

Bachelorarbeit

Cand.-B.Sc.: Tim Meyer-Hollatz

Matr.-Nr.: 354231

Thema: Entwicklung eines Modells zur ganzheitlichen Bewertung eines multimodalen Verkehrskonzepts

Betreuender Assistent: Christian Dölle, Dr.-Ing. RWTH

Aachen, den 12. September 2019

Inhalt und Ergebnis dieser Arbeit sind ausschließlich zum internen Gebrauch bestimmt. Alle Urheberrechte liegen bei der RWTH Aachen. Ohne ausdrückliche Genehmigung des betreuenden Lehrstuhls ist es nicht gestattet, diese Arbeit oder Teile daraus an Dritte weiterzugeben.

Aachen, 12. September 2019

Christian Dölle - Tel. 0241 80-27593

Bachelorarbeit

für Herrn Cand. B.Sc.

Tim Meyer-Hollatz

Matrikelnummer: 354231

Thema: Entwicklung eines Modells zur ganzheitlichen Bewertung eines multimodalen Verkehrskonzepts

Disruptive Technologiesprünge im Bereich des Transportwesens führen zu der Entstehung neuartiger Verkehrsmittel und zu neuen Verkehrskonzepten. Beispielsweise werden sich durch aktuelle Entwicklungen im Bereich des autonomen Fahrens und der Erschließung des Luftraums für kurze und mittlere Strecken neue Verkehrskonzepte entwickeln. Diese Verkehrskonzepte haben einen signifikanten Einfluss auf den ökologischen Fußabdruck des Verkehrssektors.

Der Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) stellt in seiner Studie „Deutschland Mobil 2030“ unter anderem fest, dass der Aufbruch in ein neues Mobilitätszeitalter bereits begonnen hat und in den nächsten Jahren an Dynamik gewinnen wird. Gegenwärtig besteht jedoch ein Forschungsdefizit hinsichtlich der Auswirkungen dieser neuen Entwicklungen. Es bedarf eines Modells, welches die Wirkungszusammenhänge hinreichend abbildet und eine ganzheitliche Bewertung zulässt. Eine solche Abschätzung der ökonomischen und ökologischen Auswirkungen neuer Verkehrskonzepte für Anbieter, Nutzer und eine Volkswirtschaft insgesamt ist erforderlich, um Prognosen bezüglich des späteren Erfolgs der Konzepte ableiten zu können. Für Unternehmen ist eine solche Abschätzung von besonderem Interesse, da sie bereits in einem frühen Stadium des Verkehrskonzeptes relevante Information zu neuen Investitionsmöglichkeiten oder für neue Forschungsschwerpunkte erhalten können.

Ziel der Arbeit ist es, zunächst die aktuelle Situation des multimodalen Verkehrs zu beschreiben und dessen Entwicklungsmöglichkeiten auf Basis von Expertenschätzungen sowie Studienergebnissen abzuschätzen und zu bewerten. Das dazu zu entwickelnde Bewertungsmodell soll anschließend zur Beurteilung der nächsten des multimodalen Verkehrs genutzt werden. Pod-basierter multimodaler Verkehr ist ein Konzept der Siemens Mobility GmbH. Dabei werden die Passagiere in einem festen Behälter – dem Pod – (ähnlich einem Container) transportiert, welchen sie während der Reise nicht verlassen. Der Pod kann während der Reise den Carrier (d.h. das Transportmittel, z.B. Seilbahn, Drohne, Flugzeug, Zug) wechseln. Die Vorteile der verschiedenen Verkehrsmittel werden dadurch kombiniert und so ein effizienterer Transport ermöglicht.

Der Fokus dieser Arbeit liegt dabei auf der Verknüpfung verschiedener Verkehrsmittel unter besonderer Berücksichtigung der Luftfahrt. In weiterführender Forschung soll die entwickelte

Methode als Grundlage zur Ableitung von Handlungsempfehlungen und zur Bestimmung notwendiger Technologien dienen.

Im Einzelnen sind folgende Arbeitspakete zu bearbeiten:

- Übersicht über die aktuellen Bewertungsmethoden zur Analyse von Verkehrskonzepten
- Einarbeitung in den aktuellen Stand der Technik mit besonderem Fokus auf disruptive Technologien im Bereich der Verkehrssysteme
- Entwicklung eines Modells zur ganzheitlichen Bewertung verschiedener Ausbaustufen des multimodalen Verkehrs
- Beschreibung und Bewertung der verschiedenen Ausbaustufen des multimodalen Verkehrs
- Zusammenfassung der Ergebnisse und Ableitung von Handlungsempfehlungen sowie Bestimmung notwendiger Schlüsseltechnologien.

Die Ergebnisse sind wissenschaftlich herzuleiten und nachvollziehbar zu dokumentieren.

Der Lehrstuhlinhaber

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Günther Schuh

I Inhaltsverzeichnis

I	Inhaltsverzeichnis.....	i
II	Formelzeichen und Abkürzungen.....	iii
III	Abbildungsverzeichnis.....	vi
IV	Tabellenverzeichnis.....	ix
1	Einführung	1
1.1	Motivation.....	1
1.2	Zielsetzung.....	2
1.3	Vorgehensweise.....	3
2	Grundlagen	4
2.1	Mobilität.....	4
2.1.1	Mobilität im Personenverkehr.....	5
2.1.2	Mobilität im Güterverkehr	7
2.2	Grundlagen zur Erstellung von Ökobilanzen.....	9
2.3	Grundlagen der ökonomischen Bewertung.....	12
2.4	Einführung in die Szenarioanalyse	18
3	Analyse bestehender Ansätze	23
3.1	Kriterien zur Bewertung bestehender Ansätze.....	23
3.2	Darstellung bestehender Ansätze.....	24
3.2.1	Methoden zur Bewertung von Verkehrskonzepten	24
3.2.2	Methoden zur Bewertung von Technologie- oder anderen Projekten	35
3.3	Bewertung bestehender Ansätze und resultierendes Forschungsdefizit	38
4	Konzeption eines Bewertungsmodells	41
4.1	Anforderungen an das Bewertungsmodells	41
4.2	Entwicklung der Bewertungsdimensionen	41
4.3	Konzeption der Referenzstrecken	44
4.3.1	Personenverkehr.....	44
4.3.2	Güterverkehr.....	48
5	Detaillierung des Modells.....	51
5.1	Ableiten der Bewertungskategorien und -indikatoren.....	51

5.1.1	Ökologische Bewertungskategorien und -indikatoren.....	54
5.1.2	Bewertungskategorien und -indikatoren für den individuellen Nutzen.....	59
5.1.3	Ökonomische Bewertungskategorien und -indikatoren	61
5.2	Implementierung eines Bewertungstools	63
6	Beschreibung der Szenarien zur Entwicklung der multimodalen Mobilität.....	64
6.1	Analyse-Phase mit Beschreibung des Referenzszenarios.....	64
6.1.1	Aufgabenstellung und Untersuchungsrahmen.....	65
6.1.2	Analyse des Untersuchungsumfelds	65
6.2	Prognose-Phase	77
6.2.1	Megatrends mit Auswirkungen auf die Mobilität	77
6.2.2	Megatrends im Bereich der Mobilität	79
6.2.3	Zusammenfassung der Megatrends.....	84
6.3	Synthese-Phase mit Beschreibung der Zukunftsszenarien.....	85
6.3.1	Trendszenario.....	85
6.3.2	Unregulierte autonome Mobilität	95
6.3.3	Optimierte multimodale Mobilität	102
6.3.4	Pod-basierte multimodale Mobilität	106
7	Ergebnisse	115
7.1	Vier Schwerpunktfragestellungen	115
7.1.1	Reduziert sich die Transferzeit durch Pod-basierte Mobilität?	115
7.1.2	Sind Pods das ökologischste Verkehrskonzept?	118
7.1.3	Können Pods die Kosten im Personenverkehr reduzieren?	121
7.1.4	Können Pods den Güterverkehr revolutionieren?	123
7.2	Entwicklungen in den verbleibenden Kategorien	125
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	127
V	Literaturverzeichnis.....	129
VI	Anhang	147
VII	Eidesstattliche Erklärung.....	162

II Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen	Beschreibung
$G(x)$	Gewinn für die Menge x
$K(x)$	Kosten für die Menge x
x	Menge
p	Preis
$z(x)$	maximale Zahlungsbereitschaft für Menge x
$r(x)$	Konsumentenrente (Wohlfahrt auf Seiten des Nachfragers) für Menge x
$W(x)$	Wohlfahrt in Abhängigkeit der Menge x
d_{VZ}	Distanz für die Strecke zwischen Ausgangsort V und Zielort Z
t_{VZ}	Kosten für die Distanz zwischen Ausgangsort V und Zielort Z
f^x	Frequenz des Einkaufens
p_z^x	Preis für die Menge x
s^x	Kosten für die Lagerung von Menge x
l_i	Länge des Verkehrsmittels i auf dem Weg
$en_{WTW,i}$	Well-to-Wheel Energieverbrauch je Verkehrsmittel i
$thg_{WTW,i}$	spezifische THG-Emissionen je Verkehrsmittel i
no_i	spezifische NO_x -Emissionen je Verkehrsmittel i
pm_i	spezifische Feinstaub-Emissionen je Verkehrsmittel i
u_i	Unfallrisiko je 1 Milliarde Personen-/ Tonnenkilometer

L	Länge der Gesamtstrecke
c_i	spezifische Preise des Verkehrsmittels i pro Kilometer

Abkürzung	Beschreibung
MiD	Mobilität in Deutschland
MiT	Mobilität in Tabellen
BMVI	Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur
ÖV	Öffentlicher Verkehr
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
ÖPV	Öffentlicher Personenverkehr
MIV	Motorisierter individual Verkehr
WtW	Well-to-Wheel
WtT	Well-to-Tank
TtW	Tank-to-Wheel
Tkm	Tonnenkilometer
Pkm	Personenkilometer
BAU-Szenario	Business-as-Usual Szenario
THG	Treibhausgase
av.	Average
VOT	Value-of-Time
Lkw	Lastkraftwagen
LNF	Leichte Nutzfahrzeuge

SNF	Schwere Nutzfahrzeuge
OMM	Optimierte multimodale Mobilität
PMM	Pod-basierte multimodale Mobilität
UAM	Unregulierte autonome Mobilität
BIP	Bruttoinlandsprodukt
EU	Europäische Union
Forsa	Gesellschaft für Sozialforschung und statistische Analysen mbH
KEP	Kurier-, Express- und Paketmarkt
TCO	Total-Costs of Ownership
BEV	Battery Electric Vehicle

III Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1 - Aufbau eines Indikators	4
Abbildung 2-2 - Unterscheidung multimodaler vs. intermodaler Verkehr.....	6
Abbildung 2-3 - Phasen einer Ökobilanz	11
Abbildung 2-4 - Marktgleichgewicht	14
Abbildung 2-5 - The wider Benefits of transportation	17
Abbildung 2-6 - Vorgehensweise Szenarioanalyse	21
Abbildung 3-1 - Aufbau des ASTRA Modells	25
Abbildung 3-2 – Ausschnitt aus den Szenarien in Renewbility III	28
Abbildung 3-3 - Bewertung der Methodiken.....	39
Abbildung 4-1 - Die drei Säulen der Nachhaltigkeit.....	42
Abbildung 4-2 - Urbane Verkehrsmittelkombinationen	47
Abbildung 4-3 - Referenzstrecke Güternahverkehr	49
Abbildung 4-4 - Referenzstrecke Güterfernverkehr	50
Abbildung 5-1 - Aufbau Bewertungstool	63
Abbildung 6-1 - Modal Split im Personenverkehr 2017	66
Abbildung 6-2 - Modal Split im Güterverkehr 2017	67
Abbildung 6-3 - Bevölkerung nach Häufigkeit der Fahrradnutzung 2017	68
Abbildung 6-4 - Intermodalität? Eine Frage der Definition.....	69
Abbildung 6-5 - Ausgaben für den Verkehr in Mio. Euro	74
Abbildung 6-6 - Auswirkungen der Megatrends auf die Kategorien.....	84
Abbildung 6-7 - Vergleich der spezifischen THG-Emissionen pro Pkm (2050).....	87
Abbildung 6-8 - Verkehrsleistung des Personenverkehrs im Trendszenario im Vergleich.....	88

Abbildung 6-9 - Verkehrsleistung des Güterverkehrs im Trendszenario im Vergleich	88
Abbildung 6-10 - Modal Split des Personenverkehrs im Trendszenario	89
Abbildung 6-11 - Modal Split des Güterverkehrs im Trendszenario	89
Abbildung 6-12 - Zusammensetzung der Fahrzeuge im Personenverkehr.....	90
Abbildung 6-13 - Dynamische Haltestellen	107
Abbildung 7-1 - Entwicklung der Fahrt-, Warte- und Transferzeit (UK)	116
Abbildung 7-2 - Entwicklung der Fahrt-, Warte- und Transferzeit (I)	117
Abbildung 7-3 - Entwicklung in der ökologischen Dimension (UK).....	118
Abbildung 7-4 - Entwicklung der ökologischen Dimension - Teil 1 (I).....	119
Abbildung 7-5 - Entwicklung der ökologischen Dimension - Teil 2 (I).....	120
Abbildung 7-6 - Entwicklung der THG-Emissionen (L)	120
Abbildung 7-7 - Die Entwicklung der Kosten für alle Streckentypen (Teil 1).....	121
Abbildung 7-8 - Die Entwicklung der Kosten für alle Streckentypen (Teil 2).....	122
Abbildung 7-9 - Entwicklung der Transferzeiten im Güterverkehr	123
Abbildung 7-10 - Entwicklung der ökologischen Dimension im Güternahverkehr.....	124
Abbildung 7-11 - Entwicklung der Kosten im Güterverkehr	124
Abbildung 7-12 - Entwicklung des Unfallrisikos (Teil 1).....	125
Abbildung 7-13 - Entwicklung des Unfallrisikos (Teil 2).....	126
Abbildung A-1 - Referenzstrecke Personenverkehr Intercity.....	147
Abbildung A-2 - Referenzstrecke Personenverkehr Langstrecke	148
Abbildung A-3 - Entwicklung der Fahrt-, Warte- und Transferzeit (UL)	157
Abbildung A-4 - Entwicklung der Fahrt-, Warte- und Transferzeit (L)	158
Abbildung A-5 - Entwicklung der ökologischen Dimension (UL).....	159

Abbildung A-6 - Entwicklung der ökologischen Dimension (L)	160
Abbildung A-7 - Entwicklung der ökologischen Dimension Güterfernverkehr	161

IV Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1 - Unterscheidung Prognose und Szenario.....	19
Tabelle 3-1 - Übersicht ASTRA-Modell.....	24
Tabelle 3-2 - Übersicht Renewbility I-III	27
Tabelle 3-3 - Übersicht WANTM.....	29
Tabelle 3-4 - Übersicht EFECT.....	30
Tabelle 3-5 - Übersicht ÖÖPMKM	31
Tabelle 3-6 - Übersicht FFESM	32
Tabelle 3-7 - Beschreibung der Indikatoren nach WANG	33
Tabelle 3-8 - Übersicht ADL-Urban mobility index	34
Tabelle 3-9 - Übersicht Ökoeffizienzbewertung	35
Tabelle 3-10 - Übersicht SEEBALANCE.....	36
Tabelle 3-11 - Übersicht FFE.....	37
Tabelle 4-1 - Durchschnittliche Weglänge in Deutschland	45
Tabelle 4-2 - Stadt- und Gemeindetypen nach Bevölkerungsanzahl.....	46
Tabelle 5-1 - Die SMART-Kriterien	52
Tabelle 5-2 - Die Bewertungsindikatoren (Teil 1)	53
Tabelle 5-3 - Die Bewertungsindikatoren (Teil 2)	54
Tabelle 6-1 - Ökologische Daten des Personenverkehrs (Teil 1)	72
Tabelle 6-2 - Ökologische Daten des Personenverkehrs (Teil 2)	73
Tabelle 6-3 - Ökologische Daten des Güterverkehrs	73
Tabelle 6-4 - Soziale Daten des Personenverkehrs	75

Tabelle 6-5 - Soziale Daten des Güterverkehrs	76
Tabelle 6-6 - Ökologische Daten des Personenverkehrs (Trendszenario) (Teil 1)	91
Tabelle 6-7 - Ökologische Daten des Personenverkehrs (Trendszenario) (Teil 2)	92
Tabelle 6-8 - Ökologische Daten des Güterverkehrs (Trendszenario)	92
Tabelle 6-9 - Unfallrisiko und Verfügbarkeit im Trendszenario	94
Tabelle 6-10 - Unfallrisiko (Güterverkehr) im Trendszenario	94
Tabelle 6-11 - Entwicklungen im Personenverkehr („Unregulierte autonome Mobilität“)	96
Tabelle 6-12 - Entwicklungen im Güterverkehr ("Unregulierte autonome Mobilität")	97
Tabelle 6-13 - Entwicklungen Personenverkehr ("Optimierte multimodale Mobilität ")	103
Tabelle 6-14 - Entwicklung des Güterverkehrs ("Optimierte multimodale Mobilität")	104
Tabelle 6-15 - Kosten der Pod-Carrier Kombinationen Personenverkehr	110
Tabelle 6-16 - Kosten der Pod-Carrier Kombinationen Güterverkehr (Teil 1)	110
Tabelle 6-17 - Kosten der Pod-Carrier Kombinationen Güterverkehr (Teil 2)	111
Tabelle 6-18 - Kennzahlen des Personenverkehr Pods	112
Tabelle 6-19 - Kennzahlen des Güterverkehr Pods	112
Tabelle A-1 - Modal Split des Verkehrsaufkommens	147
Tabelle A-2 - Unfallrisiko Personen- und Güterverkehr	148
Tabelle A-3 - Verbesserungsfaktoren des spezifischen Energieverbrauchs	150
Tabelle A-4 - Verbesserungsfaktoren der spezifischen THG-Emissionen	151
Tabelle A-5 - Verbesserungsfaktoren der spezifischen NOx-Emissionen	152
Tabelle A-6 - Verbesserungsfaktoren der spezifischen Feinstaub-Emissionen	153
Tabelle A-7 - Verbesserungsfaktoren des spezifischen Unfallrisikos	154
Tabelle A-8 - Marktpenetratitionen in den autonomen Szenarien	155

1 Einführung

Im folgenden Kapitel wird die Motivation hinter dieser Arbeit beschrieben und darauf aufbauend die Zielsetzung (s. Kapitel 1.2) erarbeitet. Ausgehend von der Zielsetzung wird im Kapitel 1.3 der grundlegende Aufbau der Arbeit beschrieben.

1.1 Motivation

In Deutschland handelt es sich bei ca. 76% der zurückgelegten Wege um Individualverkehr¹. Im Gegensatz zum allgemeinen Sprachgebrauch gehört zum Individualverkehr neben dem Auto, das Fahrrad und zu Fuß zurückgelegte Strecken². Kennzeichnend für den Individualverkehr ist daher die Aussage „Ich fahre (laufe)“. Kombiniert man dies mit der Steigerung der Verkehrsleistung im Personenverkehr zwischen 2002 und 2016 um 13% (selber Zeitraum Güterverkehr 59%)³, ergibt sich ein erhöhtes Verkehrsaufkommen. Dieses führte im Jahr 2018 zur höchsten gemeldeten Anzahl an Staus überhaupt⁴.

Auch innerhalb des Individualverkehrs gibt es große Unterschiede. Der motorisierte Individualverkehr (Auto, Motorrad, Mofa) macht mit 57% den größten Anteil innerhalb dieser Gruppe aus und weist gleichzeitig mit 139 CO_{2-eq}/Pkm nach dem Flugzeug die höchsten Treibhausgasemissionen aus⁵. Naturgemäß sind Fahrrad fahren und zu Fuß laufen wesentlich effizienter und verursachen keine Treibhausgasemissionen.

Faktoren für die Nutzung des Individualverkehrs im Personenverkehr liegen einerseits in dem Komfort schwere Gegenstände zu transportieren und andererseits in den zu teuren Ticketpreisen des ÖPNV und einer zu langen Fahrtdauer im ÖPNV. Als größtes Hindernis für den Umstieg auf den ÖPNV geben 65% der Befragten, welche diesen selten oder nicht nutzen, an, dass sie lieber mit dem Auto fahren.⁶

Im Güterverkehr hat sich der Anteil der Zustellungen auf der letzten Meile durch den E-Commerce deutlich erhöht⁷. Dies führt gerade in dicht besiedelten Regionen zu mehr Feinstaubemissionen und einem erhöhten Verkehrsaufkommen⁸. Neben den Klimaauswirkungen entstehen außerdem 54% der Kosten durch den Transport auf der letzten Meile. Die Gründe liegen vor allem in der persönlichen Zustellung und den ineffizienten Auslastungen.⁹ Ein

¹ Vgl. Nobis et al. (2018) Mobilität in Deutschland - 2018, S. 45.

² Vgl. Henkel et al. (2015) Mobilität aus Kundensicht, S. 1–6.

³ eigene Berechnung, Vgl. Radke (2017) Verkehr in Zahlen 17/18, S. 51–113.

⁴ Vgl. Matthias Janson (2019) So viel Stau.

⁵ Vgl. Ittershagen (2018) Klimabilanz 2017; Vgl. Nobis et al. (2018) Mobilität in Deutschland - 2018.

⁶ Vgl. ADAC e.V. (2019) Empfehlungen für den ÖPNV in Ballungsräumen, S. 1–2.

⁷ Vgl. Zanker (2018) Branchenanalyse Logistik, S. 26.

⁸ Vgl. Demir et al. (2015) the negative externalities of the freight transportation, 97ff.

⁹ Vgl. Melo et al. (2011) City distribution and urban freight transport, S. 13.

intermodales¹⁰ Verkehrssystem könnte den CO₂ Ausstoß im Vergleich zu einem unimodalen Transportsystem um ca. 57% reduzieren¹¹.

Um eine Verschiebung des Modal Splits im Personenverkehr hin zu mehr öffentlichen Verkehrsmittel und aktiveren Fortbewegungsmitteln zu erreichen, müssen daher die Umstiegs-hemmnisse abgebaut werden. In der Logistik erfordert der Wechsel zu effizienteren Verkehrsmitteln, die Entwicklung neuer kostengünstigerer Konzepte und die Kombination mit anderen Verkehrsteilnehmern, um das Verkehrsaufkommen zu senken.

Eine Möglichkeit für die Reduktion der Emissionen liegt in einem nahtlosen Verkehrskonzept. Ein solches wurde von der Firma Siemens Mobility GmbH unter dem Namen „Pod-basierte multimodale Mobilität“ entwickelt. Dabei werden die Passagiere in einem festen Behälter – dem Pod – (ähnlich einem Container) transportiert, welchen sie während der Reise nicht verlassen. Der Pod kann während der Reise den Carrier (d.h. das Transportmittel, z.B. Seilbahn, Drohne, Flugzeug, Zug) wechseln. Durch die Kombination der Carrier auf einem Weg, kann immer das für den Weg effizienteste Verkehrsmittel verwendet werden.

Mit dem Wegfall der individuellen Umstiegsvorgänge erwartet man, eine Reduktion der Reisezeit bei einem gleichzeitig erhöhten Komfort. Weiterhin erlaubt der wechselnde Carrier selbst für kurze Strecken das Verkehrsmittel mit der spezifisch höchsten Effizienz zu wählen und gleichzeitig das Kostenlevel zu halten bzw. zu senken. Fraglich ist bislang allerdings, ob ein solches Verkehrskonzept in der Realität die hoch gesteckten Erwartungen erfüllen kann und besonders im Güterverkehr eine sinnvolle Ergänzung darstellt.

1.2 Zielsetzung

Im Rahmen dieser Arbeit soll ein Bewertungsmodell entwickelt werden, welches ein neuartiges Verkehrskonzept („Pod-basierte multimodale Mobilität“ - PMM) im Kontext zu drei Szenarien beurteilt. Im „Trendszenario“ werden die aktuellen Entwicklungen fortgeschrieben. Ausgehend von diesem werden im Szenario „Unregulierte autonome Mobilität“ die Auswirkungen einer Teilimplementierung von autonomen Verkehrsmitteln untersucht. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Politik nicht in den Verkehr eingreift und sich eine Vorherrschaft des Individualverkehrs entwickelt. Im Gegensatz dazu wird im Szenario „Optimierte multimodale Mobilität“ eine politische Entscheidung zur Förderung des ÖPNV und dadurch verbesserten Warte- und Fahrtzeiten. Mit Hilfe des Bewertungskonzeptes soll die Frage beantwortet werden, ob PMM eine nachhaltige Form der multimodalen Mobilität darstellt.

Nach ROGALL ist eine Entwicklung nachhaltig, wenn „[...] für alle lebenden Menschen und künftige Generationen ausreichend hohe ökologische, ökonomische und sozial-kulturelle Standards in den Grenzen der natürlichen Tragfähigkeit der Erde [...]“¹² erreicht werden. Im Kontext dieser Arbeit soll die Bewertung daher in den Kategorien Ökonomie, Ökologie und

¹⁰ Vgl. Kapitel 2.1 zur Unterscheidung zwischen einem inter- und unimodalen Verkehrssystem.

¹¹ Vgl. Craig et al. (2013) Estimating the CO₂ intensity, S. 49–53.

¹² Vgl. Rogall (2000) Netzwerk Nachhaltige Ökonomie.

Soziales erfolgen. Innerhalb dieser Kategorien soll das Modell modular aufgebaut sein, um eventuelle Veränderungen im Transportsektor berücksichtigen zu können.

Die **Zielsetzung dieser Arbeit** ist es somit die Mobilität über Kennzahlen in den verschiedenen Bewertungskategorien abzubilden. Dafür müssen zunächst die Bewertungskategorien abgeleitet und Indikatoren für die Bewertung dieser definiert werden. Anschließend sollen die Szenarien erstellt und mit Hilfe der Indikatoren bewertet werden. Auf Basis der Ergebnisse der Bewertungskategorien sollen Entscheidungen über zukünftige Forschungen, notwendige Technologien und Verbesserungspotentiale abgeleitet werden können.

1.3 Vorgehensweise

Ausgehend von der in Kapitel 1.2 definierten Zielsetzung ergibt sich der Aufbau dieser Arbeit. Im Kapitel 2 werden die Grundlagen für die Erstellung eines Bewertungsmodells gelegt. Diese umfassen die Beschreibung der Mobilität bzw. der wichtigsten Größen der Mobilität, sowie Grundlagen für das spätere Bewertungsmodell (2.2, 2.4) und die Szenarioanalyse, welche Grundlage für die Erstellung der Szenarien ist. Ausgehend davon wird in Kapitel 3 im Rahmen einer Literaturrecherche nach bestehenden Ansätzen gesucht. Ausgehend von dem so definierten Bewertungsrahmen werden in Kapitel 3.1 Kriterien für die Bewertung festgelegt. Daraus können dann auch eventuell existierende Forschungsdefizite abgeleitet werden.

