J. (2016). Entwicklung und Nutzungsstruktur von Carsharing-Systemen in Deutschland. Potenziale neuer Mobilitätsformen und -technologien für eine nachhaltige Raumentwicklung. In: Jacoby, C., Wappelhorst, S. (Hrsg.). S. 157–174.
- Bösch, P. M., Becker, F., Becker, H., Axhausen K.W. (2017). Cost-based Analysis of Autonomous Mobility Services, Working paper, 1225, Institute for Transport Planning and Systems (IVT), ETH Zurich, Zurich.
- Bossel, H. (1992). Systemzoo: Simulationsmodelle elementarer dynamischer Systeme. In: Modellbildung und Simulation. Vieweg+Teubner Verlag.
- Boston Consulting Group (2016). What's Ahead of Car Sharing? The New Mobility and its Impact on Vehicle Sales.
- Braatz, C. (2017). Die dreistesten Falschparker Münchens - und was ihnen nun blüht. Zuletzt aufgerufen am 26.09.2017 unter <https://www.tz.de/muenchen/stadt/muenchen-ort29098/so-versucht-eine-muenchnerin-auf-falschparker-aufmerksam-zu-machen-8614120.html>.
- Bradl, P. (2004). Einsatz von System Dynamics in der strategischen Unternehmensplanung: prototypische Implementierung unter besonderer Berücksichtigung der Erfordernisse von Zu- und Abgangssystemen. Dissertation. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. *Arbeitsbericht des Institutes für Informatik* 37 (3). S. 129.
- Bräutigam-Ernst, E. (2007). Die Parklücke. *The World of Parking* 24. S. 1-4.
- Bresciani, C., Colorni, A., Lue, A., Studer, L. (2018). Carpooling: facts and new trends. Conference Paper at the *2018 International Conference of Electrical and Electronic Technologies for Automotive*. Milan, Italien.
- Brüggemeier, F. J. (2012). Nachhaltigkeit – Ein historischer Überblick. Freiburg.
- Bundesamt für Raumentwicklung (ARE) (2009). Monitoring urbaner Raum Schweiz – Analysen zu Städten und Agglomerationen.
- Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) (2012). Raumabgrenzungen und Raumtypen des BBSR. BBSR Analysen Band 6 Bau.Stadt.Raum. Bonn.
- Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) (2017). Immer mehr Menschen pendeln zur Arbeit. Zuletzt aufgerufen am 20.03.2020 von <http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Home/Topthemen/2017-pendeln.html>.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (2016). Klimaschutzplan 2050 - Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung.
- Bundesverband für CarSharing. (2007). Definition CarSharing. Pressemitteilung des Bundesverbandes für CarSharing vom 28.03.2007. Berlin.
- Bundesverband für CarSharing. (2019a). CarSharing-Statistik 2019: CarSharing in Deutschland weiter auf Wachstumskurs. Pressemitteilung des Bundesverbandes für CarSharing vom 20.02.2019. Berlin.

- 
- Bundesverband für CarSharing. (2019b). CarSharing in Deutschland. Jahresbericht 2018/19. Berlin.
- Bunghez, C. L. (2015). The Future of Transportation - Autonomous Vehicles. *International Journal of Economic Practices and Theories* 5 (5). Special issue on Trends in Sustainable Business and Consumption.
- Burgstaller, S., Flowers, D., Tamberrino, D., Terry, H., Yang, V. (2017). Rethinking Mobility - The pay as you go car: Ride hailing just the start. The Goldman Sachs Group. Equity Research Report.
- Burnard, P. (1991). A method of analysing interview transcripts in qualitative research. *Nurse Education Today* 11, S. 461–466.
- Burns, W., Jordan, C., Scarborough, B. A. (2013). Transforming Personal Mobility. Technical report, Earth Institute, Columbia University.
- Burrows, A., Bradburn, J., Cohen, T. (2015). Journeys of the Future - Introducing Mobility as a Service. *AtkinsMobility*. Birmingham, England.
- Busch-Geertsema, A., Lanzendorf, M., Müggenburg, H., Wilde, M. (2016). Mobilitätsforschung aus nachfrageorientierter Perspektive: Theorien, Erkenntnisse und Dynamiken des Verkehrshandelns. In: Schwedes, O., Canzler, W., Knie, A. (Hg.): Handbuch Verkehrspolitik. Wiesbaden: Springer Fachmedien. S. 755–779.
- Calvert, T., Chatterjee, K. (2016). New models of car use. *World Transport Policy Practices* 22. S. 171–185.
- Capra, F. (2015). The Systems View of Life A Unifying Conception of Mind, Matter, and Life. *Cosmos and History* 11 (2). S. 242–249.
- Carlowitz, H. C. (1713). Sylvicultura oeconomica - haußwirthliche Nachricht und Naturmäßige Anweisung zur wilden Baum-Zucht. Reprint: Freiberg, TU Bergakademie Freiberg und Akademische Buchhandlung 2000 (bearb. von Klaus Irmer und Angela Kießling).
- Carranza, V., Chow, K., Pham, H., Roswell, E., Sun, P. (2016). Life cycle analysis: Uber vs. car ownership. *Environment* 159. S. 1–19.
- Center for Sustainability. (2004). [www.c4s.info](http://www.c4s.info), Transportation Research Laboratory, unter [www.trl.co.uk](http://www.trl.co.uk).
- Center for Sustainable Transportation (2005). Defining Sustainable Transportation.
- Chan, N. D., Shaheen, A. S. (2012). Ridesharing in North America: Past, Present, and Future, *Transport Reviews* 32 (1). S. 93–112.
- Chen, X., Zahiri, M., Zhang, S. (2017). Understanding ridesplitting behavior of on-demand ride services: an ensemble learning approach. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 76. S. 51–70.
- Circella, G., Alemi, F. (2018). The Adoption of Ridehailing and Its Impacts on Travel Demand. Conference Paper presentet at the *Transportation Research Board 97th Annual Meeting*, Washington D.C.

- Clewlöw, R., Mishra, G. S. (2017). Disruptive Transportation: The Adoption, Utilization, and Impacts of Ride-Hailing in the United States. Institute of Transportation Studies, University of California, Davis, Research Report UCD-ITS-RR-17-07.
- Coyle, R., Alexander, M. (1997). Two approaches to qualitative modelling of a nation's drugs trade. *System Dynamics Review* 13 (3). S. 205–222.
- Cramer, J., Krueger, A. B. (2016). Disruptive Change in the Taxi Business: The Case of Uber. Working Paper 595. Princeton University.
- Deffner, J. (2009). Zu Fuß und mit dem Rad in der Stadt. Mobilitätstypen am Beispiel Berlins. Dortmund: Institut für Raumplanung (Dortmunder Beiträge zur Raumplanung - Verkehr, 7).
- Deighton-Smith, R. (2018). The Economics of Regulating Ride-Hailing and Dockless Bike Share. International Transport Forum. Diskussionspapier, OECD Publishing, Paris.
- Delatte, A., Kettner, A., Schenk, E., Schuppan, J. (2014) Multimodale Mobilität ohne eigenes Auto im urbanen Raum - Eine qualitative Studie in Berlin Prenzlauer Berg. Abschlussbericht des Institutes für Land- und Seeverkehr an der Technischen Universität Berlin.
- Deloitte University Press (2012). Digital-Age Transportation: The Future of Urban Mobility.
- Deloitte University Press (2016). The Future of mobility: What's next? Tomorrow's mobility ecosystem - and how to succeed in it.
- Deutsche Bahn (2017). Faktenblatt: Die S-Bahn München und ihr Streckennetz. Zuletzt aufgerufen am 20.03.2020 unter [https://www.2.stammstrecke-muenchen.de/medien/presse/medienpakete/2SBSS\\_171218\\_Faktenblatt\\_Netz\\_S-Bahn\\_Muenchen.pdf](https://www.2.stammstrecke-muenchen.de/medien/presse/medienpakete/2SBSS_171218_Faktenblatt_Netz_S-Bahn_Muenchen.pdf).
- Deutscher Bundestag (2017). Flächenverbrauch in Deutschland. Zuletzt aufgerufen am 20.03.2020 unter <https://www.bundestag.de/re-source/blob/538838/79607ff081975e3196cd76588334e2c1/wd-7-163-17-pdf-data.pdf>. S. 4.
- Di, X., Ma, R., Liu, H. X., Ban, X. (2018). A link-node reformulation of ridesharing user equilibrium with network design. *Transportation Research Part B: Methodolgy* 112. S. 230–255.
- Dia, H., Javanshour, F. (2017). Autonomous Shared Mobility-On-Demand: Melbourne Pilot Simulation Study. *Transportation Research Procedia* 22. S. 285–296.
- Dobranskyte-Niskota, A., Perujo, A., Pregl, M. (2007). Indicators to assess sustainability of transport activities. European Commission Joint Research Centre.
- Döring, N., Bortz J., Pöschl, S. (2016). Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften, Springer-Lehrbuch, Springer-Verlag Berlin-Heidelberg.
- Downe-Wambolt, B. (1992). Content analysis: method, applications and issues. *Health Care for Women International* 13. S. 313–321.
- Dresing, T., Pehl, T. (2015). Praxisbuch Interview, Transkription & Analyse. Anleitungen und Regelsysteme für qualitativ Forschende. 6. Auflage. Marburg.

- 
- Duden.de (2019a). „Urbanität“, zuletzt aufgerufen am 15.11.2019 unter <https://www.duden.de/rechtschreibung/Urbanitaet>.
- Duden.de (2019b). „Nachhaltigkeit“, zuletzt aufgerufen am 15.11.2019 unter <https://www.duden.de/rechtschreibung/Nachhaltigkeit>.
- Duran-Rodas, D., Chaniotakis, E., Antoniou, C. (2019). Built Environment Factors Affecting Bike Sharing Ridership: Data-Driven Approach for Multiple Cities. *Transportation Research Records*, S. 1–14.
- Eckhardt, C. F., Hansen, F. (2020). Nachhaltige und stadtverträgliche Mobilität: Für Neuausrichtung der Verkehrsstrategien. Unveröffentlichtes Arbeitsdokument.
- Eckhardt, C.F. (2004). Abschätzung der Marktchancen innovativer Verkehrsangebote für den Personennahverkehr in Ballungsgebieten. Dissertation. Technische Universität Berlin. Berlin.
- ECMT (2004). Assessment and Decision Making for Sustainable Transport. *European Conference of Ministers of Transportation and the OECD*.
- Erhardt, G. D., Roy, S., Cooper, D., Sana, B., Chen, M., Castiglione, J. (2019). Do transportation network companies decrease or increase congestion? *Science Advances* 5. S. 1-11.
- Eronen, T. (2015). Selection criteria for car rental customers at Helsinki Airport. Masterarbeit. School of Business and Culture. Helsinki.
- Europäische Union (2019). Amtsblatt der Europäischen Union zur Festsetzung von CO<sub>2</sub>-Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen und für neue leichte Nutzfahrzeuge und zur Aufhebung der Verordnungen (EG) Nr. 443/2009 und (EU) Nr. 510/2011.
- European Commission (2017). Exploratory study of consumer issues in online peer-to-peer platform markets, Tast 4 - Case Study: BlaBlaCar. Directorate-General for Justice and Consumers EU Consumer Programme. Brüssel.
- European Environment Agency (EEA) (2002). Are We Moving In The Right Direction? Indicators on Transport and Environment Integration. European Environment Agency Environmental Issues Report. Kopenhagen, Dänemark.
- European Environment Agency (EEA) (2012). The contribution of transport to air quality - TERM 2012: transport indicators tracking progress towards environmental targets in Europe. Kopenhagen, Dänemark.
- European Environment Agency (EEA) (2013). Rechtsvorschriften zur Luftqualität in Europa. Zuletzt aufgerufen am 20.10.2019 unter <https://www.eea.europa.eu/de/signale/signale-2013/artikel/rechtsvorschriften-zur-luftqualitaet-in-europa>.
- European Environment Agency (EEA) (2016). National Emission Ceilings Directive. Kopenhagen, Dänemark.
- European Union (2018). Sustainable development in the European Union - Monitoring Report on Progress towards the SDGS in an EU Context. Brüssel.

- Eurostat (2018). Territorial Typologies. Zuletzt aufgerufen am 8.10.2018 unter [https://ec.europa.eu/eurostat/-/statistics-explained/index.php/Territorial\\_typologies#Typologies](https://ec.europa.eu/eurostat/-/statistics-explained/index.php/Territorial_typologies#Typologies).
- Fagnant, D. J. (2015). Shared Autonomous Vehicles: Model Formulation, Sub-Problem Definitions, Implementation Details, and Anticipated Impacts. Conference Paper at the *American Control Conference*, Chicago.
- Fagnant, D. J., Kockelman, K. M. (2016). Dynamic ride-sharing and fleet sizing for a system of shared autonomous vehicles in Austin, Texas. *Transportation* 45. S. 143–158.
- Featherston, C. R., Doolan, M. (2012). A Critical Review of the Criticisms of System Dynamics. Conference Paper at the *The 30th International Conference of the System Dynamics Society*. St. Gallen, Schweiz.
- Federal Highway Administration (2011). Transportation Planning for Sustainability Guidebook, Federal Highway Administration.
- Ferrero, F., Perbolib, G., Rosanob, M., Vesco, A. (2017). Car-sharing services: an annotated review. *Sustainable Cities and Society* 37. S. 501–518.
- FGSV. (2005). Hinweise zum induzierten Verkehr. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. Köln.
- Fiedler, D., Cap, M., Certicky, M. (2017). Impact of Mobility-on-Demand on Traffic Congestion: Simulation-based Study. Conference Paper *IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems*.
- Fiorello, D., Fermi, F., Bielanska, D. (2010). The ASTRA model for strategic assessment of transport policies. *System Dynamics Review* 26 (3). S. 283–290.
- Firnkorn, J., Müller, M. (2012). Selling Mobility instead of Cars: New Business Strategies of Automakers and the Impact on Private Vehicle Holding. *Business Strategy and the Environment* 21. S. 264–280.
- Flick U., Kelle U., Kromrey H., Reichertz J., Rost J., Schreier M. (2014). Qualitative und quantitative Methoden in der Sozialforschung: Differenz und/oder Einheit?. In: Mey G., Mruck K. (eds) *Qualitative Forschung*. Springer VS, Wiesbaden.
- Földes, D., Csiszár, C. (2016). Conception of Future Integrated Smart Mobility. Smart Cities Symposium: Prag, Tschechische Republik.
- Follmer, R., Belz, J. (2018). Mobilität in Deutschland – MiD Kurzreport Stadt München, Münchner Umland und MVV-Verbundraum. Studie von infas, DLR, IVT und infas 360 im Auftrag des Bundesministers für Verkehr und digitale Infrastruktur (FE-Nr. 70.904/15). Bonn, Berlin.
- Forrester, J. (1958). Industrial dynamics. A major breakthrough for decision makers. *Harvard Business Review*. S. 37–66.
- Forrester, J. (1961). *Industrial Dynamics*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Forrester, J. (1968). Market growth as influenced by capital investment. *Industrial Management Review* 9 (2). S. 83–105.

- 
- Forrester, J. (1969). *Urban Dynamics*. Waltham, MA: Pegasus Communications.
- Forrester, J. (1971). *World Dynamics*. Waltham, MA: Pegasus Communications.
- Forrester, J. (1973). Confidence in Models of Social Behavior-With Emphasis on System Dynamics Models. MIT System Dynamics Group Memo D-1967, Cambridge.
- Forrester, J. (1985). “the” model versus a modeling “process”. *System Dynamics Review* 1 (1). S. 133–134.
- Forrester, J. (1994). System dynamics, systems thinking, and soft OR. *System Dynamics Review* 10 (2-3). S. 245–256.
- Forrester, J. (1995). The beginning of system dynamics. *The McKinsey Quarterly* (4). S. 4–16.
- Forrester, J. (2007a). System dynamics a personal view of the first fifty years. *System Dynamics Review* 23 (2-3). S. 345–358.
- Forrester, J. (2007b). System dynamics-the next fifty years, *System Dynamics Review* 23, 2/3. S. 359–370.
- Forrester, J., Senge, P. M. (1980). Tests for building confidence in system dynamics models, *TIMS Studies in the Management Sciences* 14. S. 209–228.
- Friedrich, M., Hartl, M. (2016). MEGAFON - Modellergebnisse geteilter autonomer Fahrzeugflotten des öffentlichen Nahverkehrs. Im Auftrag des Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e. V. (VDV).
- Geroliminis, N., Daganzo, C. F. (2007). Macroscopic Modeling of Traffic in Cities. Conference Paper at the *86th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington D.C.
- Geroliminis, N., Daganzo, F. (2008). Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams: Some experimental findings.
- Geschka, H., Hammer, R. (1992). Die Szenario-Technik in der strategischen Unternehmensplanung, in: Hahn, Dieter/Taylor, Bernard (Hrsg.): *Strategische Unternehmensplanung*, Heidelberg. S. 311-336.
- Geschka, H., Hammer, R. (1999). Methodenbericht zur Studie: Zukunft der Mobilität, Szenarien für das Jahr 2025, Vorgehensweise und Methode. Institut für Mobilitätsforschung (Hrsg.) München.
- Giesel, F., Nobis, C. (2016). The Impact of Carsharing on Car Ownership in German Cities. *Transportation Research Procedia* 19. S. 215–224.
- Glaeser, E. (2011). Cities, Productivity and Quality of Life. *Science* 333 (6042). S. 592–594.
- Goodman, M. (1997). System Thinking: What, Why, When, Where, and How? *Systems Thinker* 8 (3). S. 6–7.
- Graehler, M., Mucci, R. A., Erhardt, G. D. (2018). Understanding the Recent Transit Ridership Decline in Major US Cities: Service Cuts or Emerging Modes? Conference Paper at the *98th Annual Meeting of the Transportation Research Board*. Washington D.C.

- Greenberger, M., Crenson, M., Crissey, B. (1976). *Models in the Policy Process*. New York: Russell Sage Foundation.
- Greenshield, B. D. (1935). *Studying Traffic Capacity by New methods*. Ohio State Highway Department, Granville, Ohio.
- Greiderer, D. (2019). *Untersuchung verkehrsökologischer Indikatoren für die Auswirkungen des Straßenverkehrs im urbanen Raum - Flächenverbrauch, Emissionen und Verkehrslage*. Study Project. Technische Universität München. München.
- Gupta, S., Buriro, A., Crispo, B. (2018). DriverAuth: Behavioral biometric-based driver authentication mechanism for on-demand ride and ridesharing infrastructure. *ICT Express* 5 (1). S. 16–20.
- Hanan, B. (2019). *System Model in the Framework of Sustainable Mobility Planning*. Masterarbeit, Technische Universität München. München.
- Haraldsson, H. V. (2004). *Introducing to System Thinking and Causal Loop Diagrams*. Lund, Schweden.
- Harloff, T. (2018). *Stauhauptstadt München*. Zuletzt aufgerufen am 06.02.2018 unter <http://www.sueddeutsche.de/muenchen/verkehr-stauhauptstadt-muenchen-1.3856416>.
- Harrer, G., Wagner-Lohse, G., Bobsien, A. (2018). Co-developing and Implementing Measures for a New Mobility for Municipalities through Interconnected Thinking & System Analysis. *International Scientific Conference on Mobility and Transport Urban Mobility – Shaping the Future Together mobil.TUM 2018*, München, Deutschland.
- Hautzinger, H., Fuchs, M., Schmidt, J., Stock, W. (2010). *Laufende Hochrechnung der Kfz-Fahrleistungen auf der Basis von Hauptuntersuchungsdaten*. im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung FE-Nr.: 70.0832/2008. Schlussbericht Band 1.
- Henao, A. (2017). *Impacts of Ridesourcing - Lyft and Uber - on Transportation including VKT, Mode replacement, Parking, and Travel Behavior*. Dissertation. University of Colorado.
- Henao, A., Marshall, W. E. (2019). The impact of ride hailing on parking (and vice versa). *The Journal of Transport and Land Use* 12 (1). S. 127–147.
- Holden, E., Linnerud, K., Banister, D. (2013). Sustainable passenger transport: Back to Brundtland, *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 54. S. 67–77.
- Hollingsworth, J., Copeland, B., Johnson, J. (2019). Are e-scooters polluters? The environmental impacts of shared dockless electric scooters. *Environmental Research Letters* 14. 084031.
- Holmberg, P. E., Collado, M., Sarasini, S., Williander, M. (2016). *Mobility as a Service-MaaS. Describing the framework (Final report MaaS framework)*. Göteborg: Viktoria Swedish ICT.
- Homer, J. (1996). Why we iterate: Scientific modeling in theory and practice. *System Dynamics Review* 12 (1). S. 1–19.

- 
- Homer, J., Oliva, R. (2001). Maps and models in system dynamics: a response to Coyle. *System Dynamics Review* 17 (4). S. 347–355.
- Hoyer, K. G. (2000). Sustainable Mobility. The Concept and its Implications. Dissertation, Roskilde University; Western Norway Research Institute, Songdal, Norwegen.
- Hülsmann, F., Wiepking, J., Zimmer, W. (2018). Share -Wissenschaftliche Begleitforschung zu car2go mit batterieelektrischen und konventionellen Fahrzeugen. Abschlussbericht des Öko-Institutes e.V.
- Hürlimann, M. (2009). Dealing with Real-World Complexity: Limits, Enhancements and New Approaches for Policy Makers. Gabler Edition Wissenschaft, Springer Science & Business Media 2009.
- Hutter, D. (2017). Diesel-Fahrverbote: Deutsche Umwelthilfe will Handeln erzwingen. Süddeutsche Zeitung, Zuletzt aufgerufen am 27.11.2017 unter <http://www.sueddeutsche.de/muenchen/luftqualitaet-diesel-fahrverbote-deutsche-umwelthilfe-will-handeln-erzwingen-1.3768156>.
- Iandolo, F., Barile, S., Armenia, S., Carrubo, L. (2018). A system dynamics perspective on a viable systems approach definition for sustainable value. Japan: Springer Japan KK, part of Springer Nature.
- INRIX (2018a). München bleibt Deutschlands Stauhauptstadt – Hamburg und Berlin holen auf. Zuletzt aufgerufen am 18.06.2019 unter <http://inrix.com/press-releases/scorecard-2017-ger/>.
- INRIX (2018b). INRIX 2017 Global Traffic Scorecard.
- INRIX (2019). INRIX 2018 Global Traffic Scorecard.
- INRIX (2020). Online-Tool Roadway-Analytics. Zuletzt aufgerufen am 12.12.2020 unter <http://www2.inrix.com/trial-roadway-analytics>.
- Institut für Mobilitätsforschung (ifmo) (2011). Mobilität junger Menschen im Wandel – multi-modaler und weiblicher. München.
- Inzell-Initiative (2018). Modellstadt2030 - Lebensräume gestalten, Wege zu Ende Denken, Stadtregion Vernetzen, Dialog Starten. Broschüre der Inzell-Initiative. München.
- Inzell-Initiative (2019). Modellstadt München. Mobilität 2030. Ein Projekt der Inzell-Initiative. Lebensqualität und Mobilität steigern. Gleichzeitig. Trotz Wachstum. Vortrag zur Modellstadt2030 im Stadtrat München.
- Jalali, R., Koohi-Fayegh, S., El-Khatib, K., Hoornweg, D., Li, H. (2017). Investigating the Potential of Ridesharing to Reduce Vehicle Emissions. *Urban Planning* 2 (2). S. 26–40.
- Jensen, B., Brehmer, B. (2003). Understanding and control of a simple dynamic system. *System Dynamics Review* 19 (2). S.119–137.
- Jeon, C., Amekudzi, A., Guensler, R. (2008). Sustainability Assessment at the Transportation Planning Level: Performance Measures and Indexes, Conference Paper at the 87th Annual Meeting Transportation Research Board. Washington D.C.