In den Kapiteln 4 und 5 wird das Bewertungsmodell entwickelt. Das Grobkonzept des Bewertungsmodells wird in Kapitel 4 konzipiert. In diesem werden zuerst die Anforderungen definiert und die Bewertungskategorien abgeleitet. Im Anschluss daran werden die Referenzstrecken entwickelt. Im Kapitel 5 wird das Modell detailliert, die Bewertungsindikatoren festgelegt und abschließend in ein Bewertungstool eingebunden.

Im Kapitel 6 werden die Szenarien anhand der Szenariotechnik erstellt. Im Anschluss daran werden die Szenarien in den einzelnen Indikatoren bewertet. Die Ergebnisse werden im Kapitel 7 gegenübergestellt. Zum Abschluss wird in Kapitel 8 eine kurze Zusammenfassung der Arbeit gegeben und auf weitere Forschungsfragen verwiesen.

2 Grundlagen

Wie im ersten Kapitel dargestellt, ist es das Ziel dieser Arbeit eine Bewertung und Vergleichbarkeit multimodaler Verkehrskonzepte zu ermöglichen. Dazu wird in einem ersten Schritt der Begriff Mobilität definiert, wie er im Rahmen dieser Arbeit verstanden werden soll. In den folgenden Abschnitten sollen die für das Bewertungskonzept relevanten Teilaspekte der ökologischen und ökonomischen Theorie dargestellt werden. Den Abschluss dieses Kapitels bildet eine kurze Darstellung der theoretischen Grundlagen der Szenarioanalyse, die für die Beurteilung der multimodalen Verkehrskonzepte eingesetzt werden soll.

Zum Verständnis wird zunächst der Begriff des Indikators beschrieben. Nach GUDMUNDSSON et al. lautet die Definition:

„An indicator is a variable, or a combination of variables, selected to represent a certain wider issue or characteristic of interest“¹³

In Abbildung 2-1 ist das Zusammenspiel zwischen einem Indikator, dem Wert, der Einheit und der Variablen graphisch dargestellt. Ein Indikator reflektiert somit das zugrunde liegende Problem. Indikatoren werden verwendet, wenn ein Problem mit einem eindeutigen Wert hinterlegt werden soll.¹⁴ Im Rahmen dieser Arbeit wird das zugrunde liegende Problem mit dem Begriff Kategorie beschrieben. Mehrere Kategorien zusammen bilden eine Bewertungsdimension ab.

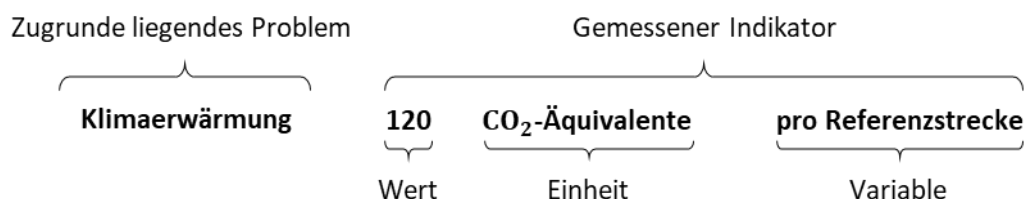


Abbildung 2-1 - Aufbau eines Indikators¹⁵

2.1 Mobilität

In diesem Kapitel wird die allgemeine räumliche Mobilität beschrieben. Diese umfasst alle Wegzwecke und ist sowohl für den Personen- als auch Güterverkehr identisch formuliert. Eine Unterscheidung besteht lediglich in der Definition der Multi-, Inter- und Intramodalität. Diese, sowie verschiedene Kennzahlen und Besonderheiten des Personen- und Güterverkehrs werden in den beiden Unterkapiteln 2.1.1 und 0 vorgestellt.

Unter dem Oberbegriff Mobilität werden verschiedene Thematiken zusammengefasst. In der deutschen Sprache werden Mobilität und Verkehr häufig als Synonym verwendet. Dies ist unter anderem durch die Stauproblematik in und um Großstädte bedingt.¹⁶ Durch die

¹³ Vgl. Gudmundsson (2016) Sustainable transportation, S. 140.

¹⁴ Vgl. Gudmundsson (2016) Sustainable transportation, S. 139–141.

¹⁵ in Anlehnung an Gudmundsson (2016) Sustainable transportation, S. 139.

¹⁶ Vgl. Petersen, Rudolf, and Karl O. Schallaböck. (2013) Mobilität für morgen, S. 9.

Gleichsetzung geht allerdings ein wichtiger Bestandteil der Mobilität verloren. In der Fachliteratur findet sich daher häufig folgende Definition:

„Der Begriff Mobilität bezeichnet im Zusammenhang mit Verkehr die Häufigkeit von Ortsveränderungen (als Folge von Tätigkeitswechseln) in Bezug auf eine Person in einem bestimmten Zeitrahmen.“¹⁷

Mobilität umfasst damit neben der Anzahl an Ortsveränderungen immer einen Zeitraum in welchem diese gemessen werden. **Verkehr** wird im Gegensatz dazu als eine Folge der Mobilität beschrieben.¹⁸ Die Definition gilt analog für den Güterverkehr, lediglich die Transportmasse verändert sich. Im Kontext dieser Arbeit wird daher ausschließlich das Thema Mobilitätskonzepte behandelt. Diese unterscheiden sich zu Verkehrskonzepten, in dem Ziel die eigentliche Mobilität zu fördern und nicht den durch die Mobilität entstandenen Verkehr zu verändern.

2.1.1 Mobilität im Personenverkehr

Im Kontext des Personenverkehrs wird unterschieden zwischen der Multi- und Intermodalität. Der Definition von BEUTLER folgend, handelt es sich bei dem multimodalen Verkehr um die Nutzung von unterschiedlichen Verkehrsmitteln in einem bestimmten Zeitraum.¹⁹ Eine Person ist dementsprechend multimodal, wenn sie innerhalb eines Zeitraums mehr als ein Verkehrsmittel nutzt, um einen Ortwechsel zu vollziehen. Der Zeitraum wird im Rahmen dieser Arbeit auf eine Woche festgelegt²⁰.

Eine Teilmenge der multimodalen Mobilität stellt die intermodale Mobilität da. Eine Person ist intermodal, wenn sie innerhalb eines Weges das Verkehrsmittel wechselt.²¹ Der klassische Fall der intermodalen Fortbewegung ist dabei die Kombination von Fernverkehr mit öffentlichen Verkehrsmitteln²². Eine solche Kombination von mehreren Verkehrsmitteln auf einem Weg wird als Verkehrskette bezeichnet. Die Beweggründe für diesen Wechsel liegen oft in den unterschiedlichen Reisegeschwindigkeiten der Verkehrsmittel.

In Abbildung 2-2 sind die beiden Formen gegenübergestellt. Entgegen der graphischen Darstellung muss es sich bei den Verkehrsmitteln nicht ausschließlich um Verkehrsmittel des ÖPNV oder des Fernverkehrs handeln. Während der heutige multimodale Verkehr mehrheitlich einen rein multimodalen Ansatz verfolgt, setzt sich die Entwicklung zu einem besser aufeinander abgestimmten intermodalen Verkehrskonzept fort. In der letzten Ausbaustufe handelt es sich um ein komplett intermodales und individuelles Konzept.²³

¹⁷ Vgl. Steierwald et al. (2005) Stadtverkehrsplanung, S. 4.

¹⁸ Vgl. Dudenredaktion (o. J.) (2019) Definition Verkehr.

¹⁹ Vgl. Beutler (2004) Intermodalität, Multimodalität und Urbanibility, S. 8–13.

²⁰ Vgl. Viegutz et al. (2018) Inter, Multi, Mono: Modalität im Personenverkehr, S. 5.

²¹ Vgl. Viegutz et al. (2018) Inter, Multi, Mono: Modalität im Personenverkehr, S. 5.

²² Vgl. Heinrichs et al. (2015) Mobilität zukünftig intermodal?, S. 18–20.

²³ Vgl. Heinrichs et al. (2015) Mobilität zukünftig intermodal?, S. 18–20.

Multimodale Mobilität



Intermodale Mobilität



Abbildung 2-2 - Unterscheidung multimodaler vs. intermodaler Verkehr

Die Mobilität in Deutschland wird turnusmäßig in der Umfrage „Mobilität in Deutschland“ (MiD) im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Sie wurde 2018 zum sechsten Mal durchgeführt. In dieser werden bundesweit Haushalte nach ihrem alltäglichen Verkehrsverhalten befragt. Die Auswahl der befragten Personen erfolgt repräsentativ. Die Ergebnisse der Studie sind im Internet freiverfügbar und werden als eine der Hauptquellen dieser Arbeit fungieren. Daher wird im Folgenden auf den Aufbau der Erhebung eingegangen und im Anschluss daran einige wichtige Zahlen definiert und analysiert.²⁴

Der Aufbau der Erhebung gliedert sich in zwei Phasen. In der ersten Phase wurden allgemeine Daten zu den Haushalten erhoben. Zu diesen Daten zählten unter anderem:²⁵

- Anzahl an Personen
- Alter der im Haus lebenden Personen
- Beschäftigungsverhältnis
- Autoverfügbarkeit am Erhebungstag
- etc.

Ziel der Erhebung dieser Daten war es, Daten zur Mobilität nach allgemeinen Kriterien zu selektieren. In der zweiten Phase der Erhebung wurde den Teilnehmern ein fester Stichtag zugeteilt. Die Verteilung dieses Stichtages erfolgte zufällig und konnte im Anschluss nicht geändert werden. Die Festlegung auf einen Tag wurde getroffen, um die Mobilität so abzubilden, wie sie am Stichtag war. Die befragten Personen waren aufgefordert, persönliche Merkmale und ihre Wege am Stichtag anzugeben. Die Erhebung dieser Daten erfolgte unmittelbar nach dem Stichtag, entweder telefonisch, schriftlich oder online (MIT 2017 – wird weiter unten beschrieben). Zeitraum der Befragung war Ende Mai 2016 bis Oktober 2017.²⁶

²⁴ Vgl. Nobis et al. (2018) Mobilität in Deutschland - 2018, S. 19–23.

²⁵ Vgl. Nobis et al. (2018) Mobilität in Deutschland - 2018, S. 19–23.

²⁶ Vgl. Nobis et al. (2018) Mobilität in Deutschland - 2018, S. 19–23.

Eine wichtige Kenngröße ist der Modal Split. Der Modal Split ist definiert als:

„[...] drückt die prozentualen Anteile der Verkehrsmittel am Verkehrsaufkommen (zurückgelegte Wege) oder an der Verkehrsleistung (zurückgelegte Personenkilometer) aus.“²⁷

Der Modal Split und seine Veränderung über die Zeit sind im Anhang in Tabelle A-1 gezeigt. Dieser wird in dieser Arbeit verwendet, um die Entwicklungen der Mobilität zwischen den verschiedenen Szenarien darzustellen.

Neben dem Modal Split ist die Verfügbarkeit (engl. Accessibility) ein Kernfaktor zur Bewertung der Mobilität.

„Accessibility (or just access) refers to the ability to reach desired goods, services, activities and destinations (collectively called opportunities).“²⁸

Die Verfügbarkeit umschließt sowohl den Wunsch als auch die Möglichkeit zu reisen, sowie die örtliche Diskrepanz zwischen verschiedenen Aktivitäten. Dabei wird lediglich ein kleiner Anteil von Reisen nicht betrachtet. Es handelt sich hierbei zum Beispiel um Rundreisen. Als Bewertungsindikatoren werden die verschiedenen zur Verfügung stehenden Verkehrsmittel (Multimodalität), die Erreichbarkeit verschiedener Orte und die Kosten der Fortbewegung angeführt.²⁹

Das oben bereits erwähnte Online-Tool MiT 2017 ist frei im Internet verfügbar und untergliedert sich in die Kategorien: Haushalte, Personen, Wege, Reisen und Autos. Innerhalb dieser Kategorien stehen verschiedene Merkmalstypen zur Auswahl. Einige Merkmalstypen, wie z.B. Wochentag, lassen sich unabhängig von der Kategorie auswählen. Nach Auswahl der Kategorien und ggf. Merkmalen können Tabellen automatisch erstellt werden.

2.1.2 Mobilität im Güterverkehr

Die Güterverteilung beschreibt die räumliche und zeitliche Veränderung eines Gutes. Betrachtet man den Güterfluss entlang der Gütertransformation ist sie zwischen der Güterbereitstellung und -verwendung anzusiedeln. Die Güterverteilung wird meist mit Logistik gleichgesetzt.³⁰ Innerhalb der Logistik ist der Transport von Gütern jedoch nur ein Teilbereich. Die Logistik kann außerdem noch die Lagerung und die Veredelung (Verpackung) umfassen. Im Rahmen dieser Arbeit wird lediglich der Teilbereich der Güterverteilung, also des Transports von A nach B, betrachtet.

²⁷ Vgl. Nobis et al. (2018) Mobilität in Deutschland - 2018, S. 45.

²⁸ Vgl. Todd Litman (2003) Measuring Transportation, S. 31.

²⁹ Vgl. Todd Litman (2003) Measuring Transportation, S. 32.

³⁰ Vgl. Pfohl (2010) Grundlagen der betriebswirtschaftlichen Logistik, S. 4.

Innerhalb des Güterverkehrs gibt es mehrere Grundstrukturen, in welchen man die verschiedenen Transportwege aufteilen kann. Man unterscheidet:³¹

- **Einstufige Systeme**

Direkte Verbindung zwischen dem Punkt der Güterbereitstellung und der Güterverwendung.

- **Mehrstufige Systeme**

Diese werden danach unterschieden, ob an einem Punkt alle Güter zusammengeführt werden um im Anschluss daran gebündelt ausgeliefert zu werden (Konzentrationspunkt) oder ob die Güter gebündelt angeliefert werden und von diesem Punkt aus verteilt werden (Auflösungspunkt).

- **Kombinierte Systeme**

Kombinierte Systeme stellen eine Mischform der beiden zuvor beschriebenen Konzepte dar. Die Waren werden entweder direkt vom Start- zum Endpunkt transportiert oder über einen Umschlagplatz (Konzentrationspunkt) aufgeteilt.

Ausgehend von dieser Unterscheidung wird im Folgenden eine Definition des multimodalen Verkehrs getroffen. Multimodaler Verkehr im Güterverkehr unterscheidet sich insofern vom multimodalen Verkehr im Personenverkehr, dass jedes Gut lediglich einmal transportiert wird. Daher wird zwischen mono- und intermodaler Mobilität unterschieden. **Monomodale** Mobilität liegt vor, wenn ein Gut mit einem Verkehrsmittel über die gesamte Distanz transportiert wird. **Intermodale** Mobilität beschreibt den Wechsel des Transportmittels innerhalb der Lieferung.³²

Intramodaler Güterverkehr beschreibt den Transport eines Gutes vom Start zum Ziel innerhalb derselben Einheit, ohne dass das Gut beim Wechsel des Transportmittels einzeln behandelt werden muss³³. Im Umkehrschluss bedeutet diese Definition, dass die Ware für den Transport in einer Einheit (Behälter, Container) transportiert werden muss, um als intramodaler Transport zu zählen. Diese Definition umfasst also nicht den Versand von Paketen auf der sog. letzten Meile.

Das Frachtaufkommen im Rahmen des Güterverkehrs wird meist mittels der Kennzahlen TEU und Tonnenkilometer beurteilt. Tonnenkilometer messen die Beförderungsleistung über alle Verkehrsmittel des Güterverkehrs. Sie berechnen sich aus dem Produkt von Gewicht und Transportentfernung und werden in der Einheit Tkm angegeben.³⁴ Die Einheit TEU beschreibt den Durchsatz an Container pro Verkehrsmittel normiert auf einen 20-Fuß-Container an.³⁵

³¹ Vgl. Pfohl (2010) Grundlagen der betriebswirtschaftlichen Logistik, S. 6.

³² Vgl. Gudehus (2012) Logistik 1, S. 126.

³³ Vgl. Crainic et al. (2007) Chapter 8 Intermodal Transportation, S. 467–537., Vgl. Krieger et al. (2018) Definition: kombinierter Verkehr

³⁴ Vgl. Krieger (2018) Definition: Tonnenkilometer.

³⁵ Vgl. Krieger (2018) Definition: TEU.

Der intermodale Güterverkehr wird in der Statistik weiterhin in drei Kategorien mit verschiedenen Merkmalsausprägungen aufgegliedert. Diese sind:³⁶

- Modal Kombinationen – Zug/Straße, inländische Wasserwege/Straße, Straße/Luftwege oder Seeweg/ Straße
- Geographische Abdeckung – innerhalb eines Mitgliedstaates der EU (Intra MS), zwischen zwei oder mehr Mitgliedstaaten der EU (Intra EU) oder international
- Art der Verbindung – begleiteter Transport (d.h. der Fahrer ist auf einem Zug oder Fähre im Fahrzeug) oder unbegleiteter Transport (d.h. lediglich das Fahrzeug oder der Container werden ohne Fahrer versendet)

Die Statistiken der europäischen Union zum Frachtverkehr sind nach diesen Kategorien aufgebaut.

Analog zum multimodalen Personenverkehr, haben die Verkehrsmittel im Güterverkehr Bereiche, in welchen sie die besten Eigenschaften aufweisen. So sind Lkws auf kurzen Strecken sowohl ökonomisch als auch ökologisch sinnvoll, während Züge erst ab einem längeren Weg rentabel werden. Durch diesen gegenläufigen Effekt gibt es für jeden Landweg eine theoretische Kombination von Lkw und Zug, welche optimal (bzgl. ökonomischer und ökologischer Faktoren) ist.³⁷

2.2 Grundlagen zur Erstellung von Ökobilanzen³⁸

Die ökologische Bewertung von technischen Produkten wird gem. DIN EN ISO 14040 anhand einer Ökobilanz vorgenommen. Diese bildet somit die Grundlage für Abschätzungen der ökologischen Nachhaltigkeit.

Das Ökobilanzen heute eine so große Bedeutung haben, liegt vor allem an zwei Aspekten. Einerseits entspricht die Erstellung von Ökobilanzen dem heutigen Verständnis von Umweltpolitik, d.h. es wird die komplette Wertschöpfungskette berücksichtigt. Andererseits wird durch die Vorgehensweise eine hohe Vergleichbarkeit und Transparenz gewährleistet.³⁹

Inhalt dieser Arbeit ist es nicht eine Ökobilanz (engl. Environmental Life Cycle Assessment - ELCA) über den gesamten Verkehrssektor zu entwickeln, vielmehr soll ausgehend von verschiedenen Studien und den aus diesen gewonnenen Erkenntnissen ein Startpunkt gewählt werden. Anschließend sollen dann Verkehrsketten hinsichtlich ihres ökologischen Fußabdrucks bewertet werden.

³⁶ Vgl. Directorate-General for Mobility and Transport (European Commission) , Gruppo CLAS S.p.A , Intermodality Ltd , KombiConsult GmbH , PLANCO Consulting GmbH (2017) Analysis of the combined transport, S. 27.

³⁷ Vgl. Bouchery et al. (2015) Cost, carbon emissions, modal shift, S. 396.

³⁸ Vgl. Deutsche Norm (2006) 14040

³⁹ Vgl. Schebek (2016) Ökobilanzen heute – Praxis oder Experten-Werkzeug?, S. 97.

Zum korrekten Verständnis der abgeleiteten Werte ist es wichtig, die Vorgehensweise zur Aufstellung einer Ökobilanz zu kennen. Im ersten Schritt wird daher die Methodik der Ökobilanz vorgestellt, dann werden einige methodische Ansätze erläutert, die aus Ökobilanzen hervorgegangen sind.

Das methodische Vorgehen zur Entwicklung einer Ökobilanz ist in den internationalen Normen ISO 14040 und ISO 14044 niedergelegt.⁴⁰ In diesen Normen werden Ökobilanzen definiert als:

„Zusammenstellung und Beurteilung der Input- und Outputflüsse und der potenziellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf seines Lebensweges.“⁴¹

In der Definition wird herausgestellt, dass Ökobilanzen den kompletten Lebenszyklus eines Produktes abdecken. Diese Eigenschaft wird im weiteren Verlauf benötigt, um beispielsweise bei konventionellen Elektroautos (BEV) alle emittierten Schadstoffe zu erfassen.

Ökobilanzen basieren auf sechs Grundsätzen. Im Folgenden werden vier dieser Grundsätze, die von besonderem Interesse für diese Arbeit sind, näher erläutert.

- **Lebenswegbetrachtung**

Wie oben bereits geschrieben, behandelt die Ökobilanz den kompletten Lebenszyklus eines Produktes. Dies umfasst alle Phasen von der Produktplanung über die Montage bis zum Recycling.⁴²

- **Umweltbezogene Ausrichtung**

Die Ökobilanz behandelt ausschließlich Umweltauswirkungen eines Produktes bzw. Systems. Zur ganzheitlichen Untersuchung muss sie daher mit anderen Methoden kombiniert werden.⁴³

- **Transparenz**

Die Komplexität einer Ökobilanz verlangt eine umfassende Dokumentation der Vorgehensweise.

- **Ganzheitlichkeit**

Für eine Ökobilanz müssen alle Aspekte eines Produktes betrachtet werden, die einen Einfluss auf die Umgebung und Umwelt haben.

Die Entwicklung einer Ökobilanz erfolgt in vier Phasen. Die Phasen und deren Zusammenspiel sind in Abbildung 2-3 dargestellt.

⁴⁰ Vgl. Deutsche Norm (2006) 14040.

⁴¹ Vgl. Deutsche Norm (2006) 14040, S. 4.

⁴² Vgl. Schuh et al. (2014) Product Lifecycle Management.

⁴³ Vgl. Deutsche Norm (2006) 14040, S. 14.

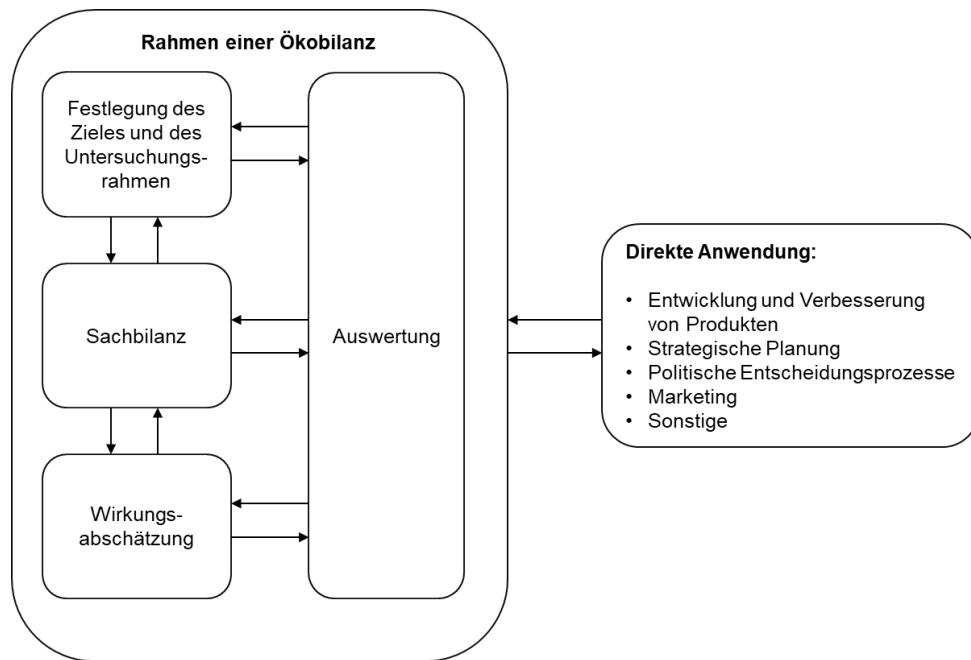


Abbildung 2-3 - Phasen einer Ökobilanz⁴⁴

Im ersten Schritt einer Ökobilanz wird der Rahmen eben dieser festgelegt. Als Rahmen kann z.B. ein Fahrzeug gewählt werden. In diesem Fall werden alle Schritte von der Entwicklung über die Produktion bis zum Recycling des Fahrzeuges betrachtet. Im Zuge dieses Schrittes wird auch das Ziel der Untersuchung festgehalten.

Der Hauptarbeitsschritt der Ökobilanz ist die Erstellung der Sachbilanz. In dieser werden alle Input- und Outputgrößen festgehalten und in Verbindung zu einander gesetzt. Dies erfordert Expertenwissen über das Produkt und liefert große Datenmengen. Im Anschluss an die Erstellung der Sachbilanz erfolgt eine Wirkungsabschätzung. In dieser werden die in der Sachbilanz gewonnen Daten hinsichtlich ihrer Umweltauswirkung bewertet. Eine solche Bewertung kann nach verschiedenen Methoden erfolgen.

In Deutschland ist die Methode des Umweltbundesamtes weit verbreitet. Grundlage für die Bewertung sind dabei die Sachbilanzergebnisse, welche nach den Kriterien des Umweltbundesamtes klassifiziert werden. Zur Berechnung wird die Masse des Stoffflusses mit seinem charakteristischen Wirkungspotential (abhängig von der Wirkungskategorie) multipliziert. Die Summe über alle Stoffströme ergibt den Effekt der Wirkungskategorie.⁴⁵

Eine Sonderform der Ökobilanz ist der Carbon Footprint (übersetzt ‚Kohlenstoff-Fußabdruck‘). Dieser behandelt lediglich die Wirkungskategorie „Anthropogener Klimawandel“. Durch diese Vorgehensweise werden nur die Auswirkungen auf das Klima erfasst und das Ergebnis in einer Kennzahl dargestellt. Die Kennzahl wird in der Einheit eines Kohlenstoffdioxid-Äquivalent ($\text{CO}_2\text{-eq}$) abgebildet. Zur Umrechnung der Einflüsse anderer Chemikalien (z.B.: CH_4) werden Wirkungsfaktoren verwendet. Von der Vorgehensweise ähneln sich Carbon Footprint und

⁴⁴ eigene Darstellung nach Deutsche Norm (2006) 14040, S. 20.

⁴⁵ Vgl. Herrmann (2010) Lebensphasenübergreifende Disziplinen, S. 156–157.

Ökobilanz. Schritte eins (Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmen) und zwei (Sachbilanz) sind identisch, wobei in der Sachbilanz hauptsächlich klimawirksame Einflussgrößen aufgeführt werden. Die Wirkungsabschätzung erfolgt wie oben bereits beschrieben mit einer Umrechnung auf ein $\text{CO}_2\text{-eq}$.⁴⁶

Daneben hat die Kennzahl „kumulierter Energieaufwand (KEA)“ Bedeutung. Bei diesem wird der Verbrauch fossiler Rohstoffe, welche über den Lebenszyklus eins Produktes anfallen, betrachtet. Aufgrund der Berücksichtigung sämtlicher Energieumwandlungsprozesse – diese gehören zu den bedeutendsten Verursachern von Emissionen – wird der KEA als Leitindikator für Ökobilanzen angesehen. Alleinstehend liefert er eine Aussage über die Energieintensität eines Produktes, nicht aber seine Umweltauswirkungen.⁴⁷

Zur Bestimmung von Transportemissionen wird häufig die Well-to-Wheel (WtW) Analyse verwendet. Diese besteht aus den beiden Teilbereichen Well-to-Tank (WtT) und Tank-to-Wheel (TtT). Im Bereich WtW werden alle Prozesse der Energiebereitstellung erfasst. Sie umfassen die Herstellung der Energiequelle bis zu Verlusten bei der Bereitstellung dieser. Im zweiten Bereich Tank-to-Wheel werden alle direkten Emissionen aus dem Fahrzeugbetrieb gebündelt (Endenergieverbrauch). Summiert ergibt sich ein Wert für die Well-to-Wheel Analyse. In diesem sind die direkten und indirekten Emissionen addiert. Angegeben wird dieser meist in CO_2 -Äquivalent.⁴⁸

2.3 Grundlagen der ökonomischen Bewertung

Wünsche und Bedürfnisse der Menschen sowie die zur Verfügung stehenden Mittel fallen häufig auseinander. Diese Diskrepanz wird als Knappheit bezeichnet. Wenn Menschen Entscheidungen über den Einsatz dieser knappen Ressourcen treffen, spricht man von Wirtschaften. Die Wirtschaftswissenschaften untersuchen, wie und nach welchen Regeln die Entscheidungen über die Verwendung knapper Ressourcen erfolgen.⁴⁹ Innerhalb der Wirtschaftswissenschaften unterscheidet man zwischen mikro- und makroökonomischen Fragestellungen.

Die Mikroökonomie beschäftigt sich mit den Verhaltensmustern einzelner Individuen, Haushalte oder Unternehmen. Es wird untersucht nach welchen Kriterien Individuen, Haushalte oder Unternehmen Entscheidungen treffen.⁵⁰ Die Makroökonomie beschäftigt sich im Gegensatz dazu mit einer gesamtwirtschaftlichen Betrachtung des Verhaltens von verschiedenen, gebündelten Wirtschaftseinheiten sowie deren Wechselwirkungen.⁵¹

⁴⁶ Vgl. Kaltschmitt et al. (2015) Umweltbewertung für Ingenieure, S. 234–238.

⁴⁷ Vgl. Herrmann (2010) Lebensphasenübergreifende Disziplinen, S. 156.

⁴⁸ Vgl. Schmied et al. (2012) Berechnung des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen des ÖPNV, S. 12.

⁴⁹ Vgl. Rittenbruch (2014) Makroökonomie, S. 3.

⁵⁰ Vgl. Jochen Schumann (1992) Grundzüge Makroökonomie, S. 1–2.

⁵¹ Vgl. Rittenbruch (2014) Makroökonomie, S. 4.

Betrachtet man die Auswirkungen von technischen oder nicht-technischen Veränderungen werden diese meist unter dem Aspekt der ökonomischen Nachhaltigkeit betrachtet⁵². Ökonomische Nachhaltigkeit beschreibt die langfristigen Folgen von Veränderungen. Zur Analyse dieser Auswirkungen gibt es eine Vielzahl von Indikatorensets⁵³. Die Einflüsse von Mobilität auf diese Indikatorensets darzustellen, scheitert allerdings an den Abhängigkeiten der Merkmale untereinander. LAKSHAMANAN stellt in seinem Bericht eine Möglichkeit dar, diese Abhängigkeiten sichtbar zu machen.⁵⁴

In der Makroökonomie werden die Zusammenhänge des Marktes zur Vereinfachung in einem vollkommenen Markt dargestellt. In diesem besteht keine Marktmacht, d.h. es gibt viele kleine Anbieter und Nachfrager. Weiterhin gibt es Markttransparenz und es wird nur ein homogenes Gut betrachtet. Markttransparenz beschreibt den Zustand, dass jeder Marktteilnehmer seine Nutzenfunktion, den Marktpreis und seine Kostenfunktion kennt. Sind diese Voraussetzungen gegeben, existiert ein zeitlich beschränktes Marktgleichgewicht zwischen Angebot und Nachfrage.

Die Angebotsfunktion gibt an, zu welchem Preis ein Anbieter seine Waren bei Angebotsmenge x abgibt. Diese Werte werden über alle Anbieter am Markt aggregiert und bilden die Angebotskurve. Die Nachfragekurve bildet ab, welche Menge an Gut x zum Preis p abgenommen wird. Die einzelne Nachfrage richtet sich nach der Maximierung des spezifischen Nutzens.⁵⁵

Im Marktgleichgewicht kann jeder Anbieter, die zu dem Preis gehörende Menge von Gut x verkaufen und jeder Nachfrager die zu dem Gleichgewichtspreis gehörende Menge von Gut x kaufen. Für den Nachfrager entspricht dies der nutzenmaximalen Menge und für den Anbieter der gewinnmaximierenden Menge. Ist der Preis höher als der Gleichgewichtspreis, ergibt sich ein Angebotsüberschuss. Umgekehrt (Preis kleiner als Gleichgewichtspreis) ergibt sich ein Nachfrageüberschuss. In beiden Fällen bewegt sich der Preis in Richtung des Gleichgewichtspreis. Diesen Vorgang nennt man Stabilität des Marktgleichgewichts.⁵⁶

⁵² Vgl. Doll et al. (2013) Wirtschaftliche Aspekte nichttechnischer Massnahmen zur Emissionsminderung im Verkehr, S. 44.

⁵³ Vgl. Bardt (2011) Indikatoren ökonomischer Nachhaltigkeit, S. 16.

⁵⁴ Vgl. Lakshmanan (2007) The wider economic benefits of transportation: an overview, S. 1–13.

⁵⁵ Vgl. Woeckener (2013) Volkswirtschaftslehre, S. 21–77.

⁵⁶ Vgl. Woeckener (2013) Volkswirtschaftslehre, S. 81–83.

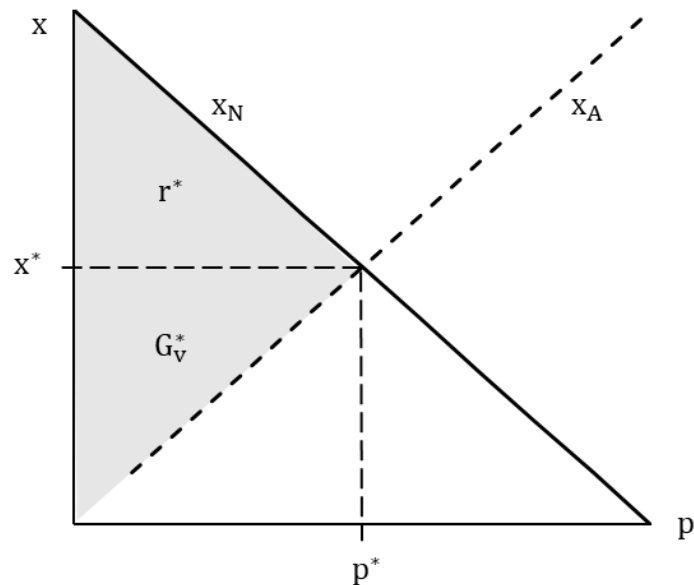


Abbildung 2-4 - Marktgleichgewicht⁵⁷

Die Lage der Kurven wird durch mehrere Parameter beeinflusst. Die Angebotskurve liegt höher, wenn Technologien effizienter sind und es mehr Anbieter gibt. Die Nachfragekurve steigt, wenn der Nachfrager bereit ist mehr für ein Gut zu bezahlen oder das Einkommen steigt. Dieser Effekt wird Preismechanismus genannt.⁵⁸

Eine wichtige Kenngröße für den Markt ist die Wohlfahrt. Die Wohlfahrt entspricht auf Seiten der Anbieter dem Gewinn.

$$G(x) = px - K(x) \quad (2-1)$$

Mit: p : Preis

x : Menge

$K(x)$: Kosten für Menge x

$G(x)$: Gewinn für Menge x

Auf Seiten der Nachfrager entspricht sie der Differenz aus Zahlungsbereitschaft und Ausgaben (Preis * Menge).

$$r(x) = z(x) - px \quad (2-2)$$

Mit: $z(x)$: maximale Zahlungsbereitschaft für Menge x

$r(x)$: Konsumentenrente (Wohlfahrt auf Seiten des Nachfragers) für Menge x

⁵⁷ Eigene Darstellung nach Woeckener (2013) Volkswirtschaftslehre, S. 97.

⁵⁸ Vgl. Stiglitz et al. (2010) Volkswirtschaftslehre, S. 141–157.

Aus diesen beiden ergibt sich die Gesamtwohlfahrt als

$$W(x) = r(x) + G(x) = z(x) - K(x) \quad (2-3)$$

Mit: $W(x)$: Wohlfahrt in Abhängigkeit der Menge x

Maximiert man die Wohlfahrt nun nach der Menge x im vollkommenen Markt, ergibt sich

$$\frac{\partial z}{\partial x}(x) = \frac{\partial K}{\partial x}(x) \quad (2-4)$$

Das Wohlfahrtsniveau wird maximiert, wenn die Grenzkosten gleich dem Grenznutzen sind. Dies ist gegeben, wenn ein Gleichgewichtspreis vorliegt. In Abbildung 2-4 ist ein solches Gleichgewicht grafisch dargestellt.

Unter Zuhilfenahme der oben genannten Erklärungen kann nun im Folgenden die Wohlfahrtsveränderung durch den Personenverkehr beschrieben werden. Exemplarisch wird dafür, analog zu STOCK, die Wohlfahrtsveränderungen durch Konsum in einem anderen Ort beschrieben. Diese Ableitung kann für alle anderen Bewegungsformen analog durchgeführt werden. Aus dieser ergeben sich einige Veränderungen im volkswirtschaftlichen Nutzen.⁵⁹

Im Ausgangsfall liegen Einkaufsort und Wohnort zusammen. Für den Kauf des Gutes in der Menge x entstehen somit Kosten von p . Fallen Wohnort und Einkaufsort örtlich auseinander, fallen zusätzlich Kosten für die Fahrt und Lagerung an. Diese Zusatzkosten lassen sich wie folgt ermitteln

$$p_z^x + \frac{f^x * 2 * d_{VZ} * t_{VZ}}{x} + \frac{1}{2} * \frac{s^x}{f^x} \quad (2-5)$$

Mit: d_{VZ} : Distanz für die Strecke zwischen Ausgangsort V und Zielort Z [km]

t_{VZ} : Kosten für die Distanz zwischen Ausgangsort V und Zielort Z [km]

f^x : Frequenz des Einkaufens

p_z^x : Preis für die Menge x

s^x : Kosten für die Lagerung von Menge x

Durch die erhöhten Kosten kann nur eine geringere Menge an Gütern gekauft werden. Die verringerte Menge an Gütern reduziert im Vergleich zum Ausgangsfall die Wohlfahrt im betrachteten Fall. Aus dieser Betrachtung lassen sich die folgenden ökonomischen Nutzenveränderungen des Personenverkehrs ableiten.⁶⁰

⁵⁹ Vgl. Stock et al. (2014) Verkehrsökonomie, S. 66–73.

⁶⁰ Vgl. Stock et al. (2014) Verkehrsökonomie, S. 78–79.

- Der Aktionsradius des Menschen steigt zusammen mit der Qualität und der Reduzierung der Kosten für den Transport.
- Mit zunehmender Güte des Transports steigt die Nachfrage an.
- Es besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der Zahlungsbereitschaft und den Nutzen, den die Verkehrsinfrastruktur stiftet.
- Sinkende Transportkosten führen zu einer Erhöhung der Verkehrsmenge.

Im Güterverkehr wird die Arbeitsteilung zwischen zwei Produktionsstandorten (I, II) untersucht, wobei die Kosten am örtlich separierten Produktionsstandort (II) geringer sind. Die Arbeitsteilung lohnt sich dann, wenn $d_{I,II} * t_{I,II} < p_I^* - p_{II}^*$. Die Kosten für den Transport somit kleiner sind als die Preisdifferenz. Verringern sich infolge einer Verkehrsinfrastrukturverbesserung die Transportkosten zwischen I und II, nimmt die Wohlfahrt am Produktionsstandort I ab und am Produktionsstandort II zu. Dies begründet sich in der erhöhten Arbeitsteilung zwischen den beiden Standorten. Insgesamt steigt die Wohlfahrt mit Absinken der Transportkosten, durch technische Innovationen. Daraus ergeben sich folgende volkswirtschaftliche Nutzenveränderungen:⁶¹

- Der Verkehr ist Triebkraft für die Arbeitsteilung. Ohne diesen würde arbeitsteiliges Wirtschaften nicht funktionieren.
- Mit sinkenden Transportkosten steigt der Anreiz zur Arbeitsteilung.

Bisher wurde lediglich der Nutzen der Mobilität betrachtet. Für eine vollständige Analyse muss diese Betrachtung um die Analyse der Kosten erweitert werden. Unterschieden wird zwischen direkten Kosten und indirekten Kosten. Direkte Kosten entsprechen in diesem Zusammenhang den Kosten, welche innerhalb der Zeit der Nutzung entstehen. Zu diesen gehören z.B. Treibstoffkosten und Abnutzungskosten. Indirekte Kosten entstehen durch indirekte Effekte, wie z.B. den CO_2 -Ausstoß des Transportfahrzeugs und die daraus resultierenden Umweltkosten.

Zum Verständnis der komplexen Bewertung von Verkehrsinfrastrukturveränderung wird im Folgenden ein Modell zur Darstellung der Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Variablen vorgestellt. LAKSHMANAN hat das Modell „The wider Benefits of transportation“ entwickelt und stellt damit die Wirkungszusammenhänge ausgehend von einer Investition in die Verkehrsinfrastruktur dar.⁶²

⁶¹ Vgl. Stock et al. (2014) Verkehrsökonomie, S. 79–81.

⁶² Vgl. Lakshmanan (2007) The wider economic benefits of transportation: an overview, S. 1–13.

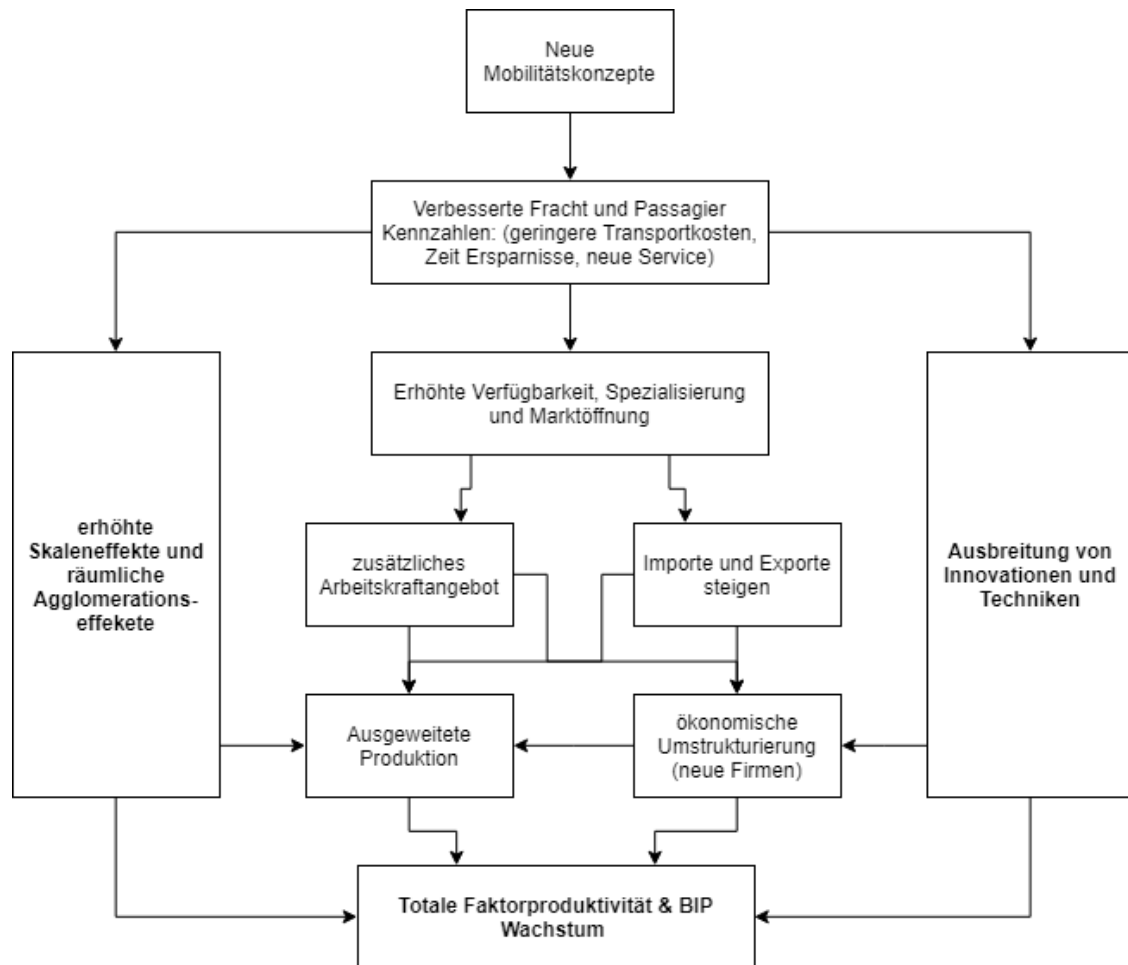


Abbildung 2-5 - The wider Benefits of transportation⁶³

In Abbildung 2-5 werden die Wirkungszusammenhänge des Modells dargestellt. Ausgehend von einer Investition in die Transportinfrastruktur verbessern sich die transportspezifischen Kennzahlen. Zu diesen gehören Zeiteinsparungen und geringere Transportkosten. Durch diese Anpassungen erhöht sich die Verfügbarkeit des Transports und der Markt wird vergrößert. Die weiteren Effekte lassen sich aus den oben beschriebenen Veränderungen ableiten. Einerseits wird die Arbeitskraft durch den größeren Aktionsradius verbessert. Andererseits führt die Reduktion der Transportkosten im Güterverkehr zu einer vermehrten Arbeitsteilung und somit höheren Importen und Exporten.

Die oben beschriebenen Effekte führen nach dem Modell zu einer erhöhten Produktion und der Umstrukturierung des Marktes. Diese Umstrukturierung ist begünstigt durch die Auslagerung von verschiedenen Teilleistungen und neuen Geschäftsfeldern. Zusammen erhöht sich die totale Faktorproduktivität und das Bruttoinlandsprodukt. Die totale Faktorproduktivität

⁶³ eigene Darstellung nach Lakshmanan (2007) The wider economic benefits of transportation: an overview, S. 11–13.

beschreibt den Teil des Wachstums des BIP, welcher nicht durch einen erhöhten Einsatz an Produktionsfaktoren entsteht. Er gibt somit Aufschluss über die Produktivität.⁶⁴

Im Transportsektor gehören zu den direkten Kosten neben den Kosten für das Fahrzeug auch die Opportunitätskosten des Fahrers. Diese werden in den Verkehrswissenschaften durch den „Value of Time“ (VOT) abgebildet.⁶⁵ Die Opportunitätskosten entsprechen gem. Definition den Kosten der entgangenen Gelegenheit.⁶⁶ Im Güterverkehr entsprechen diese den Kosten für den Lohn des Fahrers, da diese unter den Bedingungen des vollständigen Marktes den Opportunitätskosten entsprechen. Im Personenverkehr ist die Berechnung deutlich schwieriger, da es sich um unbezahlte Zeit handelt. In empirischen Studien wird versucht, den VOT über Vergleiche in der Zahlungsbereitschaft zu ermitteln. Dabei werden die Befragten gebeten anzugeben, wie viel sie bereit wären zu zahlen, um eine Zeit x auf einer Strecke einzusparen.⁶⁷

Bei gewerblichen Fahrzeugen wird neben den Kosten für den Fahrer, Kosten für die Bereitstellung zusätzlicher Fahrzeuge inkludiert. Dies basiert auf der Annahme, dass die Fahrzeuge durch Einsparungen in der Reisezeit für weitere Fahrten genutzt werden könnten.⁶⁸

Es ist darauf hinzuweisen, dass es sich bei der empirischen Bestimmung der VOT-Kosten um eine Näherung handelt, die stark von den gewählten Annahmen abhängt.⁶⁹ Die letzten verfügbaren Untersuchungen über die Kosten für Deutschland stammen aus dem Jahr 2005 und werden daher nicht berücksichtigt. Stattdessen werden die um Lohneffekte bereinigten und in Euro umgerechneten Werte aus 2017 für Großbritannien zugrunde gelegt.⁷⁰

2.4 Einführung in die Szenarioanalyse

Im Rahmen dieser Arbeit soll das Szenario eines multimodales Verkehrssystem entwickelt werden und dem aktuellen Stand gegenübergestellt werden. Für diese Bewertung sollen zunächst einige Grundlagen der Szenarioanalyse erläutert werden. Dafür wird der Begriff Szenario definiert und gegen die Prognose abgegrenzt. Basierend darauf werden verschiedene Arten von Szenarien sowie eine Methode zur Erstellung von Szenarien vorgestellt. Den Abschluss des Unterkapitels bildet die Vorstellung klassischer Fehler im Zusammenhang mit der Szenarioanalyse.

In der Literatur gibt es verschiedene Definitionen des Begriffs Szenario. Dies liegt an der im allgemeinen Sprachgebrauch vernachlässigten Unterscheidung zwischen Prognose und Szenario.⁷¹ Im Rahmen dieser Arbeit wird folgende Definition des Begriffs Szenarios verwandt:

⁶⁴ Vgl. Weyerstraß (2018) Entwicklung, Determinanten und Bedeutung der totalen Faktorproduktivität, S. 1.

⁶⁵ Vgl. Stock et al. (2014) Verkehrsökonomie, S. 66.

⁶⁶ Vgl. Woeckener (2013) Volkswirtschaftslehre, S. 86.

⁶⁷ Vgl. Stock et al. (2014) Verkehrsökonomie, S. 114–118.

⁶⁸ Vgl. Stock et al. (2014) Verkehrsökonomie, S. 115.

⁶⁹ Vgl. Wardman (2004) Public transport values, S. 363–369.

⁷⁰ Vgl. Cookson (2018) Inrix Global Traffic Scorecard, S. 4–7.

⁷¹ Vgl. Steinmüller (1997) Grundlagen Zukunftsforschung, S. 48.

„Unter einem Szenario versteht man die Beschreibung einer zukünftigen Situation und die Entwicklung bzw. Darstellung des Weges, der aus dem Heute in die Zukunft hineinführt.“⁷²

In dieser Definition sind die wichtigsten Merkmale eines Szenarios enthalten. So ist ein Szenario lediglich die Beschreibung einer möglichen Zukunft, nicht aber der Versuch die Zukunft vorherzusagen. Weiterhin benötigt ein Szenario neben der verbalen Beschreibung der zukünftigen Situation, die Beschreibung des Weges zum Szenario. Daraus können die folgenden Eigenschaften von Szenarien abgeleitet werden:⁷³

- **Hypothetisch**
Szenarien bilden lediglich eine mögliche Zukunft ab. Sie haben keinen Anspruch darauf diese vorherzusagen. Sie grenzen sich in diesem Punkt von einer Prognose ab.
- **Alternativ**
Generell wird bei Szenarioanalyse mehr als eine mögliche Alternative abgedeckt. Dadurch soll vermieden werden, lediglich Worst- oder Best-Case Szenarien darzustellen.
- **Skizzenhaft**
Szenarien sind trotz ihrer skizzenhaften Beschreibung der Zukunft meist in den entscheidenden Punkten sehr konkret.

Aufbauend auf die Beschreibung der drei Haupteigenschaften erfolgt im nächsten Schritt eine Unterscheidung zum Prognosebegriff. Eine Prognose beschreibt die wissenschaftliche Fortschreibung (Extrapolation) bestehender Trends. Genauer trifft sie basierend auf Beobachtungen aus der Vergangenheit, Aussagen über zukünftige Ereignisse.⁷⁴

Tabelle 2-1 - Unterscheidung Prognose und Szenario⁷⁵

	Prognosebegriff	Szenariobegriff
Multiplizität	Simple	Erhöhte Freiheitsgrade
Berücksichtigung von Unsicherheiten	Explorativ	Explorativ und normativ
Methoden	Trendextrapolation, Befragungen, Delphi-Studien	Mehrere Szenario-Techniken
Entscheidungsaspekte	Deterministisch	Verschieden Szenarien

⁷² Vgl. Ute von Reibnitz (1992) Szenario-Technik, S. 14.

⁷³ Vgl. Wilson (1978) Scenarios, S. 224.

⁷⁴ Vgl. Klaus Wübbenhorst, Gustav A. Horn, Udo Kamps (2018) Prognose.

⁷⁵ Vgl. Steinmüller (1997) Grundlagen Zukunftsforschung, S. 47.

In Tabelle 2-1 sind die Unterschiede zwischen einer Prognose und einem Szenario in verschiedenen Kategorien aufgeführt. In der Kategorie „Entscheidungsaspekt“ liegt die Begründung, für die Auswahl der Szenariotechniken für diese Arbeit. Bei Szenarien ist die Entscheidungsgrundlage immer durch andere Szenarien gestützt, während bei einer Prognose Trends extrapoliert werden. Um eine Beurteilung basierend auf verschiedenen Alternativen zu ermöglichen, muss daher die Szenarioanalyse gewählt werden. Trotzdem wird innerhalb der Szenarien oft auf die Extrapolation von Trends zurückgegriffen. Diese ermöglichen es, in Teilbereichen Vorhersagen zu treffen.