- Jin, S. T., Kong, H., Wub, R., Sui, D. Z. (2018). Ridesourcing the Sharing Economy and the Future of Cities. *Volume 76*. S. 96–104.
- Jittrapirom, P., Caiati, V., Feneri, A. M., Ebrahimigharehbaghi, S., Alonso-González, M., Narayan, J. (2017). Mobility as a Service: A Critical Review of Definitions, Assessments of Schemes, and Key Challenges. *Urban Planning 2* (2). S. 13–25.
- Joumard, R., Gudmundsson, H. (2010). Indicators of environmental sustainability in transport. An interdisciplinary approach to methods, INRETS Institut national de Recherche sur les Transports et leur Sécurité. Brüssel, Belgien.
- Kamargianni, M., Li, W., Matyas, M., Schäfer, A. (2016). A critical review of new mobility services for urban transport. *Transportation Research Procedia 14*. S. 3294–3303.
- Kapalschinski, C. (2019). Billigtaxi Bahn-Tochter Clevershuttle kapituliert vor Behörden und VW. Zuletzt aufgerufen am 17.12.2019 unter <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/handel-konsumgueter/billigtaxi-bahn-tochter-clever-shuttle-kapituliert-vor-behoerden-und-vw/25113482.html?ticket=ST-41744360-Bk0qIP9mJJZexv3meCJb-ap4>.
- Karagiannakidis, D., Sdoukopoulos, A., Gavanas, N., Pitsiava-Latinopoulou, M. (2014). Sustainable urban mobility indicators for medium-sized cities. The case of Serres, Greece. *2nd Conference on Sustainable Urban Mobility*, Volos, Griechenland.
- Karl, A., Maertins, C. (2009). Intermodales Angebotsdesign: Die Schließung der Angebotslücken zwischen öffentlichem Verkehr und privater Mobilität. *InnoZ-Baustein Nr. 5*.
- Karl, A., Mehlert, C., Werner, K. (2017). Reformbedarf PBefG – Rechtsrahmen für Mobilitätsangebote mit flexibler Bedienung unter besonderer Berücksichtigung des Bedarfs in Räumen und für Zeiten mit schwacher Nachfrage. Endbericht. Berlin.
- Keller, M., Hausberger, S., Matzer, C., Wüthrich, P., Notter, B. (2017). HBEFA Version 3.3 Background Dokumentation.
- Kenkmann, T., Hesse, T., Hülsmann, F., Timpe, C. (2017). Klimaschutzziel und –strategie München 2050. Endbericht.
- Knoflacher, H. (1994). Do we use the level of service concept in the right way? *2nd International Symposium on Highway Capacity*. Sydney.
- Knoll, G., Meyer, O. (2019). App verspricht günstigere Taxifahrt vom Flughafen in die Stadt. Zuletzt aufgerufen am 17.12.2019 unter <https://www.sueddeutsche.de/muenchen/taxi-mytaxi-flughafen-1.4133611>.
- Koesling, A. (2018). Abgrenzung und Bestimmung neuer Mobilitätsbegriffe und -konzepte. Bachelorarbeit. Ostfalia für angewandte Wissenschaften in Salzgitter. Salzgitter.
- König, M. (1988). Szenariotechnik. Unterrichtsgegenstand und Unterrichtsmethode in kaufmännischen Schulen. In: Becker, M. und Pleiss G. (Hrsg.): *Wirtschaftspädagogik im Spektrum ihrer Problemstellung*, Baltmannsweiler. S. 260–279.

- 
- Kopp, J., Gerike, R., Axhausen, K.W. (2015). Do sharing people behave differently? An empirical evaluation of the distinctive mobility patterns of free-floating car-sharing members. *Transportation* 42. S. 449–469.
- Kraftfahrtbundesamt (KBA) (2019). Bestand in den Jahren 1960 bis 2019 nach Fahrzeugklassen. Zuletzt aufgerufen am 08.04.2019 unter [https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Fahrzeugklassen-Aufbauarten/b\\_fzkl\\_zeitreihe.html](https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Fahrzeugklassen-Aufbauarten/b_fzkl_zeitreihe.html).
- Kraus, K. S. (2017). A transnational in-depth content analysis of German and American newspaper coverages regarding the Volkswagen organizational crisis. Masterarbeit. University of Twente. Enschede, Niederlande.
- Krietemayer, H. (2003). MVV und Car-Sharing. Auswirkungen der Marketing-Kooperation zwischen dem MVV und der Car-Sharing-Organisation STATTAUTO München.
- Kuckartz, U. (2014). Qualitative Inhaltsanalyse. Methoden, Praxis, Computerunterstützung. Weinheim: Beltz Juventa.
- Kuckartz, U., Grunenberg, H. (2013). Qualitative Daten computergestützt auswerten: Methoden, Techniken, Software. In: Friebertshäuser, B. Langer, A., Prengel, A. (Hg.): Handbuch Qualitative Forschungsmethoden in der Erziehungswissenschaft. 4. Aufl. Weinheim, München: Beltz Juventa. S. 501–514.
- Landeshauptstadt München (2004). Mobilität in Deutschland (MiD) Kurzbericht Landeshauptstadt München. Referat für Stadtplanung und Bauordnung (Hg.). München.
- Landeshauptstadt München (2006). Verkehrsentwicklungsplan. Referat für Stadtplanung und Bauordnung der Landeshauptstadt München (Hg.). München.
- Landeshauptstadt München (2008). Mobilität in Deutschland (MiD) - Alltagsverkehr in München, im Münchner Umland und im MVV-Verbundraum. Referat für Stadtplanung und Bauordnung (Hg.). München.
- Landeshauptstadt München (2010). Radverkehr in München. Referat für Stadtplanung und Bauordnung der Landeshauptstadt München (Hg.). München.
- Landeshauptstadt München (2012). Klimaschutz in München. Klimaschutzbericht 2012.
- Landeshauptstadt München (2015a). Nahverkehrsplan München Beschluss 14-20 (LHM Beschluss 14 – 20/ V 03603). München.
- Landeshauptstadt München (2015b). Beschluss des Kreisverwaltungsausschusses vom 15.12.2015 (VB). Öffentliche Sitzung. CarSharing in München. Evaluationsergebnisse des Pilotversuchs und Empfehlungen (EVA-CS). Förderung von CarSharing und Elektro-CarSharing in München.
- Landeshauptstadt München (2017). Demografiebericht München – Teil 1. Analyse und Bevölkerungsprognose 2015 bis 2035, Referat für Stadtplanung und Bauordnung der Landeshauptstadt München (Hg.). München.
- Landeshauptstadt München (2018a). Verkehrsflächenstatistik Stand 01.01.2016 mit Ergänzung Statistik 2016 - 2017. Baureferat HA Tiefbau Landeshauptstadt München.

- Landeshauptstadt München (2018b). Darstellung der derzeit möglichen Gesamtkapazität des ÖPNV innerhalb der Stadtgrenzen. Referat für Arbeit und Wirtschaft.
- Landeshauptstadt München (2019a). Zukunftsschau München 2040+ Szenario-Prozess und Werkstattreihe. Referat für Stadtplanung und Bauordnung (Hg.). München.
- Landeshauptstadt München (2019b). Mobilitätsplan für München – Modellstadt München 2030. Referat für Stadtplanung und Bauordnung. Sitzungsvorlagen Nr. 14-20 / V13893. München.
- Landeshauptstadt München (2019c). Demografiebericht München – Teil 1 Analyse und Bevölkerungsprognose 2017 bis 2040 für die Landeshauptstadt. Referat für Stadtplanung und Bauordnung. München.
- Landeshauptstadt München (2019d). Der Kraftfahrzeugbestand in der Stadt München 2016 - 2018. Kreisverwaltungsreferat, Fahrzeugzulassungs- und Fahrerlaubnisbehörde. München.
- Landeshauptstadt München (2019e). Verkehrsentwicklungsplan. Zuletzt aufgerufen am 14.12.2019 unter <https://www.muenchen.de/rathaus/Stadtverwaltung/Referat-fuer-Stadtplanung-und-Bauordnung/Verkehrsplanung/Verkehrsentwicklungsplan-VEP-2006.html>.
- Landeshauptstadt München (2020a). Parkraummanagement: 62 Parklizenzzgebiete. Zuletzt aufgerufen am 20.03.2020 unter <https://www.muenchen.de/rathaus/Stadtverwaltung/Referat-fuer-Stadtplanung-und-Bauordnung/Verkehrsplanung/Parken-Ruhender-Verkehr/Parkraummanagement.html>.
- Landeshauptstadt München (2020b). Luftreinhaltung in München. Zuletzt aufgerufen am 20.03.2020 unter [https://www.muenchen.de/rathaus/Stadtverwaltung/Referat-fuer-Gesundheit-und-Umwelt/Luft\\_und\\_Strahlung/FAQ\\_Luftreinhaltung.html](https://www.muenchen.de/rathaus/Stadtverwaltung/Referat-fuer-Gesundheit-und-Umwelt/Luft_und_Strahlung/FAQ_Luftreinhaltung.html).
- Lane, D. C. (2007). The power of the bond between cause and effect: Jay Wright Forrester and the field of system dynamics. *System Dynamics Review* 23 (2-3). S. 95–118.
- Lautso, K., Spiekermann, K., Wegener, M., Sheppard, I., Steadman, P., Martino, A., Domingo, R., Gayda, S. (2004). Planning and Research of Policies for Land Use and Transport for Increasing Urban Sustainability. PROPOLIS Final Report. EVK4-1999-00005.
- Leben, J. (2016). Rad Fahrende. Wer sie sind und was sie brauchen: LIT Verlag (Mobilität und Gesellschaft, 7).
- Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung e. V. (IÖR) (2018). Flächenverbrauch und Zersiedelung – Ein Umweltproblem der Siedlungsentwicklung, Katalog zur Ausstellung. S. 6–8.
- Li, B. (2017). Future Roles of Public Authorities in Mobility as a Service (MaaS). Workshop Report. SPICE - Smart procurement for better Transport.
- Li, J., Earnest, J. (2015). Das Beste aus zwei Welten - Vorteile einer Kombination von quantitativen und qualitativen Forschungsmethoden. Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung. (150). S. 30-33.

- 
- Linden, A., Fenn, J. (2003). Understanding Gartner's Hype Cycles. Strategic Analysis Report Gartner Research.
- Listl, G., Gerstenberger, M. (2018). Masterplan zur Luftreinhaltung für die Landeshauptstadt München. Green City Masterplan (GCP) München. Im Auftrag der Landeshauptstadt München, Referat für Gesundheit und Umwelt. München.
- Listl, G., Gerstenberger, M., Nagel, V. (2017). Ermittlung der Straßenabschnitte in München mit Grenzwertüberschreitung für Stickstoffdioxid. Im Auftrag des Bayerischen Landesamtes für Umwelt. Augsburg.
- Litman, T. A. (2007). Developing Indicators for Comprehensive and Sustainable Transport Planning. *Transportation Research Record* 2007. S. 10–15.
- Litman, T. A. (2019). Well Measured - Developing Indicators for Sustainable and Livable Transport Planning. Victoria Transport Policy Institute.
- Litman, T. A., Burwell, D. (2006). Issues in sustainable transportation. *International Journal for Global Environmental Issues* 6 (4). S. 331–347.
- Liyanage, S., Dia, H., Abduljabbar, R., Bagloee, S.A. (2019). Flexible Mobility On-Demand: An Environmental Scan. *Sustainability* 11. 1262.
- Loose, W. (2010). The State of European Car-Sharing. Final Report D 2.4 Work Package 2. Bundesverband CarSharing e. V. Berlin.
- Loose, W. (2016). Mehr Platz zum Leben – wie CarSharing Städte entlastet. Endbericht des Bundesverband CarSharing e. V. Berlin.
- Lorkowski, S., Brockfeld, E., Mieth, P., Passfeld, B., Thiessenhusen, K. U., Schäfer, R.-P. (2003). Erste Mobilitätsdienste auf Basis von "Floating Car Data". Tagungsband 4. Aachener Kolloquium Mobilität und Stadt. Aachen. S. 93–100.
- Machado, C. A., Hue, N. P., Berssaneti, F. T., Quintanilha, J. A. (2018). An Overview of Shared Mobility. *Sustainability* 10. 4342.
- Mailer, M., Wulfhorst, G., Bogenberger, K., Kesselring, S., Keil, M., Reiter, M. (2014). Mobility 2050. Region of Munich – Creating a common vision for sustainable development in an unique Public Private Cooperation. *Transportation Research Procedia* 4. S. 557–565.
- Majedi, H., Habib, F., Khanloo, N. (2012). An Analysis to Challenges of Sustainable Urban Transport in Metropolitan Areas. *Journal of Basic and Applied Scientific Research* 2 (10). S. 10523–10527.
- Manz, W., Elgendy, H., Berger, J. (2017). Urban Mobility in China. Institut für Mobilitätsforschung (Hrsg.). München.
- Marczuk, K. A., Hong, H. S., Azevedo, C. M., Adnan, M., Pendleton, S. D., Frazzoli, E., Lee, H. (2015). Autonomous Mobility on Demand in SimMobility: Case Study of the Central Business District in Singapore. Conference Paper presented at the *IEEE 7th International Conference on Cybernetics and Intelligent Systems (CIS)* and *IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM)*.

- Marsden, D. G., Kelly, C., Nellythrop, J., Lucas D. K., Brooks M. (2005). A Framework for the Appraisal of Sustainability in Transport.
- Marsden, G. (2007). Defining and Measuring Progress Towards a Sustainable Transport System. TRB Sustainable Transportation Indicators (STI) Discussion Paper.
- Martin, E. W., Shaheen, S. (2010). Greenhouse Gas Emission Impacts of Carsharing in North America. Mineta Transportation Institute.
- Martin, E. W., Shaheen, S. (2016). The Impacts of Car2go on Vehicle Ownership, Modal Shift, Vehicle Miles Traveled, and Greenhouse Gas Emissions: An Analysis of Five North American Cities. Working Paper.
- Martin, E. W., Shaheen, S., Lidicker, J. (2010). Impact of Carsharing on Household Vehicle Holdings. Results from North American Shared-Use Vehicle Survey. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2143. S. 150–158.
- Mayring, P. (2010). Qualitative Inhaltsanalyse. Grundlagen und Techniken. 11., aktualisierte und überarbeitete Auflage. Weinheim: Beltz.
- McKinsey & Company (2015). Urban Mobility at a tipping point. McKinsey Center for Business and Environment.
- McKinsey & Company (2016). Automotive revolution - perspective towards 2030. How the convergence of disruptive technology-driven trends could transform the auto industry. McKinsey Center for Business and Environment.
- Meadows, D. (2009). Thinking in Systems.
- Meadows, D., Meadows, D. H., Randers, J., Behrens, W. (1972). The Limits to Growth. New York: Universe Press.
- Mega, V., Pedersen, J. (1998). Urban Sustainability Indicators. European Foundation for the Improvement of Living and Working Conditions. Luxemburg.
- Mehlert, C., Schiefelbusch, M. (2017). Neuer ÖPNV? - On-demand versus Linie: Disruption oder Hype? *Der Nahverkehr* (35). S. 6–12.
- Metropolitan Area Planning Council of the City of Boston (MAPC) (2018). Share of Choices - Further Evidence of the ride-hailing effect in Metro Boston and Massachusetts. Research Brief.
- Millard-Ball, M., Murray, G., Ter Schure, J., Fox, C., Burkhardt, J. (2005). Car-Sharing: Where and How It Succeeds. Transit Cooperative Research Program (TCRP) Report 108, published by Transportation Research Board, Washington.
- Miller, J., How, J. P. (2017). Predictive positioning and quality of service ridesharing for campus mobility on demand systems. Proceedings of the *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Singapur. S. 1402–1408.
- Miramontes, M. (2019). Assessment of mobility stations. Success factors and contributions to sustainable urban mobility. Dissertation, Technische Universität München. München.

- 
- Mitran, G., Ilie, S., Igret, S.V., Mihailescu, S. (2019). Sustainable mobility as a result of peoples' awareness on environmental problems generated by transport activity. IOP Conference Series: *Materials Science and Engineering* 568. 012025.
- mobil.LAB Promotionskolleg (2014). Our understanding of sustainable mobility. A working document from the mobil.LAB Doctoral Research Group "Sustainable Mobility in the Metropolitan Region of Munich". Unveröffentlichtes Arbeitsdokument.
- Mogge, K. (2018). Abgrenzung und Begriffsbestimmung neuer Mobilitätskonzepte - Analyse des Begriffs- und Konzeptverständnisses von Bürgern bezüglich neuer, bedarfsorientierter Mobilitätsangebote. Masterarbeit. Johannes Gutenberg-Universität Mainz.
- Münchener Verkehrs- und Tarifverbund (MVV) (2018). 3. Fortschreibung des regionalen Nahverkehrsplan für das Gebiet des Münchener Verkehrs- und Tarifverbundes.
- Münchener Verkehrs- und Tarifverbund (MVV) (2019a). Park & Ride – mit Auto zum Bahnhof, mit der Bahn zum Ziel. Zuletzt aufgerufen am 20.03.2020 unter <https://www.mvv-muenchen.de/service/weitere-mobilitaetsangebote/park-ride/index.html>.
- Münchener Verkehrs- und Tarifverbund (MVV) (2019b). Der MVV in Zahlen - Daten, Zahlen, Fakten. Zuletzt aufgerufen am 20.03.2020 unter <https://www.mvv-muenchen.de/mvv-und-service/der-verbund/mvv-in-zahlen/index.html>.
- Münchener Verkehrsgesellschaft (MVG) (2016). Nachhaltigkeitsbericht der Münchener Verkehrsgesellschaft (MVG) 2014/2015.
- NACTO (2019). Shared Micromobility in the U.S.: 2018. Zuletzt aufgerufen am 20.03.2020 unter [https://nacto.org/wp-content/uploads/2019/04/NACTO\\_Shared-Micromobility-in-2018\\_Web.pdf](https://nacto.org/wp-content/uploads/2019/04/NACTO_Shared-Micromobility-in-2018_Web.pdf).
- Newman, P. W., Kenworthy, J. R. (1996). The Land Use – Transport Connection. *Land use Policy*. S. 1–22.
- Nicolas J. P., Pochnel, P. (2003). Towards Sustainable Mobility Indicators: Application to the Lyons Conurbation. *Transport Policy* 10 (3). S. 197–208.
- Nijland, H., van Meerkerk, J. (2017). Mobility and environmental impacts of car sharing in the Netherlands. *Environmental Innovation and Societal Transitions* 23. S. 84–91.
- Nijland, H., van Meerkerk, J., Hoen, A. (2015). Impact of carsharing on Mobility and CO<sub>2</sub> Emissions.
- Nikitas, A. (2019). How to Save Bike-Sharing: An Evidence-Based Survival Toolkit for Policy-Makers and Mobility Providers. *Sustainability* 11. 3206.
- OECD (1996). Towards Sustainable Transportation. OECD proceedings, The Vancouver Conference.
- OECD (2008). OECD Key Environmental Indicators. Paris. Frankreich.
- OECD (2015). Urban Mobility System Upgrade - How shared self-driving cars could change city traffic. Bericht des International Transport Forum.

- Panek, E. T. (2012). Immediate Media: How Instant Gratification, Self-Control, and the Expansion of Media Choice Affect our Everyday Lives. Dissertation. University of Michigan.
- Papula L. (2000). Gaußsches Fehlerfortpflanzungsgesetz. Mathematische Formelsammlung für Ingenieure und Naturwissenschaftler. Viewegs Fachbücher der Technik. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden.
- PBefG. (1990). Personenbeförderungsgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 08.08.1990 (BGBl. I S. 1690), das zuletzt durch Artikel 4 des Gesetzes vom 03.03.2020 (BGBl. I S. 433) geändert worden ist.
- Peterson, D., Eberlein, R. (1994). Reality check: A bridge between systems thinking and system dynamics. *System Dynamics Review* 10 (2-3). S. 159–174.
- Pfaffenbichler, P., Emberger, G., Shepherd, S. (2008). The Integrated Dynamic Land Use and Transport Model MARS. *Networks and Spatial Economics* 8 (2–3). S. 183–200.
- Pisarski, A. E. (2006). Commuting in America - the Third National Report on Commuting Patterns and Trends. Transportation Research Board. Washington D.C.
- Plewnia, F., Guenther, E. (2018). Mapping the sharing economy for sustainability research. *Management Decision*. 0025-1747.
- Price, J., DeMaio, P., Hamilton, C. (2006). Arlington Carshare Program. Arlington: Arlington County Commuter Services, Division of Transportation.
- Priester, R., Kenworthy, J., Wulfhorst, G. (2013). The Diversity of Megacities Worldwide: Challenges for the Future of Mobility. In: Institute for Mobility Research (Hrsg.), Megacity Mobility Culture (S. 23-54). Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Priester, R., Miramontes, M., Wulfhorst, G. (2014). A Generic Code of Urban Mobility: How can Cities Drive Future Sustainable Development? *Transportation Research Procedia* 4. S. 90–102.
- Pruyt, E. (2013). Small System Dynamics Models for Big Issues: Triple Jump towards Real-World Complexity. Delft: TU Delft.
- PwC (2018). Share Economy 2017 - The New Business Model. Zuletzt aufgerufen am 20.03.2020 unter <https://www.pwc.de/de/digitale-transformation/share-economy-report-2017.pdf>.
- Ramani, T. (2009). Developing Sustainable Transportation Performance Measures for TxDOT's Strategic Plan – Technical Report, Texas Transportation Institute for the Texas Department of Transportation.
- Randelhoff, M. (2014). Vergleich unterschiedlicher Flächeninanspruchnahmen nach Verkehrsarten (pro Person). Zuletzt abgerufen am 03.11.2018 unter <https://www.zukunft-mobilitaet.net/78246/ana-lyse/flaechenbedarf-pkw-fahrrad-bus-strassenbahn-stadtbahn-fussgaenger-metro-bremsver-zoegerung-vergleich/>.
- Randers, J. (1980). Elements of the System Dynamics Method. MIT Press/Wright-Allen Series in System Dynamics. Cambridge, MA: The MIT Press.

- 
- Reibnitz, U. (1991). Szenario-Technik. Instrumente für die unternehmerische und persönliche Erfolgsplanung. Wiesbaden.
- Reicher, C. (2014). Städtebauliches Entwerfen. Springer Fachmedien, Wiesbaden.
- Rencken, A., Schmidt, P., Stroh, K. (2019). MVG Streik – Dann eben mit Rad. Zuletzt aufgerufen am 14.03.2020 unter <https://www.sueddeutsche.de/muenchen/muenchen-mvg-streik-pendler-fahrrad-1.4517369>.
- Renne, J. (2009). Evaluating Transit-Oriented Development Using a Sustainability Framework: Lessons from Perth's Network City. Planning Sustainable Communities, Sasha Tsenkova, ed., University of Calgary, S. 115-148.
- Richardson, G. (1996). Problems for the future of system dynamics. *System Dynamics Review* 12 (2). S. 141–157.
- Richardson, G. (1999). Reflections for the future of system dynamics. *Journal of the Operational Research Society* 50 (4). S. 440–449.
- Richardson, G., Pugh A. I. (1981). Introduction to System Dynamics Modeling. Productivity Press: Portland. Previously published by MIT Press.
- Richmond, B. (1993). Systems thinking: Critical thinking skills for the 1990s and beyond, *System Dynamics Review* 9 (2). S. 113–134.
- Riegler, S., Juschten, M., Hössinger, R., Gerike, R., Rößger, L., Schlag, B., Manz, W., Rentschler, C., Kopp, J. (2016). Carsharing 2025 - Nische oder Mainstream? Institut für Mobilitätsforschung (Hrsg.). München.
- Rigole, P.-J. (2014). Study of Shared Autonomous Vehicles Based Mobility Solution in Stockholm. Masterarbeit. Royal Institute of Technology. Stockholm.
- Rode, P. (2013). Trends and Challenges: Global Urbanisation and Urban Mobility. In: Institute for Mobility Research (Hrsg.), Megacity Mobility Culture (S. 3-21). Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Rode, P., Hoffmann, C., Kandt, J., Smith, D., Graff, A. (2015). Toward New Urban Mobility: The case of London and Berlin. Peter Griffiths (ed). LSE Cities/InnoZ. London School of Economics and Political Science: London.
- Rodenbach, J., Mathis, J., Chicco, A., Diana, M. (2018). Car sharing in Europe: a multidimensional classification and inventory. Shared mobility opportunities and challenges for European Cities (STARS). Research and Innovation Action. H2020-MG-2016-2017.
- Roland Berger. (2016). A CEO agenda for the (r)evolution of the automotive ecosystem. Study highlights. Unveröffentlichtes Arbeitsdokument.
- Rosnay, J. (1979). The Macroscope. New York.
- Rupprecht, S., Brand, L., Böhler-Baedeker, S., Brunner, L. M. (2013). Guidelines. Developing and Implementing a Sustainable. Rupprecht Consult (editor), Guidelines for Developing and Implementing a Sustainable Urban Mobility Plan, Second Edition, 2019.