Aufbauend auf dieser Abgrenzung werden im Folgenden die zwei verschiedenen Arten der Szenarien vorgestellt. In der Szenarioanalyse unterscheidet man nach ARRAS et. al zwischen **projektiven Szenarien** und **normativen Szenarien**. Wobei erstere auf der Fortschreibung von aktuellen Trends und Computersimulationen beruhen. Bei diesen werden sektorale Trends nicht berücksichtigt. Es handelt sich daher um sogenannte „Business-as-usual-Szenarien“. Normative Szenarien beschreiben im Gegensatz dazu Entwicklungswege, welche auf Basis von Studien oder Präferenzen erstellt werden. Diese bauen auf verschiedenen Umweltzuständen auf, die bis zu dem Szenario eintreten müssen.⁷⁶

Im Fall der normativen Szenarien ist es entscheidend, die Handlungswege, welche zu den Umweltzuständen führen zu dokumentieren. Annahmen müssen kenntlich gemacht und dokumentiert werden.

Bezüglich der Vorgehensweise zur Erstellung eines Szenarios bzw. mehrere Szenarien gibt es in der Literatur mehrere Ansätze. Bis auf wenige Ausnahmen haben alle eine identische Grundstruktur. Nach einer Analyse-Phase folgt eine Prognose-Phase sowie eine Synthese-Phase. Die einzelnen Phasen werden dabei linear, d.h. nacheinander, durchlaufen.⁷⁷

In der **Analyse-Phase** wird zunächst die Problemdefinition erstellt. Diese umfasst neben der Definition des Problems auch dessen Abgrenzung. Im Anschluss daran wird eine Informationsbasis geschaffen, um die Ausgangslage zu beschreiben.⁷⁸

Die **Prognose-Phase** schließt an diese an und beschäftigt sich mit der Ableitung von aufeinander abgestimmten Entwicklungen innerhalb der betrachteten Problemdefinition. Innerhalb dieser werden verschiedenen Annahmen bzgl. der Entwicklung getroffen. Diese sind wie oben bereits beschrieben ausführlich zu dokumentieren.⁷⁹

In der **Synthese-Phase** werden die Szenarien basierend auf den vorher gewonnen Informationen definiert. Die Definition ist dabei immer eine ausführliche textuelle Beschreibung des Szenarios.⁸⁰

⁷⁶ Vgl. Arras (1987) Notwendigkeit und Methodik von Szenarien, S. 192–197.

⁷⁷ Vgl. Mißler-Behr (1993) Methoden der Szenarioanalyse, S. 9.

⁷⁸ Vgl. Mißler-Behr (1993) Methoden der Szenarioanalyse, S. 9.

⁷⁹ Vgl. Mißler-Behr (1993) Methoden der Szenarioanalyse, S. 9.

⁸⁰ Vgl. Mißler-Behr (1993) Methoden der Szenarioanalyse, S. 10.

Aufgrund ihrer großen Verbreitung in Deutschland und der EU wird im Rahmen dieser Arbeit die Szenarioanalyse nach MISSLER-BEHR detailliert vorgestellt und später angewandt. Sie besitzt einen achtegliedrigen Aufbau, wobei die ersten drei Phasen der Analyse-Phase zuzuordnen sind, die Schritte 4-6 der Prognose-Phase und die restlichen Schritte der Synthese-Phase.⁸¹

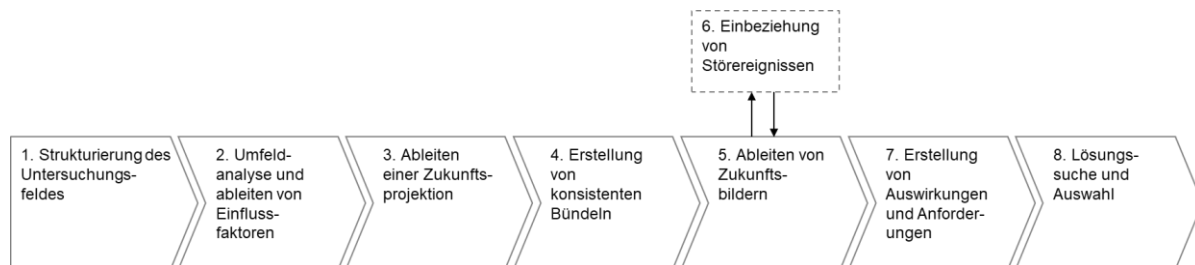


Abbildung 2-6 - Vorgehensweise Szenarioanalyse⁸²

In Abbildung 2-6 sind die Schritte der Szenarioanalyse dargestellt. Diese werden im Folgenden kurz dargestellt.

Der erste Schritt befasst sich mit der Strukturierung des Untersuchungsumfeldes. In diesem wird die Aufgabenstellung formuliert. In der Aufgabenstellung sollen bereits die ersten Hintergrundinformationen zu finden sein. Ausgehend von dieser wird im Folgenden der Untersuchungsrahmen formuliert und das Untersuchungsumfeld analysiert. Bei der Formulierung des Untersuchungsrahmens sollte berücksichtigt werden, dass bei einer Szenarioanalyse trotz groß gewählten Rahmen, lediglich gewisse Handlungsfelder zu identifizieren sind. Diese Handlungsfelder müssen für den IST-Zustand definiert sein, um im Schritt 3 Zukunftsprojektionen ableiten zu können. Durch die Beschreibung der Handlungsfelder im IST-Zustand entsteht somit automatisch eine Beschreibung des heutigen Szenarios. Im Rahmen dieser Arbeit wird es das Basisszenario des multimodalen Verkehrs bilden.⁸³

Im zweiten Schritt wird aus der Umfeldanalyse ein Netz von Einflussgrößen abgeleitet. Durch Kreativitätstechniken werden für ein Handlungsfeld verschiedene Einflussmöglichkeiten definiert. Im Busverkehr könnte dies z.B. der Zeitpunkt, in welchem autonomes Fahren Marktreife erreicht, sein. Aufbauend darauf, werden im dritten Schritt Entwicklungstendenzen erstellt. Diese Entwicklungstendenzen basieren auf dem IST-Zustand und werden genutzt, um den Szenario-Zustand in der Zukunft zu projizieren. Grundlage für die Projektion bilden dabei entweder Expertengespräche, zugängliche Prognosen oder Recherchen. Dabei kann es passieren, dass es zu unterschiedlichen Entwicklungstendenzen je Prognose kommt. Diese Entwicklungstendenzen werden als kritische Entwicklungstendenzen kenntlich gemacht und unterschiedliche Entwicklungsstränge für diese aufgestellt. Unabhängig davon, müssen alle Entwicklungstendenzen klar dokumentiert werden.⁸⁴

⁸¹ Vgl. Mißler-Behr (1993) Methoden der Szenarioanalyse, S. 10–11.

⁸² eigene Darstellung nach Geschka et al. (1990) Die Szenario-Technik in der Unternehmensplanung, S. 319.

⁸³ Vgl. Geschka et al. (1990) Die Szenario-Technik in der Unternehmensplanung, S. 321.

⁸⁴ Vgl. Geschka et al. (1990) Die Szenario-Technik in der Unternehmensplanung, S. 321–322.

Aus den in Schritt 3 gewonnen Entwicklungstendenzen werden konsistente Bündel gebildet. Die in den vorherigen Schritten heraus gearbeiteten, kritischen Entwicklungstendenzen werden untersucht, inwiefern sich diese ausschließen, gegenseitig verstärken oder neutralisieren. Auf Basis dieser Untersuchung werden konsistente Bündel gebildet (Schritt 4). Konsistente Bündel sind dabei mehrere Trends, welche zu einem Entwicklungsziel zusammenführen. Im Schritt 5 werden zu diesen zusammen mit den unkritischen Entwicklungstendenzen aggregiert. Dadurch entstehen die Umweltszenarien. Diese Szenarien werden im Anschluss daran ausformuliert. In konstanten Zeitintervallen wird das Szenario bis zum finalen Zeitpunkt entwickelt. Durch diese Vorgehensweise werden die Zeitschritte kleiner und realitätsnäher.⁸⁵

Der 6. Schritt weicht von der sonst linearen Vorgehensweise ab. In diesem werden mögliche Störfaktoren aus den Umweltszenarien entwickelt und im Anschluss daran bewertet. Die Störfaktoren werden über Kreativitätstechniken bestimmt. Basierend auf den Störfaktoren erfolgt eine kritische Würdigung des Ergebnisses.

Die Schritte sieben und acht werden im Folgenden nicht weiter beschrieben, da sich diese mit der Ableitung von Handlungsempfehlungen beschäftigen, welche im Rahmen dieser Arbeit eine untergeordnete Rolle spielen.

⁸⁵ Vgl. Geschka et al. (1990) Die Szenario-Technik in der Unternehmensplanung, S. 322–323.

3 Analyse bestehender Ansätze

In diesem Kapitel werden bestehende Ansätze zur Bewertung von Verkehrskonzepten vorgestellt. Diese werden zunächst beschreiben und im Anschluss daran auf Basis der in Kapitel 3.1 definierten Kriterien, aufgegliedert nach Objekt- und Zielbereich, bewertet. Basierend auf den Ergebnissen wird in Kapitel 3.3 das Forschungsdefizit herausgearbeitet.

3.1 Kriterien zur Bewertung bestehender Ansätze

Im Folgenden werden Kriterien zur Bewertung der bereits in der Literatur beschriebenen Ansätze entwickelt. Diese Kriterien leiten sich aus der Fragestellung bzw. den in diesem Kapitel definierten Objekt- und Zielbereich ab.

Der Objektbereich definiert den Kontext, in welchem der Bewertungsansatz entwickelt wird. Dieser setzt sich zusammen aus:

- **Evaluierung neuartiger multimodaler Verkehrskonzepte**
Das Ziel der Arbeit ist die Evaluierung des Pod-basierten multimodalen Mobilitätskonzepts. Das Bewertungskonzept sollte daher auf die Integration neuer Verkehrsmittel sowie die Bewertung eines in der Zukunft befindlichen Zeitpunkts ermöglichen.
- **Fokus auf eine ganzheitliche Betrachtung**
Aufgrund der grundlegenden Bedeutung eines Verkehrskonzeptes für ein Land, soll neben dem Kundennutzen außerdem die ökonomischen und ökologischen Einflüsse berücksichtigt werden.
- **Schwerpunkt multimodaler Verkehr**
Das Bewertungskonzept soll nicht den gesamten Verkehrssektor beschreiben, sondern sich schwerpunktmäßig mit dem multimodalen Verkehr befassen und dessen Vorzüge bzw. Schwachstellen herausarbeiten.
- **Berücksichtigung Personen- und Güterverkehr**
Das Bewertungskonzept soll neben dem Personenverkehr auch den Güterverkehr abbilden.
- **Begrenzte Komplexität**
Neben den genannten Anforderungen an die Rahmenbedingungen soll das Modell nicht zu komplex sein. Die Realität soll „nicht so exakt wie möglich, sondern so genau wie nötig“⁸⁶ dargestellt werden.

Der Zielbereich dieser Arbeit wurde bereits in Kapitel 1.2 beschreiben. Aus der Zieldefinition des Kapitels lassen sich die nachstehenden Kriterien zur Bewertung eines multimodalen Verkehrskonzepts ableiten:

⁸⁶ Vgl. Banse (2011) Das Einfachheitsprinzip in den Technikwissenschaften, S. 93.

- **Entscheidungshilfe für weitere Forschungen**

Auf Basis des Modells sollen Entscheidungen über zukünftige Forschungsprojekte unter Einbeziehung von wechselnden Umweltzuständen getroffen werden können.

- **Schwachpunktanalyse basierend auf den Ergebnissen**

Aus den Ergebnissen der Szenarien sollen Aussagen über die Schwachpunkte der Verkehrskonzepte getroffen werden können.

- **Schlüsseltechnologien ausarbeiten**

Im Zusammenspiel mit der Schwachpunktanalyse und der Sensitivität der einzelnen Parameter, sollen Aussagen über Schlüsseltechnologien getroffen werden können.

In Kapitel 3.3 werden die Ergebnisse zusammengefasst und das Forschungsdefizit herausgearbeitet.

3.2 Darstellung bestehender Ansätze

Im folgenden Kapitel werden einerseits Methoden zur Bewertung von Verkehrskonzepten aus Perspektive der Politik beschrieben und auf der anderen Seite Methoden zur generellen Bewertung von Technologie/ Verkehrsprojekten vorgestellt.

3.2.1 Methoden zur Bewertung von Verkehrskonzepten

ASTRA-Modell⁸⁷

Tabelle 3-1 - Übersicht ASTRA-Modell

Institut/ Unternehmen/ Autor	Auftraggeber: EU Durchgeführt: <u>TRT TRASPORTI E TERRITORIO</u> ; <u>M-Five GmbH</u> ; <u>Fraunhofer-Institut Für System- Und Innovationsforschung ISI</u>
Erscheinungsdatum	1997 - 2018
Zielsetzung	Das ASTRA-Modells wurde ursprünglich zur Unterstützung von Transport strategischen Entscheidungen der EU Transportpolitik entwickelt.
Studie oder Modell?	Modell
Auswahlgrund	Bewertung der volkswirtschaftlichen Auswirkungen von verkehrspolitischen Entscheidungen. Sowie die Abdeckung einer ganzen Region.

⁸⁷ Vgl. Lehr et al. (2011) ASTRA und PANTA RHEI im Vergleich, S. 12–18; Vgl. Schade (2005) Strategic sustainability analysis; Vgl. Krail (2009) System-based analysis of income distribution impacts on mobility behaviour, S. 16–108.

Mithilfe des ASTRA-Modells lassen sich Analysen über die zukünftige Entwicklung innerhalb der Verkehrs-, Umwelt- und Wirtschaftssysteme durchführen. Prognosen können bis zur 50 Jahre in die Zukunft gehen⁸⁸. Das Modell basiert dabei auf dem „System Dynamics“-Ansatz. System Dynamics wurde in den 1950er-Jahren von Jay W. Forresters entwickelt und ist eine Methodik um dynamisch-komplexe Sachverhalte zu modellieren, zu analysieren und zu simulieren.⁸⁹

Unterschieden wird zwischen dem ASTRA-EC, ASTRA-D und ASTRA-IT Modellen. Ausgelegt ist das ASTRA-EC Modell auf eine Modellierung für alle europäischen Staaten. In diesem Zusammenhang wurde es bereits in einer Vielzahl an Forschungsprojekten eingesetzt⁹⁰. Im Rahmen des Projektes RENEWABILITY II wurde das ASTRA-EC Modell auf Deutschland (ASTRA-D) bezogen. Dieses hat im Vergleich zum europäischen Modell eine höhere Detailtreue und modelliert Deutschland damit exakter. Das ASTRA-IT-Modell ist das Äquivalent zu dem ASTRA-D Modell für Italien.

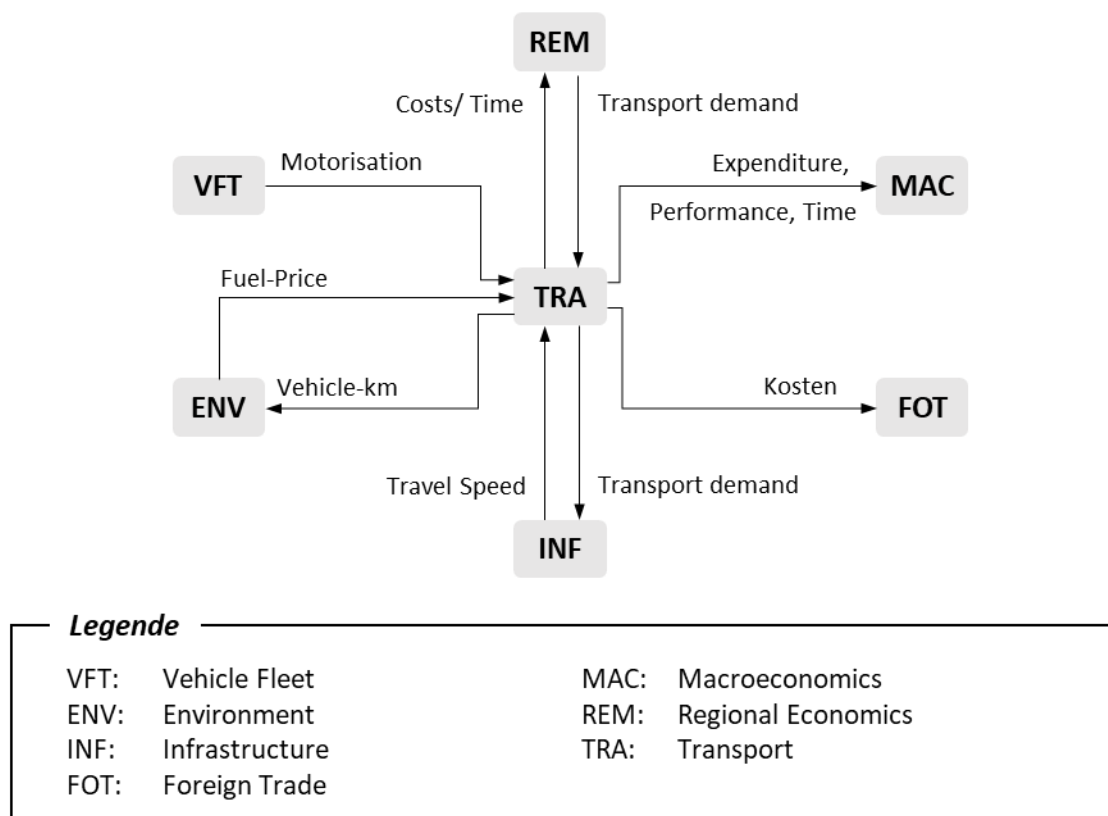


Abbildung 3-1 - Aufbau des ASTRA Modells⁹¹

⁸⁸ Vgl. Zimmer et al. (2013) Renewability II Szenario für einen anspruchsvollen Klimaschutzbeitrag des Verkehrs, S. 21.

⁸⁹ Vgl. Coyle (2000) Qualitative and quantitative modelling, S. 226.

⁹⁰ Vgl. Krail (2009) System-based analysis of income distribution impacts on mobility behaviour, S. 16.

⁹¹ in Anlehnung an Krail (2009) System-based analysis of income distribution impacts on mobility behaviour, S. 19.

Der grundlegende Aufbau des Modells ist am Beispiel der Verbindungen im Transportmodul in Abbildung 3-1 dargestellt. Dargestellt werden die Interaktionen innerhalb des Transportmoduls. Verbindungen zwischen den anderen Modulen sind aus Gründen der Darstellbarkeit nicht berücksichtigt worden. Außerdem gibt es noch folgende Module:⁹²

- **Bevölkerungsmodul**

Das Bevölkerungsmodul simuliert die demographische Entwicklung der EU27+2 Länder. Die Bevölkerung wird dabei in Altersgruppen mit Jahresabständen unterteilt.

- **Makroökonomisches Modul**

Das makroökonomische Modul ist das Kernstück von ASTRA. In diesem werden die ökonomischen Indikatoren modelliert, welche Input-Größen für viele andere Module darstellen. Das makroökonomische Modul besteht aus sechs Sektionen: Handel zwischen den Nationen, Nachfrageseite, Angebotsseite, Beschäftigung, Regierung und die Verknüpfung zwischen dem Mikro- und Makrolevel des Verkehrs.

- **Außenhandelsmodul**

Aufgrund der hohen Bedeutung des Außenhandels für die EU-Staaten haben Veränderungen im Transportsektor wesentliche Auswirkungen bzgl. der Beschäftigung und anderer wirtschaftlicher Indikatoren.⁹³

- **Regional-ökonomisches Modul**

Im regional-ökonomischen Modul wird der Transport zwischen und innerhalb des simulierten Ökosystems modelliert.

- **Transport Modul**

Im TRA-Modul wird der Modal Split für den Passagier- und Frachtverkehr ermittelt. Die Auswahl des für den Weg optimalen Verkehrsmittels erfolgt dabei anhand eines Ansatzes zur diskreten Auswahlmodellierung. Die diskrete Auswahlmodellierung beschreibt ein Verfahren, in welchem die Entscheidung eines Menschen für einen gewissen Zeitpunkt basierend auf der Umwelt und externen Einflussfaktoren bestimmt wird.

- **Infrastruktur Modul**

Im Infrastruktur Modul wird der Ausbau des Transportnetzwerks beschrieben. Basierend auf diesem lassen sich die Kapazitäten für die verschiedenen Verkehrsmittel ableiten.

- **Fahrzeugflotten Modul**

Neben der Kapazität des Transportnetzwerks wird im Fahrzeugflotten Modul die (technische) Zusammensetzung und Anzahl an Fahrzeugen in den jeweiligen Fahrzeugkategorien berechnet. Dabei wird zwischen den folgenden vier Fahrzeugtypen unterschieden: Autos, Bussen, leichten Lkws und schweren Lkws.

- **Umweltmodul**

Ausgehend von den Berechnungen zum Verkehrsaufkommen und der Produktion an Neuwagen werden im Umweltmodul die Auswirkungen auf Personen und das globale Ökosystem berechnet.

⁹² Vgl. Krail (2009) System-based analysis of income distribution impacts on mobility behaviour, S. 19–34.

⁹³ Vgl. Krail (2009) System-based analysis of income distribution impacts on mobility behaviour, S. 25.

- **Wohlfahrtsmodul**

Verschiedenen Indikatoren werden in a-priori festgelegten Schemen zusammengefasst und bewertet.

Das ursprüngliche ASTRA-EC Modell wurde im Rahmen des Projektes RENEWBILITY weiterentwickelt und auf Deutschland ausgerichtet. Weiterhin wurde zwischen 2017 und 2018 das „Trust network model“ eingebunden. Das Trust network model ist ein vom TT TRASPORTI E TERRITORIO entwickeltes Modell zur Abbildung des gesamten europäischen Schienen-, Schiffs- und Straßenverkehrs. Als Outputgrößen werden für den Güterverkehr die Anzahl der Tonnen-Km und für den Personenverkehr die Anzahl Passagier-km ermittelt.⁹⁴

Das ASTRA-EC Modell wurde bereits im Rahmen von mehreren EU-Projekten eingesetzt, um die Auswirkungen verkehrspolitischer Szenarien zu analysieren⁹⁵. In der Studie „Energie- und Treibhauswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr“ wird es um eine Methode erweitert, wie neue Fahrzeugkonzepte und Mobilitätsketten einzubinden sind⁹⁶. Schwachstellen hat das ASTRA-EC Modell in der Bewertung der ökologischen Auswirkungen der Maßnahmen.

Renewbility I-III (2006-2016)⁹⁷

Tabelle 3-2 - Übersicht Renewbility I-III

Institut/ Unternehmen/ Autor	Auftraggeber: <u>Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit</u> Durchgeführt von: <u>Öko-Institut, Institut für Verkehrsforschung am DLR, INFRAS und dem IFEU-Institut</u>
Erscheinungsdatum	2016
Zielsetzung	Das Ziel der Studie war es Szenarien zur Dekarbonisierung des Verkehrssektors aufzustellen und in ökonomischen und ökologischen Dimensionen zu bewerten.
Studie oder Modell?	Studie
Auswahlgrund	Szenarioanalyse für den deutschen Mobilitätssektor und die Integration verschiedener Tools zur ganzheitlichen Bewertung. Betrachtung des gesamten innerdeutschen Personen- und Güterverkehrs.

⁹⁴ Vgl. TRT Transporti e Territorio (2018) Description Trust Model, S. 4–6.

⁹⁵ Vgl. Lehr et al. (2011) ASTRA und PANTA RHEI im Vergleich, S. 12.

⁹⁶ Vgl. Krail (2019) Energie- und Treibhausgaswirkungen autonomes, vernetztes Fahren, S. 137–139.

⁹⁷ Vgl. Zimmer et al. (2016) Renewbility III Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors, S. 19–42; Vgl. Zimmer et al. (2013) Renewbility II Szenario für einen anspruchsvollen Klimaschutzbeitrag des Verkehrs, S. 7–29.;

Bei Renewbility handelt es sich um einen integrativen Ansatz. Dieser kombiniert die Mobilitätsnachfrage mit dem -angebot. Dafür wird sowohl der Personen- als auch der Güterverkehr betrachtet. Wobei die Betrachtung des Personenverkehrs nicht mit Blick auf den multimodalen Verkehr analysiert wurde. Busse, Schienenfahrzeuge und andere Verkehrsmittel werden in der Kategorie „Sonstige“ gebündelt und ausschließlich auf einer höheren Ebene analysiert.

Um eine umfassende Analyse zur ermöglichen, wurden neben den eigentlichen Emissionen während der Nutzung, auch die Vorketten-Emissionen berücksichtigt. Abgebildet wurden diese über eine Stoffstromanalyse. Die Stoffstromanalyse ist ein Teilschritt der Ökobilanzierung und dient zur Quantifizierung von Emissionseffekten innerhalb eines Szenarios.

In Renewbility II wurde außerdem erstmals das ASTRA-D-Modell eingebunden. Dies ermöglicht es, Aussagen über die volkswirtschaftlichen Auswirkungen in den Szenarien treffen zu können. Die Anwendung des ASTRA-D-Modells erfolgt iterativ, d.h. Änderungen im Verkehrsaufkommen werden rückwirkend wieder als Eingangsgrößen des Modells verwendet. Durch diese Anwendung konnten Veränderungen im Investitionsverhalten und damit verbundene geographische Auswirkungen als Inputgrößen in die Gesamtbetrachtung integriert werden.

Die Verkehrsnachfrage wird aufgeteilt in eine Mikro- und Makroebene. Auf der Mikroebene werden regional spezifische Veränderungen in Deutschland betrachtet. Im Vergleich dazu werden auf Makroebene gesamtdeutsche Entwicklungen betrachtet. Durch die Kombination der beiden Analysen mit der Technologiedatenbank, können die Emissionen des Verkehrssektors abgebildet werden.

Die Szenarien wurden von einer interdisziplinären Gruppe erstellt. Alle Szenarien, mit Ausnahme des Referenzszenarios (Basis), haben das Ziel, im Jahr 2050 zu einer vollständigen Dekarbonisierung des Verkehrssektors zu führen.

	Szenario Basis	Szenario Effizienz	Szenario Effizienz Plus	Szenario PKW-Maut
Kraftstoffmix	Konv. Kraftstoffe	95% Ptx 5% Biokraftstoffe	95% Ptx 5% Biokraftstoffe	95% Ptx 5% Biokraftstoffe
Kraftstoffpreise	Niedrige Kraftstoffpreise	Hohe Kraftstoffpreise	Hohe Kraftstoffpreise	Hohe Kraftstoffpreise
PKW-Grenzwert	95 g	60g (2030) 10g (2050)	60g (2030) 10g (2050)	60g (2030) 10g (2050)
Verfügbarkeit O-Lkw	konv. Lkw	Oberleitungs-Lkw	Oberleitungs-Lkw	Oberleitungs-Lkw
Maßnahmen zur Verlagerung			u.a. „Lebenswerte Innenstadt“	
PKW-Maut	Nein	Nein	Nein	Ja (4 ct/km)

Abbildung 3-2 – Ausschnitt aus den Szenarien in Renewbility III⁹⁸

⁹⁸ in Anlehnung an Zimmer et al. (2016) Renewbility III Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors, S. 21.

In Abbildung 3-2 sind die Klimaschutzszenarien dargestellt. Auffällig ist die fehlende Integration von Elektromobilität in den Szenarien und die Fokussierung auf Oberleitungs-Lkw. Außerdem handelt es sich um reine Politiksznarien.

Wirtschaftliche Aspekte nicht-technischer Maßnahmen zur Emissionsminderung im Verkehr - WANTM⁹⁹

Tabelle 3-3 - Übersicht WANTM

Institut/ Unternehmen/ Autor	Auftraggeber: <u>Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit</u> Durchführung: <u>Frauenhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI</u>
Erscheinungsdatum	2013
Zielsetzung	Ziel der Studie ist es die Auswirkungen von verschiedenen nicht-technischen Maßnahmen zur Emissionsminderung im Straßenverkehr zu messen.
Studie oder Modell?	Studie
Auswahlgrund	Berücksichtigung von sowohl privat- als auch gesamtwirtschaftlichen Folgewirkungen. Sowie die eigene Entwicklung eines Analyse-Tools

Die Bewertung erfolgt bezüglich der Emissionsverminderung und deren wirtschaftlichen Folgen auf Mikro- und Makroebene. Die Studie wird in die individuelle Perspektive der betroffenen Nutzer und die volkswirtschaftliche Perspektive aufgeteilt. Analog zu Renewbility beschäftigt sich diese Studie mit verkehrspolitischen Vorgaben, d.h. es werden keine technischen Innovationen sondern politische Entscheidungen diskutiert.

Im Rahmen der Studie wurden fünf Maßnahmen zur Reduktion von Emissionen untersucht. Diese wurden hinsichtlich ihrer Verbesserung zum BAU-Szenario¹⁰⁰ bewertet. Umgesetzt werden die verschiedenen Maßnahmen über Wirkungsmechanismen wie Infrastrukturmaßnahmen oder preisliche Anreize. Die Szenarien lauten:¹⁰¹

- **Modal Split Rad & Fußverkehr**

Durch bestimmte Anreize (z.B.: Fahrpreissenkung) erhöht sich der Anteil von Rad- und Fußverkehr im Vergleich zum BAU-Szenario um 10%. Betrachtet wurde dabei vor allem der Nahverkehr.

⁹⁹ Vgl. Doll et al. (2013) Wirtschaftliche Aspekte nichttechnischer Massnahmen zur Emissionsminderung im Verkehr.

¹⁰⁰ Ein BAU-Szenario (Busines-as-usual Szenario) schreibt die aktuellen Entwicklungstrends linear fort. Dadurch entsteht ein Vergleichsszenario für den Endzustand.

¹⁰¹ Vgl. Doll et al. (2013) Wirtschaftliche Aspekte nichttechnischer Massnahmen zur Emissionsminderung im Verkehr, S. 23.

- **Modal Split ÖPNV**

Die Autoren der Studie nehmen an, dass die PKW Fahrten, welche durch den ÖPNV bis 2030 ersetzt werden, im Durchschnitt länger werden. Dadurch erhöht sich der Anteil des ÖPNV am städtischen Personennahverkehr um 10%.

- **Wegelängen PKW**

Durch verschiedene Maßnahmen nehmen die Autoren an, dass die durchschnittlichen PKW-Distanzen um 10% über alle Entfernungsbereiche verkürzt werden.

- **Energieeffizienz PKW**

Im Vergleich zum BAU-Szenario wird sich der CO₂-Ausstoß der gesamten PKW-Flotte bis 2030 um 10% reduzieren (z.B.: durch Technologieverbesserungen).

- **Modal Split Bahn im Güterverkehr**

Die Maßnahme sieht eine Erhöhung des Bahnanteils im Güterverkehr vorher.

Der Bewertungsansatz zur Ermittlung von individuellen Wirkungen wurden in einem von den Verfassern der Studie entwickelten Tool („PEXMO“ – Tool zur Berechnung der Ausgaben, Emissionen und Energieverbräuche je persönlichem Modal Split) dargestellt. Die volkswirtschaftlichen Auswirkungen werden mit Hilfe des ASTRA-D-Modell ermittelt. Die ökologische Bewertung erfolgt mit dem Energie- und Verkehrsmodell TREMOD (s. Kapitel 5.1.3), welches vom IFEU entwickelt wurde. TREMOD will den motorisierten Verkehr in Deutschland unter anderem hinsichtlich seiner Emissionen abbilden.¹⁰²

EFFECT – evaluation framework of environmental impacts and costs of transport initiatives¹⁰³

Tabelle 3-4 - Übersicht EFFECT

Institut/ Unternehmen/ Autor	Autoren: Dimitrios Tsamboulas, George Mikroudis Durchführung: <u>Department of Transportation Planning and Engineering, National Technical University of Athens</u>
Erscheinungsdatum	2000
Zielsetzung	Ziel des generalisierten Frameworks ist es die Auswirkungen von Transportprojekten mit einem Schwerpunkt auf die ökologischen Auswirkungen zu bewerten.
Studie oder Modell?	Modell
Auswahlgrund	Die Verknüpfung von mehreren methodischen Frameworks (Multikriterienanalyse und Kosten-Nutzen-Analyse), sowie die generelle Anwendbarkeit ohne direkten Ortsbezug.

¹⁰² Vgl. Knörr et al. (2012) Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland, S. 1–4.

¹⁰³ Vgl. Tsamboulas et al. (2000) EFFECT.

EFFECT ist eine Methode zur Bewertung von Verkehrsprojekten hinsichtlich ihrer ökonomischen Wirkung. Grundsätzlich wird eine Kombination aus einer Nutzenwertanalyse und einer Kosten-Nutzen Berechnung verwendet. Diese werden über eine additive Funktion miteinander verknüpft.

Das Framework ist in vier Schritte aufgeteilt. Im ersten Schritt wird eine Struktur erarbeitet. Innerhalb dieser Struktur entsteht ein Entscheidungsbaum für ökonomische und monetäre Effekte. Im nächsten Schritt werden die zuvor im Entscheidungsbaum festgelegten Kriterien hinsichtlich ihrer geographischen Region, der Zeit und der Bedeutung des Kriteriums gewichtet. Im dritten Schritt erfolgt die Bewertung der alternativen Projekte. Im letzten Schritt erfolgt die Analyse.

Kritisch ist anzumerken, dass das Bewertungsschema nahezu ausschließlich auf die ökonomischen Auswirkungen ausgerichtet ist. Außerdem ist der geographische Raum für die Untersuchung auf zehn Kilometer beschränkt.

Ökologische und ökonomische Potenziale von Mobilitätskonzepten in Klein- und Mittelzentren - ÖÖPMKM¹⁰⁴

Tabelle 3-5 - Übersicht ÖÖPMKM

Institut/ Unternehmen/ Autor	Auftraggeber: <u>Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit</u> Durchführung: <u>Innovationszentrum für Mobilität und gesellschaftlichen Wandel; Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Verkehrswesen</u>
Erscheinungsdatum	2019
Zielsetzung	Ziel der Studie ist es Wege aufzuzeigen, um den Verkehr in bestimmten Regionen zu verlagern und effizienter zu gestalten.
Studie oder Modell?	Studie
Auswahlgrund	Ausweitung der Bewertung auf mehrere Modellregionen. Implementierung einer Szenario mit Bezug auf die Verkehrsprognose 2030.

In der Studie werden die Auswirkungen von mehreren Maßnahmenpaketen auf die ökonomischen und ökologischen Folgen diskutiert. Die Maßnahmen wurden auf der Basis der CO₂-Emissionen und der ökonomischen Indikatoren bewertet.

Die Maßnahmen umfassen: Verkehrsvermeidung, ÖV-Magistralisierung, ÖV-Grundbedienung inkl. Integration von Mitfahrangeboten, Fahrgemeinschaften, Radverkehrsförderung und Förderung von Elektrofahrzeugen. Diese wurden aggregiert in einem Trendszenario 2030

¹⁰⁴ Vgl. Herget et al. (2018) Ökologische und ökonomische Potenziale von Mobilitätskonzepten in Klein- und Mittelzentren.

zusammengefasst, welches mit einem BAU-Szenario und dem Referenzszenario von 2018 verglichen wurde.

Innerhalb der Studie werden zwei Szenarien entwickelt. Im Trendszenario 2030 werden die Entwicklungen ausgehend von dem heutigen Zustand mit Bezug auf die Bevölkerungsprognose, Verkehrsprognose und festen Annahmen zu technischen Entwicklungen fortgeschrieben. Das Trendszenario 2030 gehört daher in die Gruppe der projektiven Szenarien. Im Positiv-Szenario 2030 werden politische Maßnahmen zur Steigerung der Effekte berücksichtigt. Bei diesem handelt es sich daher um ein normatives Szenario.

Die Studie befasste sich hauptsächlich mit der Erstellung von Szenarien, um durch diese eine Datenbasis für spätere Bewertung zu erlangen. Nicht berücksichtigt wurden die Auswirkungen der Maßnahmenpakete auf die Gesellschaft (z.B.: Veränderungen der Fahrdauer) an sich und die volkswirtschaftliche Entwicklung (z.B.: Investitionskosten).

Framework for evaluating sustainability of transport system in megalopolis and it's Application - FFESM¹⁰⁵

Tabelle 3-6 - Übersicht FFESM

Institut/ Unternehmen/ Autor	Autor: Liling Wang, <u>School of Traffic and Transportation, Beijing University</u>
Erscheinungsdatum	2014
Zielsetzung	Ziel des Modells ist es eine nachhaltige Bewertung des Verkehrssektors innerhalb von Groß- bzw. Megastädten zu ermöglichen.
Studie oder Modell?	Modell
Auswahlgrund	Beispielhafte Anwendung des Modells auf zwei verschiedene Stadtregionen. Außerdem wurden die Indikatoren ausführlich beschrieben und die Datenquellen offengelegt.

Das von WANG entwickelte Framework hat zum Ziel, ein einfaches und bezogen auf die benötigte Datenmenge wenig aufwendiges Bewertungsschema für den nachhaltigen Verkehr zu entwickeln. Sie definiert Nachhaltigkeit dabei als das Zusammenspiel zwischen sozialen, ökonomischen und ökologischen Einflüssen. Das Modell basiert auf zwei Vorgeben. Einerseits sollen die Indikatoren so gewählt werden, dass sie messbar und für den Verkehr in Großstädten relevant sind. Andererseits soll die benötigte Datenmenge möglichst gering sein.

Das Modell gliedert sich in vier Dimensionen: Ökonomie, Ökologie, Soziales und Mobilität. Innerhalb dieser wurden verschiedene Indikatoren bestimmt, welche für eine einfache Bewertung notwendig sind.

¹⁰⁵ Vgl. Wang (2014) Framework for Evaluating, S. 110–116.

Die Auswahl der Indikatoren beruht dabei auf verschiedenen anderen Studien zum Einfluss der jeweiligen Indikatoren.

Tabelle 3-7 - Beschreibung der Indikatoren nach WANG¹⁰⁶

Problem	Kategorie	Indikatoren
Mobility	<ul style="list-style-type: none"> • Konnektivität • Abdeckungsrate • Transportkapazität • Überlastung 	<ul style="list-style-type: none"> • Länge des Schienennetzwerks • Länge der Straßen und Autobahnen • Dichte des Transportnetzwerks • Gesamter Umsatz des Transportsektors • Verhältnis des Passagierumsatzes zur Fläche
Ökologische Dimension	<ul style="list-style-type: none"> • Energie Verbrauch • Emissionen • Flächennutzung • Lärm 	<ul style="list-style-type: none"> • Finaler Verbrauch der Fahrzeuge aufgeschlüsselt nach Verwendungszweck • NOx Ausstoß pro Fahrzeug • Anteil der Stadtfläche für Transportgebäude/-flächen
Soziale Dimension	<ul style="list-style-type: none"> • Sicherheit • Adaption 	<ul style="list-style-type: none"> • Anzahl an Verkehrsunfällen • Anzahl an Verkehrstoten • Fahrzeuge pro 10.000 Bewohner
Ökonomische Dimension	<ul style="list-style-type: none"> • Investitionen und Betriebskosten • Ökonomische Auswirkungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Individuelle Ausgaben für Transport und Mobilität im Vergleich zu den Gesamtausgaben • Ausgaben für Fahrzeuge • Investitionen in den Verkehrssektor • Output-Indikatoren

In Tabelle 3-7 sind die verschiedenen Indikatoren dargestellt. Zu jedem dieser Indikatoren hat WANG eine einfache Berechnungsvorschrift mit öffentlich zugänglichen Zahlenangaben verwendet. Als nachteilig erweist sich die von WANG vorgenommene Reduzierung auf sehr einfach Kennzahlen, die auf ein zukünftiges Mobilitätskonzept nicht übertragbar sind.

¹⁰⁶ Vgl. Wang (2014) Framework for Evaluating, S. 113.

ADL – Urban mobility index¹⁰⁷**Tabelle 3-8 - Übersicht ADL-Urban mobility index**

Institut/ Unternehmen/ Autor	Durchgeführt: <u>Arthur D. Little</u> , <u>UTIP</u>
Erscheinungsdatum	2018
Zielsetzung	Bewertung der Mobilität in Städten mit Spezialisierung auf die Innovationen im Bereich der Mobilität.
Studie oder Modell?	Studie
Auswahlgrund	Unterteilung der Bewertung entlang der verschiedenen Stadtypologien. Indikatoren lassen sich mit öffentlich zugänglichen Werten berechnen.

Der von Arthur D. Little entwickelte „Urban mobility Index“ in der dritten Version wurde zur Bewertung der Mobilität in Städten entwickelt. Bewertet wurden weltweit 100 Städte. Diese wurden unterteilt in Mega-Cities, Großstädte und kleinere innovative Städte. Bewertungskategorien sind die Reife des Verkehrssystems, der Innovationsgrad und die Performance. Innerhalb dieser Kategorien wurden 27 Indikatoren mit unterschiedlichen Gewichtungen verwandt.

Die erste Kategorie „Maturity“ (dt.: Reife des Verkehrssystems) beschäftigt sich mit dem jetzigen Stand der Verkehrssysteme. Die Bewertung umfasst Indikatoren zur Aufteilung des Modal Splits, den finanziellen Aktivitäten (z.B.: individuelle Kosten, Investitionen) und der Flächen-nutzung im Transportsektor. Die einzelnen Indikatoren werden auf Basis der Stadt spezifischen (z.B.: Einwohneranzahl) Kennzahlen bewertet. Bewertungsgrundlage für die Frequenz des ÖV ist z.B. die Frequenz der meist benutzten Route.

In der zweiten Kategorie „Innovation“ werden die von Arthur D. Little als zukunftsweisendsten angesehenen Innovationsgebiete untersucht. Zu diesen gehört die Verfügbarkeit von Mobility-as-a-Service Anwendungen und Bike- sowie Carsharing.

Die letzte Kategorie „Performance“ (dt.: Leistung) beurteilt das aktuelle Verkehrssystem der Stadt hinsichtlich der Umweltemissionen, Sicherheit und Transportzeit.

Generell ist festzuhalten, dass die Indikatoren meist auf einfachen Berechnungen beruhen. So werden die individuellen Transportkosten als Gegenüberstellung der Kosten von MIV für eine fünf Kilometer lange Strecke und dem ÖV für dieselbe Distanz berechnet. Außerdem wird im Rahmen der Studie Multimodalität gleichgesetzt mit einer Nutzung des öffentlichen Personenverkehrs.

¹⁰⁷ Vgl. François-Joseph Van Audenhove, Guillaume Rominger, Guillaume Rominger, Aurelia Bettati, Nicolas Steylemans, Michael Zintel, Andrew Smith, Sylvain Haon (2018) The Future of Mobility 3.0, S. 79–97.

3.2.2 Methoden zur Bewertung von Technologie- oder anderen Projekten

Ökoeffizienzbewertung¹⁰⁸

Tabelle 3-9 - Übersicht Ökoeffizienzbewertung

Institut/ Unternehmen/ Autor	Normiert durch: <u>Deutsches Institut für Normung</u>
Erscheinungsdatum	2012
Zielsetzung	Produkte und Prozesse an der Schnittstelle zwischen ökologischer Nachhaltigkeit und ökonomischen Interessen zu bewerten.
Studie oder Modell?	Modell
Auswahlgrund	Unterteilung der Bewertung entlang der verschiedenen Stadtypologien. Indikatoren lassen sich mit öffentlich zugänglichen Werten berechnen.

Die Ökoeffizienzbewertung ähnelt in ihrem Aufbau einer Ökobilanz. Sie liefert eine einheitliche Methode zur Bewertung der ökonomischen und ökologischen Folgewirkungen von Produkten, Prozessen und Ähnlichem. Die ökonomischen Indikatoren werden dabei unter dem Oberbegriff Nutzen zusammengefasst. Ziel ist es, die ökoeffizienteste Möglichkeit zur Erfüllung eines definierten Nutzens zu identifizieren. Da es sich bei der Ökoeffizienzbewertung um eine vergleichende Methode handelt, müssen mindestens zwei Alternativszenarien vorhanden sein.

Analog zur Ökobilanz besteht die Ökoeffizienzbewertung aus vier Phasen, welche iterativ mit einander verbunden sind. Im ersten Schritt müssen das Ziel und der Untersuchungsrahmen der Ökoeffizienzbewertung festgelegt werden. Basierend auf diesen werden parallel die Umweltbewertung und die Bewertung des Produktsystemnutzen durchgeführt. Der Produktsystemnutzen entspricht einer Nutzenanalyse des Produktes oder Prozesses. Die Ökobilanz wird dabei wie in Kapitel 2.2 beschrieben durchgeführt. Indikatoren für die Bewertung des Produktsystemnutzen können in verschiedenen Arten (Punktesystem, physikalischen Einheiten, monetär, etc.) ausgedrückt werden.

Abgeschlossen wird die Ökoeffizienzbewertung durch eine Auswertung. In dieser werden die im Verhältnis zueinander betrachteten Indikatoren bewertet und die signifikantesten Indikatoren ausgewählt. Basierend auf den Ergebnissen werden dann Schlussfolgerungen und Empfehlungen abgegeben.

Die Ökoeffizienzbewertung findet ihre Anwendung u.a. in der Entwicklung und Verbesserung von Produkten, der strategischen Planung, politischen Entscheidungsprozessen und der

¹⁰⁸ Vgl. Kaltschmitt et al. (2015) Umweltbewertung für Ingenieure, S. 261–263, Vgl. Normenausschuss Grundlagen des Umweltschutzes (NAGUS) (2012) 14045.

Nachhaltigkeitsbewertung. Ihr breites Anwendungsspektrum spricht für die Adaptierbarkeit auf neue Problemstellungen.

SEEBALANCE¹⁰⁹

Tabelle 3-10 - Übersicht SEEBALANCE

Institut/ Unternehmen/ Autor	Entwickelt von <u>BASF</u>
Erscheinungsdatum	2005
Zielsetzung	Die Entwicklungen in Prozessen und Produkten auf der Ebene der Nachhaltigkeit messbar machen.
Studie oder Modell?	Modell
Auswahlgrund	Allgemeine Methodik zur Verknüpfung von sozialen, ökologischen und ökonomischen Auswirkungen von Produkten.

Die SEEBALANCE (SocioEcoEfficiency) Methode ist eine Weiterentwicklung der Ökoeffizienzbewertung. Mit dieser werden neben den ökonomischen und ökologischen Aspekten auch soziale Aspekte bewertet. Die Auswertung der Ergebnisse kann sowohl in aggregierter Form als auch in den einzelnen Kategorien (Ökonomie, Ökologie und Soziales) erfolgen.

Die Kriterien für die Bewertung innerhalb von SEEBALANCE werden durch die Kombination eines Bottom-UP Ansatzes mit einem Top-DOWN Ansatz bestimmt. Dafür werden im ersten Schritt die Kriterien ausgewählt, welche aus Betrachtung der Gesamtheit am sinnvollsten erscheinen. Diesen wird im Bottom-UP-Schritt ein Datenerhebungsaufwand zugeschrieben. Aus der Symbiose dieser beiden Schritte werden die Kriterien ausgewählt.

Im Unterschied zur Ökoeffizienzbewertung wird im zweiten Schritt neben der Ökobilanz und der Bewertung des Produktsystemnutzen, eine soziale Bewertung vorgenommen. Diese gliedert sich in die folgenden fünf Oberkategorien: Arbeitnehmer, internationale Gemeinschaft, zukünftige Generationen, Endverbraucher sowie Umfeld und Gesellschaft. Die verschiedenen Kategorien werden dabei mit Wirtschaftszweigcodes indiziert, um statistische Werte für verschiedene Branchen herzuleiten.

Die Auswertung der SEEBALANCE Methode erfolgt auf Basis der funktionellen Einheit. Die funktionelle Einheit variiert nach Anwendungsfall. Im Mobilitätskontext könnte die funktionale Einheit eine Person sein. Die Auswertung würde in diesem Fall auf die Person bezogen und im Anschluss daran bewertet. Dargestellt werden die Ergebnisse in einem Spinnennetzdiagramm.

¹⁰⁹ Vgl. Kaltschmitt et al. (2015) Umweltbewertung für Ingenieure, S. 263–267, Vgl. Kölsch (2011) Sozioökonomische Bewertung von Chemikalien, S. 53–77.

Fahrzeugantriebe für die Elektromobilität - FFE¹¹⁰**Tabelle 3-11 - Übersicht FFE**

Institut/ Unternehmen/ Autor	Autor: Danny Kreyenberg
Erscheinungsdatum	2016
Zielsetzung	Analyse der wirtschaftlichen und technischen Sinnhaftigkeit von Elektromobilität.
Studie oder Modell?	Studie
Auswahlgrund	Berücksichtigung der Total Costs of Ownership und Analyse in drei Dimensionen.

Die von KREYENBERG entwickelte Methode zur Bewertung von Fahrzeugantrieben für die Elektromobilität basiert auf den drei Dimensionen: Kostenanalyse, Ökobilanzierung und Kundennutzen. Mittels dieser drei Dimensionen werden die alternativen Antriebskonzepte bewertet.

Die Kostenanalyse ist auf Elektromobilität zugeschnitten und gliedert sich in die Bereiche: Fahrzeugkosten, Unterhaltskosten und eine TCO (Total Cost of Ownership) -Analyse zur Bewertung von Fahrzeugen, um die Kosten in ein Verhältnis zum Fahrzeug zu setzen. Für die Approximation der Preisentwicklung setzt KREYENBERG auf eine 2-Faktor Erfahrungskurve. Die Erfahrungskurve an sich beruht auf der Annahme, dass sich die Stückkosten eines Produktes mit jeder Verdopplung der Produktionsmenge um einen gewissen Prozentsatz vermindern. Bei der 2-Faktor Erfahrungskurve wird dieser Ansatz um ein weiteres Kriterium, die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten, erweitert.

Die Ökobilanzierung erfolgt im Rahmen einer Well-to-Wheel (WtW) Analyse. Diese umfasst nicht den kompletten Lebenszyklus, sondern nur den Betrieb, sowie die Herstellung der zum Betrieb des Fahrzeugs erforderlichen Kraftstoffe. Die Analyse wird in die Bereiche Well-to-Tank (WtT) und Tank-to-Wheel (TtW) aufgeteilt. In der WtT werden die sogenannten Vorketten der Kraftstoffherstellung betrachtet, während in der TtW-Analyse der Wirkungsgrad und die Verwertung des Kraftstoffes analysiert wird. Die Ergebnisse dieser WtW-Analyse werden meist im Energieverbrauch pro Km und der Treibhausgasemissionen (CO₂-Äquivalenten) pro Km gemessen.

Die Bewertung des Kundennutzen erfolgt anhand einer Conjoint-Analyse. Eine Conjoint-Analyse hat zum Ziel die nicht beobachtbaren Kaufentscheidungsprozesse des Kunden zu

¹¹⁰ Vgl. Kreyenberg (2016) Fahrzeugantriebe Elektromobilität.

modellieren. Sie basiert darauf, jeder Merkmalsausprägung einen Teilnutzen zuzuordnen und somit die Wichtigkeit dieser Ausprägung zu bestimmen.¹¹¹

Aus der Aggregation der drei Dimensionen ergibt sich ein ganzheitliches Bild über die verschiedenen Fahrzeugantriebe.

3.3 Bewertung bestehender Ansätze und resultierendes Forschungsdefizit

Die im Kapitel 3.2 beschriebenen Methoden werden nun hinsichtlich des Objekt- und Zielbereichs bewertet. Konnte eine Bewertung in einer Kategorie aufgrund der Beschreibungen nicht vorgenommen werden, wird die Eignung in dieser Kategorie geschätzt. Die Schätzung wurde gerade bei den Methoden der allgemeinen Bewertung von Konzepten, Technologien und Produkten angewandt, da bei diesen der Datenerhebungsaufwand und die Integration der verschiedenen Stufen nicht klar erkennbar waren.

Die ganzheitliche Bewertung wurde im Vergleich zur textuellen Beschreibung in Kapitel 3.1 um die Betrachtung des kompletten Lebenszyklus der Verkehrsmittel erweitert. Diese umfasst somit die drei Nachhaltigkeitsdimensionen (Ökonomie, Ökologie und Soziales) und die Lebenszyklusbetrachtung. Fraglich ist bei den meisten Methoden ob die Adaption eines neuartigen Verkehrskonzepts möglich ist.

In Abbildung 3-3 sind die Ergebnisse der Bewertung zusammengefasst. Die einzelnen Kategorien wurden dabei aufgeteilt in Ziel- und Objektbereich auf einer Skala von 1 bis 5 bewertet (1 - entspricht einem unausgefüllten Kreis und 5 - einem voll ausgefüllten Kreis). Eine Bewertung von 1 entspricht dabei einer mangelnden Integration in das Modell.

¹¹¹ Vgl. Stadler (1993) Conjoint measurement, S. 32.