- Rydén, C., Morin, E. (2005). Environmental assessment. Report WP 6. Moses - Mobility Services for urban Sustainability. Trivector Traffic AB. Stockholm, Sweden.
- Rye, T., Stanchev, D. (2016). City level Sustainable Mobility Indicator Descriptions.
- Santia, P., Resta, G., Szell, M., Sobolevsky, S., Strogatz, S. H., Ratti, C. (2014). Quantifying the benefits of vehicle pooling with shareability networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111 (37). S. 13290–13294.
- Schaller, B. (2017). Unsustainable? The Growth of App-Based Ride Services and Traffic, Travel and the Future of New York City. New York.
- Schaller, B. (2018). The New Automobility: Lyft, Uber and the Future of American Cities. New York.
- Schiller, C. (2010). Auslastungsabhängige Attraktivitäten in makroskopischen Zielwahlmodellen. *Straßenverkehrstechnik* 2010 (5). S. 285–291.
- Schmidt, D. (2020). Marktanalyse von Mobilitätsanbietern in der Stadt München. Study Project. Technische Universität München. München.
- Schreier, H., Becker, U., Heller, J. (2015). Evaluation CarSharing (EVA-CS) Landeshauptstadt München (teamred). Endbericht.
- Schreier, M. (2014). Varianten qualitativer Inhaltsanalyse: Ein Wegweiser im Dickicht der Begrifflichkeiten. In: Forum Qualitative Sozialforschung / Forum: *Qualitative Social Research* 15 (1).
- Schruben, L. W. (1980). Establishing the Credibility of Simulations. *Simulation* 34 (3). S. 101–105.
- Schubert, A. (2018). Elektroroller-Flotte in München soll ausgebaut werden. Zuletzt aufgerufen am 17.12.2019 unter <https://www.sueddeutsche.de/muenchen/mobilitaet-elektroroller-flotte-in-muenchen-soll-ausgebaut-werden-1.3921871>.
- Schubert, A. (2019a). Wie sich der Carsharing-Markt verändert. Zuletzt aufgerufen am 17.12.2019 unter <https://www.sueddeutsche.de/muenchen/muenchen-verkehr-carsharing-e-scooter-tier-1.4495514>.
- Schubert, A. (2019b). Verkehrswende - Raus aus dem Stau. Zuletzt aufgerufen am 14.12.2019 unter <https://www.sueddeutsche.de/muenchen/muenchen-verkehr-verkehrswende-zukunft-1.4636557>.
- Schubert, H. (2000). Städtischer Raum und Verhalten. Springer Fachmedien, Wiesbaden.
- Schuster, M., Steinacher, I., Tomschy, R. (2015). Car Sharing Wien - Evaluierung. Wien.
- Senge, P. (1990). The Fifth Discipline, the Art and Practice of the Learning Organization. New York, NY: Doubleday/Currency.
- Setzwein, E. C. (2019). Gemeinschaftlich mobil. Zuletzt aufgerufen am 16.12.2019 unter <https://www.sueddeutsche.de/muenchen/fuerstenfeldbruck/sz-serie-start-up-folge-12-gemeinschaftlich-mobil-1.4607553>.

- 
- SFCTA (2018). TNC's and Congestion. Draft Report. San Francisco County Transportation Authority (SFCTA). San Francisco.
- Shaheen, S., Chan, N., Bansal, A., Cohen, A. (2016). Shared Mobility: A Sustainability and Technologies Workshop—Definitions, Industry Developments, and Early Understanding; Transportation Sustainability Research Center, University of California, Berkeley and California Department of Transportation: Richmond, CA, USA.
- Shaheen, S., Cohen, A. (2013). Carsharing and Personal Vehicle Services: Worldwide Market Developments and Emerging Trends, *International Journal of Sustainable Transportation* 7 (1). S. 5–34.
- Shaheen, S., Cohen, A., Bayen, A. (2018). The Benefits of Carpooling—The Environmental and Economic Value of Sharing a Ride; U.C. Berkeley: Berkeley, CA, USA.
- Shaheen, S., Cohen, A., Chung, A. (2009). North American Carsharing 10-Year Retrospective. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. S. 35–44.
- Shaheen, S., Cohen, A., Yelchuru, B., Sarkhili, S. (2018). Mobility on Demand Operational Concept Report. Transportation Sustainability Research Center, University of California, Berkeley and California Department of Transportation: Richmond, CA, USA.
- Shaheen, S., Cohen, A., Zohdy, I. (2016). Shared Mobility: Current Practices and Guiding Principles; U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration: Washington, D.C.
- Shen, W., Lopes, C. (2015). Managing Autonomous Mobility on Demand Systems for Better Passenger Experience. Presented at PRIMA 2015 – *Principles and Practice of Multi-Agent Systems 18th International Conference*, Bertinoro, Italien.
- Shen, Y., Hermans, E. (2017). Developing a Sustainable Urban Mobility Index. In: Jeremic, V. et al. (Eds.), *Emerging Trends in the Development and Application of Composite Indicators*, IGI Global, S. 20–37.
- Shepherd, S. P. (2014). A Review of System Dynamics Models Applied in Transportation. *Transportmetrica B: Transport Dynamics* 2 (2). S. 83–105.
- Shepherd, S. P., Emberger, G. (2010). Introduction to the special issue: system dynamics and transportation. *System Dynamics Review* 26 (3). S. 193–194.
- Shoup, D.C. (2006). Cruising for parking. *Transport Policy* 13. S. 479–486.
- Slavik, A. (2019). Moia muss Flotte reduzieren. Zuletzt aufgerufen am 17.12.2019 unter <https://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/moia-hamburg-shuttledienst-vw-bus-1.4420652>.
- Soteropoulos, A., Berger, M., Ciari, F. (2019). Impacts of automated vehicles on travel behaviour and land use: an international review of modelling studies, *Transport Reviews* 39 (1). S. 29–49.

- Spieser, K., Ballantyne, K. T., Zhang, R., Frazzoli, E., Morton, D., Pavone, M. (2014). Toward a Systematic Approach to the Design and Evaluation of Automated Mobility on-Demand Systems A Case Study in Singapore. In: Gereon Meyer, Sven Beiker (editors). Road Vehicle Automation, (Lecture Notes in Mobility).
- Statistisches Amt für Hamburg und Schleswig-Holstein (Statistikamt Nord) (2015). Die wirtschaftliche Lage des Hamburger Taxengewerbes 2014. Abschlussbericht im Auftrag der Freien und Hansestadt Hamburg. Behörde für Wirtschaft, Verkehr und Innovation.
- Statistisches Amt München (2017). Die Münchner Verkehrsgesellschaft mbH (MVG) 2014 - 2016. Zuletzt aufgerufen am 17.11.2018 unter <https://www.muenchen.de/rathaus/Stadtfinfos/Statistik/Verkehr.html>.
- Sterman, J. (2000). Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world. Irwin/McGraw-Hill: Boston.
- Sterman, J. (2002). All models are wrong: reflections on becoming a systems scientist. *System Dynamics Review* 18 (4). S. 501–531.
- Sterzer, L. (2019). Wohnen und Mobilität im Kontext von Fremdbestimmung und Exklusion. Dissertation. Technische Universität München. München.
- StMUV (2015). Luftreinhalteplan für die Stadt München 6. Fortschreibung. Bayrisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV).
- StMUV (2019). 7. Fortschreibung des Luftreinhalteplans für die Stadt München. Bayrisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV).
- Strohhecker, J. (2008). System Dynamics für die Finanzindustrie: simulieren und analysieren dynamisch-komplexer Probleme. Frankfurt-School-Verlag, 2008.
- Sürig, D. (2019). Mieten, teilen, Taxi fahren. Zuletzt abgerufen am 21.03.2020 unter <https://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/sixt-mieten-teilen-taxi-fahren-1.4350541>.
- Sweeney, L. B., Sterman, J. (2000). Bathtub dynamics: initial results of a systems thinking inventory. *System Dynamics Review* 16 (4). S. 249–286.
- Tachet, R., Sagarra, O., Santi, P., Resta, G., Szell, M., Strogatz, S. H., Ratti, C. (2017). Scaling Law of Urban Ride Sharing. *Nature Scientific Report* 7. 42868.
- Tagesspiegel (2016). Interview mit BMW Vorstandsvorsitzendem Harald Krüger. Zuletzt aufgerufen am 20.10.2017 unter <http://www.tagesspiegel.de/advertorials/ots/bilanz-bmw-chef-kontrolle-ist-gut-vertrauen-ist-besser-harald-krueger-laesst-den-mitarbeitern-des-autokonzerns-mehr-freiraum-/13048566.html>.
- TRB (1997). Toward A Sustainable Future; Addressing the Long-Term Effects of Motor Vehicle Transportation on Climate and Ecology. Committee for a Study on Transportation and a Sustainable Environment. National Academy Press.
- Treiber, M., Kesting, A. (2010). Verkehrsdynamik und -simulation – Daten, Modelle und Anwendungen der Verkehrsflussdynamik. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg.

- 
- Trommer, S., Kolarova, V., Fraedrich, E., Kröger, L., Kickhöfer, B., Kuhnimhof, T., Lenz, B., Phleps, P. (2016). *Autonomous Driving - The impact of vehicle Automation on Mobility Behaviour*. Institut für Mobilitätsforschung (Hrsg.). München.
- Tully, C. (2011). Mobilisierung des Mobilen Trends in der Jugendmobilität. *Der Nahverkehr* 7-8. S. 12–15.
- Tully, C. (2018). Mobile Technik - Umgang und Aneignung anhand von vier Thesen. In: de Witt C., Gloerfeld C. (eds) *Handbuch Mobile Learning*. Springer VS, Wiesbaden.
- Tully, C., Alfaraz, C. (2017). Youth and mobility: The lifestyle of the new generation as an indicator of a multi-local everyday life. *Applied Mobilities*. DOI: 10.1080/23800127.2017.1322778.
- Tully, C., Baier, D. (2006). *Mobiler Alltag - Mobilität zwischen Optionen und Zwang - Vom Zusammenspiel biografischer Motive und sozialer Vorgaben*. VS Verlag für Sozialwissenschaften. Wiesbaden.
- Tunsch, C. (2015). *Bildungseffekte urbaner Räume*. Springer Fachmedien, Wiesbaden.
- Umweltbundesamt (UBA) (2016a). Die Treibhausgase. Zuletzt aufgerufen am 10.05.2019 unter <http://www.europarl.europa.eu/news/de/-head-lines/society/20180301STO98928/treibhausgasemissionen-nach-landern-und-sektoren-info-grafik>.
- Umweltbundesamt (UBA) (2016b). Emissionsquellen. Zuletzt aufgerufen am 10.05.2019 unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/treibhausgas-emissionen/emissionsquellen#textpart-1>.
- Umweltbundesamt (UBA) (2017). Flächeninanspruchnahme für Siedlungen und Verkehr reduzieren. Zuletzt aufgerufen am 05.05.2019 unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/boden-landwirtschaft/flaechensparen-boeden-land-schaften-erhalten/flaechen-inanspruchnahme-fuer-siedlungen-verkehr#textpart-1>.
- Umweltbundesamt (UBA) (2018a). Spezifische Emissionen Pkw (Emissionen Pkw / Verkehrsaufwand Pkw). Zuletzt aufgerufen am 20.03.2020 unter <https://www.umweltbundesamt.de/bild/spezifische-emissionen-pkw-emissionen-pkw>.
- Umweltbundesamt (UBA) (2018b). Emissionen prioritärer Luftschadstoffe. Zuletzt aufgerufen am 20.03.2020 unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/luft/luftschadstoff-emissionen-in-deutschland/emissionen-prioritaerer-luftschadstoffe>.
- Umweltbundesamt (UBA) (2018c). Umweltzonen in Deutschland. Zuletzt aufgerufen am 20.03.2020 unter <https://www.umweltbundesamt.de/-the-men/luft/luftschadstoffe/feinstaub/umweltzonen-in-deutschland#textpart-1>.
- UNECE (2011). *Transport for Sustainable Development in the ECE Region*, United Nations Economic Commission for Europe.
- United Nations (UN) (2015). *Sustainable Urban Mobility and Public transport in UNECE Capitals*. Transport Trends and Economics Series (WP.5). (ECE/TRANS/245). New York: United Nations.

- United Nations (UN) (2019). World Urbanization Prospects: The 2018 Revision. Department of Economic and Social Affairs, Population Division. (ST/ESA/SER.A/420). New York: United Nations.
- Vallone, P. (2001). The Green Transport Hierarchy. *Transportation Alternatives* 7 (2). S. 9.
- Vester, F. (1990). *Ausfahrt Zukunft. Strategien für den Verkehr von morgen. Eine Systemuntersuchung.* Wilhelm Heyne Verlag. München.
- Vester, F. (1996). *Crashtest Mobilität - Die Zukunft des Verkehrs, Fakten, Strategien, Lösungen.* Wilhelm Heyne Verlag. München.
- Vester, F. (2002). *Die Kunst vernetzt zu denken – Ideen und Werkzeuge für einen neuen Umgang mit Komplexität. Ein Bericht an den Club of Rome.* Deutscher Taschenbuch Verlag. München.
- Villeneuve, D., Duran-Rodas, D., Ferri, A., Kuttler, T., Magelund, J., Mögele, M., Nitschke, L., Servou, E., Silva, C., (2019). What is Interdisciplinarity in Practice? Critical Reflections on Doing Mobility Research in an Intended Interdisciplinary Doctoral Research Group. *Sustainability* 2020, 12. 197.
- Voinov, A. (2008). *Systems science and modeling for ecological economics.* 1. Auflage Elsevier Academic Press, Amsterdam/Boston.
- Von Peinen, A. (2017). *Der Einfluss des autonomen Fahrens auf die Geschäftsdynamik der On Demand Mobilität anhand einer Geschäftsmodellsimulation.* Masterarbeit. Technische Universität München. München.
- Von Peinen, A., Böhmer, A. I., Lindemann, U. (2018). System Dynamics as a Tool for Data Driven Business Model Design in the Context of Autonomous Ride Hailing. Conference Paper at the *2018 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)*.
- Wang, P., Hunter, T., Bayen, A., Schechtner, K., González, M. (2012). Understanding Road Usage Patterns in Urban Areas. School of Traffic and Transportation Engineering, Central South University, Changsha, China.
- Warren, K., Langley, P. (1999). The effective communication of system dynamics to improve insight and learning in management education. *Journal of the Operational Research Society* 50 (4). S. 396–404.
- WCED (1987). *Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future.* Zuletzt aufgerufen am 25.10.2019 unter <http://www.un-documents.net/our-common-future.pdf>.
- Wefering, F., Rupprecht, S., Bührmann, S., Böhrler-Baedeker, S. (2014). *Guidelines. Developing and Implementing a Sustainable Urban Mobility Plan.*
- Weinberger, P. (2019). *Szenariotechnik.* Zuletzt aufgerufen am 20.03.2020 unter <https://www.sowi-online.de/praxis/methode/szenariotechnik.html>.

- 
- Weinbrenner, P. (1994). Die Wiedergewinnung der Zukunft als universale Bildungsaufgabe - Zukunftswerkstatt und Szenariotechnik im Methodenvergleich. In: Fischer, A., Hartmann, G. (Hrsg.): Ökologisches Lernen - Projekte stellen sich vor. Hattinger Materialien zur beruflichen Umweltbildung. 11. Hattingen. S. 75–114.
- Welte, J. (2016). Radwege blockiert: Stadt geht gegen Park-Rowdys vor. Tageszeitung (tz). Zuletzt aufgerufen am 12.02.2016 unter <https://www.tz.de/muenchen/stadt/radwege-blockiert-stadt-geht-gegen-park-rowdys-6116582.html>.
- Wilson, E. O. (1998). *Consilience: the Unity of Knowledge*. Alfred Knopf (New York).
- Wolf, C., Person, F., Jelse, K. (2012). A Logistic Analysis with the Sensitivity Model Prof. Vester. Technical Report B2048, IVL Swedish Environmental Research Institute Ltd.
- Wolstenholme, E. (1994). *Modeling for Learning Organizations*, Chapter A systematic approach to model creation. Portland, OR: Productivity Press.
- Wolstenholme, E. (1999). Qualitative vs quantitative modelling: the evolving balance. *Journal of the Operational Research Society* 50 (4). S. 422–428.
- Wolstenholme, E. (2003). Towards the definition and use of a core set of archetypal structures in system dynamics. *System Dynamics Review* 19 (1). S. 7–26.
- World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) (2001). *Mobility 2001: World Mobility at the End of the Twentieth Century and its Sustainability*, Massachusetts Institute of Technology and Charles River Associates for the WBCSD Sustainable Mobility Working Group. Genf, Schweiz.
- World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) (2004). *Mobility 2030: Meeting the Challenges to Sustainability*, WBCSD Sustainable Mobility Project. Genf, Schweiz.
- World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) (2015). *Methodology and indicator calculation method for sustainable urban mobility*. Genf, Schweiz.
- World Health Organization (WHO) (2013). *Health effects of particulate matter - Policy implications for countries in eastern Europe, Caucasus and central Asia*. Kopenhagen, Dänemark.
- Wulfhorst, G. (2003). *Flächennutzung und Verkehrsverknüpfung an Bahnhöfen – Wirkungsabschätzung mit systemdynamischen Modellen*. Dissertation. RWTH Aachen. Bericht 49 des Instituts für Stadtbauwesen und Stadtverkehr. Aachen.
- Wulfhorst, G., Priester, R., Miramontes, M. (2013). *What Cities Want – How cities plan future mobility*. Im Auftrag und veröffentlicht durch MAN SE. Zuletzt aufgerufen am 25.03.2020 unter [https://www.man.eu/man/media/de/content\\_medien/doc/global\\_corporate\\_website\\_1/presse\\_und\\_medien\\_1/2013\\_1/man\\_wcw\\_2013.pdf](https://www.man.eu/man/media/de/content_medien/doc/global_corporate_website_1/presse_und_medien_1/2013_1/man_wcw_2013.pdf).
- Wullenweber, K. (2000). Wortfang. Was die Sprache über Nachhaltigkeit verrät. *Politische Ökologie* 63/64, S. 23 f.

- Xiaoshan L. (2019). Urbanization and Automobile Dependency: Opportunities and Challenges in China's Urban Sprawl. In: Wang J. (eds) Development of a Society on Wheels. Research Series on the Chinese Dream and China's Development Path. Springer, Singapur.
- Yevdokimov, Y. V. (2003). Sustainable Transportation in Canada. Zuletzt aufgerufen am 17.10.2019 unter [www.unb.ca/research/transportation-group/\\_resources/pdf/research-papers/sustainable-transportation-in-canada.pdf](http://www.unb.ca/research/transportation-group/_resources/pdf/research-papers/sustainable-transportation-in-canada.pdf).
- Zaim, S., Bayyurt, N., Tarim, M., Zaim, H., Guc, Y. (2013). System dynamics modeling of a knowledge management process: A case study in Turkish Airlines. *Procedia – Social and Behavioral Sciences* 99, S. 545–552.
- Zegras, C. (2011). Mainstreaming sustainable urban transport: putting the pieces together', in Dimitriou, H., Gakenheimer, R. (Eds.), *Urban Transport in the Developing World*, Edward Elgar Publishing.
- Zegras, P. C. (2005). Sustainable Urban Mobility: Exploring the Role of the Built Environment. Dissertation. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA.
- Zhang, L., Wei, Y.Y. (2012). The Definition and Connotation of the Sustainable Urban Transport, *Applied Mechanics and Materials* 253-255. S.254–262.
- Zimmermann, G. E. (2001). Räumliche Mobilität. In: Schäfers B., Zapf W. (eds) *Handwörterbuch zur Gesellschaft Deutschlands*. VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- Zito, P., Salvo, G. (2011). Toward an urban transport sustainability index: An European comparison. *European Transport Research Review* 3. S. 179–195.

---

## Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die bei der promotionsführenden Einrichtung

Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt der TUM zur Promotionsprüfung vorgelegte Arbeit mit dem Titel:

### **Systemanalyse der Wirkungen von On-Demand-Mobilitätsdienstleistungen im Kontext nachhaltiger urbaner Mobilität**

bei der Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt, Professur für Siedlungsstruktur und Verkehrsplanung unter der Anleitung und Betreuung durch: Prof. Dr.-Ing. Gebhard Wulforst ohne sonstige Hilfe erstellt und bei der Abfassung nur die gemäß § 6 Ab. 6 und 7 Satz 2 angebotenen Hilfsmittel benutzt habe.

Ich habe keine Organisation eingeschaltet, die gegen Entgelt Betreuerinnen und Betreuer für die Anfertigung von Dissertationen sucht, oder die mir obliegenden Pflichten hinsichtlich der Prüfungsleistungen für mich ganz oder teilweise erledigt.

Ich habe die Dissertation in dieser oder ähnlicher Form in keinem anderen Prüfungsverfahren als Prüfungsleistung vorgelegt.

Die vollständige Dissertation wurde in \_\_\_\_\_ veröffentlicht. Die promotionsführende Einrichtung Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt hat der Veröffentlichung zugestimmt.

Ich habe den angestrebten Doktorgrad noch nicht erworben und bin nicht in einem früheren Promotionsverfahren für den angestrebten Doktorgrad endgültig gescheitert.

Ich habe bereits am \_\_\_\_\_ bei der Fakultät für \_\_\_\_\_ der Hochschule \_\_\_\_\_ unter der Vorlage einer Dissertation mit dem Thema \_\_\_\_\_ die Zulassung zur Promotion beantragt mit dem Ergebnis: \_\_\_\_\_

Die öffentlich zugängliche Promotionsordnung der TUM ist mir bekannt, insbesondere habe ich die Bedeutung von § 28 (Nichtigkeit der Promotion) und § 29 (Entzug des Doktorgrades) zur Kenntnis genommen. Ich bin mir der Konsequenzen einer falschen Eidesstattlichen Erklärung bewusst.

Mit der Aufnahme meiner personenbezogenen Daten in die Alumni-Datei bei der TUM bin ich

einverstanden,  nicht einverstanden.

München, 10.07.2020



---

Ort, Datum, Unterschrift

## Anhang

**Anhang 1:** Kennzahlen / Indikatoren für die Erfassung der Reife / Leistungsfähigkeit urbaner Mobilität (eigene Darstellung, in Anlehnung an Arthur D. Little, 2016).

<b>Kriterium</b>	<b>Reife</b> [max. 58 Punkte]		<b>Leistungsfähigkeit</b> [max. 42. Punkte]	
		<b>Gewichtung</b>	<b>Kriterien</b>	<b>Gewichtung</b>
Finanzielle Attraktivität öffentlicher Verkehr		4	Transportrelevante CO <sub>2</sub> -Emissionen	4
Anteil öffentlicher Verkehr im modalen Split		6	NO <sub>2</sub> Konzentration	4
Anteil Null-Emissionen Modi		6	PM <sub>10</sub> Konzentration	4
Straßendichte		4	Verkehrstote	6
Radwegedichte		6	Zuwachs öffentlicher Verkehr im modalen Split	6
Dichte städtischer Ballungszentren		2	Zuwachs Anteil Null-Emissions Modi	6
Penetration Smart Cards		6	Durchschnittliche Zeit für Arbeitswege	6
Bike Sharing Leistungsfähigkeit		6	Fahrzeugdichte	6
Car Sharing Leistungsfähigkeit		6		
Dichte öffentlicher Verkehr		6		
Initiativen im öffentlichen Sektor		6		

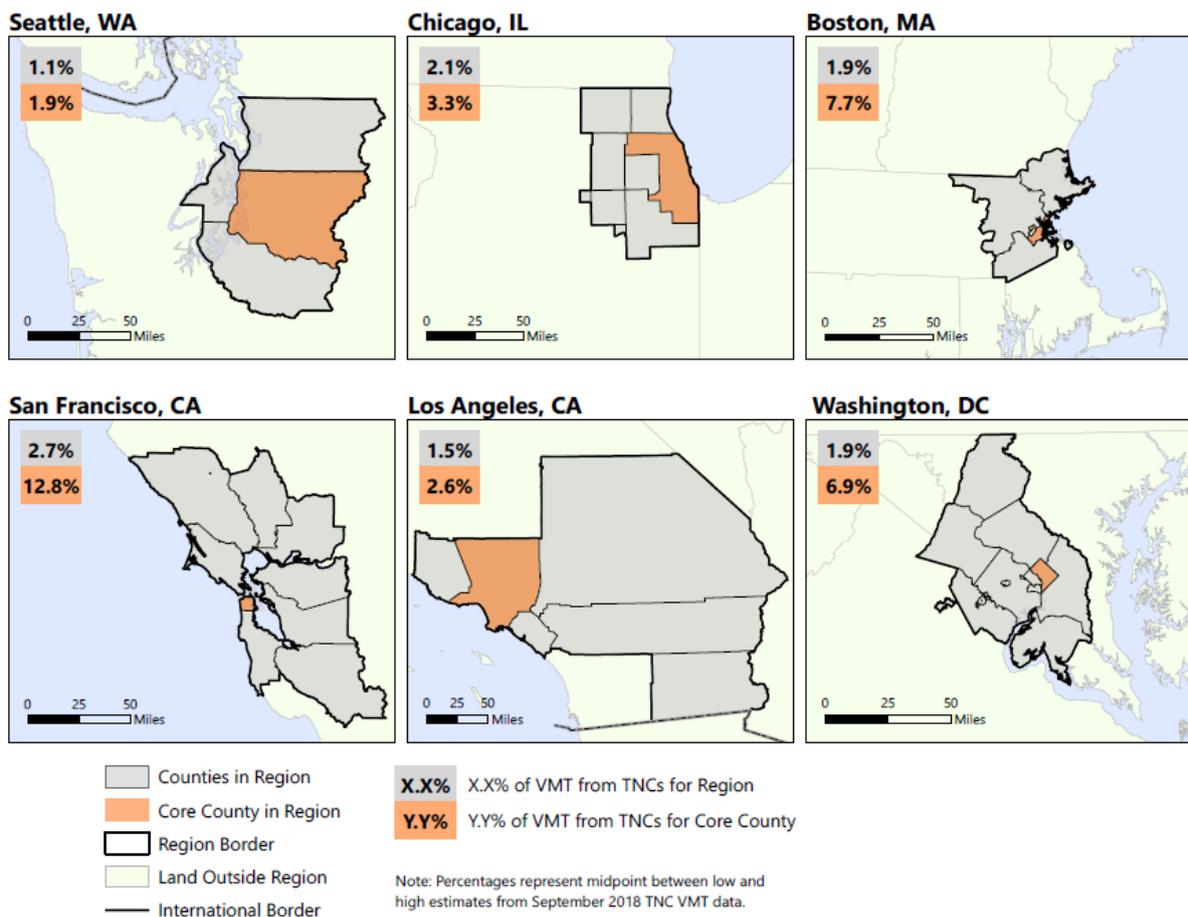
**Anhang 2:** Inhalte der laufender Initiativen / Projekte „EasyRide“, „smarter together“, „City2share“, „CIVITAS ECCENTRIC“, *Verkehrskonzept Europäische Metropolregion München* (eigene Darstellung, in Anlehnung an Listl & Gerstenberger, 2018)