	Renewability	WANTM	EFFECT	ÖÖPMVM	FFESM	ASTRA	ADL-UMI	Ökoeffizienzbewertung	SEEBALANCE	FFE
Objektbereich										
Neuartiges multimodales Verkehrskonzept	○	○	◐	○	●	◐	◐	●	●	◐
Ganzheitliche Betrachtung	●	●	○	◐	●	◐	◐	◐	●	◐
Schwerpunkt Multimodalität	○	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	○
Personen- und Güterverkehr	●	●	●	○	○	●	○	●	●	◐
Komplexität	○	◐	◐	◐	●	◐	●	●	◐	◐
Zielbereich										
Entscheidungshilfe Forschung	◐	◐	◐	◐	◐	◐	○	◐	◐	◐
Schwachpunkt-analyse	●	○	◐	●	◐	○	○	●	●	◐
Schlüsseltechnologien ausarbeiten	○	○	○	◐	◐	○	◐	●	●	◐

Abbildung 3-3 - Bewertung der Methodiken

Bei der Analyse der Ergebnisse fällt auf, dass die eine Reihe der Studien den multimodalen Verkehr nur unzureichend betrachten. Dies begründet sich bei den meisten Studien dadurch, dass der öffentliche Personenverkehr nur auf Systemebene dargestellt wurde. Die Systemebene beschreibt eine ungenauere Detaillierungsebene als für die sonstige Betrachtung des Modells verwendet wird. In ihr werden nur zusammengefasste Ergebnisse abgelegt.

Bei den Methoden zur Bewertung von Verkehrskonzepten (in Abbildung 3-3 die ersten sieben Modelle), ist außerdem durchschnittlich eine erhöhte Komplexität vorhanden. Dies begründet sich in der Anwendung komplexer Modelle zur Modellierung des Verkehrs, sowie zur Modellierung der Auswirkungen von Verkehrssystemen. Bei vielen Bewertungskonzepten für Verkehrskonzepte ist außerdem eine Analyse der Schlüsseltechnologien nur eingeschränkt möglich. In den meisten Bewertungsmethoden werden die Alternativszenarien anhand

verschiedener Indikatoren bewertet. Eine Differenzierung hinsichtlich verschiedener Verkehrsmittel ist dadurch nicht mehr möglich.

Aus der Analyse der bestehenden Bewertungsmethoden ergeben sich somit die Schwerpunkte für die vorliegende Arbeit. Sie umfassen:

- **Integration des multimodalen Verkehrs**

Im Rahmen der Arbeit soll ein Verkehrskonzept entwickelt werden, welches multi- bzw. intramodal ist. Das zu entwickelnde Bewertungskonzept soll den multimodalen Verkehr in Deutschland abbilden können.

- **Modularer Aufbau**

Die meisten Studien fokussieren sich auf die Entwicklung eines Bewertungskonzeptes für den Zeitpunkt der Studie oder des Szenarios. Das im Rahmen dieser Arbeit zu entwickelnde Konzept soll dynamisch sein, um neue Entwicklungen im Verkehrssektor berücksichtigen zu können.

- **Erweiterung um einen Analyse-Block**

Die Ergebnisse der Studie sollen in anschaulicher und leicht verständlicher Form wiedergegeben werden, um eine Diskussion zu ermöglichen. Der Analyse-Block soll die Auswertung hinsichtlich verschiedener Verkehrsmittel ermöglichen. Durch diesen Aufbau sollen Schlüsseltechnologien identifiziert werden können. Die Identifikation der Schlüsseltechnologien soll durch Zu- und Abwahl von Verkehrsmitteln bei der Bewertung erfolgen.

- **Fokussierung auf einen ganzheitlichen Aufbau bei gleichzeitig reduzierter Komplexität**

Viele der bisherigen Ansätze erfordern einen hohen Datenerhebungsaufwand, welcher für Szenarien mit Endpunkten in der Zukunft nicht valide bestimmt werden können. Obgleich die Ganzheitlichkeit des Ansatzes nicht verloren gehen soll, sollten die Indikatoren mit einem geringeren Aufwand zu ermitteln sein.

4 Konzeption eines Bewertungsmodells

Im Folgenden wird ein Modell zur Bewertung des multimodalen Verkehrs vorgestellt. Dafür werden zunächst die Anforderungen definiert (s. Kapitel 4.1). Anschließend werden aus der Fragestellung dieser Arbeit (s. Kapitel 3.3) und dem abgeleiteten Forschungsdefizit die Bewertungsdimensionen abgeleitet. Zum Abschluss dieses Kapitels werden die Referenzstrecken für den Personen- und Güterverkehr zur späteren Bewertung unterschiedlicher Mobilitätsformen definiert.

4.1 Anforderungen an das Bewertungsmodells

Das zu entwickelnde Modell soll eine wissenschaftliche Reproduzierbarkeit und Transparenz gewährleisten. Zusammen mit der Zielsetzung der Arbeit (s. Kapitel 1.2) und dem Forschungsdefizit sollen diese Anforderungen in die Auswahl des Bewertungsverfahrens, die Erstellung der Bewertungsdimensionen, -ziele und -indikatoren einfließen.

Ausgehend von der Fragestellung dieser Arbeit und der damit einhergehenden Bewertung eines in der Zukunft befindlichen Zeitpunktes sollen sowohl **quantitative** als auch **qualitative Kriterien** berücksichtigt werden.

Eine weitere Anforderung ist ein **reduzierter Aufwand** (einschließlich geringer Kosten) zur Ermittlung der Indikatoren. In der Literatur werden viele Indikatoren beschrieben, deren Erhebungsaufwand in keinem Verhältnis zum späteren Ertrag steht. Die Indikatoren sollen daher sowohl aussagekräftig als einfach zu beschaffen sein.

Im Rahmen des Modells müssen Annahmen über die Entwicklung des Verkehrssektors getroffen werden. Um die Annahmen nachvollziehen und ggf. auf eventuelle spätere Änderungen der Umweltzustände eingehen zu können, müssen die Annahmen dokumentiert werden. Die Dokumentation soll neben den Quellen daher auch eine kurze Begründung für die Verwendung gerade dieser Annahmen enthalten. Diese Anforderungen werden unter dem Oberbegriff **Transparenz** zusammengefasst.

Die **Reproduzierbarkeit** ist eng mit der Erfüllung der Anforderung Transparenz verbunden. Dritte sollen bei inhaltlich korrekter Anwendung des Bewertungsmodells zu vergleichbaren Ergebnissen kommen.

4.2 Entwicklung der Bewertungsdimensionen

Ziel dieser Untersuchung ist es ein multimodales Verkehrskonzept unter Berücksichtigung der Nachhaltigkeit zu bewerten. Als Konzept für die nachhaltige Bewertung hat sich das drei Säulen Modell der Nachhaltigkeit etabliert¹¹². Dieses umfasst die drei Säulen Ökonomie, Ökologie

¹¹² Das Konzept „Die drei Säulen der Nachhaltigkeit wurde 1995 von der Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“. Grundlage für das Konzept war dabei die Konferenz der Vereinten Nationen in Rio de Janeiro 1992, auf welcher Nachhaltigkeit mit den Attributen Ökonomie, Ökologie und soziales definiert wurde.

und Soziales, wodurch ein dreidimensionales und ganzheitliches Bild entsteht. Die drei Säulen der Nachhaltigkeit sind in Abbildung 4-1 dargestellt.

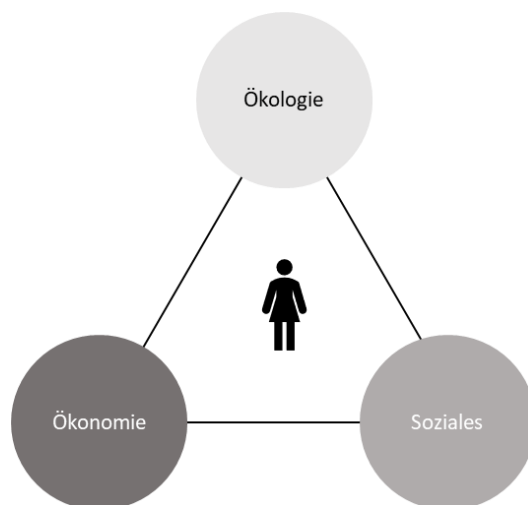


Abbildung 4-1 - Die drei Säulen der Nachhaltigkeit

Die drei Säulen werden in einem Dreieck visualisiert, um die Verknüpfung der Dimensionen untereinander darzustellen. Das Ziel dieses Konzepts liegt in der Verbesserung der Nachhaltigkeit in allen Säulen. Laut der Enquete-Kommission des Bundestags von 1998 hängen die Säulen voneinander ab und können nicht unabhängig optimiert werden.

„THE PEP – Transport, Health and Environment Pan-European Programme“ ist ein gemeinsames Programm von UNECE und der WHO zur Integration von nachhaltigen und gesundheitsfördernden Mobilitätskonzepten in die Politik der 56 Mitgliedsstaaten. Dabei bringt THE PEP führende Vertreter aus den Sektoren Transport, Gesundheitswesen und Umwelt mit den politischen Entscheidern der Mitgliedsstaaten zusammen.¹¹³ Die Interessen aus den drei Säulen sollen dabei gleichberechtigt und gleichwertig zu einander stehen¹¹⁴. Verknüpft man Ziele des Nachhaltigkeitskonzepts mit den Zielen von „THE PEP“ ergeben sich die Zieldimensionen für die vorliegende Arbeit.

Die Ziele der „THE PEP“ werden alle fünf Jahre aktualisiert. In der letzten Iteration wurden die folgenden Ziele herausgestellt:¹¹⁵

1. Die Mobilitätskonzepte sollen zu einer nachhaltigen Entwicklung beitragen. Dazu zählen die ökonomische Entwicklung und die Erhöhung der Beschäftigung.
2. Die Effizienz der Mobilitätskonzepte soll bei gleichbleibender oder erhöhter Nachhaltigkeit verbessert werden.
3. Reduktion aller ökologisch schädlichen Faktoren (Lärm, Emissionen), welche durch den Verkehrssektor entstehen.

¹¹³ Vgl. Arseni et al. (2018) Making the Link, S. 1.

¹¹⁴ Vgl. Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt - Ziele und (1998) Konzept Nachhaltigkeit, S. 16–28.

¹¹⁵ Vgl. Arseni et al. (2018) Making the Link, S. 12.

4. Einführung von politischen Handlungen zur Erhöhung der Sicherheit und Gesundheit über alle Verkehrsmittel.
5. Integration der drei Säulen von „THE PEP“ (Umwelt, Transport, Gesundheit) in die Planung von Mobilitätskonzepten.

Verknüpft man die Ziele von „THE PEP“ mit den drei Säulen der Nachhaltigkeit aus Abbildung 4-1 ergeben sich mehrere Überschneidungen. So hat das Ziel 2 (Erhöhung der Effizienz bei erhöhter Nachhaltigkeit) Überschneidungen mit der sozialen Dimension. Die ökonomische Dimension spiegelt sich einerseits in der Forderung nach einer nachhaltigen Entwicklung (Ziel 1) und andererseits in der Erhöhung der Gesundheit und Sicherheit (Ziel 4). Während die ökologische Dimension ihr Abbild in Ziel 3 findet.¹¹⁶

Über den ersten vier Zielen von „THE PEP“ steht das letzte Ziel (Einbeziehung der Säulen Umwelt, Transport, Gesundheit in die Planung von Mobilitätskonzepten). Dieser Ansatz deckt sich mit der Zielsetzung dieser Arbeit. Sie soll Aussagen über die Schlüsseltechnologien und Handlungsfelder, welche für eine nachhaltige Entwicklung entscheidend sind, ermöglichen.

Aus den Zielen des Konzepts der drei Säulen der Nachhaltigkeit und den Zielen von „THE PEP“ lassen sich die drei Bewertungsdimensionen für das in dieser Arbeit zu erstellende Modell ableiten.

- **Ökonomie**

Die Ökonomie umfasst neben Kennzahlen wie z.B. Bruttoinlandsprodukt (BIP) oder Investitionskosten, weitere Bereiche wie den Arbeitsmarkt und Gesundheitskosten. Ökonomische Veränderungen sind aufgrund der unterschiedlichen Entwicklungen in den Bundesländern in Deutschland nur schwer zu isolieren, daher ist eine Reduktion auf simple und isoliert zu betrachtenden Indikatoren z.B.: Staukosten, wie in den Anforderungen an das Bewertungskonzept gefordert, notwendig.

- **Ökologie**

Der Transportsektor war im Jahr 2016 für ca. 18 % der Treibhausgasemissionen in Deutschland verantwortlich¹¹⁷. Eine Reduktion dieser Zahl bei gleichzeitiger Steigerung der Effizienz ist sowohl in den Zielen von „THE PEP“ als auch in dem Konzept der 3 Säulen der Nachhaltigkeit verankert.

- **Soziales bzw. individueller Nutzen**

Die Bewertungskategorie Soziales bzw. individueller Nutzen basiert auf dem zweiten Ziel von „THE PEP“ und der Säule Soziales aus dem Konzept der 3 Säulen der Nachhaltigkeit. In diesem Bereich sollen alle Einzelaspekte bzgl. des einzelnen Individuums abgedeckt werden.

¹¹⁶ Vgl. Arseni et al. (2018) Making the Link, S. 11.

¹¹⁷ Vgl. Ittershagen (2018) Klimabilanz 2017.

4.3 Konzeption der Referenzstrecken

Ausgehend von der Definition für Multimodalität in Kapitel 2.1 sollen für die einzelnen Szenarien (vgl. Kapitel 6) Referenzstrecken definiert werden. Dabei wird zwischen Personen- und Güterverkehr unterschieden. Innerhalb der Referenzstrecken werden je Szenario Fortbewegungsketten definiert. Fortbewegungsketten entstehen durch die Kombination verschiedener Verkehrsmittel auf einem Weg. Diese variieren, da je Szenario unterschiedliche Verkehrsmittel und -kombinationen zur Verfügung stehen.

Diese methodische Vorgehensweise ähnelt der Zusammenstellung eines repräsentativen Warenkorb, welcher in der Volkswirtschaftslehre genutzt wird, um die Inflationsrate zu bestimmen. Der repräsentative Warenkorb enthält dabei eine definierte Menge an Produkten, die in einem repräsentativen Einkaufskorb enthalten sind. Basierend auf diesem Warenkorb wird die Preisentwicklung über einen festgelegten Zeitraum beobachtet und so die Inflationsrate ermittelt.¹¹⁸

Außerdem sollen die Erkenntnisse des WLTP (Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure) -Fahrzyklus genutzt werden. Der WLTP ist der weltweit harmonisierte Testzyklus für leichte Fahrzeuge (<3,5 t). Er basiert auf gesammelten Fahrdaten und soll das Fahrverhalten weltweit repräsentativ abbilden. Analog zu diesem sollen die Referenzstrecken das Fahrverhalten der multimodalen Verkehrsnutzer erfassen.¹¹⁹

4.3.1 Personenverkehr

Auf die vorliegende Problemstellung übertragen, wurden vier Szenarien entwickelt. Diese vier Referenzstrecken sollen möglichst realistische Bewegungsschema abbilden. Als Grundlage für die Erstellung der Szenarien wurden die Ergebnisse aus der Befragung Mobilität in Deutschland genommen. In dieser mussten die befragten Personen angeben, welche Weglänge sie am Stichtag zurückgelegt haben.

In Tabelle 4-1 sind die Weglängen nach ihrer Häufigkeit erfasst worden. Aus den Ergebnissen der Befragung lassen sich vier Referenzstrecken ableiten. Im Rahmen dieser Arbeit wird dabei auf eine Betrachtung von Strecken, die kleiner als 0,5 km sind, verzichtet, da diese zu 87 % zu Fuß oder mit dem Fahrrad zurückgelegt werden.

Die Referenzstrecke „Urban-Kurzstrecke“ soll dabei innerstädtische Strecken mit einer Weglänge von weniger als 5 km abdecken, während „Urban-Langstrecke“, Strecken innerhalb von Großstädten oder ins direkte Umland beschreiben soll. All diese Distanzen unter 20 km werden unter dem Szenario „Urban“ zusammengefasst. In diesem Szenario sind nahezu 87 % aller täglichen Fahrten zusammengefasst. Dementsprechend werden diese in den späteren Bewertungen stärker gewichtet.

¹¹⁸ Vgl. Woeckener (2013) Volkswirtschaftslehre, S. 169.

¹¹⁹ Vgl. Liebl et al. (2014) Energiemanagement im Kraftfahrzeug, S. 279–286.

Tabelle 4-1 - Durchschnittliche Weglänge in Deutschland¹²⁰

Weglänge [km] in Gruppen	% der Fälle	kumuliert
unter 0,5	10 %	10 %
0,5 bis unter 1	11 %	21 %
1 bis unter 2	14 %	35 %
2 bis unter 5	23 %	58 %
5 bis unter 10	16 %	74 %
10 bis unter 20	13 %	87 %
20 bis unter 50	9 %	96 %
50 bis unter 100	2 %	98 %
100 und mehr	2 %	100 %

Die Referenzstrecke „Urban-Kurzstrecke“ soll dabei innerstädtische Strecken mit einer Weglänge von kleiner als 5 km abdecken, während „Urban-Longstrecke“, Strecken innerhalb von Großstädten oder ins direkte Umland beschreiben soll. Die maximale Weglänge von Strecken dieser Kategorie beträgt 20 km.

Die dritte Referenzstrecke umfasst alle Strecken mit einer Weglänge kleiner als 200 km. Dieses Szenario trägt den Namen „Intercity“ und soll die Verbindung zwischen zwei Städten beschreiben, welche in derselben Region liegen.

Die Referenzstrecke „Langstrecke“ wird innerhalb der Studie „Mobilität in Deutschland“ nicht berücksichtigt. Sie umfasst alle Strecken mit einer Länge über 200 km. Hier werden alle Reisen oder Fahrten zwischen mehreren Regionen gebündelt. Die Betrachtung der „Langstrecke“ ist notwendig, um den Verkehr vollumfänglich abzubilden.

Um die unbegrenzte Anzahl an Wegkombinationen zu begrenzen, wurden mehrere repräsentative Strecken definiert. Eine repräsentative Strecke entspricht einem definierten Startpunkt (z.B.: Aachen Hbf) und einem definierten Endpunkt (z.B.: Campus-Boulevard 30, Aachen). Diese Strecken sind im weiteren Verlauf essenziell, um eine einheitliche Vergleichsbasis zu schaffen.

Für die Erstellung der Referenzstrecken und der genutzten Verkehrsmittel werden einige Annahmen getroffen. Durch diese konnte die Anzahl an möglichen Kombinationen verringert werden. Diese Annahmen gelten für alle Referenzstrecken und lauten:

¹²⁰ Vgl. Nobis et al. (2018) Mobilität in Deutschland - 2018.

- **Start- und Endpunkt**

Der Start- und Endpunkt einer Reise ist nicht direkt an der nächstgelegenen Zwischenstation, sondern erfordert einen gesonderten Weg.

- **Bikesharing¹²¹**

Aufgrund der aktuellen Entwicklung im Bikesharing wurden nur Varianten berücksichtigt, die definierte Abstellstationen haben. Leihräder müssen daher an einer Zwischenstation abgegeben werden.

- **Auto**

Auf die Abbildung eines Weges zum Auto wurde in den graphischen Darstellungen verzichtet. In der Berechnung der Referenzstrecken, wird dieser allerdings mit einem, im Vergleich zu den anderen Fußwegen, kleinen Zeitfaktor eingerechnet.

Als Folge des demographischen Wandels ist in ländlichen Regionen vermehrt eine Reduzierung der Verbindungen des ÖPV zu beobachten¹²². Daher wird für diese Regionen ein rückläufiger Anteil des ÖPV beim Modal Split zu berücksichtigen sein. Im Folgenden werden im Rahmen dieser Arbeit die Referenzstrecken in den Szenarien in mehreren Städten unterschiedlicher Größe gemessen. Die Städte werden für diese Arbeit, wie in Tabelle 4-2 dargestellt, eingeteilt. Wenn der Startort und Zielort einer Strecke unterschiedlich sind, wird die Strecke zweimal (für Start- und Zielort) gewertet. Die Strecken werden mit den Anteilen des Stadt- und Gemeindetyps an der Gesamtbevölkerung multipliziert und je Stadtyp aufsummiert. Dadurch werden die regionalen Unterschiede mit der Anzahl an Personen, welche in dem Stadt- und Gemeindetyp leben ins Verhältnis gesetzt.

Tabelle 4-2 - Stadt- und Gemeindetypen nach Bevölkerungsanzahl¹²³

Stadt- und Gemeindetyp	Ab Bevölkerungsanzahl
Großstadt	100.000 bis 1.000.000
Megastadt	> 1.000.000
Mittelstadt	20.000 bis 100.000
Kleinstadt	5.000 bis 20.000
Landgemeinde	< 5000

Die Szenarien werden für den heutigen Stand der multimodalen Mobilität aufgestellt und im weiteren Verlauf an die Ausbaustufen angepasst. Wegstrecken, die vollständig emissionsfrei zurückgelegt werden, werden in den Grafiken gestrichelt dargestellt. Außerdem sind Zwischenstationen (ZS) nicht automatisch identische Orte, sondern stellen einen Umsteigepunkt

¹²¹ Vgl. Timo Stukenberg Leihfahrräder in deutschen Städten.

¹²² Vgl. Mager (2017) Mobilitätslösungen für den ländlichen Raum, S. 217.

¹²³ Vgl. Heineberg et al. Grundriß allgemeine Geographie, S. 29.

dar. Im Folgenden wird eine solche Grafik für das Szenario „Urban“ exemplarisch dargestellt. Die Grafiken für die anderen Szenarien finden sich im Anhang dieser Arbeit (Anhang Abbildung A-1 und Abbildung A-2).

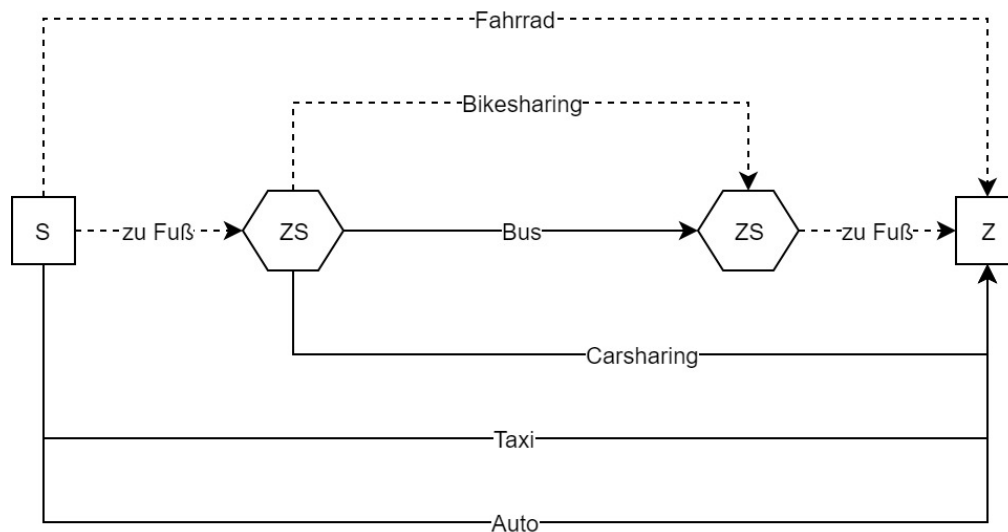


Abbildung 4-2 - Urbane Verkehrsmittelkombinationen

In Abbildung 4-2 sind die für das Szenario „Urban“ ermittelten Kombinationen dargestellt. Es ist darauf hinzuweisen, dass „Urban-Kurzstrecke“ und „Urban-Langstrecke“ von den Verkehrsmitteln her identisch sind. Daher wurde darauf verzichtet zwei Diagramme für die beiden Szenarien zu erstellen. In späteren Berechnungen muss die Unterscheidung Auto, Taxi und Carsharing beibehalten werden, da sie einen signifikanten Einfluss auf die ökonomische Bewertung hat. Zu beachten ist in diesem Szenario die Vielzahl emissionsloser Möglichkeiten, vom Start zum Ziel zu gelangen. Diese sind vor allem auf vergleichsweise kurze Distanz zurück zu führen.

Im Szenario „Intercity“ sind die Möglichkeiten emissionslos von Start (S) nach Ziel (Z) zu gelangen aufgrund der wesentlich größeren Wegstrecken deutlich geringer (vgl. Anhang Abbildung A-1). Gleichzeitig nimmt die Anzahl an Zwischenstationen zu. Der öffentliche Fernverkehr wird in diesem Szenario berücksichtigt.

Das Szenario „Langstrecke“ umfasst alle Strecken mit einer Länge größer 200 Km. Neben nationalen Strecken kommen dabei auch internationale Strecken in Betracht. Wie in den Annahmen bereits beschrieben, wird zur Reduktion der Komplexität darauf verzichtet, alle möglichen Verkehrsmittelkombinationen (nicht berücksichtigt wird z.B.: Berlin-München mit dem Regionalexpress) zu betrachten. Die möglichen Kombinationen werden beispielhaft in im Anhang Abbildung A-2 dargestellt.

Für das Referenzszenario wurden Daten zur Wegstrecke, -dauer, zu Kosten und Umsteigezeiten mit Navigationssoftwares bestimmt. Um valide Datensätze zu erzeugen, werden die Daten an einem Wochentag zu der gleichen Uhrzeit (8 Uhr morgens) erstellt.

4.3.2 Güterverkehr

Im Güterverkehr bzw. der Transportlogistik unterscheidet man zwischen zentralen und dezentralen Netzwerken sowie einer Kombination aus beiden. **Zentrale** Netzwerke zeichnen sich durch einen gebündelten Umschlagspunkt in zentraler Lage zu den regionalen Zielen aus. Der Vorteil dieser Lager besteht in der höheren Automatisierung, während die längeren Transportwege nachteilig zu erwähnen sind. In **dezentralen** Netzwerken entstehen mehrere kleine Umschlagspunkte in der Nähe der Kunden. Dadurch werden die Transportzeiten reduziert. Voraussetzung für diese ist eine hohe und gleichmäßige Auslastung. **Kombinierte** Netzwerke werden angewandt, wenn zwischen zwei Punkten im Netzwerk ein erhöhtes Warenaufkommen besteht. In diesem Fall wird die kürzere Distanz von dezentralen Netzwerken für die beiden verwandt und für die restlichen Punkte weiterhin ein oder mehrere Zentrallager.¹²⁴

Innerhalb der Netzwerke unterscheidet man zwischen verschiedenen Typen von Transportfahrten. Die **Abholfahrt** bezieht sich auf den Großkundenhandel und beschreibt die Abholung von Waren bei einem Lieferanten und Zustellung an einen Empfänger. Bei dieser handelt es sich somit um eine Direktverbindung. Im Gegensatz dazu werden bei der **Sammelfahrt**, Waren von mehreren Lieferanten aufgenommen und gebündelt zu einem Empfänger gebracht. **Zustellfahrten** stellen das Gegenteil einer Abholfahrt dar und versorgen einen Empfänger mit Waren von einem Lieferanten. **Verteildfahrten** sind das Gegenteil der Sammelfahrt. Waren von einem Lieferanten werden auf einer Fahrt an mehrere Empfänger geliefert. Die Kombination von Sammel- und Verteildfahrten werden **Umschlagsfahrten** genannt. Bei diesen werden sowohl Waren an verschiedenen Empfänger ausgeliefert als auch eingesammelt und zum Ausgangspunkt der Fahrt gebracht.¹²⁵

Bei den vorherigen Beschreibungen wurde als Zielpunkt kontinuierlich von einem Empfänger ausgegangen. Dieser muss nicht zwingend eine natürliche Person oder Firma sein. In den meisten Fällen handelt es sich bei diesen um Sammel-, Umschlags- oder Verteilumschlagspunkte (Im Kontext dieser Arbeit Umschlagpunkt).