<b>Initiative / Projekt</b>	<b>Inhalte</b>
Digitales Testfeld Autobahn (A9 München – Nürnberg)	Ausbau der infrastrukturseitigen Ausstattung (lückenlose Abdeckung mit Highspeed-LTE-Mobilfunk, verschiedene Sensorik-Modelle, standardisierte Aufbereitung von Mobilitätsdaten) zur Erprobung innovativer Ansätze für eine zweckmäßige und zukunftsweisende Ausgestaltung intelligenter Straßeninfrastruktur vor allem auch im Hinblick auf das automatisierte, elektrische Fahren auf Autobahnen.
Projekt „EasyRide“	Entwicklung, Wirkungsermittlung, Bewertung und Optimierung realistischer Szenarien für neue Verkehrsangebote (Mobility as a Service) mit folgenden Feldversuchen: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Individualisierter, automatisierter OV (hochautomatisierte Kleinbusse als Zubringer zum OV)</li> <li>- Automatisierter Ride-Pooling-Service (Flottenintelligenzfunktionen für einen on-Demand-Ride Pooling-Service)</li> </ul>
Projekt „smarter together“	Vernetzung von Informationen zu vorhandenen Mobilitätsdiensten mit dem Ziel, diese den Bürgerinnen und Bürger und Mobilitätsanbietern zur Verfügung zu stellen. Umsetzung des Pilotprojekts im Gebiet Westkreuz – Neuaußing: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Errichtung von 8 Mobilitätsstationen (inkl. Information und Leitsysteme)</li> <li>- Aufbau einer einheitlichen Datenplattform</li> </ul>
Projekt „city2share“	Stärkung integrierter Angebote des Individual- und Lieferverkehrs in den Pilotquartieren Unterending und Isarvorstadt. <ul style="list-style-type: none"> <li>- Test eines neuen innerstädtischen Lieferkonzepts mit elektrischen Lastenfahrrädern</li> <li>- Errichtung von 4 Mobilitätsstationen</li> <li>- Bereitstellung von Informationen über die Verfügbarkeit von Mobilitätsangeboten an Mobilitätsanbieter und Bürgerinnen und Bürger über eine vernetzte App</li> </ul>
Projekt „CIVITAS ECCENTRIC“	Untersuchung von Lösungen für zukunftsorientierte Mobilität in städtischen Zentrumsrandlagen: Im Projektgebiet Neubaugebiet Domagkpark und Parkstadt Schwabing wird unter Berücksichtigung von Bürgerbeteiligung, Elektromobilität, Logistik, geteilte Mobilität und Mobilitätsmanagement ein integrierter Ansatz zur stadtvertraglichen Mobilität verfolgt. <ul style="list-style-type: none"> <li>- Errichtung von 4 Mobilitätsstationen, inklusive Sharing-Angebote und Elektroladeinfrastruktur</li> <li>- Erweiterung einer bestehenden E-Sharing-Station im Domagkpark</li> <li>- Errichtung von 6 Micro-Depots zur Verbesserung der innerstädtischen Logistik durch Einsatz von (E-)Lastenrädern</li> <li>- Entwicklung und Nutzertest von neuen Elektrofahrzeugen (MVG eTrike und Elektroleichtfahrzeug ACM)</li> <li>- Eröffnung eines Quartier-Concierge-Dienstes zur Bündelung von Paketzustellfahrten in das Projektquartier und umweltfreundliche Bedienung der letzten Meile durch (E-) Lastenräder</li> <li>- Entwicklung einer Quartiers-Mobilitätsapp zur Mobilitäts- und Routenplanung anhand von lokalen Emissionswerten</li> <li>- Anwendung von zielgruppenspezifischen Mobilitätsmanagements und - trainings</li> </ul>
Verkehrskonzept Europäische Metropolregion München (EMM)	Laufende Projekte und Untersuchungen zu den Themenfeldern Erreichbarkeit, nachhaltige Verkehrsplanung und Elektromobilität

**Anhang 3:** Abschätzung der Anzahl an Trips, Personenkilometer und Fahrzeugkilometer aller ODM-Anbieter in München (eigene Hochrechnung, basierend auf Schmidt, 2019)

ODM Anbieter	ODM Angebotsform	Fahrzeugflotte	Anzahl Trips	Gesamt-Personenkilometer (PKM/Tag)	Gesamt-Fahrzeugkilometer (VKM/Tag)
DriveNow	Car Sharing FF	750	3.259,73	21.742,37	13.429,11
Car2go	Car Sharing FF	550	2.358,84	15.733,43	9.717,71
Miles	Car Sharing FF	250	443,50	2.958,15	1.827,09
Sixt Share	Car Sharing FF	700	2.048,97	13.666,63	8.441,15
Flinkster	Car Sharing SB	135	141,63	944,68	546,92
Oply	Car Sharing SB	200	354,80	2.366,52	1.370,09
STATTAUTO	Car Sharing SB	450	798,30	5.324,66	3.082,70
MVG IsarTiger	Ride Pooling	16	170,30	1.135,93	795,15
CleverShuttle	Ride Pooling	57	728,05	4.856,09	3.399,26
Taxi	Ride Hailing	3.400	31.364,32	209.200,01	209.200,01
Sixt Ride	Ride Hailing	100	887,00	5.916,29	5.916,29
Free Now	Ride Hailing	300	2.394,90	15.973,98	15.973,98
Uber X	Ride Hailing	132	585,42	3.904,75	3.904,75
		<b>7.040</b>	<b>45.536</b>	<b>303.723,49</b>	<b>277.604,22</b>

**Anhang 4:** Prozentualer Anteil der VMT von TNCs in 6 Städten Nord-Amerikas (Balding et al., 2019)



---

## Anhang 5: Überblick relevanter Ride Pooling Studien in Kombination mit VAF

---

<b>Autor</b>	<b>Stadt</b>	<b>Indikatoren der Studie</b>	<b>Methode</b>	<b>Software</b>
OECD, 2015	Lisabon	Anzahl der Fahrzeuge, zurückgelegte Kilometer, Auswirkungen auf den Verkehrsstau, Auswirkungen auf den Parkplatz	Agenten-basiertes Modell	/
Rigole, 2014	Stockholm	Zurückgelegte Kilometer, Anzahl der Fahrzeugen, Parkplatz, Wartezeit / Reisezeit, Straßenverkehr	Analytical Modell	MATLAB
Friedrich & Hartl, 2016	Stuttgart	Abschaffung von privat Fahrzeugen, zurückgelegte Kilometern, Parkplatz- und Energieverbrauch	Agenten-basiertes Modell	mobiTopp, VISUM
Fagnant et al. 2015	Austin	Abschaffung privat Fahrzeuge, gefahrenen Kilometern, Emissionen	Agenten-basiertes Modell	MATSim
Agua, 2016	München	Anzahl Fahrzeuge, Wartezeit / Fahrzeit, zurückgelegte Kilometer, Energieverbrauch	Agenten-basiertes Modell	JADE
Bötsch et al. 2017	Zürich	Kostenstruktur für autonomen Service (Reinigung, Mainenance, Kraftstoffverbrauch, usw.)	Kostenbasierte Analyse	/
Dia & Javanshour, 2017	Melbourne	Abschaffung von privat Fahrzeugen, Flottengröße, Wartezeit, zurückgelegte Kilometer, Leerfahrten, Staus, Emissionen	Agenten-basiertes Modell	/
Shen & Lopes, 2015	New York	Wartezeit, Erfolgsrate bei der Bedienung von Fahrt-Anfragen, Anzahl der Kunden bedient	Agenten-basiertes Modell	Mobility Testbed
Bischoff et al. 2016	Berlin	Flottengröße, Wartezeit, zurückgelegte Kilometer, Leerfahrten, Auswirkungen auf Parkplatzbedarf	Agenten-basiertes Modell	MATSim
Spieser et al. 2014	Singapur	Flottengröße, Abschaffung von privat Fahrzeugen	Analytical Modell	/
Marczuk et al. 2015	Singapur	Flottengröße, Wartezeit, Erfolgsrate bei der Bedienung von Fahrt-Anfragen, Stationsstandorte, Möglicher Ersatz von Privatwagen	Agenten-basiertes Modell	Sim Mobility

---

## Anhang 6: Interviewleitfaden qualitative Expertenstudie



### Qualitative Forschungsstudie

- Explorative Expertenbefragung -  
Systemanalyse der Auswirkungen von  
On-Demand-Mobilitätsdienstleistungen im Kontext  
nachhaltiger urbaner Mobilität

**Zielsetzung:**

Im Rahmen dieser Promotion werden explorative Interviews mit Experten und Nutzern von On-Demand Mobilitäts-Angeboten durchgeführt. Ziel der **Expertenbefragung** ist es neue Inhalte zum Forschungsgegenstand aufzudecken.

Die Experten wurden aus unterschiedlichen Branchen und Funktionsbereichen ausgewählt, um ein breites Verständnis über On-Demand-Mobilität abzudecken und dessen Einfluss auf eine nachhaltige urbane Mobilität identifizieren zu können.

Alle personenbezogenen Informationen werden bei der Auswertung der Interviews anonymisiert und selbstverständlich nicht an Dritte weitergegeben. Bei Interesse werden allen Umfrageteilnehmern dieser Studie die Ergebnisse selbstverständlich zur Verfügung gestellt.

Vielen Dank für ihre Zeit und die Teilnahme an dieser Befragung.

Christian Assmann

Interviewpartner:

Expertenbefragung

### Interviewleitfaden Experteninterview

Zur Promotion: Systemanalyse der Auswirkungen von On-Demand-Mobilitätsdienstleistungen im Kontext nachhaltiger urbaner Mobilität

.

#### Kontakt Informationen

Name:

Unternehmen:

Position:

E-Mail:

#### 1. Informationen zu Institution und Tätigkeitsbereich

1.1 Unternehmensbranche

Automobil-Branche	<input type="checkbox"/>	Stadtplanung	<input type="checkbox"/>
Mobilitätsdienstleister	<input type="checkbox"/>	Wissenschaft	<input type="checkbox"/>
Mobility Start-Up	<input type="checkbox"/>	Sonstiges	<input type="checkbox"/>
Verbände	<input type="checkbox"/>		

Andere: \_\_\_\_\_

1.2 Alter

18 – 25 Jahre	<input type="checkbox"/>	26 – 35 Jahre	<input type="checkbox"/>
36 – 45 Jahre	<input type="checkbox"/>	46 – 55 Jahre	<input type="checkbox"/>
> 55 Jahre	<input type="checkbox"/>		

1.3 Typische Produkte und Dienstleistungen des Unternehmens

1)

2)

3)

## 2. Grundlagen ODM / Mobilitätsbedürfnisse

- 2.1 Was verstehen Sie unter On-Demand Mobilität?
- 2.2 Welche ODM Angebotsformen halten Sie für wichtig?
- 2.3 Welche ODM Angebotsform hat Ihrer Meinung nach das größte veränderliche Potential auf die Mobilität in urbanen Ballungsräumen? / Warum?
- 2.4 Welche Angebots-Merkmale (Kosten, Fahrzeuge, Erreichbarkeit...) sind Ihrer Meinung nach besonders wichtig für eine erfolgreiche Umsetzung der Dienstleistung? / Warum?
- 2.5 Was verstehen Sie unter dem Begriff Mobilitätsbedürfnis? Welche Mobilitätsbedürfnisse sehen Sie als wichtig an? Zwischen den Begriffen Mobilitätsbedürfnis und Mobilitätsverhalten scheint es Unterschiede zu geben, welche könnten das sein?
- 2.5 Welche Mobilitätsbedürfnisse können Ihrer Meinung nach durch ODM besser bedient werden, als durch herkömmliche Mobilitätslösungen (z.B. ÖPNV oder mIV) ? / Warum?

## 3. Rahmenbedingungen ODM

- 3.1 Welche Rahmenbedingungen haben Ihrer Meinung nach einen wichtigen Einfluss auf Angebot und Nachfrage eines ODM Angebotes? / Warum?

## 4. Nachhaltige urbane Mobilität

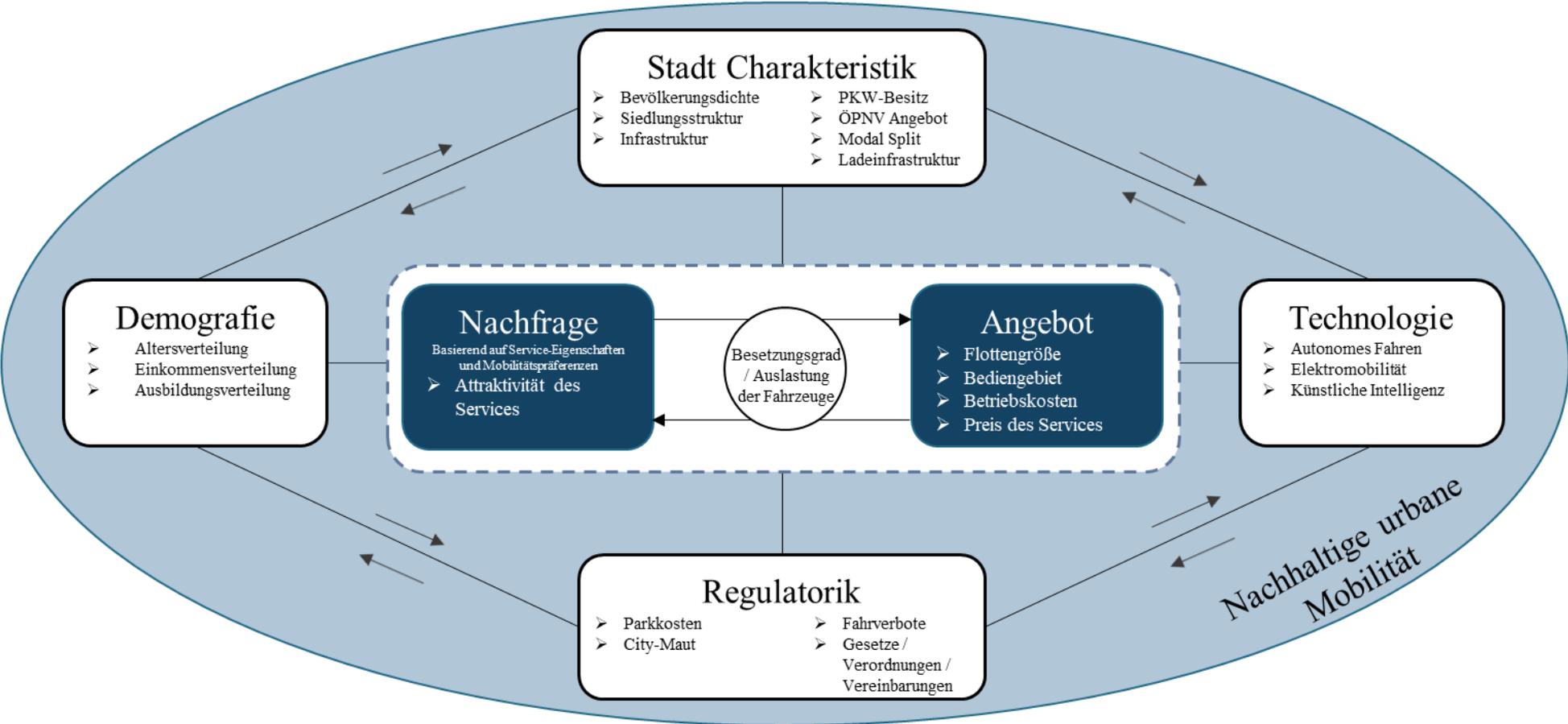
- 4.1 Was verstehen Sie unter nachhaltiger Mobilität in Städten?
- 4.2 Wie lässt sich nachhaltige Mobilität beschreiben?
- 4.3 Denken Sie, dass ein weit verbreitetes ODM Angebot einen individuellen Mehrwert bringt – und gleichzeitig die Mobilität in Städten nachhaltig verbessern kann?

Möchten Sie eine Auswertung dieser Forschungsstudie erhalten?

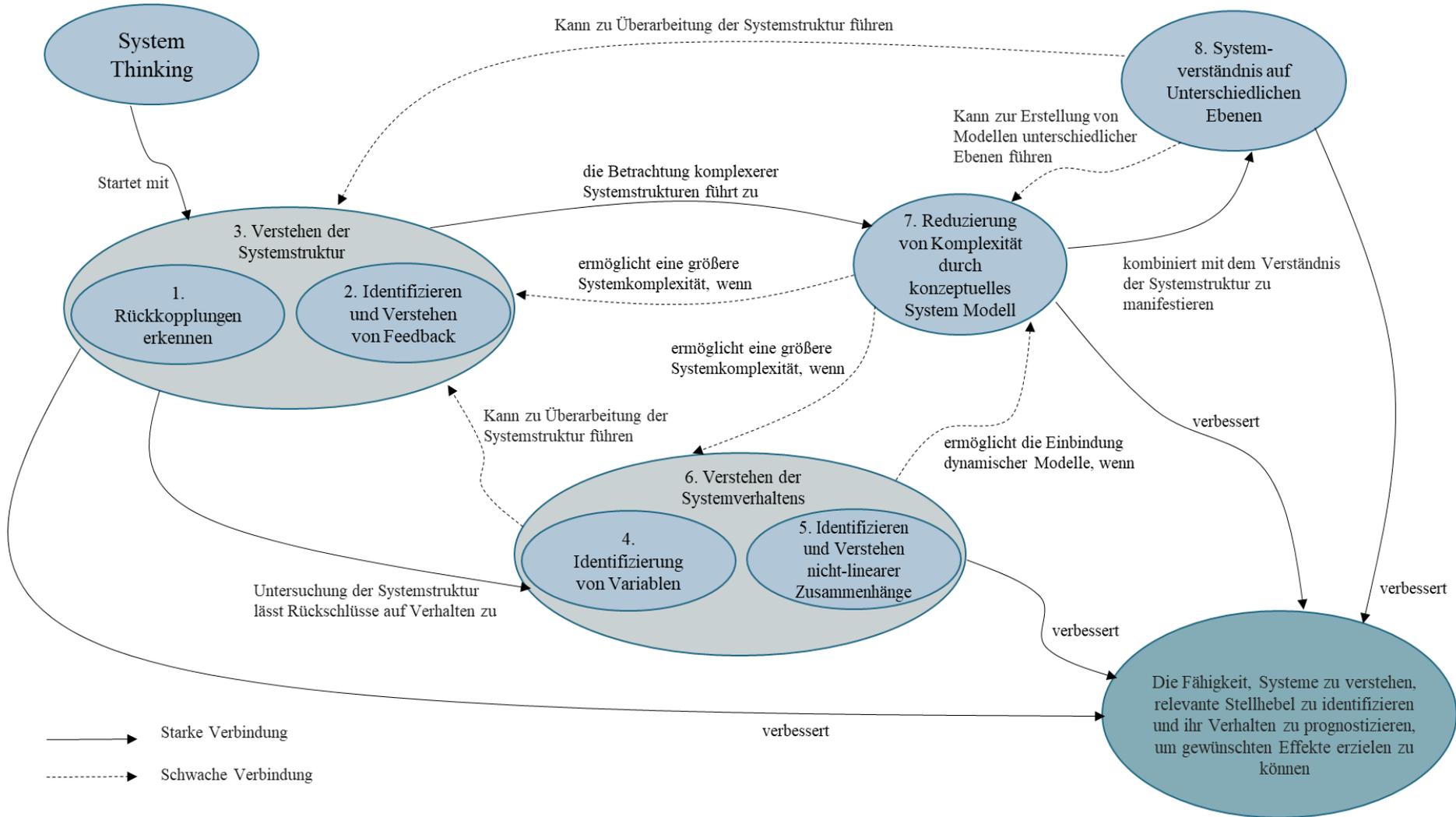
Ja

Nein

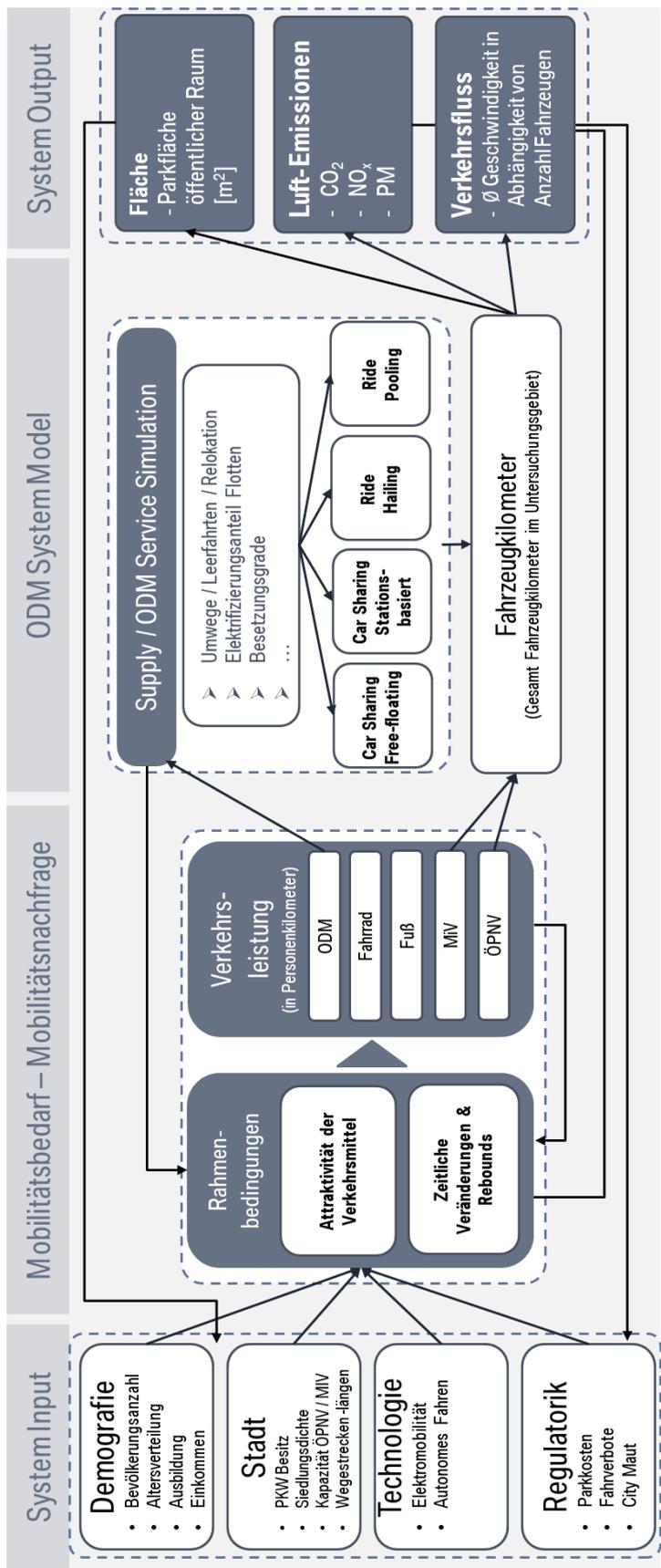
**Anhang 7:** Modell-Variablen und Wirkzusammenhänge auf Basis der Haupt- und Unter-Kategorien (eigene Darstellung)



**Anhang 8:** Verständnis System Thinking (eigene Darstellung, in Anlehnung an Arnold et al., 2015)



**Anhang 9:** Überblick System-Modell



## Anhang 10: SFD Systemelemente und zugrunde liegende Differenz- und Differentialgleichungssysteme

SFD Systemelement	Einheit	Mathematische Beschreibung des Systemelements
0-17 Years	person	(230018+Growth projection Agegroup 0-17)*1<<persons>>
18-29 Years	person	(293976+Growth projection Agegroup 18-29)*1<<persons>>
2018 Agegroup 0 - 17	person	LOOKUP(Number of Persons in Group 2018;1)
2018 Agegroup 18 - 29	person	LOOKUP(Number of Persons in Group 2018;2)
2018 Agegroup 30-49	person	LOOKUP(Number of Persons in Group 2018;3)
2018 Agegroup 50-64	person	LOOKUP(Number of Persons in Group 2018;4)
2018 Agegroup 65-74	person	LOOKUP(Number of Persons in Group 2018;5)
2018 Agegroup older than 74	person	LOOKUP(Number of Persons in Group 2018;6)
2018 Average daily Distance	km	INT(Daily Mobility Demand per Person)
2030 Agegroup 0 - 17	person	LOOKUP(Number of Persons in Group 2030;1)
2030 Agegroup 18 - 29	person	LOOKUP(Number of Persons in Group 2030;2)
2030 Agegroup 30-49	person	LOOKUP(Number of Persons in Group 2030;3)
2030 Agegroup 50-64	person	LOOKUP(Number of Persons in Group 2030;4)
2030 Agegroup 65-74	person	LOOKUP(Number of Persons in Group 2030;5)
2030 Agegroup older than 74	person	LOOKUP(Number of Persons in Group 2030;6)
30-49 Years	person	(517862+Growth projection Agegroup 30-49)*1<<persons>>
49-64 Years	person	(219067+Growth projection Agegroup 50-64)*1<<persons>>
65-74 Years	person	(128955+Growth projection Agegroup 65-74)*1<<persons>>
Abolition caused by Car Sharing	vehicle/mo	(ODM Vehicle Input-DELAYPL/ODM Vehicle Input;1<<mo>>)*1<<1/mo>>
Abolition caused by Car Sharing I	vehicle/mo	IF(Activate Button Vehicle Abolition=1;Abolition caused by Car Sharing;0<<vehicles/mo>>)
Accumulated Mode Share	%	'Mode Share Bicycle'+Mode Share Motorized individual Traffic - Driver'+Mode Share Motorized individual Traffic - Passenger'+Mode Share Public Transport'+Mode Share Walking'+Mode Share ODM'
Activate Button Vehicle Abolition		1
Activate ODM Scenarios		0
Adjustment Bicycle	%	GRAPH(TIME,DATE(2018;1;1);13<<yr>>);{0;(Mode Share ODM 2030*Shift Bicycle to ODM)/Min;-5;Max:20/1}
Adjustment Bike		'Attractivity Bike'
Adjustment Car		'Attractivity Motorized individual Traffic - Driver'
Adjustment Car - Passenger		'Attractivity Motorized individual Traffic - Passenger'
Adjustment Factor Mode Attractivity		6/(Attractivity Bike'+Attractivity Motorized individual Traffic - Driver'+Attractivity Motorized individual Traffic - Passenger'+Attractivity ODM'+Attractivity PT'+Attractivity Walk)
Adjustment Motorized individual Traffic - Driver	%	GRAPH(TIME,DATE(2018;1;1);13<<yr>>);{0;(Mode Share ODM 2030*Shift Motorized individual Traffic - Driver to ODM)/Min;-5;Max:20/1}
Adjustment Motorized individual Traffic - Passenger	%	GRAPH(TIME,DATE(2018;1;1);13<<yr>>);{0;(Mode Share ODM 2030*Shift Motorized individual Traffic - Passenger to ODM)/Min;-5;Max:20/1}
Adjustment ODM		'Attractivity ODM'
Adjustment PT		'Attractivity PT'
Adjustment Public Transport	%	GRAPH(TIME,DATE(2018;1;1);13<<yr>>);{0;(Mode Share ODM 2030*Shift Public Transport to ODM)/Min;-5;Max:20/1}
Adjustment Walk		'Attractivity Walk'
Adjustment Walking	%	GRAPH(TIME,DATE(2018;1;1);13<<yr>>);{0;(Mode Share ODM 2030*Shift Walk to ODM)/Min;-5;Max:20/1}
Attractivity Bike		IF(Feedback Switch Traffic Flow=0;1;1)*IF(Feedback Switch Space=0;1;1)
Attractivity MIV- Driver		IF(Feedback Switch Traffic Flow=0;1;1)*Niveau_2)*IF(Feedback Switch Space=0;1;1)*Niveau_1)*IF(Feedback Switch Driving Bans - Congestion Charge=0;1;1)*Change in Attractivity Congestion Charge - Driving Ban)
Attractivity MIV- Passenger		IF(Feedback Switch Traffic Flow=0;1;1)*Niveau_2 - Copy)*IF(Feedback Switch Space=0;1;1)*Niveau_1 - Copy 2)
Attractivity ODM		IF(Feedback Switch Traffic Flow=0;1;1)*Niveau_2 - Copy 2)*IF(Feedback Switch Space=0;1;1)*Niveau_1 - Copy)
Attractivity PT		IF(Feedback Switch Traffic Flow=0;1;1)*IF(Feedback Switch Space=0;1;1)
Attractivity Walk		IF(Feedback Switch Traffic Flow=0;1;1)*IF(Feedback Switch Space=0;1;1)
Auxiliary 1		'Mode Attractivity Bicycle'+Mode Attractivity Motorized individual Traffic - Driver'+Mode Attractivity Motorized individual Traffic - Passenger'+Mode Attractivity ODM'+Mode Attractivity Public Transport'+Mode Attractivity Walking'
Average Daily distance	km	((0-17 Years)*Average Daily Distance 0-17 years)+(18-29 Years)*Average Daily Distance 18-29 years)+(30-49 Years)*Average Daily Distance 30-49 years)+(49-64 years)*Average Daily Distance 49-64 years)+(65-74 Years)*Average Daily Distance 65-74 years)+(older 74 Years)*Average Daily Distance older 74 years)) / ((0-17 Years)+18-29 Years+30-49 Years+49-64 years+65-74 Years+older 74 Years)
Average Age 2018		(2018 Agegroup 0 - 17*8.5+2018 Agegroup 18 - 29*23.5+2018 Agegroup 30-49*39.5+2018 Agegroup 50-64*57+2018 Agegroup 65-74*69.5+2018 Agegroup older than 74*78) / (2018 Agegroup 0 - 17+2018 Agegroup 18 - 29+2018 Agegroup 30-49+2018 Agegroup 50-64+2018 Agegroup 65-74+2018 Agegroup older than 74)
Average Age 2030		(2030 Agegroup 0 - 17*8.5+2030 Agegroup 18 - 29*23.5+2030 Agegroup 30-49*39.5+2030 Agegroup 50-64*57+2030 Agegroup 65-74*69.5+2030 Agegroup older than 74*78) / (2030 Agegroup 0 - 17+2030 Agegroup 18 - 29+2030 Agegroup 30-49+2030 Agegroup 50-64+2030 Agegroup 65-74+2030 Agegroup older than 74)
Average Age Vehicle Munich	yr	XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R48C4")<<yr>>
Average Daily Distance 0-17 years	km	XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input Munich Characteristics"; "R17C4")<<km>>
Average Daily Distance 18-29 years	km	XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input Munich Characteristics"; "R18C4")<<km>>
Average Daily Distance 30-49 years	km	XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input Munich Characteristics"; "R19C4")<<km>>
Average Daily Distance 49-64 years	km	XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input Munich Characteristics"; "R20C4")<<km>>
Average Daily Distance 65-74 years	km	XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input Munich Characteristics"; "R21C4")<<km>>
Average Daily Distance older 74 years	km	XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input Munich Characteristics"; "R22C4")<<km>>
Average private Vehicle Ownership Munich 2018	vehicle/person	XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R52C4")<<vehicle/person>>
Average Speed in City	km	-0,000004*Total VKM Travelled+39,235<<km>>
Average trip Length Cycling	km/trip	XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input Munich Characteristics"; "R11C4")<<km/trip>>
Average trip Length Motorized individual Traffic - Driver	km/trip	XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input Munich Characteristics"; "R13C4")<<km/trip>>
Average trip Length Motorized individual Traffic - Passenger	km/trip	XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input Munich Characteristics"; "R14C4")<<km/trip>>
Average trip Length ODM	km/trip	XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input Munich Characteristics"; "R15C4")<<km/trip>>
Average trip Length Public Transport	km/trip	XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input Munich Characteristics"; "R12C4")<<km/trip>>
Average Trip Length Public Transport - Bus	person*km/trip	XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R92C4")<<person*km/trip>>
Average Trip Length Public Transport - Tram	person*km/trip	XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R90C4")<<person*km/trip>>
Average Trip Length Walking	km/trip	XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input Munich Characteristics"; "R10C4")<<km/trip>>
BEV Car Sharing FF 2018	vehicle	XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R61C4")<<vehicle>>
BEV Car Sharing SB 2018	vehicle	XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R66C4")<<vehicle>>
BEV in 2030	%	XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R53C4")<<%>>
BEV Ride Hailing - 2018	vehicle	XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R74C4")<<vehicle>>
BEV Ride Pooling- 2018	vehicle	XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R82C4")<<vehicle>>
BEV Total	vehicle	'Private BEV Vehicles 1'+BEV Vehicles Car Sharing FF 1'+BEV Vehicles Car Sharing SB 1'+BEV Vehicles Ride Hailing 1'+BEV Vehicles Ride Pooling 1'
BEV Vehicles Car Sharing FF	vehicle	'BEV Car Sharing FF 2018'
BEV Vehicles Car Sharing FF 1	vehicle	'BEV Vehicles Car Sharing FF'
BEV Vehicles Car Sharing SB	vehicle	'BEV Car Sharing SB 2018'
BEV Vehicles Car Sharing SB 1	vehicle	'BEV Vehicles Car Sharing SB'
BEV Vehicles Ride Hailing	vehicle	'BEV Ride Hailing - 2018'
BEV Vehicles Ride Hailing 1	vehicle	'BEV Vehicles Ride Hailing'
BEV Vehicles Ride Pooling	vehicle	'BEV Ride Pooling- 2018'
BEV Vehicles Ride Pooling 1	vehicle	'BEV Vehicles Ride Pooling'
Car Sharing FF	%	XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R14C4")<<%>>
Car Sharing FF Cars Parking in Public Space	%	XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R97C4")<<%>>
Car Sharing FF Minutes in Movement	min/(vehicle*h)	'Fleet Utilization Car Sharing FF/Average Speed in City'*60<<min/h>>
Car Sharing FF Penetration Rate BEV	%	GRAPH(TIME,DATE(2018;1;1);1);{Szenario BEV Car Sharing FF-2018}*1<<yr>>};{((BEV Car Sharing FF 2018/FleetSize Car Sharing FF 1)*100<<%>>);Penetration Rate BEV 1'}
Car Sharing FF Penetration Rate PHEV	%	GRAPH(TIME,DATE(2018;1;1);1);{Szenario PHEV Car Sharing FF-2018}*1<<yr>>};{(PHEV Car Sharing FF 2018/FleetSize Car Sharing FF 1);Penetration Rate PHEV 1'}
Car Sharing SB	%	XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R22C4")<<%>>
Car Sharing SB Cars Parking in Public Space	%	XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R98C4")<<%>>

Car Sharing SB Minutes in Movement	min/ (vehicle*h)	Fleet Utilization Car Sharing SB/Average Speed in City*60<<min/h>>
Car Sharing SB Penetration Rate BEV	%	GRAPH(TIME,DATE(2018;1;1);(Scenario BEV Car Sharing SB-2018)*1<<yr>>);((BEV Car Sharing SB 2018/FleetSize Car Sharing SB 1)*100<<%>>);Penetration Rate BEV 1 CS SB 1)
Car Sharing SB Penetration Rate PHEV	%	GRAPH(TIME,DATE(2018;1;1);(Scenario PHEV Car Sharing SB-2018)*1<<yr>>);((PHEV Car Sharing SB - 2018/FleetSize Car Sharing SB 1);Penetration Rate PHEV 1 CS SB 1)
Change in % Agegroup 0-17	%	((2030 Agegroup 0 - 17/2018 Agegroup 0 - 17)-1)*100<<%>>
Change in % Agegroup 18-29	%	((2030 Agegroup 18 - 29/2018 Agegroup 18 - 29)-1)*100<<%>>
Change in % Agegroup 30-49	%	((2030 Agegroup 30-49/2018 Agegroup 30-49)-1)*100<<%>>
Change in % Agegroup 50-64	%	((2030 Agegroup 50-64/2018 Agegroup 50-64)-1)*100<<%>>
Change in % Agegroup 65-74	%	((2030 Agegroup 65-74/2018 Agegroup 65-74)-1)*100<<%>>
Change in % Agegroup older 74	%	((2030 Agegroup older than 74/2018 Agegroup older than 74)-1)*100<<%>>
Change in Agegroup 0-17	person	(2030 Agegroup 0 - 17-2018 Agegroup 0 - 17)*1/1<<person>>
Change in Agegroup 18-29	person	(2030 Agegroup 18 - 29-2018 Agegroup 18 - 29)*1/1<<person>>
Change in Agegroup 18-29 1	person	'Change in Agegroup 18-29'1<<person>>
Change in Agegroup 30-49	person	(2030 Agegroup 30-49-2018 Agegroup 30-49)*1/1<<person>>
Change in Agegroup 30-49 1	person	'Change in Agegroup 30-49'1<<person>>
Change in Agegroup 50-64	person	(2030 Agegroup 50-64-2018 Agegroup 50-64)*1/1<<person>>
Change in Agegroup 50-64 1	person	'Change in Agegroup 50-64'1<<person>>
Change in Agegroup 65-74	person	(2030 Agegroup 65-74-2018 Agegroup 65-74)*1/1<<person>>
Change in Agegroup 65-74 1	person	'Change in Agegroup 65-74'1<<person>>
Change in Agegroup older 74	person	'Change in Agegroup older than 74'1<<person>>
Change in Agegroup older than 74	person	(2030 Agegroup older than 74-2018 Agegroup older than 74)*1/1<<person>>
Change in Attractivity Congestion Charge - Driving Ban		IF(Change in Attractivity Congestion Charge - Driving Ban - Copy 2<Impact;Impact;Change in Attractivity Congestion Charge - Driving Ban - Copy 2)
Change in Attractivity Congestion Charge - Driving Ban - Copy 2		IF(Delay>Impact;GRAPH(CURVE,(TIME,DATE(Date Driving Bans occur;1;1);Delay Temporal Change/4;{Delay;(Delay-(Difference/5));(Impact+(Difference/5));Impact);Impact)
Change in Attractivity Congestion Charge - Driving Ban - 1		IF(Delay>Impact;GRAPH(TIME,DATE(Date Driving Bans occur;1;1);Delay Temporal Change;{Delay;(Impact)};Impact)
Change Trips Car - MIV Passenger	%	0%
Change Trips Car - ODM	%	50%
Change Trips Car - PT	%	50%
CO2 Data	g/km	LOOKUP(CO2 Data Input;YEAR Variable;MONTH Variable)*1<<g/km>>
CO2 Data Input		XLDATA(C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx; "Emission HBEFA Input"; "R17C3:R30C14")
CO2 Emission Car Sharing FF	g	(Emission ICE Car Sharing FF+Emission PHEV Car Sharing FF)*CO2 Data
CO2 Emission Car Sharing FF 1	km*g/kWh	((Percentage BEV Car Sharing FF*VKM Car Sharing FF 1*Share of electric drive BEV Car Sharing FF*CO2 Power Data)+(Percentage PHEV Car Sharing FF*VKM Car Sharing FF 1*Share of Electric drive PHEV Car Sharing FF*CO2 Power Data)
CO2 Emission Car Sharing FF BEV PHEV	g	'CO2 Emission Car Sharing FF 1'*Consumption Electric Car
CO2 Emission Car Sharing SB	g	(Emission ICE Car Sharing SB+Emission PHEV Car Sharing SB)*CO2 Data
CO2 Emission Car Sharing SB 1	km*g/kWh	((Percentage BEV Car Sharing SB*VKM Car Sharing SB 1*Share of electric drive BEV Car Sharing SB*CO2 Power Data)+(Percentage PHEV Car Sharing SB*VKM Car Sharing SB 1*Share of Electric drive PHEV Car Sharing SB*CO2 Power Data)
CO2 Emission Car Sharing SB BEV PHEV	g	'CO2 Emission Car Sharing SB 1'*Consumption Electric Car
CO2 Emission Private BEV PHEV	km*g/kWh	((Percentage BEV Private Vehicle*VKM Motorized Individual Traffic*Share of electric drive BEV Private*CO2 Power Data)+(Percentage PHEV Private Vehicle*VKM Motorized Individual Traffic*Share of Electric drive PHEV Private*CO2 Power Data)
CO2 Emission Private BEV PHEV - 1	g	'CO2 Emission Private BEV PHEV'*Consumption Electric Car
CO2 Emission Private Vehicle KM	g	(Emission ICE Private Vehicle KM+Emission PHEV Private Vehicle KM)*CO2 Data
CO2 Emission Ride Hailing	km*g/kWh	((Percentage BEV Car Sharing SB - Copy*VKM Ride Hailing 1*Share of electric drive BEV Ride Hailing*CO2 Power Data)+(Percentage PHEV Car Sharing SB - Copy*VKM Ride Hailing 1*Share of Electric drive PHEV Ride Hailing*CO2 Power Data)
CO2 Emission Ride Hailing - Copy	km*g/kWh	((Percentage BEV Ride Pooling*VKM Ride Pooling 1*Share of electric drive BEV Ride Pooling*CO2 Power Data)+(Percentage PHEV Ride Pooling*VKM Ride Pooling 1*Share of Electric drive PHEV Ride Pooling*CO2 Power Data)
CO2 Emission Ride Hailing 1	g	(Emission ICE Ride Hailing+Emission PHEV Ride Hailing)*CO2 Data
CO2 Emission Ride Hailing BEV PHEV	g	'CO2 Emission Ride Hailing'*Consumption Electric Car
CO2 Emission Ride Pooling	g	(Emission ICE Ride Hailing - Copy+Emission PHEV Ride Hailing - Copy)*CO2 Data
CO2 Emission Ride Pooling BEV PHEV	g	'CO2 Emission Ride Hailing - Copy'*Consumption Electric Car
CO2 Emission total BEV PHEV	g	'CO2 Emission Private BEV PHEV - 1'+CO2 Emission Car Sharing FF BEV PHEV+CO2 Emission Car Sharing SB BEV PHEV+CO2 Emission Ride Hailing BEV PHEV+CO2 Emission Ride Pooling BEV PHEV
CO2 Emission total ICE	g	'CO2 Emission Private Vehicle KM'+CO2 Emission Car Sharing FF+CO2 Emission Car Sharing SB+CO2 Emission Ride Hailing 1+CO2 Emission Ride Pooling+Public Bus Emission CO2
CO2 Power Data	g/kWh	LOOKUP(CO2 Power Data Input 2;YEAR Variable;MONTH Variable)*1<<g/kWh>>
CO2 Power Data Input 2		XLDATA(C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx; "Emission CO2 Input"; "R2C3:R15C14")
CO2 pro PKM Bus	g	XLDATA(C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx; "Input On-Demand Mobility Data"; "R127C4")<<g>>
CO2 Total Emission Car Sharing FF	g	'CO2 Emission Car Sharing FF BEV PHEV'+CO2 Emission Car Sharing FF
CO2 Total Emission Car Sharing SB	g	'CO2 Emission Car Sharing SB BEV PHEV'+CO2 Emission Car Sharing SB
CO2 Total Emission Private Vehicle KM	g	'CO2 Emission Private BEV PHEV - 1'+CO2 Emission Private Vehicle KM
CO2 Total Emission Ride Hailing	g	'CO2 Emission Ride Hailing BEV PHEV'+CO2 Emission Ride Hailing 1'
CO2 Total Emission Ride Pooling	g	'CO2 Emission Ride Pooling BEV PHEV'+CO2 Emission Ride Pooling'
Combined CO2 Emission ICE BEV PHEV	g	'CO2 Emission total BEV PHEV'+CO2 Emission total ICE'
Congestion Charge - Driving Bans		0
Constant Daily Mobility Demand	km	XLDATA(C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx; "Input Munich Characteristics"; "R5C4")<<km>>
Consumption Electric Car	kWh/km	XLDATA(C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx; "Input On-Demand Mobility Data"; "R108C4")<<kWh/km>>
Daily Mobility Demand per Person	km	'Average Daily distance'*Proportion of mobile persons per Day
Data Input Model Split Bicycle		XLDATA(C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx; "Input Model Split"; "R18C2:R32C13")
Data Input Model Split MIV Driver		XLDATA(C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx; "Input Model Split"; "R34C2:R48C13")
Data Input Model Split MIV Passenger		XLDATA(C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx; "Input Model Split"; "R50C2:R64C13")
Data Input Model Split ODM		XLDATA(C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx; "Input Model Split"; "R82C2:R96C13")
Data Input Model Split Public Transport		XLDATA(C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx; "Input Model Split"; "R66C2:R80C13")
Data Input Model Split Walking		XLDATA(C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx; "Input Model Split"; "R2C2:R16C13")
Date Driving Bans occur		2022
Decrease Number of trips car 1	trip	(Change in Attractivity Congestion Charge - Driving Ban 1)*INT(1100000<<trip>>)
Delay	yr	DELAYPPL(Impact Driving Ban - Congestion Charge;Delay Temporal Change;1)
Delay Temporal Change	yr	2<<yr>>
Delay Variable	vehicle	DELAYPPL('Vehicle Registration';1<<mo>>;0<<vehicle>>)
Difference		1-Impact Driving Ban on Private Vehicle Attractivity'
Emission BEV Car Sharing FF	km	'Percentage BEV Car Sharing FF*Share of conventional drive BEV Car Sharing FF*VKM Car Sharing FF 1'
Emission BEV Car Sharing SB	km	'Percentage BEV Car Sharing SB*Share of conventional drive BEV Car Sharing SB*VKM Car Sharing SB 1'
Emission BEV Private Vehicle KM	km	'Percentage BEV Private Vehicle*Share of conventional drive BEV Private*VKM Motorized Individual Traffic'
Emission BEV Ride Hailing	km	'Percentage BEV Car Sharing SB - Copy*Share of conventional drive BEV Ride Hailing*VKM Ride Hailing 1'
Emission BEV Ride Hailing - Copy	km	'Percentage BEV Ride Pooling*Share of conventional drive BEV Ride Pooling*VKM Ride Pooling 1'
Emission ICE Car Sharing FF	km	'Percentage ICE Car Sharing FF*Share of conventional drive ICE Car Sharing FF*VKM Car Sharing FF 1'
Emission ICE Car Sharing SB	km	'Percentage ICE Car Sharing SB*Share of conventional drive ICE Car Sharing SB*VKM Car Sharing SB 1'
Emission ICE Private Vehicle KM	km	'Percentage ICE Private Vehicle*Share of conventional drive ICE Private*VKM Motorized Individual Traffic'
Emission ICE Ride Hailing	km	'Percentage ICE Car Sharing SB - Copy*Share of conventional drive ICE Ride Hailing*VKM Ride Hailing 1'
Emission ICE Ride Hailing - Copy	km	'Percentage ICE Ride Pooling*Share of conventional drive ICE Ride Pooling*VKM Ride Pooling 1'
Emission PHEV Car Sharing FF	km	'Percentage PHEV Car Sharing FF*Share of conventional drive PHEV Car Sharing FF*VKM Car Sharing FF 1'
Emission PHEV Car Sharing SB	km	'Percentage PHEV Car Sharing SB*Share of conventional drive PHEV Car Sharing SB*VKM Car Sharing SB 1'
Emission PHEV Private Vehicle KM	km	'Percentage PHEV Private Vehicle*Share of conventional drive PHEV Private*VKM Motorized Individual Traffic'
Emission PHEV Ride Hailing	km	'Percentage PHEV Car Sharing SB - Copy*Share of conventional drive PHEV Ride Hailing*VKM Ride Hailing 1'
Emission PHEV Ride Hailing - Copy	km	'Percentage PHEV Ride Pooling*Share of conventional drive PHEV Ride Pooling*VKM Ride Pooling 1'
Energy Consumption Electric Bus	kWh/km	XLDATA(C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx; "Input Munich Characteristics"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R130C4")<<kWh/km>>
Feedback Switch Driving Bans - Congestion Charge		0
Feedback Switch Space		1
Feedback Switch Traffic Flow		1
Fleet Car Sharing FF	vehicle	0<<vehicles>>
Fleet Car Sharing SB	vehicle	0<<vehicles>>
Fleet Ride Hailing	vehicle	0<<vehicles>>