Daneben wird im Güterverkehr der Transport entlang einer Transportkette in verschiedene Phasen eingeteilt. Eine Transportkette entspricht der Kombination von mehreren Verkehrsmitteln auf einem Weg. Die erste und letzte Meile wird unter dem Begriff **Vor-** bzw. **Nachlauf** zusammengefasst. Bei Paketdiensten entspricht dies der City-Logistik. Der **Zu-** und **Auslauf** umfasst alle Transportvorgänge, die von/zu großen Umschlagplätzen (Hafen, Flughafen) oder zu/von Verteil- bzw. Sammelzentren der Logistikdienstleister führen. Bei größeren Lieferanten oder Empfängern kann von/zu den großen Umschlagplätzen auch eine direkte Verbindung von/zu den Lieferanten oder Empfängern bedeuten. Der **Hauptlauf** beschreibt die längste Distanz des Transports. In diesem werden die gebündelten Waren aus dem Verteil- oder Umschlagzentren zu anderen Verteil- bzw. Umschlagzentren gebracht.¹²⁶

¹²⁴ Vgl. Gudehus (2012) Logistik 2, S. 947–1004, Vgl. Koether (2012) Distributionslogistik, S. 18–19.

¹²⁵ Vgl. Gudehus (2012) Logistik 2, S. 948.

¹²⁶ Vgl. Bretzke (2014) Nachhaltige Logistik, S. 270–273.

Unabhängig von der Unterscheidung zwischen den verschiedenen Transportfahrtenarten, wird zwischen Nah- und Fernverkehr unterschieden. Der **Nahverkehr** wickelt hauptsächlich den Vor- und Nachlauf der Transportkette ab. Zu diesem zählen Sammel- und Verteilfahrten. Als Fahrzeuge werden dafür kleine Transporter oder kleine Lkws genutzt. Ein Sonderfall des Nahverkehrs stellt die Belieferung von Großhandelsketten dar. Bei diesen werden größere Sattel-schlepper genutzt. Diese eignen sich besser zum schnellen Be- und Entladen von großen Mengen. Der **Fernverkehr** umfasst alle Strecken des Direkt-, Haupt-, Zu- und Auslauf. Die Distanzen im Fernverkehr sind wesentlich größer. Eingesetzt werden Lkws, Lkws mit Anhängern, Sattelkraftfahrzeuge und lange Lkws (Sattelzüge).¹²⁷

GUDENHUS hat für die Transportlogistik fünf Standardstrecken¹²⁸ ermittelt. Diese beschreiben den Transport von Waren zwischen Lager, Kunden und Empfänger. Ganz ähnlich hat BRETZKE sechs Transportmuster ermittelt. Diese sollten ebenso wie bei GUDENHUS die Verbindungen zwischen Start- und Zielpunkt darstellen. Bei BRETZKE werden die Folgen des eCommerce wesentlich ausführlicher behandelt¹²⁹.

Aus einer Kombination der beiden Standardwerke zur Logistik sind die Referenzstrecken dieser Arbeit für den Güterverkehr abgeleitet worden. Die Referenzstrecken sind in den **Güter-nahverkehr** (s. Abbildung 4-3) und den **Güterfernverkehr** (s. Abbildung 4-4) aufgeteilt. Es ist darauf hinzuweisen, dass im Güternahverkehr hauptsächlich der Vor- und Nachlauf berücksichtigt wird.

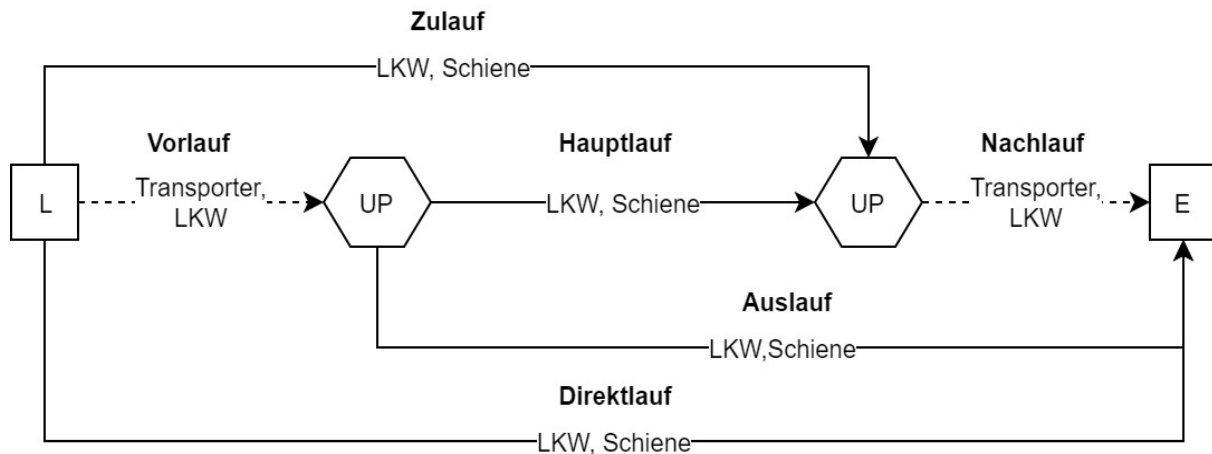


Abbildung 4-3 - Referenzstrecke Güternahverkehr

¹²⁷ Vgl. Koether (2012) Distributionslogistik, S. 189–193.

¹²⁸ Vgl. Gudehus (2012) Logistik 2, S. 991.

¹²⁹ Vgl. Bretzke (2014) Nachhaltige Logistik, S. 270–273.

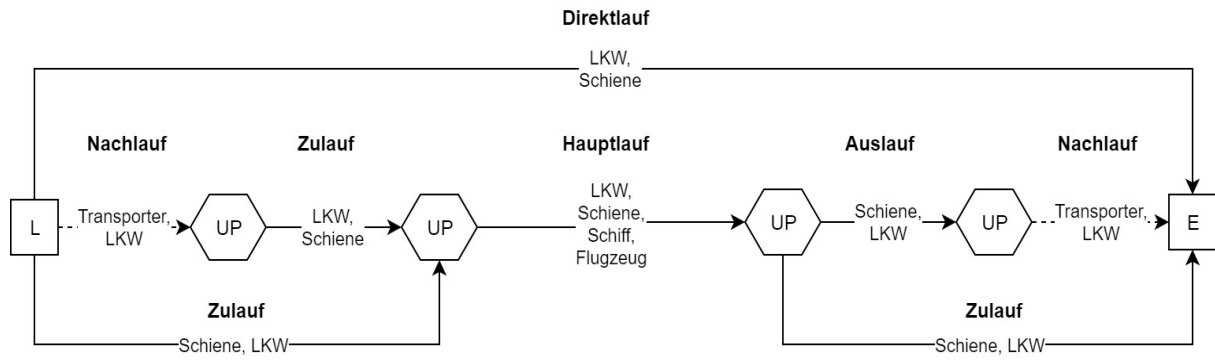


Abbildung 4-4 - Referenzstrecke Güterfernverkehr

5 Detaillierung des Modells

In ersten Teil des Kapitels werden die Bewertungskategorien und -indikatoren definiert. Diese werden in den Unterkapiteln den jeweiligen Bewertungsdimensionen zugeordnet. Im Anschluss an die Ableitung werden die Datensätze aufgebaut und die Abhängigkeiten untereinander herausgearbeitet.

5.1 Ableiten der Bewertungskategorien und -indikatoren

Das Kapitel befasst mit der Festlegung von Bewertungskategorien und -indikatoren für die Bewertungsdimensionen. Die Bewertungskategorien und -indikatoren sollen den in Kapitel 4.1 definierten Anforderungen genügen und die jeweilige Bewertungsdimensionen ausreichend abbilden.

Gerade in dem Bereich der Nachhaltigkeitsuntersuchung werden häufig Indikatoren verwendet. Die Nutzung begründet sich in den vielfältigen Handlungsfeldern der Nachhaltigkeit und dem Ziel, Verbesserungen sichtbar zu machen. Zur Darstellung werden Indikatoren benötigt, die das zugrunde liegende Problem in einen messbaren Wert abbilden.¹³⁰

Es gibt unterschiedliche Konzepte Indikatoren in Kategorien einzuteilen. Die European environmental agency verwendet folgende vier Kategorien:

- deskriptive Indikatoren (Was passiert mit der Umwelt und den Menschen durch eine Veränderung?),
- Performanceindikatoren (Hat eine Veränderung Auswirkungen?),
- Effizienzindikatoren (Verbessern wir uns?) und
- Gesamtwohlfahrtsindikatoren (Stellen wir uns insgesamt durch eine Veränderung besser?).¹³¹

Deskriptive Indikatoren beschreiben die aktuelle Situation mit Blick auf das zugrunde liegende Problem.¹³² **Performanceindikatoren** verweisen im Gegensatz zu deskriptiven Indikatoren nicht ausschließlich auf den IST-Zustand, sondern vergleichen diesen mit dem SOLL-Zustand. Der SOLL-Zustand wird anhand von festgelegten Grenzwerten beschrieben (z.B.: CO_2 -Grenzwert pro Personenkilometer).¹³³

Effizienzindikatoren beschreiben den Zusammenhang zwischen verschiedenen Elementen. Ein Beispiel für einen Effizienzparameter ist der Energieverbrauch pro Personenkilometer.¹³⁴ Neben den Effizienzparametern, bilden die **Gesamtwohlfahrtsindikatoren** die

¹³⁰ Vgl. Gudmundsson (2016) Sustainable transportation, S. 144–145.

¹³¹ Vgl. Smeets et al. (1999) Environmental indicators, S. 8.

¹³² Vgl. Smeets et al. (1999) Environmental indicators, S. 8–11.

¹³³ Vgl. Smeets et al. (1999) Environmental indicators, S. 11–12.

¹³⁴ Vgl. Smeets et al. (1999) Environmental indicators, S. 12–13.

Verbesserungen in einem Staat ab. Zu diesen Indikatoren gehört beispielsweise der „Happy Planet Index“.¹³⁵

Im Rahmen dieser Arbeit werden ausschließlich deskriptive Indikatoren verwendet. Für Performance Indikatoren müssten Grenz-, bzw. Richtwerte festgelegt werden, welche über den kompletten Zeitraum konstant sind. Weiterhin müssten die Grenzwerte sowohl für den Güter- als auch Personenverkehr vorhanden sein. Im Zuge der Umrechnung der Variablen auf die Referenzstrecken, werden aus Effizienz Indikatoren, deskriptive Indikatoren.

Von GUDMUNDSSON wurden Anforderungen, die sog. SMART-Kriterien, formuliert, um in Unternehmen realistische Ziele zusetzen. Von BROUGHTON et al. wurde vorgeschlagen diese Kriterien auch auf Indikatoren anzuwenden.¹³⁶ In Tabelle 5-1 sind die SMART-Kriterien für Indikatoren vorgestellt. Die SMART-Kriterien wurden bei der Auswahl und Definition der Indikatoren angewandt.

Tabelle 5-1 - Die SMART-Kriterien¹³⁷

S - Specific	M - Measurable	A - Attainable	R - Relevant	T - Timely
Indikatoren müssen spezifisch bzgl. des zugrunde liegenden Problems sein.	Weiterhin sollen die Indikatoren messbar sein. Dafür ist eine genaue Definition notwendig.	Der Indikator muss kostengünstig beschafft werden können.	Eine Beziehung zwischen Indikator und Problem muss gegeben sein.	Die zeitliche Dimension muss bei der Definition berücksichtigt werden.

Analog zu den, in einem Whitepaper der Europäischen Union vorgestellten Indikatoren, wird das Verkehrsaufkommen in dieser Arbeit als globaler Indikator über den Kategorien eingeführt¹³⁸. Das Verkehrsaufkommen wird gemessen mit Hilfe der Verkehrsleistung, d.h. den Personen- und Tonnenkilometern.

Das Verkehrsaufkommen wird separat betrachtet, da es sekundäre Auswirkungen in allen Kategorien hat. Das Verkehrsaufkommen z.B. beeinflusst indirekt die spezifischen Emissionen, d.h. durch mehr Stau müssen Autos öfter anfahren oder längere Wege fahren und direkt die gesamten Emissionen, d.h. mehr Autos können auch bei geringeren spezifischen Emissionen für mehr Gesamtemissionen sorgen. Analoge Abhängigkeiten lassen sich auch in den anderen Dimensionen finden.

Aus der Definition des Begriffs Indikator und den vorstehenden Definitionen wurden die folgenden Fragestellungen identifiziert. In den Kapiteln 5.1.1, 5.1.2, 5.1.3 wird die Auswahl der Bewertungskategorien und -indikatoren vorgestellt und die Gründe für die Auswahl dargelegt.

¹³⁵ Vgl. Smeets et al. (1999) Environmental indicators, S. 13.

¹³⁶ Vgl. Gudmundsson (2016) Sustainable transportation, S. 159.

¹³⁷ Vgl. Gudmundsson (2016) Sustainable transportation, S. 160.

¹³⁸ Vgl. EC-European Commission (2011) Roadmap to a Single European Transport Area, 56ff.

In Tabelle 5-2, Tabelle 5-3 sind die Bewertungsdimensionen, -kategorien und Indikatoren aufgelistet.

Tabelle 5-2 - Die Bewertungsindikatoren (Teil 1)

Kategorie	Indikator
Dimension 1: Ökologie	
Klimaerwärmung	<p><i>THG-Emissionen</i></p> <p>Alle Treibhausgasemissionen werden auf ein CO₂-Äquivalente pro Verkehrsmittel umgerechnet. Die CO₂-Äquivalente werden mit dem jeweiligen Anteil eines Verkehrsmittels auf einer Referenzstrecke multipliziert</p>
Luftverschmutzung (I)	<p><i>Feinstaub</i></p> <p>Multiplikation der durchschnittlichen Feinstaub-Emissionen mit dem Anteil des Verkehrsmittels an der Referenzstrecke.</p>
Luftverschmutzung (II)	<p><i>NO_x-Emissionen</i></p> <p>Durchschnittliche NO_x-Emissionen der Verkehrsmittel multipliziert mit dem jeweiligen Anteil des Verkehrsmittels an der Referenzstrecke.</p>
Energieverbrauch	<p><i>Energieverbrauch</i></p> <p>Multiplikation des durchschnittlichen Energieverbrauchs mit dem Anteil des Verkehrsmittels an der Referenzstrecke.</p>

Tabelle 5-3 - Die Bewertungsindikatoren (Teil 2)

Kategorie	Indikator
Dimension 2: Sozial bzw. individueller Nutzen	
Zeit	<i>Fahrtzeit</i> Gesamte Fahrzeit auf einer Referenzstrecke.
Kompatibilität der Verkehrsmittel	<i>Wartezeit</i> Summe der Wartezeiten zwischen den Verkehrsmitteln und vor Antritt der Reise.
Individuelle Kosten	<i>Transportkosten</i> Kosten für den Transport mit einem Verkehrsmittel vom Start bis zum Ziel der Referenzstrecke pro Person bzw. Gut.
Sicherheit	<i>Unfallrisiko</i> Anzahl der getöteten Personen pro eine Milliarde Personen- bzw. Tonnenkilometer je Referenzstrecke.
Dimension 3: Ökonomie	
Kosten (I)	<i>Infrastrukturinvestitionen</i> ...
Kosten (II)	<i>Staukosten</i> Kosten, die jährlich durch den Stau auf deutschen Straßen entstehen

5.1.1 Ökologische Bewertungskategorien und -indikatoren

Die ökologischen Bewertungskategorien und -indikatoren werden nachfolgend beschrieben und ihre Auswahl begründet. Die Bedeutung einzelner Bewertungskategorien und -indikatoren zeigt sich durch die wiederholte Verwendung in Studien, wie z.B. „Nachhaltige Entwicklung im Transportsektor“¹³⁹, und anderen Umfragen¹⁴⁰. Dabei werden die Kategorien Treibhausgase,

¹³⁹ Vgl. Gudmundsson (2016) Sustainable transportation.

¹⁴⁰ Vgl. Hagshenas et al. (2012) Urban sustainable transportation indicators for global comparison; Vgl. Shiao et al. (2013) Developing an indicator system for local governments to evaluate transport sustainability strategies; Vgl. Shiao et al. (2013) Developing an indicator system for local governments to evaluate transport sustainability strategies

Lärm, Luftverschmutzung und Energieverbrauch am häufigsten verwendet.¹⁴¹ Die Lärm-Emissionen werden im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet.

Energie

Energie beschreibt in diesem Zusammenhang die Fähigkeit, mechanische Arbeit zu verrichten.¹⁴² Der Energieverbrauch in der Mobilität misst, wieviel Energie ein Verkehrsmittel auf einem Kilometer verbraucht. Einheit des Energieverbrauchs ist MJ/km. Der Energieverbrauch ist eine direkte Wirkungsgröße, die direkt mit der Anzahl der zurückgelegten Kilometer korreliert.¹⁴³ Dies grenzt den Energieverbrauch von den THG-Emissionen ab.

Die Auswahl des Energieverbrauchs als Kategorie begründet sich durch den hohen Anteil an gesamten Energieverbrauch. Im Jahr 2017 entstand ca. 30 % des deutschen Energieverbrauchs durch den Transportsektor¹⁴⁴. Zur Minderung des gesamten Energieverbrauchs ist der Transportsektor somit einer der Haupthebel.

Der Energieverbrauch und die THG-Emissionen werden mit Hilfe der DIN EN 16258 berechnet. Im Gegensatz zur Ökobilanzierung ganzer Unternehmen erlaubt die Norm, eine Allokation der Emissionen auf die Transportleistung der unterschiedlichen Verkehrsmittel. Die Ermittlung des Energieverbrauchs gemäß dieser DIN-Norm erfolgt in drei Schritten:¹⁴⁵

1. Bestimmung der Teilstrecken je Verkehrsmittel innerhalb der Referenzstrecke
2. Berechnung des Energieverbrauchs und der THG-Emissionen für die zuvor bestimmten Teilstrecken
 - a. Wie viel Kraftstoff bzw. Energie wurde für den Zyklus¹⁴⁶ verbraucht?
 - b. Berechnung des Energieverbrauchs und der THG-Emissionen für den gesamten Zyklus des betrachteten Verkehrsmittels. (1)
 - c. Bestimmung des Energieverbrauchs bzw. der THG-Emissionen für die Teilstrecken, durch eine Aufteilung der Gesamtergebnisse (1) auf die Teilstrecken. (2)
3. Addition der Ergebnisse (2) zu einem Energieverbrauch bzw. den THG-Emissionen.

Die DIN-Norm ist für die Anwendung im öffentlichen Personenverkehr ausgelegt. Die Anwendung im Güterverkehr erfolgt analog dazu. Für den motorisierten Individualverkehr werden anstatt des gesamten Zyklus die direkten Verbrauchswerte verwendet und diese über die durchschnittliche Auslastung umgerechnet.

Berücksichtigt werden bei der Berechnung des Energieverbrauchs und der THG-Emissionen zusätzlich zu dem direkten Verbrauch die Vorketten der Energiegewinnung (Wheel-to-Wheel

¹⁴¹ Vgl. Haghsheenas et al. (2012) Urban sustainable transportation indicators for global comparison, S. 115–121.

¹⁴² Vgl. Tipler et al. (2015) Energie und Arbeit, S. 168.

¹⁴³ Vgl. Tipler et al. (2015) Energie und Arbeit, S. 169.

¹⁴⁴ Vgl. DIW Berlin et al. (2018) Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland.

¹⁴⁵ Vgl. Deutsches Institut für Normung e.V. (2013) 16258.

¹⁴⁶ Gesamte Strecke eines Verkehrsmittels auf einer Linienfahrt

Energieverbrauch. Nicht berücksichtigt werden die Energieverbräuche und THG-Emissionen für Wartung, Herstellung und Entsorgung. Die Herstellung und Wartung werden aufgrund ihres kleinen Anteils an dem gesamten Verbrauch vernachlässigt. Außerdem fehlen konsistente Werte für diese über alle Verkehrsmittel.¹⁴⁷ Im Sinne der DIN EN 16258 sind durch diese Betrachtung Vergleiche zwischen den Verkehrsmitteln möglich und erlaubt.

Die Werte für die Energieverbräuche können dabei laut DIN EN 16258 aus drei Quellen stammen. Die Werte aus den drei Quellen werden als gleichwertig betrachtet und können je nach Datenstand gemischt verwendet werden. Es sind:

- **Individuelle Messwerte** – Energieverbrauch eines Verkehrsmittels liegt als gemessener Wert vor
- **Spezifische Werte des Transportdienstleisters** – Für einzelne Verkehrsmitteltypen liegt ein Durchschnittswert vor
- **Flottenwerte des Transportdienstleisters** – Der Energieverbrauch liegt für eine gesamte Flotte vor.

TREMODO ist Rechenprogramm zur Beschreibung des motorisierten Verkehrs in Deutschland. Es bildet den Zeitraum von 1960 bis 2050 ab und beschreibt in diesem alle Personen- und Güterverkehrsmittel.¹⁴⁸ Es stellt eine umfangreiche Datenbasis dar, welche für das Umweltbundesamt entwickelt wurde. Die Daten über den spezifischen Energiebedarf liegen bezogen auf Personen- und Tonnenkilometer (Berechnungsbasis: Well-to-Wheel) vor und werden übernommen.

Ausgehend von diesen Daten wird der Energieverbrauch für die Referenzstrecken berechnet.

$$\text{Energieverbrauch pro Fahrgast} = \sum_{i=1}^I l_i * en_{WTW} \quad (5-1)$$

Mit: en_{WTW} : spezifischer Well-to-Wheel Energieverbrauch je Verkehrsmittel

Analog funktioniert die Aufteilung beim Güterverkehr. Notwendige Werte für die Bewertung sind daher:

- Daten zum spezifischen Energiebedarf
- Länge der Referenzstrecke aufgeschlüsselt nach Verkehrsmittel

Klimaerwärmung

Die Weltgesundheitsorganisation sieht die Luftverschmutzung und die globale Erwärmung als größte Bedrohung der globalen Gesundheit im Jahr 2019 an.¹⁴⁹ Dem folgt die UN, welche in Ziel 13 der Sustainable Development Goals die Maßnahmen zum Klimaschutz aufgreift¹⁵⁰.

¹⁴⁷ Vgl. Schmied et al. (2012) Berechnung des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen des ÖPNV.

¹⁴⁸ Vgl. Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (2016) TREMOD.

¹⁴⁹ Vgl. World Health Organization (2019) Ten threats to.

¹⁵⁰ Vgl. United Nations Sustainable Development Goals.

Kombiniert begründen diese beiden Quellen die Aufnahme der Klimaerwärmung als Bewertungskategorie für die ökologische Bewertung.

Die THG-Emissionen bilden die Grundlagen, um Aussagen über die Entwicklung und Ursachen des Treibhauseffektes und somit die Klimaerwärmung zu treffen. Im KYOTO-Protokoll¹⁵¹ werden CO₂, CH₄, N₂O und synthetischen Gasen als sog. Treibhausgase definiert¹⁵². Sie wirken sich in Abhängigkeit von ihren Umweltauswirkungen (Global Warming Potential, GWP) auf das CO_{2-eq} aus. Ausschlaggebend für die Gewichtung der Treibhausgase im CO_{2-eq} ist das GWP. Es gibt an, welche Auswirkung das jeweilige Gas auf die Erderwärmung hat. Je höher der Wert ist, desto höher die Auswirkungen.¹⁵³ Die Entwicklung der CO_{2-eq} gibt an, wie sich die Treibhausgase in der Welt entwickeln und wie sich dadurch die Klimaerwärmung beschleunigt oder verlangsamt. Die THG-Emissionen sind daher ein geeigneter Indikator für die Klimaerwärmung.

Der Indikator THG-Emissionen wird analog zum Energieverbrauch je Referenzstrecke berechnet. Die Daten zu den spezifischen Emissionen je Verkehrsmittel und Personen- bzw. Tonnenkilometer liegt in TREMOD vor. Die Durchschnitte werden, wie beim spezifischen Energieverbrauch basierend auf der aktuellen Zusammensetzung der Verkehrsmittel berechnet. Bezugsjahr der Daten im Ausgangsszenario ist 2017. Für die Zukunftsszenarien werden diese Werte approximiert.

$$THG - Emissionen = \sum_{i=1}^I l_i * thg_{WTW} \quad (5-2)$$

Mit: thg_{WTW} : spezifische THG-Emissionen je Verkehrsmittel $\left[\frac{CO_{2-eq}}{P_{km}} / \frac{CO_{2-eq}}{T_{km}} \right]$.

Notwendige Werte für die Bewertung sind daher:

- Daten zum spezifischen Energiebedarf
- Länge der Referenzstrecke aufgeschlüsselt nach Verkehrsmittel

Luftverschmutzung - NO_x- Emissionen

Neben der WHO geben, gemäß einer forsa-Umfrage die meisten Deutschen an, dass Luftverschmutzung nach ihrer Wahrnehmung den größten Einfluss auf ihre Gesundheit hat¹⁵⁴. Unter Luftverschmutzung werden hier sowohl Stickstoffdioxid-Emissionen als auch Feinstaub-Emissionen verstanden.

¹⁵¹ Vgl. UNFCCC (1997) Kyoto Protocol to the United Nations.

¹⁵² Vgl. UNFCCC (1997) Kyoto Protocol to the United Nations, S. 19.

¹⁵³ Vgl. Demirel (2014) Thermoeconomics, S. 277.

¹⁵⁴ Vgl. forsa Gesellschaft für Sozialforschung und statistische Analysen mbH (2018) Umweltbewusstsein in Deutschland 2018.