Fleet Ride Pooling	vehicle	0<<vehicles>>
Fleet Size Car Sharing FF Total	vehicle	'FleetSize Car Sharing FF 1'+Fleet Car Sharing FF'
Fleet Size Car Sharing SB Total	vehicle	'FleetSize Car Sharing SB 1'+Fleet Car Sharing SB'
Fleet Size Ride Hailing Total	vehicle	'FleetSize Ride Hailing 1'+Fleet Ride Hailing'
Fleet Size Ride Pooling Total	vehicle	'FleetSize Ride Pooling 1'+Fleet Ride Pooling'
Fleet Utilization Car Sharing FF	km/vehicle	'VKM Car Sharing FF 1'/FleetSize Car Sharing FF 1'
Fleet Utilization Car Sharing FF - Total	km/vehicle	'VKM Car Sharing FF 1'/FleetSize Car Sharing FF Total'
Fleet Utilization Car Sharing SB	km/vehicle	(VKM Car Sharing SB 1'/FleetSize Car Sharing SB 1')
Fleet Utilization Car Sharing SB - Total	km/vehicle	'VKM Car Sharing SB 1'/FleetSize Car Sharing SB Total'
Fleet Utilization Ride Hailing	km/vehicle	(VKM Ride Hailing 1'/FleetSize Ride Hailing 1')
Fleet Utilization Ride Hailing - Total	km/vehicle	'VKM Ride Hailing 1'/FleetSize Ride Hailing Total'
Fleet Utilization Ride Pooling	km/vehicle	(VKM Ride Pooling 1'/FleetSize Ride Pooling 1')
Fleet Utilization Ride Pooling - Total	km/vehicle	'VKM Ride Pooling 1'/FleetSize Ride Pooling Total'
FleetSize Car Sharing FF 1	vehicle	XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input Munich Characteristics"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R17C4")<<vehicles>>
FleetSize Car Sharing SB 1	vehicle	XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input Munich Characteristics"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R25C4")<<vehicles>>
FleetSize Ride Hailing 1	vehicle	XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input Munich Characteristics"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R33C4")<<vehicles>>
FleetSize Ride Pooling 1	vehicle	XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input Munich Characteristics"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R42C4")<<vehicles>>
Growth projection Agegroup 0-17		GRAPH(TIME,DATE(2018;1;1);13<<yr>>);{0;(Change in Agegroup 0-17)/Min;-5;Max:20/}
Growth projection Agegroup 18-29		GRAPH(TIME,DATE(2018;1;1);13<<yr>>);{0;(Change in Agegroup 18-29)/Min;-5;Max:20/}
Growth projection Agegroup 30-49		GRAPH(TIME,DATE(2018;1;1);13<<yr>>);{0;(Change in Agegroup 30-49)/Min;-5;Max:20/}
Growth projection Agegroup 50-64		GRAPH(TIME,DATE(2018;1;1);13<<yr>>);{0;(Change in Agegroup 50-64)/Min;-5;Max:20/}
Growth projection Agegroup 65-74		GRAPH(TIME,DATE(2018;1;1);13<<yr>>);{0;(Change in Agegroup 65-74)/Min;-5;Max:20/}
Growth projection Agegroup older 74		GRAPH(TIME,DATE(2018;1;1);13<<yr>>);{0;(Change in Agegroup older than 74)/Min;-5;Max:20/}
ICE Total	vehicle	'Private ICE Vehicle'+ICE Vehicles Car Sharing FF 1'+ICE Vehicles Car Sharing SB 1'+ICE Vehicles Ride Hailing 1'+ICE Vehicles Ride Pooling 1'
ICE Vehicles Car Sharing FF	vehicle	'FleetSize Car Sharing FF 1'+BEV Car Sharing FF 2018'+PHEV Car Sharing FF 2018'
ICE Vehicles Car Sharing SB	vehicle	'ICE Vehicles Car Sharing SB'
ICE Vehicles Car Sharing SB	vehicle	'FleetSize Car Sharing SB 1'+BEV Car Sharing SB 2018'+PHEV Car Sharing SB - 2018'
ICE Vehicles Car Sharing SB 1	vehicle	'ICE Vehicles Car Sharing SB'
ICE Vehicles Ride Hailing	vehicle	'FleetSize Ride Hailing 1'+BEV Ride Hailing - 2018'+PHEV Ride Hailing - 2018'
ICE Vehicles Ride Hailing 1	vehicle	'ICE Vehicles Ride Hailing'
ICE Vehicles Ride Pooling	vehicle	'FleetSize Ride Pooling 1'+BEV Ride Pooling - 2018'+PHEV Ride Pooling - 2018'
ICE Vehicles Ride Pooling 1	vehicle	'ICE Vehicles Ride Pooling'
Impact		'Impact Driving Ban - Congestion Charge'
Impact Driving Ban - Congestion Charge		IF('Step Function Driving Ban - Congestion Charge')=1;1;'Step Function Driving Ban - Congestion Charge'-1)
Impact Driving Ban on Private Vehicle Attractivity		IF(Congestion Charge - Driving Bans=0;1;IF(Congestion Charge - Driving Bans=1;0,95;IF(Congestion Charge - Driving Bans=2;0,90;IF(Congestion Charge - Driving Bans=3;0,75;0))))
Impact of Space on Car Attractivity - Driver		1
Impact of Space on Car Attractivity - Passenger		0
Impact of Space on ODM Services		2
Impact of Traffic Flow on Car Attractivity		2
Impact of Traffic Flow on Car Attractivity - Passenger		2
Impact of Traffic Flow on ODM		2
Increase in BEV New Registrations	%	GRAPH(TIME,DATE(2018;1;1);13<<yr>>);{New Registrations Share BEV;'(BEV in 2030)*100<<%>>/Min;-5;Max:20/}
Increase in Fleet size Car Sharing FF	vehicle/da	XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R18C4")<<vehicle/da>>
Increase in Fleet size Car Sharing SB	vehicle/da	XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R26C4")<<vehicle/da>>
Increase in Fleet size Ride Hailing	vehicle/da	XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R34C4")<<vehicle/da>>
Increase in Fleet size Ride Pooling	vehicle/da	XLDATA("C:/Users/q428759/Desktop/PowerSim Studio/Model Update August 2019-/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R43C4")<<vehicle/da>>
Increase in PHEV New Registrations	%	GRAPH(TIME,DATE(2018;1;1);13<<yr>>);{PHEV Share;'(PHEV in 2030)*100<<%>>/Min;-5;Max:20/}
Increase in Share BEV New Registrations	%	'Increase in BEV New Registrations'
Increase in Share PHEV New Registrations	%	'Increase in PHEV New Registrations'
Increase Number of Trips MIV Passenger	trip	'Decrease Number of trips car 1'*(-Change Trips Car - MIV Passenger)*(Average trip Length Motorized individual Traffic - Driver/Average trip Length Motorized individual Traffic - Passenger)
Increase Number of trips ODM	trip	'Decrease Number of trips car 1'*(-Change Trips Car - ODM)*(Average trip Length Motorized individual Traffic - Driver/Average trip Length ODM)
Increase Number of trips PT	trip	'Decrease Number of trips car 1'*(-Change Trips Car - PT)*(Average trip Length Motorized individual Traffic - Driver/Average trip Length Public Transport)
Mobility Demand Cycling	person*km	'PKM Cycling'*Hilfsvariable_1
Mobility Demand MIV - Driver	person*km	'PKM Motorized individual Traffic - Driver'*Hilfsvariable_1
Mobility Demand MIV - Passenger	person*km	'PKM Motorized individual Traffic - Passenger'*Hilfsvariable_1
Mobility Demand ODM	person*km	'PKM ODM'*Hilfsvariable_1
Mobility Demand per Person per Day	km	IF('Switch Mobility Demand Input'=0;'Daily Mobility Demand per Person';'Constant Daily Mobility Demand')
Mobility Demand Public Transport	person*km	'PKM Public Transport'*Hilfsvariable_1
Mobility Demand Public Transport - 1	person*km	'Average trip Length Public Transport'*Hilfsvariable_1*'Number of Trips Public Transport'
Mobility Demand Walking	person*km	'PKM Walking'*Hilfsvariable_1
Mode Attractivity Bicycle		(Adjustment Bike*'Adjustment Factor Mode Attractivity')
Mode Attractivity MIV - Driver		(Adjustment Car*'Adjustment Factor Mode Attractivity')
Mode Attractivity MIV - Passenger		(Adjustment Car - Passenger*'Adjustment Factor Mode Attractivity')
Mode Attractivity ODM		(Adjustment ODM*'Adjustment Factor Mode Attractivity')
Mode Attractivity Public Transport		(Adjustment PT*'Adjustment Factor Mode Attractivity')
Mode Attractivity Walking		(Adjustment Walk*'Adjustment Factor Mode Attractivity')
Mode Share Bicycle	%	IF('Activate ODM Scenarios'=0; LOOKUP('Data Input Model Split Bicycle';YEAR Variable';MONTH Variable')*1<<%>>; LOOKUP('Data Input Model Split Bicycle';YEAR Variable';MONTH Variable')*1<<%>>+'Adjustment Bicycle')
Mode Share Bicycle 1	%	'Mode Share Bicycle'*Mode Attractivity Bicycle'
Mode Share MIV - Driver	%	IF('Activate ODM Scenarios'=0; LOOKUP('Data Input Model Split Motorized individual Traffic Driver';YEAR Variable';MONTH Variable')*1<<%>>; LOOKUP('Data Input Model Split Motorized individual Traffic Driver';YEAR Variable';MONTH Variable')*1<<%>>+'Adjustment Motorized individual Traffic - Driver')
Mode Share MIV - Driver 1	%	'Mode Share Motorized individual Traffic - Driver'*Mode Attractivity Motorized individual Traffic - Driver'
Mode Share MIV - Passenger	%	IF('Activate ODM Scenarios'=0; LOOKUP('Data Input Model Split Motorized individual Traffic Passenger';YEAR Variable';MONTH Variable')*1<<%>>; LOOKUP('Data Input Model Split Motorized individual Traffic Passenger';YEAR Variable';MONTH Variable')*1<<%>>+'Adjustment Motorized individual Traffic - Passenger')
Mode Share MIV - Passenger 1	%	'Mode Share Motorized individual Traffic - Passenger'*Mode Attractivity Motorized individual Traffic - Passenger'
Mode Share ODM	%	IF('Activate ODM Scenarios'=0; LOOKUP('Data Input Model Split ODM';YEAR Variable';MONTH Variable')*1<<%>>; LOOKUP('Data Input Model Split ODM';YEAR Variable';MONTH Variable')*1<<%>>+'Mode Share Projection1 ODM')
Mode Share ODM 1	%	'Mode Share ODM'*Mode Attractivity ODM'
Mode Share ODM 2030	%	XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R2C4")<<%>>
Mode Share Projection1 ODM	%	GRAPH(TIME,DATE(2018;1;1);13<<yr>>);{0;(Mode Share ODM 2030)/Min;-5;Max:20/}
Mode Share Public Transport	%	IF('Activate ODM Scenarios'=0; LOOKUP('Data Input Model Split Public Transport';YEAR Variable';MONTH Variable')*1<<%>>; LOOKUP('Data Input Model Split Public Transport';YEAR Variable';MONTH Variable')*1<<%>>+'Adjustment Public Transport')
Mode Share Public Transport 1	%	'Mode Share Public Transport'*Mode Attractivity Public Transport'
Mode Share Walking	%	IF('Activate ODM Scenarios'=0; LOOKUP('Data Input Model Split Walking';YEAR Variable';MONTH Variable')*1<<%>>; LOOKUP('Data Input Model Split Walking';YEAR Variable';MONTH Variable')*1<<%>>+'Adjustment Walking')
Mode Share Walking 1	%	'Mode Share Walking'*Mode Attractivity Walking'
MONTH Variable		MONTH(TIME)
New BEV Registration	vehicle/yr	'Private Vehicle Registration'*Increase in Share BEV New Registrations'
New PHEV Registration	vehicle/yr	'Private Vehicle Registration'*Increase in Share PHEV New Registrations'
New Registrations Share BEV	%	(Number BEV Vehicles 2018/Number of Vehicles in Munich 2018)*100<<%>>
New Vehicle to stock	vehicle/yr	'Total Private Number Vehicles/(2*Average Age Vehicle Munich)+ IF('Vehicle Registration - Delay Variable'<0<<vehicle>>;0<<vehicle>>;'Vehicle Registration - Delay Variable')/1<<mo>>
Niveau_1 Car Sharing FF	km/vehicle	0<<km/vehicle>>
Niveau_1 Car Sharing SB	km/vehicle	0<<km/vehicle>>
Niveau_1 Ride Hailing	km/vehicle	0<<km/vehicle>>
Niveau_1 Ride Pooling	km/vehicle	0<<km/vehicle>>
Nox Data	g/km	LOOKUP('NOx Data Input';YEAR Variable';MONTH Variable')*1<<g/km>>
Nox Data Input		XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Emission HBEFA Input"; "R2C3;R15C14")
Nox Emission Car Sharing FF	g	(Emission ICE Car Sharing FF+'Emission PHEV Car Sharing FF')*NOx Data'
Nox Emission Car Sharing SB	g	(Emission ICE Car Sharing SB+'Emission PHEV Car Sharing SB')*NOx Data'

NOx Emission Private Vehicle KM	g	(Emission ICE Private Vehicle KM+Emission PHEV Private Vehicle KM)*NOx Data'
NOx Emission Ride Hailing	g	(Emission ICE Ride Hailing+Emission PHEV Ride Hailing)*NOx Data'
NOx Emission Ride Pooling	g	(Emission ICE Ride Hailing - Copy'+Emission PHEV Ride Hailing - Copy')*NOx Data'
NOx Emission total ICE	g	'NOx Emission Private Vehicle KM'+NOx Emission Car Sharing FF'+NOx Emission Car Sharing SB'+NOx Emission Ride Hailing'+NOx Emission Ride Pooling'+Public Bus Emission NOx'
NOx pro PKM Bus	g	XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R128C4")<<gr>>
Number BEV Vehicles 2018	vehicle	XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R51C4")<<vehicle>>
Number ICE Vehicles 2018	vehicle	INIT('Private ICE Vehicle')
Number of Cars Parking in Public Space	vehicle	(Total Private Vehicles 1*Private Cars Parking in Public Space)+(Fleet Size Car Sharing FF Total*Car Sharing FF Cars Parking in Public Space)+(Fleet Size Car Sharing SB Total*Car Sharing SB Cars Parking in Public Space)+(Fleet Size Ride Hailing Total*Ride Hailing Cars Parking in Public Space)+(Fleet Size Ride Pooling Total*Ride Pooling Cars Parking in Public Space)
Number of Persons in Group 2018	person	20000<<persons>>
Number of Persons in Group 2030	person	20000<<persons>>
Number of Trips Cycling	trip	'Mode Share Bicycle 1*Number of Trips per Day'
Number of Trips MIV - Driver	trip	(Mode Share Motorized individual Traffic - Driver 1*Number of Trips per Day)+Decrease Number of trips car 1'
Number of Trips MIV - Passenger	trip	(Mode Share Motorized individual Traffic - Passenger 1*Number of Trips per Day)+Increase Number of Trips MIV Passenger'
Number of Trips ODM	trip	(Number of Trips per Day*Mode Share ODM 1)+Increase Number of trips ODM'
Number of Trips per Day	trip	'Number of Trips per Person per Day*Population Munich'
Number of Trips per Person per Day	trip/person	XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input Munich Characteristics"; "R7C4")<<trip/person>>
Number of Trips Public Transport	trip	(Number of Trips per Day*Mode Share Public Transport 1)+Increase Number of trips PT'
Number of Trips Walking	trip	'Mode Share Walking 1*Number of Trips per Day'
Number of Vehicles in Munich 2018	vehicle	INIT('Population Munich')*INIT('Average private Vehicle Ownership Munich 2018')
Number PHEV Vehicles 2018	vehicle	XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R54C4")<<vehicle>>
Occupancy Car Sharing FF		XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R133C4")<<vehicle>>
Occupancy Car Sharing SB		XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R134C4")<<vehicle>>
Occupancy Factor		(2.7*Mode Share Motorized individual Traffic - Passenger)/(Mode Share Motorized individual Traffic - Driver)
Occupancy Ride Hailing		XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R135C4")<<vehicle>>
Occupancy Ride Pooling during Trip		XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R40C4")<<vehicle>>
ODM Control variable	%	'Car Sharing FF'+Car Sharing SB'+Ride Hailing'+Ride Pooling'
ODM Vehicle	vehicle	'BEV Vehicles Car Sharing FF 1'+BEV Vehicles Car Sharing SB 1'+BEV Vehicles Ride Hailing 1'+BEV Vehicles Ride Pooling 1'+ICE Vehicles Car Sharing FF 1'+ICE Vehicles Car Sharing SB 1'+ICE Vehicles Ride Hailing 1'+ICE Vehicles Ride Pooling 1'+PHEV Vehicles Car Sharing FF 1'+PHEV Vehicles Car Sharing SB 1'+PHEV Vehicles Ride Hailing 1'+PHEV Vehicles Ride Pooling 1'
ODM Vehicle Input	vehicle	((Fleet Size Car Sharing FF Total-INIT('Fleet Size Car Sharing FF Total'))*Vehicle Abolition CS FF*1<<1/vehicle>>)+((Fleet Size Car Sharing SB Total-INIT('Fleet Size Car Sharing SB Total'))*Vehicle Abolition CS SB*1<<1/vehicle>>)
older 74 Years	person	(136178+Growth projection Agegroup older 74)*1<<persons>>
Overall Utilization Bus	person/vehicle	XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input Munich Characteristics"; "R67C4")<<persons/vehicle>>
Overall Utilization Tram	person/vehicle	XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input Munich Characteristics"; "R48C4")<<person/vehicle>>
Overall Utilization U-Bahn S-Bahn	person/vehicle	270<<person/vehicle>>
Overhead Time Factor Car Sharing FF		XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R16C4")<<vehicle>>
Overhead Time Factor Car Sharing SB		XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R24C4")<<vehicle>>
Overhead Time Factor Car Sharing SB - Copy 2	%	XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R41C4")<<%>>
Overhead Time Factor Ride Hailing	%	XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R32C4")<<%>>
Overhead Trip Factor Car Sharing FF	%	XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R15C4")<<%>>
Overhead Trip Factor Car Sharing SB	%	XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R23C4")<<%>>
Overhead Trip Factor Ride Hailing	%	XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R31C4")<<%>>
Overhead Trip Factor Ride Pooling	%	XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R39C4")<<%>>
Parking Attractivity Stock		0
Parking Space Needed	m <sup>2</sup>	(Number of Cars Parking in Public Space*Space per Parking Spot)/1<<vehicle>>
Penetration Rate BEV 1	%	XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R62C4")<<%>>
Penetration Rate BEV 1 CS SB	%	XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R67C4")<<%>>
Penetration Rate BEV 1 Ride Pooling	%	XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R83C4")<<%>>
Penetration Rate BEV 1 Ride Hailing	%	XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R75C4")<<%>>
Penetration Rate PHEV 1	%	XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R83C4")<<%>>
Penetration Rate PHEV 1 CS SB	%	XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R70C4")<<%>>
Penetration Rate PHEV Ride Hailing	%	XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R78C4")<<%>>
Penetration Rate PHEV Ride Pooling	%	XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R86C4")<<%>>
Percentage BEV Car Sharing FF		'BEV Vehicles Car Sharing FF 1'/Fleet Size Car Sharing FF Total'
Percentage BEV Car Sharing SB		'BEV Vehicles Car Sharing SB 1'/Fleet Size Car Sharing SB Total'
Percentage BEV Car Sharing SB - Copy		'BEV Vehicles Ride Hailing 1'/Fleet Size Ride Hailing Total'
Percentage BEV Private Vehicle		'Private BEV Vehicles 1'/Total Private Vehicles 1'
Percentage BEV Ride Pooling		'BEV Vehicles Ride Pooling 1'/Fleet Size Ride Pooling Total'
Percentage ICE Car Sharing FF		'ICE Vehicles Car Sharing FF 1'/Fleet Size Car Sharing FF Total'
Percentage ICE Car Sharing SB		'ICE Vehicles Car Sharing SB 1'/Fleet Size Car Sharing SB Total'
Percentage ICE Car Sharing SB - Copy		'ICE Vehicles Ride Hailing 1'/Fleet Size Ride Hailing Total'
Percentage ICE Private Vehicle		'Private ICE Vehicles 1'/Total Private Vehicles 1'
Percentage ICE Ride Pooling		'ICE Vehicles Ride Pooling 1'/Fleet Size Ride Pooling Total'
Percentage PHEV Car Sharing FF		'PHEV Vehicles Car Sharing FF 1'/Fleet Size Car Sharing FF Total'
Percentage PHEV Car Sharing SB		'PHEV Vehicles Car Sharing SB 1'/Fleet Size Car Sharing SB Total'
Percentage PHEV Car Sharing SB - Copy		'PHEV Vehicles Ride Hailing 1'/Fleet Size Ride Hailing Total'
Percentage PHEV Private Vehicle		'Private PHEV Vehicles 1'/Total Private Vehicles 1'
Percentage PHEV Ride Pooling		'PHEV Vehicles Ride Pooling 1'/Fleet Size Ride Pooling Total'
PHEV Car Sharing FF 2018	vehicle	XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R58C4")<<vehicle>>
PHEV Car Sharing SB - 2018	vehicle	XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R69C4")<<vehicle>>
PHEV in 2030	%	XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R55C4")<<%>>
PHEV Ride Hailing - 2018	vehicle	XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R77C4")<<vehicle>>
PHEV Ride Pooling - 2018	vehicle	XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R85C4")<<vehicle>>
PHEV Share	%	'Number PHEV Vehicles 2018'/Number of Vehicles in Munich 2018'
PHEV Total	vehicle	'Private PHEV Vehicles 1'+PHEV Vehicles Car Sharing FF 1'+PHEV Vehicles Car Sharing SB 1'+PHEV Vehicles Ride Hailing 1'+PHEV Vehicles Ride Pooling 1'
PHEV Vehicles Car Sharing FF	vehicle	'PHEV Car Sharing FF 2018'
PHEV Vehicles Car Sharing FF 1	vehicle	'PHEV Vehicles Car Sharing FF'
PHEV Vehicles Car Sharing SB	vehicle	'PHEV Car Sharing SB - 2018'
PHEV Vehicles Car Sharing SB 1	vehicle	'PHEV Vehicles Car Sharing SB'
PHEV Vehicles Ride Hailing	vehicle	'PHEV Ride Hailing - 2018'
PHEV Vehicles Ride Hailing 1	vehicle	'PHEV Vehicles Ride Hailing'
PHEV Vehicles Ride Pooling	vehicle	'PHEV Ride Pooling - 2018'
PHEV Vehicles Ride Pooling 1	vehicle	'PHEV Vehicles Ride Pooling'
PKM Car Sharing FF	person*km	'Trips Car Sharing FF*Average trip Length ODM*1<<person>>
PKM Car Sharing SB	person*km	'Trips Carsharing SB*Average trip Length ODM*1<<person>>
PKM Cycling	km	'Number of Trips Cycling*Average trip Length Cycling'
PKM Motorized individual Traffic - Driver	km	'Number of Trips Motorized individual Traffic - Driver*Average trip Length Motorized individual Traffic - Driver'
PKM MIV - Passenger	km	'Average trip Length Motorized individual Traffic - Passenger*Number of Trips Motorized individual Traffic - Passenger'
PKM ODM	km	'Average trip Length ODM*Number of Trips ODM'
PKM Public Transport	km	'Number of Trips Public Transport*Average trip Length Public Transport'
PKM Ride Hailing	person*km	'Trips Ride Hailing*Average trip Length ODM*1<<person>>
PKM Ride Pooling	person*km	'Trips Ride Pooling*Average trip Length ODM*1<<person>>
PKM Walking	km	'Number of Trips Walking*Average trip Length Walking'
PM Data	g/km	LOOKUP('PM Data Input';YEAR Variable';MONTH Variable')*1<<gr/km>>
PM Data Input		XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Emission HBEFA Input"; "R32C3:R45C14")
PM Emission Car Sharing FF	g	(Emission ICE Car Sharing FF+Emission PHEV Car Sharing FF)*PM Data'
PM Emission Car Sharing SB	g	(Emission ICE Car Sharing SB+Emission PHEV Car Sharing SB)*PM Data'
PM Emission Private Vehicle KM	g	(Emission ICE Private Vehicle KM+Emission PHEV Private Vehicle KM)*PM Data'
PM Emission Ride Hailing	g	(Emission ICE Ride Hailing+Emission PHEV Ride Hailing)*PM Data'
PM Emission Ride Pooling	g	(Emission ICE Ride Hailing - Copy'+Emission PHEV Ride Hailing - Copy)*PM Data'

PM Emission total ICE	g	'PM Emission Private Vehicle KM'+PM Emission Car Sharing FF'+PM Emission Car Sharing SB'+PM Emission Ride Hailing'+PM Emission Ride Pooling'+ Public Bus Emission PM'
PM pro PKM Bus	g	<b>XLDATA</b> ("C://Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R129C4")<<gr>>
Population	person	'Population Munich'
Population 2010	person	'2018 Agegroup 0 - 17'+2018 Agegroup 18 - 29'+2018 Agegroup 30-49'+2018 Agegroup 50-64'+2018 Agegroup 65-74'+2018 Agegroup older than 74'
Population 2030	person	'2030 Agegroup 0 - 17'+2030 Agegroup 18 - 29'+2030 Agegroup 30-49'+2030 Agegroup 50-64'+2030 Agegroup 65-74'+2030 Agegroup older than 74'
Population Munich	person	'0-17 Years'+18-29 Years'+30-49 Years'+49-64 years'+65-74 Years'+older 74 Years'
Private BEV Vehicles	vehicle	'Number BEV Vehicles 2018'
Private BEV Vehicles 1	vehicle	'Private BEV Vehicles'
Private Cars Parking in Public Space	%	<b>XLDATA</b> ("C://Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R96C4")<<e%>>
Private ICE Vehicle	vehicle	'Total Private Number Vehicles -Private PHEV Vehicles -Private BEV Vehicles'
Private ICE Vehicles 1	vehicle	'Private ICE Vehicle'
Private PHEV Vehicles	vehicle	'Number PHEV Vehicles 2018'
Private PHEV Vehicles 1	vehicle	'Private PHEV Vehicles'
Private Vehicle	vehicle	'Private ICE Vehicle'+Private PHEV Vehicles 1'+Private BEV Vehicles 1'
Private Vehicle Registration	vehicle/yr	'New Vehicle to stock'
Projection Share ODM Car Sharing FF	%	<b>GRAPH(TIME,DATE)</b> (2018;1;1;1;13<<yr>>){(Share Car Sharing FF 2018;(Car Sharing FF))}
Projection Share ODM Car Sharing SB	%	<b>GRAPH(TIME,DATE)</b> (2018;1;1;1;13<<yr>>){(Share Car Sharing SB 2018;(Car Sharing SB))}
Projection Share ODM Ride Hailing	%	<b>GRAPH(TIME,DATE)</b> (2018;1;1;1;13<<yr>>){(Share Ride Hailing 2018;(Ride Hailing))}
Projection Share ODM Ride Pooling	%	<b>GRAPH(TIME,DATE)</b> (2018;1;1;1;13<<yr>>){(Share Ride Pooling 2018;(Ride Pooling))}
Proportion of mobile persons per Day	%	91<<e%>>
PT Trips Bus	%	<b>XLDATA</b> ("C://Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input Munich Characteristics"; "R39C4")<<e%>>
PT Trips Tram	%	<b>XLDATA</b> ("C://Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input Munich Characteristics"; "R38C4")<<e%>>
Public Bus Emission CO2	g	(VKM PT Bus*1<<vehicle>>)*Share of ICE Busses*(CO2 pro PKM Bus*1<<1/(person*km)>>)*Overall Utilization Bus)
Public Bus Emission NOx	g	(VKM PT Bus*1<<vehicle>>)*Share of ICE Busses*(NOx pro PKM Bus*1<<1/(person*km)>>)*Overall Utilization Bus)
Public Bus Emission PM	g	(VKM PT Bus*1<<vehicle>>)*Share of ICE Busses*(PM pro PKM Bus*1<<1/(person*km)>>)*Overall Utilization Bus)
Public Transport PKM Bus	person*km	'Number of Trips Public Transport*PT Trips Bus*Average Trip Length Public Transport - Bus'
Public Transport PKM Tram	person*km	'Number of Trips Public Transport*PT Trips Tram*Average Trip Length Public Transport - Tram'
Public Transport PKM U-Bahn S-Bahn	person*km	'Mobility Demand Public Transport - 1'-Public Transport PKM Bus'-Public Transport PKM Tram'
Ride Hailing	%	<b>XLDATA</b> ("C://Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R30C4")<<e%>>
Ride Hailing Cars Parking in Public Space	%	<b>XLDATA</b> ("C://Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R99C4")<<e%>>
Ride Hailing Minutes in Movement	min/(vehicle*h)	'Fleet Utilization Ride Hailing'/Average Speed in City*60<<min/h>>
Ride Hailing Penetration Rate BEV	%	<b>GRAPH(TIME,DATE)</b> (2018;1;1;1;13<<yr>>){(Szenario BEV Ride Hailing'-2018)*1<<yr>>}{((BEV Ride Hailing - 2018)/FleetSize Ride Hailing 1)*100<<e%>>};Penetration Rate BEV 1 Ride Hailing 1)}
Ride Hailing Penetration Rate PHEV	%	<b>GRAPH(TIME,DATE)</b> (2018;1;1;1;13<<yr>>){(Szenario PHEV Ride Hailing'-2018)*1<<yr>>}{((PHEV Ride Hailing - 2018)/FleetSize Ride Hailing 1);Penetration Rate PHEV Ride Hailing 1)}
Ride Pooling	%	<b>XLDATA</b> ("C://Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R38C4")<<e%>>
Ride Pooling Cars Parking in Public Space	%	<b>XLDATA</b> ("C://Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R100C4")<<e%>>
Ride Pooling Penetration Rate BEV	%	<b>GRAPH(TIME,DATE)</b> (2018;1;1;1;13<<yr>>){(Szenario BEV Ride Pooling'-2018)*1<<yr>>}{((BEV Ride Pooling - 2018)/FleetSize Ride Pooling 1)*100<<e%>>};Penetration Rate BEV 1 Ride Pooling 1)}
Ride Pooling Penetration Rate PHEV	%	<b>GRAPH(TIME,DATE)</b> (2018;1;1;1;13<<yr>>){(Szenario PHEV Ride Pooling'-2018)*1<<yr>>}{((PHEV Ride Pooling - 2018)/FleetSize Ride Pooling 1);Penetration Rate PHEV Ride Pooling 1)}
Sensitivity Attractivity Adjustment ODM		<b>IF</b> (Impact of Traffic Flow on ODM=0;0.001; <b>IF</b> (Impact of Traffic Flow on ODM=1;0.002; <b>IF</b> (Impact of Traffic Flow on ODM=2;0.0035;0.006))
Sensitivity Attractivity Adjustment Private Car - Driver		<b>IF</b> (Impact of Traffic Flow on Car Attractivity=0;0.001; <b>IF</b> (Impact of Traffic Flow on Car Attractivity=1;0.002; <b>IF</b> (Impact of Traffic Flow on Car Attractivity=2;0.0035;0.006))
Sensitivity Attractivity Adjustment Private Car - Passenger		<b>IF</b> (Impact of Traffic Flow on Car Attractivity -Passenger=0;0.001; <b>IF</b> (Impact of Traffic Flow on Car Attractivity -Passenger=1;0.002; <b>IF</b> (Impact of Traffic Flow on Car Attractivity -Passenger=2;0.0035;0.006))
Sensitivity Space Adjustment		<b>IF</b> (Impact of Space on Car Attractivity - Driver=0;0.001; <b>IF</b> (Impact of Space on Car Attractivity - Driver=1;0.002; <b>IF</b> (Impact of Space on Car Attractivity - Driver=2;0.0035;0.006))
Share Car Sharing FF 2018	%	<b>XLDATA</b> ("C://Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R13C4")<<e%>>
Share Car Sharing SB 2018	%	<b>XLDATA</b> ("C://Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R21C4")<<e%>>
Share of conventional drive BEV Car Sharing FF	%	<b>XLDATA</b> ("C://Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R112C4")<<e%>>
Share of conventional drive BEV Car Sharing SB	%	<b>XLDATA</b> ("C://Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R116C4")<<e%>>
Share of conventional drive BEV Private	%	<b>XLDATA</b> ("C://Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R107C4")<<e%>>
Share of conventional drive BEV Ride Hailing	%	<b>XLDATA</b> ("C://Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R120C4")<<e%>>
Share of conventional drive BEV Ride Pooling	%	<b>XLDATA</b> ("C://Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R124C4")<<e%>>
Share of conventional drive ICE Car Sharing FF	%	<b>XLDATA</b> ("C://Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R110C4")<<e%>>
Share of conventional drive ICE Car Sharing SB	%	<b>XLDATA</b> ("C://Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R114C4")<<e%>>
Share of conventional drive ICE Private	%	<b>XLDATA</b> ("C://Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R105C4")<<e%>>
Share of conventional drive ICE Ride Hailing	%	<b>XLDATA</b> ("C://Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R118C4")<<e%>>
Share of conventional drive ICE Ride Pooling	%	<b>XLDATA</b> ("C://Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R122C4")<<e%>>
Share of conventional drive PHEV Car Sharing FF	%	<b>XLDATA</b> ("C://Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R111C4")<<e%>>
Share of conventional drive PHEV Car Sharing SB	%	<b>XLDATA</b> ("C://Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R115C4")<<e%>>
Share of conventional drive PHEV Private	%	<b>XLDATA</b> ("C://Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R106C4")<<e%>>
Share of conventional drive PHEV Ride Hailing	%	<b>XLDATA</b> ("C://Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R119C4")<<e%>>
Share of conventional drive PHEV Ride Pooling	%	<b>XLDATA</b> ("C://Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R123C4")<<e%>>
Share of electric drive BEV Car Sharing FF	%	100<<e%>>-Share of conventional drive BEV Car Sharing FF'
Share of electric drive BEV Car Sharing SB	%	100<<e%>>-Share of conventional drive BEV Car Sharing SB'
Share of electric drive BEV Private	%	100<<e%>>-Share of conventional drive BEV Private'
Share of electric drive BEV Ride Hailing	%	100<<e%>>-Share of conventional drive BEV Ride Hailing'
Share of electric drive BEV Ride Pooling	%	100<<e%>>-Share of conventional drive BEV Ride Pooling'
Share of electric drive PHEV Car Sharing FF	%	100<<e%>>-Share of conventional drive PHEV Car Sharing FF'
Share of electric drive PHEV Car Sharing SB	%	100<<e%>>-Share of conventional drive PHEV Car Sharing SB'
Share of electric drive PHEV Private	%	100<<e%>>-Share of conventional drive PHEV Private'
Share of electric drive PHEV Ride Hailing	%	100<<e%>>-Share of conventional drive PHEV Ride Hailing'
Share of electric drive PHEV Ride Pooling	%	100<<e%>>-Share of conventional drive PHEV Ride Pooling'
Share of electric driven Buses in 2030	%	<b>XLDATA</b> ("C://Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R126C4")<<e%>>
Share of Electric Driven Buses	%	<b>GRAPH(TIME,DATE)</b> (2018;1;1;1;13<<yr>>){(2030'-2018)*1<<yr>>}{0;Share of electric driven Buses in 2030)}
Share of Electric Driven Buses	%	1'-Share of Electric Driven Buses'
Share of the route on the road Bus	%	<b>XLDATA</b> ("C://Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input Munich Characteristics"; "R62C4")
Share of the route on the road Tram	%	<b>XLDATA</b> ("C://Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input Munich Characteristics"; "R43C4")
Share of the route on the road U-Bahn	%	0 / <b>XLDATA</b> ("C://Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input Munich Characteristics"; "R51C4")
Share Ride Hailing 2018	%	<b>XLDATA</b> ("C://Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R29C4")<<e%>>
Share Ride Pooling 2018	%	<b>XLDATA</b> ("C://Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R37C4")<<e%>>
Shift Bicycle to ODM	%	<b>XLDATA</b> ("C://Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R6C4")<<e%>>
Shift Motorized individual Traffic - Driver to ODM	%	<b>XLDATA</b> ("C://Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R8C4")<<e%>>
Shift Motorized individual Traffic - Passenger to ODM	%	<b>XLDATA</b> ("C://Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R9C4")<<e%>>
Shift Public Transport to ODM	%	<b>XLDATA</b> ("C://Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R7C4")<<e%>>
Shift Walk to ODM	%	<b>XLDATA</b> ("C://Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R5C4")<<e%>>
Space per Parking Spot	m <sup>2</sup>	<b>XLDATA</b> ("C://Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R101C4")<<e%>>
Step Function Driving Ban - Congestion Charge		1-STEP/Impact Driving Ban on Private Vehicle Attractivity;DATE(Date Driving Bans occur))
Stock CO2 Emission Car Sharing FF	t	0<<t>>
Stock CO2 Emission Car Sharing FF BEV PHEV	t	0<<t>>
Stock CO2 Emission Car Sharing SB	t	0<<t>>
Stock CO2 Emission Car Sharing SB BEV PHEV	t	0<<t>>
Stock CO2 Emission Private BEV PHEV - 1	t	0<<t>>
Stock CO2 Emission Private Vehicle KM	t	0<<t>>
Stock CO2 Emission Public Bus	t	0<<t>>
Stock CO2 Emission Ride Hailing 1	t	0<<t>>
Stock CO2 Emission Ride Hailing BEV PHEV	t	0<<t>>
Stock CO2 Emission Ride Pooling	t	0<<t>>
Stock CO2 Emission Ride Pooling BEV PHEV - Copy	t	0<<t>>
Stock CO2 Total Emission Car Sharing FF	t	0<<t>>

Stock CO2 Total Emission Car Sharing SB	t	0<<t>>
Stock CO2 Total Emission Private Vehicle KM	t	0<<t>>
Stock CO2 Total Emission Ride Hailing	t	0<<t>>
Stock CO2 Total Emission Ride Pooling	t	0<<t>>
Stock NOx Emission Car Sharing FF	t	0<<t>>
Stock NOx Emission Car Sharing SB	t	0<<t>>
Stock NOx Emission Private Vehicle KM	t	0<<t>>
Stock NOx Emission Public Bus	t	0<<t>>
Stock NOx Emission Ride Hailing	t	0<<t>>
Stock NOx Emission Ride Pooling	t	0<<t>>
Stock PM Emission Car Sharing FF	t	0<<t>>
Stock PM Emission Car Sharing SB	t	0<<t>>
Stock PM Emission Private Vehicle KM	t	0<<t>>
Stock PM Emission Public Bus	t	0<<t>>
Stock PM Emission Ride Hailing	t	0<<t>>
Stock PM Emission Ride Pooling	t	0<<t>>
Sum Mobility Demand	person*km	'Mobility Demand Walking'+Mobility Demand Cycling'+Mobility Demand Public Transport'+Mobility Demand Motorized individual Traffic - Driver'+Mobility Demand Motorized individual Traffic - Passenger'+Mobility Demand ODM'
Sum Mobility Demand 1	km	'PKM Walking'+PKM Cycling'+PKM Public Transport'+PKM Motorized individual Traffic - Driver'+PKM Motorized individual Traffic - Passenger'+PKM ODM'
Sum Number of trips	trip	'Number of Trips Walking'+Number of Trips Cycling'+Number of Trips Public Transport'+Number of Trips Motorized individual Traffic - Driver'+Number of Trips Motorized individual Traffic - Passenger'+Number of Trips ODM'
Switch Mobility Demand Input	1	
Szenario BEV Car Sharing FF	2025	
Szenario BEV Car Sharing SB	2025	
Szenario BEV Ride Hailing	2025	
Szenario BEV Ride Pooling	2025	
Szenario PHEV Car Sharing FF	2025	
Szenario PHEV Car Sharing SB	2025	
Szenario PHEV Ride Hailing	2025	
Szenario PHEV Ride Pooling	2025	
Total Change in Population	person	'Population 2030'-Population 2018'
Total Change in Population in %	%	((Population 2030/Population 2018)-1)*100<<%>>
Total CO2 Emissions	t	'Stock CO2 Total Emission Private Vehicle KM'+Stock CO2 Emission Public Bus'+Stock CO2 Total Emission Car Sharing FF'+Stock CO2 Total Emission Car Sharing SB'+Stock CO2 Total Emission Ride Hailing'+Stock CO2 Total Emission Ride Pooling'
Total Daily Mobility Demand Munich	person*km	'Mobility Demand per Person per Day'*Population Munich'
Total NOx Emissions	t	'Stock NOx Emission Private Vehicle KM'+Stock NOx Emission Public Bus'+Stock NOx Emission Car Sharing FF'+Stock NOx Emission Car Sharing SB'+Stock NOx Emission Ride Hailing'+Stock NOx Emission Ride Pooling'
Total PM Emissions	t	'Stock PM Emission Private Vehicle KM'+Stock PM Emission Public Bus'+Stock PM Emission Car Sharing FF'+Stock PM Emission Car Sharing SB'+Stock PM Emission Ride Hailing'+Stock PM Emission Ride Pooling'
Total Private Number Vehicles	vehicle	'Number of Vehicles in Munich 2018'
Total Private Vehicles 1	vehicle	'Total Private Number Vehicles'
Total VKM Travelled	km	'VKM Motorized Individual Traffic - 1'+VKM PT Bus - 1'+VKM PT Tram - 1'+VKM PT U-Bahn S-Bahn - 1'+VKM ODM 1'
Traffic Adjusting Factor Bus-Vehicle		'XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R93C4")'
Traffic Adjusting Factor Tram-Vehicle		'XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R91C4")'
Traffic Adjusting Factor U-Bahn Vehicle -		15
Trips Car Sharing FF	trip	'Projection Share ODM Car Sharing FF'*Number of Trips ODM'
Trips Carsharing SB	trip	'Projection Share ODM Car Sharing SB'*Number of Trips ODM'
Trips Ride Hailing	trip	'Projection Share ODM Ride Hailing'*Number of Trips ODM'
Trips Ride Pooling	trip	'Number of Trips ODM'*Projection Share ODM Ride Pooling'
Utilization Increase Car Sharing FF	km/vehicle	10<<km/vehicle>>
Utilization Increase Car Sharing SB	km/vehicle	10<<km/vehicle>>
Utilization Increase Ride Hailing	km/vehicle	10<<km/vehicle>>
Utilization Increase Ride Pooling	km/vehicle	30<<km/vehicle>>
Vehicle Abolition CS FF	vehicle	'XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R50C4")<<vehicle>>
Vehicle Abolition CS SB	vehicle	'XLDATA("C:/Future On-Demand Mobility Impact Simulation.xlsx"; "Input On-Demand Mobility Data"; "R49C4")<<vehicle>>
Vehicle Abolition ODM	vehicle	0<<vehicle>>
Vehicle Abolition	vehicle/yr	'(Total Private Number Vehicles)/(2*Average Age Vehicle Munich)'+Abolition caused by Car Sharing 1'
Vehicle BEV Car Sharing FF	vehicle	'Car Sharing FF Penetration Rate BEV'*Fleet Size Car Sharing FF Total'
Vehicle BEV Car Sharing SB	vehicle	'Car Sharing SB Penetration Rate BEV'*Fleet Size Car Sharing SB Total'
Vehicle BEV Ride Hailing	vehicle	'Ride Hailing Penetration Rate BEV'*Fleet Size Ride Hailing Total'
Vehicle BEV Ride Pooling	vehicle	'Ride Pooling Penetration Rate BEV'*Fleet Size Ride Pooling Total'
Vehicle PHEV Car Sharing FF	vehicle	'Car Sharing FF Penetration Rate PHEV'*Fleet Size Car Sharing FF Total'
Vehicle PHEV Car Sharing SB	vehicle	'Car Sharing SB Penetration Rate PHEV'*Fleet Size Car Sharing SB Total'
Vehicle PHEV Ride Hailing	vehicle	'Ride Hailing Penetration Rate PHEV'*Fleet Size Ride Hailing Total'
Vehicle PHEV Ride Pooling	vehicle	'Ride Pooling Penetration Rate PHEV'*Fleet Size Ride Pooling Total'
Vehicle Registration	vehicle	'(Population Munich*Average private Vehicle Ownership Munich 2018)-Number of Vehicles in Munich 2018)
VKM Attractivity Stock	0	
VKM Car Sharing FF 1	km	((PKM Car Sharing FF*1/Occupancy Car Sharing FF)+(PKM Car Sharing FF*Overhead Trip Factor Car Sharing FF))*1<<1/person>>
VKM Car Sharing SB 1	km	((PKM Car Sharing SB*1/Occupancy Car Sharing SB)+(PKM Car Sharing SB*Overhead Trip Factor Car Sharing SB))*1<<1/person>>
VKM Motorized Individual Traffic	km	'Mobility Demand Motorized individual Traffic - Driver'*1<<vehicle/person>>*1<<1/vehicle>>
VKM Motorized Individual Traffic - 1	km	'VKM Motorized Individual Traffic'
VKM ODM	km	'VKM Car Sharing FF 1'+VKM Car Sharing SB 1'+VKM Ride Hailing 1'+VKM Ride Pooling 1'
VKM ODM 1	km	'VKM ODM'
VKM PT Bus	km	'Public Transport PKM Bus'/Overall Utilization Bus'*1<<1/vehicle>>
VKM PT Bus - 1	km	'VKM PT Bus'*Share of the route on the road Bus'*Traffic Adjusting Factor Bus-Vehicle'
VKM PT Tram	km	'Public Transport PKM Tram'/Overall Utilization Tram'*1<<1/vehicle>>
VKM PT Tram - 1	km	'VKM PT Tram'*Traffic Adjusting Factor Tram-Vehicle'*Share of the route on the road Tram'
VKM PT U-Bahn S-Bahn	km	'Public Transport PKM U-Bahn S-Bahn'/Overall Utilization U-Bahn S-Bahn'*1<<1/vehicle>>
VKM PT U-Bahn S-Bahn - 1	km	'VKM PT U-Bahn S-Bahn'*Share of the route on the road U-Bahn S-Bahn'*Traffic Adjusting Factor U-Bahn Vehicle -'
VKM Ride Hailing 1	km	((PKM Ride Hailing*1/Occupancy Ride Hailing)+(PKM Ride Hailing*Overhead Trip Factor Ride Hailing))*1<<1/person>>
VKM Ride Pooling 1	km	((PKM Ride Pooling*1/Occupancy Ride Pooling)+(PKM Ride Pooling*Overhead Trip Factor Ride Pooling))*1<<1/person>>
YEAR Variable		YEAR(TIME)-2017

## Hilfsvariablen

SFD Systemelement	Einheit	Mathematische Beschreibung des Systemelements
Hilfsvariable_1	person	'Total Daily Mobility Demand Munich'/Sum Mobility Demand 1'
Hilfsvariable_2 - Copy		IF(Rate_15<0<<1/da>>;1*Sensitivity Space Adjustment - Copy; IF(Rate_15<0<<1/da>>;Sensitivity Space Adjustment - Copy;0))
Hilfsvariable_2 - Copy 2		IF(Rate_15<0<<1/da>>;1*Sensitivity Space Adjustment - Copy 2; IF(Rate_15<0<<1/da>>;Sensitivity Space Adjustment - Copy 2;0))
Hilfsvariable_20		IF(Rate_22<0<<1/da>>;1*Sensitivity Attractivity Adjustment Private Car - Driver; IF(Rate_22<0<<1/da>>;Sensitivity Attractivity Adjustment Private Car - Driver;0))
Hilfsvariable_20 - Copy		IF(Rate_22<0<<1/da>>;1*Sensitivity Attractivity Adjustment Private Car - Passenger; IF(Rate_22<0<<1/da>>;Sensitivity Attractivity Adjustment Private Car - Passenger;0))
Hilfsvariable_20 - Copy 2		IF(Rate_22<0<<1/da>>;1*Sensitivity Attractivity Adjustment ODM; IF(Rate_22<0<<1/da>>;Sensitivity Attractivity Adjustment ODM;0))
Hilfsvariable_3	@da	INT/(DATE(Date Driving Bans occur))
Sensitivity Space Adjustment - Copy		IF(Impact of Space on ODM Services=0,0,001; IF(Impact of Space on ODM Services=2;0,0035;0,006))
Sensitivity Space Adjustment - Copy 2		IF(Impact of Space on Car Attractivity - Passenger=0,0,001; IF(Impact of Space on Car Attractivity - Passenger=1;0,002; IF(Impact of Space on Car Attractivity - Passenger=2;0,0035;0,006))
Ride Pooling Minutes in Movement - Copy 2	min/(vehicle*h)	'Fleet Utilization Ride Pooling'/Average Speed in City*60<<min/h>>
Niveau_1	1	
Niveau_1 - Copy	1	
Niveau_1 - Copy 2	1	

Rate_1	vehicle/da	(Fleet Size Car Sharing FF Total' -(Car Sharing FF Penetration Rate BEV*Fleet Size Car Sharing FF Total) -(Car Sharing FF Penetration Rate PHEV*Fleet Size Car Sharing FF Total) -DELAYPPL((Fleet Size Car Sharing FF Total' -(Car Sharing FF Penetration Rate BEV*Fleet Size Car Sharing FF Total) -(Car Sharing FF Penetration Rate PHEV*Fleet Size Car Sharing FF Total);1<<da>>))*1<<1/da>>
Rate_1 Car Sharing FF	km/(da*vehicle)	(Fleet Utilization Car Sharing FF-INIT'(Fleet Utilization Car Sharing FF))*1<<1/da>>
Rate_1 Car Sharing SB	km/(da*vehicle)	(Fleet Utilization Car Sharing SB-INIT'(Fleet Utilization Car Sharing SB))*1<<1/da>>
Rate_1 Ride Hailing	km/(da*vehicle)	(Fleet Utilization Ride Hailing-INIT'(Fleet Utilization Ride Hailing))*1<<1/da>>
Rate_1 Ride Pooling	km/(da*vehicle)	(Fleet Utilization Ride Pooling-INIT'(Fleet Utilization Ride Pooling))*1<<1/da>>
Rate_10	vehicle/da	(Vehicle PHEV Ride Hailing-DELAYPPL(Vehicle PHEV Ride Hailing;1<<da>>))*1<<1/da>>
Rate_11	vehicle/da	(Fleet Size Ride Pooling Total' -(Ride Pooling Penetration Rate BEV*Fleet Size Ride Pooling Total) -(Ride Pooling Penetration Rate PHEV*Fleet Size Ride Pooling Total) -DELAYPPL((Fleet Size Ride Pooling Total' -(Ride Pooling Penetration Rate BEV*Fleet Size Ride Pooling Total) -(Ride Pooling Penetration Rate PHEV*Fleet Size Ride Pooling Total);1<<da>>))*1<<1/da>>
Rate_12	vehicle/da	(Vehicle BEV Ride Pooling-DELAYPPL(Vehicle BEV Ride Pooling;1<<da>>))*1<<1/da>>
Rate_13	vehicle/da	(Vehicle PHEV Ride Pooling-DELAYPPL(Vehicle PHEV Ride Pooling;1<<da>>))*1<<1/da>>
Rate_14	da^-1	DELAYPPL(NumberOfCarsParkingInPublicSpace*1<<1/(da*vehicle)>>;1<<da>>)
Rate_15	da^-1	IF(ParkingAttractivityStock>10000;ParkingAttractivityStock*1<<1/da>>;0*1<<1/da>>)
Rate_16	da^-1	Hilfsvariable_2*1<<1/da>>
Rate_16 - Copy	da^-1	Hilfsvariable_20*1<<1/da>>
Rate_16 - Copy 2	da^-1	Hilfsvariable_2 - Copy*1<<1/da>>
Rate_16 - Copy 3	da^-1	Hilfsvariable_2 - Copy 2*1<<1/da>>
Rate_17	da^-1	Hilfsvariable_20 - Copy*1<<1/da>>
Rate_17 - Copy	da^-1	Hilfsvariable_20 - Copy 2*1<<1/da>>
Rate_2	t/da	'CO2 Emission Private Vehicle KM*1<<1/(1000000gr*da)>>
Rate_2 - Copy	t/da	'PM Emission Private Vehicle KM*1<<1/(1000000gr*da)>>
Rate_2 - Copy 10	t/da	'CO2 Emission Car Sharing SB*1<<1/(1000000gr*da)>>
Rate_2 - Copy 11	t/da	'NOx Emission Car Sharing SB*1<<1/(1000000gr*da)>>
Rate_2 - Copy 12	t/da	'CO2 Emission Car Sharing SB BEV PHEV*1<<1/(1000000gr*da)>>
Rate_2 - Copy 13	t/da	'PM Emission Car Sharing SB*1<<1/(1000000gr*da)>>
Rate_2 - Copy 14	t/da	'CO2 Total Emission Car Sharing SB*1<<1/(1000000gr*da)>>
Rate_2 - Copy 15	t/da	'CO2 Emission Ride Hailing 1*1<<1/(1000000gr*da)>>
Rate_2 - Copy 16	t/da	'NOx Emission Ride Hailing*1<<1/(1000000gr*da)>>
Rate_2 - Copy 17	t/da	'CO2 Emission Ride Hailing BEV PHEV*1<<1/(1000000gr*da)>>
Rate_2 - Copy 18	t/da	'PM Emission Ride Hailing*1<<1/(1000000gr*da)>>
Rate_2 - Copy 19	t/da	'CO2 Total Emission Ride Hailing*1<<1/(1000000gr*da)>>
Rate_2 - Copy 2	t/da	'NOx Emission Private Vehicle KM*1<<1/(1000000gr*da)>>
Rate_2 - Copy 20	t/da	'CO2 Emission Ride Pooling*1<<1/(1000000gr*da)>>
Rate_2 - Copy 21	t/da	'NOx Emission Ride Pooling*1<<1/(1000000gr*da)>>
Rate_2 - Copy 22	t/da	'CO2 Emission Ride Pooling BEV PHEV*1<<1/(1000000gr*da)>>
Rate_2 - Copy 23	t/da	'PM Emission Ride Pooling*1<<1/(1000000gr*da)>>
Rate_2 - Copy 24	t/da	'CO2 Total Emission Ride Pooling*1<<1/(1000000gr*da)>>
Rate_2 - Copy 25	t/da	'Public Bus Emission CO2*1<<1/(1000000gr*da)>>
Rate_2 - Copy 26	t/da	'Public Bus Emission PM*1<<1/(1000000gr*da)>>
Rate_2 - Copy 27	t/da	'Public Bus Emission NOx*1<<1/(1000000gr*da)>>
Rate_2 - Copy 3	t/da	'CO2 Emission Private BEV PHEV - 1*1<<1/(1000000gr*da)>>
Rate_2 - Copy 4	t/da	'CO2 Total Emission Private Vehicle KM*1<<1/(1000000gr*da)>>
Rate_2 - Copy 5	t/da	'CO2 Emission Car Sharing FF*1<<1/(1000000gr*da)>>
Rate_2 - Copy 6	t/da	'NOx Emission Car Sharing FF*1<<1/(1000000gr*da)>>
Rate_2 - Copy 7	t/da	'CO2 Emission Car Sharing FF BEV PHEV*1<<1/(1000000gr*da)>>
Rate_2 - Copy 8	t/da	'CO2 Total Emission Car Sharing FF*1<<1/(1000000gr*da)>>
Rate_2 - Copy 9	t/da	'PM Emission Car Sharing FF*1<<1/(1000000gr*da)>>
Rate_2 Car Sharing FF	km/(da*vehicle)	DELAYPPL(Rate_1 Car Sharing FF;1<<da>>)
Rate_2 Car Sharing SB	km/(da*vehicle)	DELAYPPL(Rate_1 Car Sharing SB;1<<da>>)
Rate_2 Ride Hailing	km/(da*vehicle)	DELAYPPL(Rate_1 Ride Hailing;1<<da>>)
Rate_2 Ride Pooling	km/(da*vehicle)	DELAYPPL(Rate_1 Ride Pooling;1<<da>>)
Rate_20	da^-1	Total VKM Travelled*1<<1/(km*da)>>
Rate_21	da^-1	DELAYPPL(Total VKM Travelled*1<<1/(km*da)>>;1<<da>>)
Rate_22	da^-1	IF(VKMAttractivityStock>1000000;VKMAttractivityStock*1<<1/da>>;0*1<<1/da>>)
Rate_3	da^-1	NumberOfCarsParkingInPublicSpace*1<<1/(da*vehicle)>>
Rate_3 Car Sharing FF	km/(da*vehicle)	IF(Niveau_1 Car Sharing FF>Utilization Increase Car Sharing FF;Niveau_1 Car Sharing FF*1<<1/da>>;0<<km/(da*vehicle)>>)
Rate_3 Car Sharing SB	km/(da*vehicle)	IF(Niveau_1 Car Sharing SB>Utilization Increase Car Sharing SB;Niveau_1 Car Sharing SB*1<<1/da>>;0<<km/(da*vehicle)>>)
Rate_3 Ride Hailing	km/(da*vehicle)	IF(Niveau_1 Ride Hailing>Utilization Increase Ride Hailing;Niveau_1 Ride Hailing*1<<1/da>>;0<<km/(da*vehicle)>>)
Rate_3 Ride Pooling	km/(da*vehicle)	IF(Niveau_1 Ride Pooling>Utilization Increase Ride Pooling;Niveau_1 Ride Pooling*1<<1/da>>;0<<km/(da*vehicle)>>)
Rate_4	vehicle/da	(Vehicle BEV Car Sharing FF-DELAYPPL(Vehicle BEV Car Sharing FF;1<<da>>))*1<<1/da>>
Niveau_2	1	
Niveau_2 - Copy	1	
Niveau_2 - Copy 2	1	
Rate_4 - Copy	vehicle/da	(Vehicle PHEV Car Sharing FF-DELAYPPL(Vehicle PHEV Car Sharing FF;1<<da>>))*1<<1/da>>
Rate_4 Car Sharing FF	vehicle/da	IF(Rate_3 Car Sharing FF>0<<km/(mo*vehicle)>>;Increase in Fleet size Car Sharing FF;0<<vehicle/da>>)
Rate_4 Car Sharing SB	vehicle/da	IF(Rate_3 Car Sharing SB>0<<km/(mo*vehicle)>>;Increase in Fleet size Car Sharing SB;0<<vehicle/da>>)
Rate_4 Ride Hailing	vehicle/da	IF(Rate_3 Ride Hailing>0<<km/(mo*vehicle)>>;Increase in Fleet size Ride Hailing;0<<vehicle/da>>)
Rate_4 Ride Pooling	vehicle/da	IF(Rate_3 Ride Pooling>0<<km/(mo*vehicle)>>;Increase in Fleet size Ride Pooling;0<<vehicle/da>>)
Rate_5	vehicle/da	(Fleet Size Car Sharing SB Total' -(Car Sharing SB Penetration Rate BEV*Fleet Size Car Sharing SB Total) -(Car Sharing SB Penetration Rate PHEV*Fleet Size Car Sharing SB Total) -DELAYPPL((Fleet Size Car Sharing SB Total' -(Car Sharing SB Penetration Rate BEV*Fleet Size Car Sharing SB Total) -(Car Sharing SB Penetration Rate PHEV*Fleet Size Car Sharing SB Total);1<<da>>))*1<<1/da>>
Rate_6	vehicle/da	(Vehicle BEV Car Sharing SB-DELAYPPL(Vehicle BEV Car Sharing SB;1<<da>>))*1<<1/da>>
Rate_7	vehicle/da	(Vehicle PHEV Car Sharing SB-DELAYPPL(Vehicle PHEV Car Sharing SB;1<<da>>))*1<<1/da>>
Rate_8	vehicle/da	(Fleet Size Ride Hailing Total' -(Ride Hailing Penetration Rate BEV*Fleet Size Ride Hailing Total) -(Ride Hailing Penetration Rate PHEV*Fleet Size Ride Hailing Total) -DELAYPPL((Fleet Size Ride Hailing Total' -(Ride Hailing Penetration Rate BEV*Fleet Size Ride Hailing Total) -(Ride Hailing Penetration Rate PHEV*Fleet Size Ride Hailing Total);1<<da>>))*1<<1/da>>
Rate_9	vehicle/da	(Vehicle BEV Ride Hailing-DELAYPPL(Vehicle BEV Ride Hailing;1<<da>>))*1<<1/da>>

## Anhang 11: Model-Input für Szenario-Analyse (SE-X; SR-X; SD-X) (eigene Darstellung)

		Basis Scenario - Evolution			Scenario - Revolution			Scenario - Disruption		
		SE-1	SE-2	SE-3	SR-1	SR-2	SR-3	SD-1	SD-2	SD-3
Total Change in Population	person	200000	200000	200000	200000	200000	200000	200000	200000	200000
Mode Share ODM 2030	%	1,5	1,5	1,5	5,0	5,0	5,0	15,0	15,0	15,0
<b>Trip Substitution ODM</b>										
Walking	%	12,5	5,0	0,0	12,5	5,0	0,0	12,5	5,0	0,0
Bicycle	%	12,5	5,0	0,0	12,5	5,0	0,0	12,5	5,0	0,0
Public Transport	%	50,0	40,0	25,0	50,0	40,0	25,0	50,0	40,0	25,0
Individual Traffic - Driver	%	20,0	40,0	70,0	20,0	40,0	70,0	20,0	40,0	70,0
Individual Traffic Passenger	%	5,0	10,0	5,0	5,0	10,0	5,0	5,0	10,0	5,0
Average Trip Length ODM	km	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7
<b>Car Sharing Free-Floating</b>										
Share ODM 2018	%	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
Share ODM 2030	%	27,0	27,0	27,0	27,0	27,0	27,0	27,0	27,0	27,0
Overhead Trip Factor Car Sharing FF	%	15,0	10,0	5,0	15,0	10,0	5,0	15,0	10,0	5,0
Overhead Time Factor Car Sharing FF	%	15,0	10,0	5,0	15,0	10,0	5,0	15,0	10,0	5,0
FleetSize Car Sharing FF 1	vehicles	3000,0	3000,0	3000,0	3000,0	3000,0	3000,0	3000,0	3000,0	3000,0
Increase in Fleet size Car Sharing FF	vehicles	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	90,0	90,0	90,0
<b>Car Sharing Station-Based</b>										
Share ODM 2018	%	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Share ODM 2030	%	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
Overhead Trip Factor Car Sharing SB	%	10,0	5,0	0,0	10,0	5,0	0,0	10,0	5,0	0,0
Overhead Time Factor Car Sharing SB	%	15,0	10,0	5,0	15,0	10,0	5,0	15,0	10,0	5,0
FleetSize Car Sharing SB 1	vehicles	500,0	500,0	500,0	500,0	500,0	500,0	500,0	500,0	500,0
Increase in Fleet size Car Sharing SB	vehicles	75,0	75,0	75,0	75,0	75,0	75,0	75,0	75,0	75,0
<b>Ride Hailing</b>										
Share ODM 2018	%	64,0	64,0	64,0	64,0	64,0	64,0	64,0	64,0	64,0
Share ODM 2030	%	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
Overhead Trip Factor Ride Hailing	%	55,0	45,0	35,0	50,0	40,0	30,0	40,0	30,0	20,0
Overhead Time Factor Ride Hailing	%	15,0	10,0	5,0	15,0	10,0	5,0	15,0	10,0	5,0
FleetSize Ride Hailing	vehicles	3400,0	3400,0	3400,0	3400,0	3400,0	3400,0	3400,0	3400,0	3400,0
Increase in Fleet size Ride Hailing	vehicles	200,0	200,0	200,0	150,0	150,0	150,0	130,0	130,0	130,0
<b>Ride Pooling</b>										
Share ODM 2018	%	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Share ODM 2030	%	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
Overhead Trip Factor Ride Pooling	%	50,0	40,0	20,0	40,0	30,0	15,0	30,0	20,0	10,0
Occupancy Ride Pooling during Trip	Person	1,7	2,0	2,3	1,9	2,3	2,5	2,2	2,6	3,0
Overhead Time Factor Ride Pooling	%	15,0	10,0	5,0	15,0	10,0	5,0	15,0	10,0	5,0
FleetSize Ride Pooling	vehicles	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
Increase in Fleet size Ride Pooling	vehicles	20,0	20,0	20,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
<b>Private Vehicles</b>										
Proportion of mobile persons per Day	%	91,0	91,0	91,0	91,0	91,0	91,0	91,0	91,0	91,0
Average Age Vehicle Munich	yr	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9
Vehicle Abolition CS SB	vehicle	5,0	8,0	13,0	5,0	10,0	15,0	5,0	10,0	15,0
Vehicle Abolition CS FF	vehicle	1,0	3,0	5,0	2,0	4,0	8,0	2,0	4,0	8,0
Number BEV Vehicles 2018	vehicle	2350,0	2350,0	2350,0	2350,0	2350,0	2350,0	2350,0	2350,0	2350,0
Average private Vehicle Ownership Munich 2018	vehicle/person	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
BEV in 2030	%	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
Number PHEV Vehicles 2018	vehicle	7786,0	7786,0	7786,0	7786,0	7786,0	7786,0	7786,0	7786,0	7786,0
PHEV in 2030	%	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
<b>ODM Car Sharing FF</b>										
PHEV Car Sharing FF 2018	vehicle	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Penetration Rate PHEV 1	%	50,0	30,0	10,0	50,0	30,0	10,0	50,0	30,0	10,0
Szenario PHEV Car Sharing FF	yr	2025	2025	2025	2025	2025	2025	2025	2025	2025
BEV Car Sharing FF 2018	vehicle	200,0	200,0	200,0	200,0	200,0	200,0	200,0	200,0	200,0
Penetration Rate BEV 1	%	50,0	70,0	90,0	50,0	70,0	90,0	50,0	70,0	90,0
Szenario BEV Car Sharing FF	yr	2025	2025	2025	2025	2025	2025	2025	2025	2025
<b>ODM Car Sharing SB</b>										
BEV Car Sharing SB 2018	vehicle	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Penetration Rate BEV 1 CS SB	%	10,0	25,0	50,0	10,0	25,0	50,0	10,0	25,0	50,0
Szenario BEV Car Sharing SB	yr	2025	2025	2025	2025	2025	2025	2025	2025	2025
PHEV Car Sharing SB - 2018	vehicle	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Penetration Rate PHEV 1 CS SB	%	30,0	35,0	50,0	30,0	35,0	50,0	10,0	25,0	50,0
Szenario PHEV Car Sharing SB	yr	2025	2025	2025	2025	2025	2025	2025	2025	2025
<b>ODM Ride Hailing</b>										
BEV Ride Hailing - 2018	vehicle	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Penetration Rate BEV 1 Ride Hailing	%	20,0	35,0	60,0	20,0	35,0	60,0	20,0	35,0	60,0
Szenario BEV Ride Hailing	yr	2025	2025	2025	2025	2025	2025	2025	2025	2025
PHEV Ride Hailing - 2018	vehicle	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Penetration Rate PHEV Ride Hailing	%	20,0	25,0	40,0	20,0	25,0	40,0	20,0	25,0	40,0
Szenario PHEV Ride Hailing	yr	2025	2025	2025	2025	2025	2025	2025	2025	2025

**ODM Ride Pooling**

BEV Ride Pooling - 2018	vehicle	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Penetration Rate BEV 1 Ride Pooling	%	50,0	70,0	90,0	50,0	70,0	90,0	50,0	70,0
Scenario BEV Ride Pooling	yr	2025	2025	2025	2025	2025	2025	2025	2025
PHEV Ride Pooling - 2018	vehicle	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Penetration Rate PHEV Ride Pooling	%	50,0	30,0	10,0	50,0	30,0	10,0	50,0	30,0
Scenario PHEV Ride Pooling	yr	2025	2025	2025	2025	2025	2025	2025	2025

**Public Transport**

Average Trip Length Public Transport - Tram	person	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Traffic Adjusting Factor Tram-Vehicle	*km/trip	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
Average Trip Length Public Transport - Bus	person	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Traffic Adjusting Factor Bus-Vehicle	*km/trip	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0

**Parking**

Private Cars Parking in Public Space	%	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0
Car Sharing FF Cars Parking in Public Space	%	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Car Sharing SB Cars Parking in Public Space	%	100,0	100,0	80,0	100,0	100,0	80,0	100,0	100,0
Ride Hailing Cars Parking in Public Space	%	40,0	20,0	0,0	40,0	20,0	0,0	40,0	20,0
Ride Pooling Cars Parking in Public Space	%	40,0	20,0	0,0	40,0	20,0	0,0	40,0	20,0
Space per Parking Spot	m2	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0

**Emissions Model**

Share of conventional drive ICE Private	%	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Share of conventional drive PHEV Private	%	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
Share of conventional drive BEV Private	%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Consumption Electric Car	kWh/100km	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Share of conventional drive ICE Car Sharing FF	%	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Share of conventional drive PHEV Car Sharing FF	%	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
Share of conventional drive BEV Car Sharing FF	%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Share of conventional drive ICE Car Sharing SB	%	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Share of conventional drive PHEV Car Sharing SB	%	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
Share of conventional drive BEV Car Sharing SB	%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Share of conventional drive ICE Ride Hailing	%	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Share of conventional drive PHEV Ride Hailing	%	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
Share of conventional drive BEV Ride Hailing	%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Share of conventional drive ICE Ride Pooling	%	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Share of conventional drive PHEV Ride Pooling	%	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
Share of conventional drive BEV Ride Pooling	%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Share of electric driven Buses in 2030	%	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
CO2 pro PKM Bus	gr	75,0	75,0	75,0	75,0	75,0	75,0	75,0	75,0
NOx pro PKM Bus	gr	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
PM pro PKM Bus	gr	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Energy Consumption Electric Bus	kWh/km	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2

**Occupancy**

Occupancy Car Sharing FF	-	1,3	1,7	1,8	1,3	1,7	1,8	1,3	1,7
Occupancy Car Sharing SB	-	1,7	1,9	2,1	1,7	1,9	2,1	1,7	1,9
Occupancy Ride Hailing	-	1,3	1,5	1,7	1,3	1,5	1,7	1,3	1,5

**Sensitivities: Feedback Loops in Simulation**

Activate ODM Scenarios	-	Base	Base	Base	Activate	Activate	Activate	Activate	Activate
Feedback Switch Traffic Flow	-	Activate							
Impact of Traffic Flow on Car Attractivity - Driver	-	High							
Impact of traffic Flow on Car Attractivity - Passenger	-	Middle							
Impact of traffic Flow on ODM	-	High							
Feedback Switch Space	-	Activate							
Impact of Space on Car Attractivity - Driver	-	Middle							
Impact of Space on Car Attractivity - Passenger	-	Low							
Impact of Space on ODM	-	High							
Feedback Switch Driving Bans - Congestion Charge	-	Deactivated							
Congestion Charge - Driving Bans	-	no							

**Anhang 12:** Test-Verfahren für System Dynamics Modells (eigene Darstellung, auf Basis Sterman, 2000; Barlas, 1990)

Test	Purpose of Test	Tools and Procedures
1. Boundary Adequacy	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Are the important concepts for addressing the problem endogenous to the model?</li> <li>- Does the behavior of the model change significantly when boundary assumptions are relaxed?</li> <li>- Do the policy recommendations change when the model boundary is extended?</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Use model boundary charts, subsystem diagrams, causal diagrams, stock and flow maps, and direct inspection of model equations. Use interviews, workshops to solicit expert opinion, archival materials, review of literature, direct inspection/participation in system processes, etc.</li> <li>- Modify model to include plausible additional structure; make constants and exogenous variables endogenous, then repeat sensitivity and policy analysis.</li> </ul>
2. Structure Assessment	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Is the model structure consistent with relevant descriptive knowledge of the system?</li> <li>- Is the level of aggregation appropriate?</li> <li>- Does the model conform to basic physical laws such as conservation laws?</li> <li>- Do the decision rules capture the behavior of the actors in the system?</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Use policy structure diagrams, causal diagrams, stock and flow maps and direct inspection of model equations. Use interviews, workshops to solicit expert opinion, archival materials, direct inspection or participation in system processes, as in (1) above.</li> <li>- Conduct partial model tests of the intended rationality of decision rules.</li> <li>- Conduct laboratory experiments to elicit mental models and decision rules of system participants.</li> <li>- Develop disaggregate submodels and compare behavior to aggregate formulations.</li> <li>- Disaggregate suspect structures, then repeat sensitivity and policy analysis.</li> </ul>
3. Dimensional Consistency	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Is each equation dimensionally consistent without the use of parameters having no real world meaning?</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Use dimensional analysis software.</li> <li>Inspect model equations for suspect parameters.</li> </ul>
4. Parameter Assessment	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Are the parameter values consistent with relevant descriptive and numerical knowledge of the system?</li> <li>- Do all parameters have real world counterparts?</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Use statistical methods to estimate parameters (wide range of methods available).</li> <li>- Use partial model tests to calibrate subsystems.</li> <li>- Use judgmental methods based on interviews, expert opinion, focus groups, archival materials, direct experience, etc. (as above)</li> <li>- Develop disaggregate submodels to estimate relationships for use in more aggregate models.</li> </ul>
5. Extreme Conditions	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Does each equation make sense even when its inputs take on extreme values?</li> <li>- Does the model respond plausibly when subjected to extreme policies, shocks, and parameters?</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Inspect each equation.</li> <li>- Test response to extreme values of each input, alone and in combination.</li> <li>- Subject model to large shocks and extreme conditions.</li> <li>- Implement tests that examine conformance to basic physical laws (e.g., no inventory, no shipments; no labor, no production).</li> </ul>
6. Integration Error	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Are the results sensitive to the choice of time step or numerical integration method?</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cut the time step in half and test for changes in behavior.</li> <li>Use different integration methods and test for changes in behavior.</li> </ul>
7. Behavior Reproduction	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Does the model reproduce the behavior of interest in the system (qualitatively and quantitatively)?</li> <li>- Does it endogenously generate the symptoms of difficulty motivating the study?</li> <li>- Does the model generate the various modes of behavior observed in the real system?</li> <li>- Do the frequencies and phase relationships among the variables match the data?</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Compute statistical measures of correspondence between model and data: descriptive statistics (e.g., R2, MAE); time domain methods (e.g., autocorrelation functions); frequency domain methods (e.g., spectral analysis); many others.</li> <li>- Compare model output and data qualitatively, including modes of behavior, shape of variables, asymmetries, relative amplitudes and phasing, unusual events.</li> <li>- Examine response of model to test inputs, shocks, and noise.</li> </ul>

8. Behavior Anomaly	- Do anomalous behaviors result when assumptions of the model are changed or deleted?	- Zero out key effects (loop knockout analysis). - Replace equilibrium assumptions with disequilibrium structures.
9. Family Member	- Can the model generate the behavior observed in other instances of the same system?	- Calibrate the model to the widest possible range of related systems.
10. Surprise Behavior	- Does the model generate previously unobserved or unrecognized behavior? - Does the model successfully anticipate the response of the system to novel conditions?	- Keep accurate, complete, and dated records of model simulations. - Use model to simulate likely future behavior of system. - Resolve all discrepancies between model behavior and your understanding of the real system. - Document participant and client mental models prior to the start of the modeling effort.
11. Sensitivity Analysis	- Numerical sensitivity: Do the significantly. . . - Behavioral sensitivity: Do the numerical values change modes of behavior generated by the model change significantly . . . - Policy sensitivity: Do the policy implications change significantly...  ... when assumptions about parameters, boundary, and aggregation are varied over the plausible range of uncertainty?	- Perform univariate and multivariate sensitivity analysis. - Use analytic methods (linearization, local and global stability analysis, etc.). - Conduct model boundary and aggregation tests listed in (1) and (2) above. - Use optimization methods to find the best parameters and policies. - Use optimization methods to find parameter combinations that generate implausible results or reverse policy outcomes.
12. System Improvement	- Did the modeling process help change the system for the better?	- Design instruments in advance to assess the impact of the modeling process on mental models, behavior, and outcomes. - Design controlled experiments with treatment and control groups, random assignment, pre-intervention and postintervention assessment, etc.

## **Imprint**

### **Publisher:**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gebhard Wulfhorst  
Chair of Urban Structure and Transport Planning  
Technische Universität München  
Germany

### **Edited by:**

Christian Assmann

### **Printed by:**

TypeSet GmbH, Kirchheim bei München

### **Place and year of publication:**

München, 2020

ISBN 978-3-9820294-6-7

ISSN 2192-9459

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gebhard Wulfhorst

Chair of Urban Structure and Transport Planning

Focus Area Mobility and Transportation Systems

Technical University of Munich

Arcisstraße 21 - 80333 München - Germany

[www.sv.bgu.tum.de](http://www.sv.bgu.tum.de)