Dabei ist Stickstoff der Grundbaustein des menschlichen Lebens¹⁵⁵. Der menschliche Körper besteht bei einem Gewicht von 70 Kg aus 2 Kg Stickstoff. Weiterhin besteht die Atmosphäre zu 80% aus Stickstoff.¹⁵⁶ Gefährlich bzw. schädlich sind ausschließlich die reaktiven Verbindungen des Stickstoffs. Diese entstehen durch Umwandlungen unter hohem Energieaufwand, z.B. bei Verbrennungsprozessen. Durch die Freisetzung des Stickstoffs beim Verbrennen von Energieträgern wird elementarer Stickstoff aus der Luft in Stickstoffdioxid umgewandelt.¹⁵⁷ Die Stickstoffdioxide bezeichnen alle Elemente der Gruppe NO_x und werden meist gemessen.¹⁵⁸

Die Diskussion um Stickstoffoxide hat in den letzten Jahren zugenommen. Dies liegt auch an der Tatsache, dass die Belastbarkeit der Erde durch reaktiven Stickstoffdioxid bereits heute überschritten ist.¹⁵⁹ In den Fokus sind dabei die durch den Verkehr emittierten Stickstoffoxide und Grenzwerte gerückt.¹⁶⁰ Gemäß Umweltbundesamt gehört der Straßenverkehr zu den bedeutendsten Stickstoffdioxid Emittenten.¹⁶¹ Eine Reduktion der Stickstoffdioxid-Emissionen ist daher notwendig und begründet die Aufnahme als Indikator in der Kategorie Luftverschmutzung.

Die Daten zu den spezifischen Emissionen je Verkehrsmittel und Personen- bzw. Tonnenkilometer liegen in TREMOD vor. Zusammen mit den Anteilen des Verkehrsmittels auf der Referenzstrecke, werden so die Werte pro Referenzstrecke berechnet.

$$\text{NO}_x - \text{Emissionen} = \sum_{i=1}^I l_i * no_i \quad (5-3)$$

Mit: no_i : spezifische NO_x -Emissionen je Verkehrsmittel $\left[\frac{\text{g}}{\text{Pkm}} / \frac{\text{g}}{\text{Tkm}} \right]$.

Notwendige Werte für die Bewertung sind daher:

- Daten zu den spezifischen NO_x -Emissionen
- Länge der Referenzstrecke aufgeschlüsselt nach Verkehrsmittel

Luftverschmutzung – Feinstaub

Die WHO (World Health Organisation) geht in ihrem „World Health Report 2002“ davon aus, dass 800.000 Menschen jährlich, aufgrund einer erhöhten Feinstaubbelastung, verfrüht sterben.¹⁶² Dem folgend stellt die American Heart Association in 2010 fest, dass Personen, welche

¹⁵⁵ Vgl. Ittershagen (2011) Stickstoff - lebensnotwendiger Nährstoff, S. 1.

¹⁵⁶ Vgl. Schütze et al. Stickstoff - Zuviel des Guten?, S. 3.

¹⁵⁷ Vgl. Schütze et al. Stickstoff - Zuviel des Guten?, S. 4–5.

¹⁵⁸ Vgl. Schütze et al. Stickstoff - Zuviel des Guten?, S. 13.

¹⁵⁹ Vgl. Schütze et al. Stickstoff - Zuviel des Guten?, S. 13.

¹⁶⁰ Vgl. Zimmermann (2019) Diskussion um Stickstoffoxid-Grenzwert.

¹⁶¹ Vgl. Umweltbundesamt (2016) Stickstoffoxide.

¹⁶² Vgl. World Health Organization The World Health Report 2002, S. 69.

mehrere Stunden pro Tag $PM < 2,5 \mu m$ (Feinstaubpartikel mit einer Größe kleiner als $2,5 \mu m$) ausgesetzt sind, mehrere Monate bis Jahre früher sterben.¹⁶³

Feinstaub umfasst mehrere kleine Partikel und Tropfen, welche u.a. aus organischen Metallen und Staub bestehen. Man unterscheidet zwischen natürlichen und von Menschen produzierten Feinstaub.¹⁶⁴ Zu den Quellen des von Menschen produzierten Feinstaub gehören die Industrie, der Verkehr und Tabakrauch.¹⁶⁵ Eine Reduktion des Feinstaubausstoß durch den Verkehrssektor wäre daher wünschenswert.

Der Ausstoß von Feinstaub in der Luft wird durch die Angabe des Durchmessers der Körner oder Tropfen in Verbindung mit ihrem Gewicht in g angegeben. Je kleiner der Durchmesser ist, desto gefährlicher sind die Teilchen, da sie weiter in die Lunge eindringen können.¹⁶⁶ Die Werte für den Transportsektor bezogen auf einen Personen- oder Tonnenkilometer liegt in TREMOD vor. Diese werden analog zu den NO_x -Emissionen auf die Referenzstrecke aggregiert.

$$Feinstaub = \sum_{i=1}^I l_i * pm_i \quad (5-4)$$

Mit: pm_i : spezifische Feinstaub-Emissionen je Verkehrsmittel $\left[\frac{g}{Pkm} / \frac{g}{Tkm} \right]$

Notwendige Werte für die Bewertung sind daher:

- Daten zu den spezifischen Feinstaub-Emissionen
- Länge der Referenzstrecke aufgeschlüsselt nach Verkehrsmittel

5.1.2 Bewertungskategorien und -indikatoren für den individuellen Nutzen

Sicherheit

Die Kategorie Sicherheit beschreibt, wie hoch die Gefahr ist auf einer gewählten Referenzstrecke ums Leben zu kommen. Als Indikator für die Kategorie wurde daher die Anzahl an Personen, welche im Verkehr mit dem jeweiligen Verkehrsmittel oder einer Verkehrsmittelkombination getötet werden, gewählt.

In den meisten Studien zum Thema „Nachhaltige Entwicklung im Transportsektor“ werden unter dem Begriff Sicherheit lediglich die Anzahl an Unfällen zusammengefasst¹⁶⁷. Dies liegt in der Tatsache begründet, dass bspw. Unfallstatistiken für Bahnhöfe und Haltestellen nur

¹⁶³ Vgl. Brook et al. (2010) Particulate matter air pollution and cardiovascular disease, S. 2331.

¹⁶⁴ Vgl. Anderson et al. (2012) Clearing the air, S. 168.

¹⁶⁵ Vgl. Anderson et al. (2012) Clearing the air, S. 169.

¹⁶⁶ Vgl. Anderson et al. (2012) Clearing the air, S. 168.

¹⁶⁷ Vgl. Buzási et al. (2015) Sustainability Indicators, Vgl. Nicolas et al. (2003) Towards sustainable mobility indicators, Vgl. Shiao et al. (2013) Developing an indicator system for local governments to evaluate transport sustainability strategies.

schwer zugänglich sind. Im Rahmen dieser Arbeit wird daher darauf verzichtet, diese Parameter näher zu untersuchen.

$$\text{Unfallrisiko} = \sum \frac{u_i * l_i}{L} \quad (5-5)$$

Mit: u_i : Unfallrisiko je 1 Milliarde Personen-/ Tonnenkilometer

L : Länge der Gesamtstrecke

Das Unfallrisiko gibt an, wie viele Personen je einen Milliarde Personen-/Tonnenkilometer bei einem Unfall gestorben sind.

Notwendige Werte für die Bewertung sind daher:

- Länge der Referenzstrecke aufgeschlüsselt nach Verkehrsmittel
- Unfallrisiko je Verkehrsmittel

Individuellen Transportkosten

Die individuellen Transportkosten geben an, wie viele Kosten eine Person für die Bewältigung der Distanz zwischen dem Start- und dem Zielpunkt aufwenden muss. Für den Güterverkehr entspricht dies den Kosten pro Tkm. Ermittelt werden die individuellen Transportkosten als Preis für die einzelnen Teilstrecken.

In einer Umfrage durch den Verkehrsclub Deutschland e.V. haben 43,1 % der befragten Personen angegeben, dass die Kosten für sie eine entscheidende Rolle bei der Verkehrsmittelwahl spielen¹⁶⁸. Entsprechend sind auch im Güterverkehr die Transportkosten die wichtigste Entscheidungsgrundlage. Daher werden in vielen Studien die direkten Kosten pro Pkm/Tkm als Bewertungsindikator gewählt.¹⁶⁹

Berechnet werden die individuellen Transportkosten auf Basis der Referenzstrecken. Dafür wird die Referenzstrecke in Teilstrecken je Verkehrsmittel aufgeteilt und diese einzeln bepreist.

$$\text{Kosten pro Referenzstrecke} = \sum_{i=1}^I c_i * l_i \quad (5-6)$$

Mit: c_i : spezifische Preise des Verkehrsmittels i pro Kilometer $\left[\frac{\text{€}}{\text{Pkm}}, \frac{\text{€}}{\text{Tkm}} \right]$

Daraus resultieren die folgenden benötigten Daten:

- Daten zu den spezifischen Preisen der Verkehrsmittel
- Länge der Referenzstrecke aufgeschlüsselt nach Verkehrsmittel

¹⁶⁸ Vgl. VCD (2014) VCD Bahntest 14/15, S. 19.

¹⁶⁹ Vgl. Haghsheenas et al. (2012) Urban sustainable transportation indicators for global comparison, S. 115–121.

Zeit – Kompatibilität der Verkehrsmittel

Die beiden Kategorien werden kombiniert betrachtet und erklärt, da die Warte- und Transferzeit miteinander verknüpft sind.

In einer Umfrage des VCD (Verkehrsclub Deutschland e.V.) gaben über 41% der befragten Personen an, dass für sie die Fahrzeit (im Kontext dieser Arbeit „Transferzeit“) relevant für die Verkehrsmittelwahl ist.¹⁷⁰ Im Rahmen dieser Arbeit wird die Transferzeit als die Summe der effektiven Fahrtzeit und den Wartezeiten verstanden. Die Transferzeit in Minuten wird als Indikator für die zeitliche Dimension der Reise verwendet. Zeitliche Daten sind absolute Größen, welche aus den Daten für die Referenzstrecken gewonnen werden.

Die Kompatibilität der Verkehrsmittel wird durch den Indikator Wartezeit beschrieben. Je länger die Wartezeit zwischen den Verkehrsmitteln ist, desto schlechter sind diese aufeinander abgestimmt. Die Wartezeiten werden aus den Daten für die Referenzstrecken gewonnen.

Daraus resultieren die folgenden benötigten Daten:

- Transit-, Fahrt- und Wartezeiten der Referenzstrecken

5.1.3 Ökonomische Bewertungskategorien und -indikatoren

Kosten (II) – Investitionen

Infrastrukturinvestitionen werden selten einem Faktor isoliert zugerechnet werden. Die beiden Kategorien werden daher ausschließlich textuell beschrieben.

Die Infrastrukturinvestitionen bis 2030 sind für Deutschland im Bundesverkehrswegeplan 2030 (BWP) festgehalten. Dieser regelt die Investitionen in die Infrastruktur in Deutschland bis zum Jahr 2030.¹⁷¹ Unterschieden werden die Kategorien Erhaltung/Ersatz, Aus- und Neubau sowie einer Dringlichkeitseinstufung innerhalb der Verkehrsträger¹⁷². Insgesamt werden im Rahmen des BWP 2030 rund 270 Milliarden Euro in das Gesamtnetz investiert. Von diesen fließen 49 % in die Straßeninfrastruktur, 42 % in die Schieneninfrastruktur und 9% in Wasserstraßen.¹⁷³

Fraglich ist, ob und welche dieser Kosten durch neue Mobilitätskonzepte ggf. entfallen oder sogar erhöht werden müssen. Für eine genaue Abschätzung müssten die Auswirkungen auf Infrastrukturprojekte einzeln in den Zukunftsszenarien bewertet werden können. Außerdem müssten für zusätzliche Projekte Kostenrechnungen vorgenommen werden.

Im Rahmen dieser Arbeit werden stattdessen nur die zusätzlichen Investitionskosten am Beispiel der Stadt Aachen berechnet. Diese ergeben sich beispielsweise aus Umbauarbeiten an

¹⁷⁰ Vgl. VCD (2014) VCD Bahntest 14/15, S. 168.

¹⁷¹ Vgl. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2016) Bundesverkehrswegeplan 2030, S. 2–3.

¹⁷² Vgl. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2016) Bundesverkehrswegeplan 2030, S. 11.

¹⁷³ Vgl. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2016) Bundesverkehrswegeplan 2030, S. 13–14.

Bahnhöfen, zusätzlichen Schienenverbindungen und Ladestationen. Dafür wird kein deskriptiver Indikator ermittelt, sie werden lediglich qualitativ bewertet.

Kosten (I) – Staukosten

Ein Stau entsteht, wenn die Kapazität der Verkehrsanlage überstritten wird. Dies kann sowohl auf der Straße, der Schiene als auch in der Luft geschehen.¹⁷⁴ Im Straßenverkehr lässt sich das Vorkommen von Stau mathematisch berechnen. So tritt ein Stau auf, wenn die tatsächliche Verkehrsstärke größer als die Kapazität ist. Die Kapazität entspricht der größten Verkehrsstärke, welche eine Straße bei perfekten Bedingungen erreichen kann.¹⁷⁵ Laut INRIX kommt es des Weiteren zu einem Kapazitätseinbruch, d.h. einer Reduzierung der Kapazität mit zusätzlich hinzukommenden Fahrzeugen, wenn der gesamte Platz einer Straße aufgebraucht ist.¹⁷⁶ Ein solcher reduziert den Verkehrsfluss erheblich.

In Deutschland steht jeder Deutsche durchschnittlich 120 Stunden im Jahr im Stau. Dadurch entstehen pro Person Kosten in der Höhe von 1.052€ (nur Straßenverkehr)¹⁷⁷. Neben dem Personenverkehr wird auch der Güterverkehr stark beeinflusst. Das American Transportation Research Institut schätzt die Gesamtkosten, welche durch Staus 2016 in den USA entstanden sind, auf ca. 74,5 Milliarden \$.¹⁷⁸

Für das Referenzszenario werden die ermittelten Staukosten von INRIX verwendet. Diese werden durch einen Vergleich der Verkehrsbedingungen während der „Freien Fahrt“ und der „Stoßzeiten“ gewonnen. Die Differenz zwischen den beiden Werten ergeben die Stauzeiten.¹⁷⁹ In den Zukunftsszenarien werden die Werte für den Stau geschätzt. Einflussgrößen für die Reduktion von Stau sind nach GERIKE.¹⁸⁰

- **Vermeiden**

Verkehr kann vermieden werden, indem Menschen ihre Aktivitäten ohne örtliche Diskrepanz erledigen können, z.B.: Heimarbeit

- **Verlagern**

Die Verlagerung des Individualverkehrs zum öffentlichen Verkehr ermöglicht die Reduktion des Verkehrsaufkommens, da die Auslastung bzw. die Anzahl der Personen je Fahrzeug steigt.

- **Verbessern**

Dies umfasst alle Verbesserungen der Qualität des Verkehrs.

Anhand der oben genannten Einflussgrößen und dem Verkehrsaufkommen wird die Entwicklung des Staus prognostiziert.

¹⁷⁴ Vgl. Gerike (2018) Das Phänomen Stau, S. 245.

¹⁷⁵ Vgl. Gerike (2018) Das Phänomen Stau, S. 246–247.

¹⁷⁶ Vgl. Cookson (2018) Inrix Global Traffic Scorecard.

¹⁷⁷ Vgl. Cookson (2018) Inrix Global Traffic Scorecard, S. 36.

¹⁷⁸ Die Berechnung der Kosten erfolgt anhand des Value of Time. Vgl. Hooper (2018) Cost of Congestion, S. 6.

¹⁷⁹ Vgl. Cookson (2018) Inrix Global Traffic Scorecard, S. 4.

¹⁸⁰ Vgl. Cookson (2018) Inrix Global Traffic Scorecard, S. 263–264.

5.2 Implementierung eines Bewertungstools

Das Bewertungstool soll die Eingangsgrößen, bestehend aus den Technologiedaten, Referenzstrecken und sonstigen Tabellen, zur Berechnung der Indikatoren nutzen und diese in Diagrammen und Tabellen darstellen. Der Aufbau des Bewertungstools ist in Abbildung 5-1 dargestellt.

Der Kern der Berechnung wird dabei in einen Python Tool vorgenommen. Dieses bekommt die Daten aus den Excel Tabellenblätter und transformiert diese in Dataframes. Ein Dataframe ist ein von der Bibliothek Pandas zur Verfügung gestellter Konstruktor zur einfachen und schnellen Verarbeitung von Daten. Innerhalb der Dataframes werden die Daten bearbeitet und die Berechnungen durchgeführt.

Zur parallelen Bearbeitung der Excel Tabellen und der Berechnung wurde die Bibliothek Xlwings eingebunden. Diese fungiert als Schnittstelle zwischen dem Python Tool und der Excel. Bei allen beschriebenen Tools handelt es sich um Open Source Anwendungen, welche zur freien Verwendung sind.

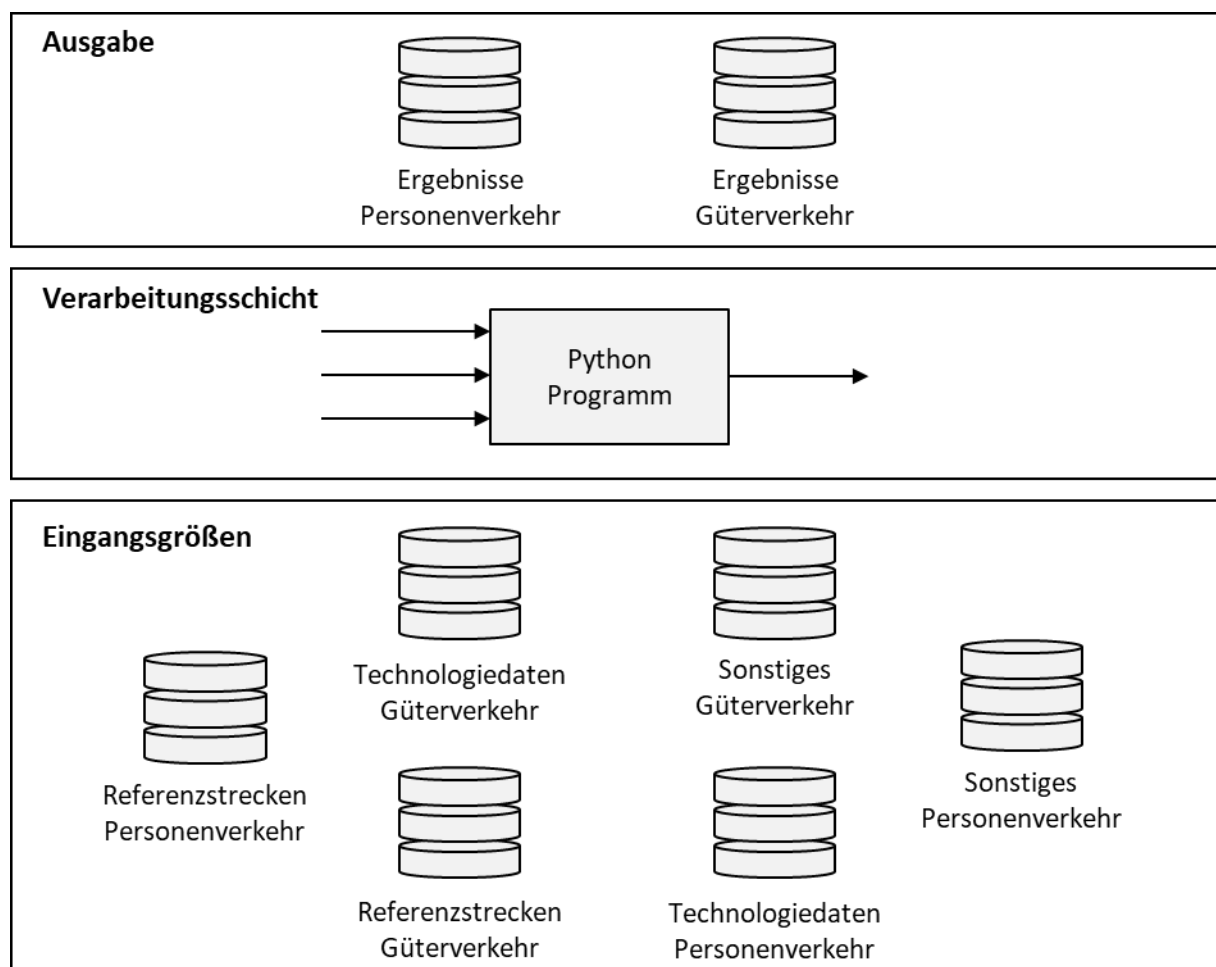


Abbildung 5-1 - Aufbau Bewertungstool

6 Beschreibung der Szenarien zur Entwicklung der multimodalen Mobilität

Mögliche Entwicklungen der multimodalen Mobilität sollen mithilfe der in Kapitel 2.4 beschriebenen Szenarioanalyse analysiert werden. Dafür wird im ersten Schritt die Aufgabenstellung erarbeitet und der Untersuchungsrahmen abgesteckt. Ausgehend von diesem erfolgt die Analyse des Untersuchungsumfeldes. Aus der Analyse des Untersuchungsumfeldes ergibt sich auch die Beschreibung des Referenzszenarios.

Insgesamt werden im Rahmen dieser Arbeit vier Szenarien: „Trendszenario“, sowie die drei Zukunftsszenarien „unreguliertes autonomes Fahren“ (UAM), „optimierte multimodale Mobilität“ (OMM) und „Pod-basierte multimodale Mobilität“ (PMM) entwickelt. Während für die Analyse des Untersuchungsrahmen hauptsächlich Umfragen und Kennzahlen über den aktuellen Stand der Mobilität verwendet werden können, wird in den Zukunftsszenarien eine Beschreibung anhand von Studien vorgenommen.

Das Trendszenario stellt den Ausgangspunkt für die Beschreibung der anderen Szenarien dar. Im Trendszenario werden die spezifischen Emissionen der Verkehrsmittel, ihre Kosten, die Verfügbarkeit und das Unfallrisiko erfasst. Basierend auf den für dieses Szenario ermittelten Werten werden die Werte für die anderen Szenarien mit Hilfe von Verbesserungsfaktoren bestimmt. In Abgrenzung zu einem Business-as-usual Szenario (Fortschreibung der aktuellen Entwicklungen) werden im Trendszenario bereits beschlossene politische Maßnahmen berücksichtigt¹⁸¹.

Voraussetzung für Pod-basierte multimodale Mobilität ist das autonome Fahren. Um eine einheitliche Vergleichsbasis zu schaffen, werden daher die Szenarien für optimierte multimodale Mobilität ebenfalls mit autonomen Fahrzeugen gestaltet. Mobility on Demand (MoD)-Systeme bauen darauf, dass autonome Fahrzeuge in möglichst naher Zukunft zur Verfügung stehen, um rentabel zu werden¹⁸². Ein Pod-System ist durch seine Struktur automatisch ein MoD-System.

Im Kapitel 6.2 werden im Anschluss daran die wichtigsten Trends und größten Unsicherheiten separat beschrieben. Die Auswahl sowie die Beschreibung dieser Trends basiert auf den Ergebnissen verschiedener Studien, welche im Rahmen des Kapitels vorgestellt werden. Aufbauend auf die Prognose-Phase werden in Kapitel 6.3 mögliche Zukunftsbilder entwickelt, welche in Unterkapiteln skizziert werden.

6.1 Analyse-Phase mit Beschreibung des Referenzszenarios

Die Analyse-Phase gliedert sich, wie zu Beginn des Kapitels 6 beschrieben, in die Erstellung der Aufgabenstellung und der Festlegung des Untersuchungsrahmens. Aus diesen beiden

¹⁸¹ Vgl. Adolf, Jörg et al. (2014) Shell PKW-Szenarien bis 2040, S. 57.

¹⁸² Vgl. Redaktion NGIN Mobility (2018) Mit On-Demand-Shuttles lässt sich nur Geld verdienen, wenn sie fahrerlos sind.

entsteht im Anschluss die Analyse des Untersuchungsumfeldes. Daraus wird die Beschreibung des Referenzszenarios entwickelt.

6.1.1 Aufgabenstellung und Untersuchungsrahmen

Die Kernfrage der Szenarioanalyse lautet: „Wie sieht die Zukunft der Mobilität im Jahr 2050 aus?“. Daraus leitet sich die Aufgabenstellung dieser Arbeit ab, welche lautet die Mobilität in Deutschland im Jahr 2050 als Ganzes darzustellen und ein besonderes Augenmerk auf die Entwicklung der multimodalen Mobilität zu legen.

Aus der Aufgabenstellung ergibt sich der Untersuchungsrahmen der Szenarioanalyse. So soll die Entwicklung der Mobilität mit räumlicher Abgrenzung auf Deutschland vorgenommen werden, wobei globale Effekte (z.B.: gestiegene Energiepreise oder EU-Richtlinien zum Klimaabkommen) berücksichtigt werden.

6.1.2 Analyse des Untersuchungsumfelds

Die Analyse des Untersuchungsumfeldes bildet den IST-Zustand der Mobilität in Deutschland ab. Der Aufbau der Beschreibung gliedert sich in neun verschiedene Punkte: Allgemeine Bevölkerungsdaten, das Verkehrsaufkommen, der Modal Split, der Aufbau der Referenzstrecken, Kennziffern des Personenverkehrs, Kennziffern des Güterverkehrs, die Zusammensetzung der Fahrzeugkategorien, ökologischen Daten, ökonomischen Daten und der Dimension soziales bzw. individueller Nutzen.

Allgemeine Bevölkerungsdaten

Insgesamt leben 83,02 Millionen Menschen in Deutschland¹⁸³. Von den 83 Millionen Bürgern leben 15 % in Landgemeinden mit weniger als 5.000 Einwohnern. Weitere 27 % leben in Kleinstädten zwischen 5.000 und 20.000 Einwohnern. In Mittelstädten (20.000 bis 100.000 Menschen) leben ebenso viele Menschen (27 %). Die restlichen 31 % leben in Großstädten mit mehr als 100.000 Einwohnern.¹⁸⁴ Der Urbanisierungsgrad, d.h. der Anteil der Bevölkerung, welche in Städten lebt, lag im Jahr 2015 bei 75,3 %¹⁸⁵.

Das Verkehrsaufkommen

In 2016 (eine Aufschlüsselung nach Bereichen lag zum Zeitpunkt der Arbeit für 2017 noch nicht vor) betrug die Verkehrsleistung im Personenverkehr 1.143,83 Milliarden Personenkilometer, welche sich aus 82,54 Milliarden Personenkilometer im Öffentlichen Straßenpersonenverkehr, 95,83 Milliarden Personenkilometer im Eisenbahnverkehr und dem Rest im motorisierten Individualverkehr aufteilen.¹⁸⁶ Zusätzlich kommen 696 Milliarden Tonnenkilometer im

¹⁸³ Vgl. Statistisches Bundesamt (2019) Bevölkerungsdaten.

¹⁸⁴ Alle Angaben aus 2015 Vgl. Bangel et al. (2017) Stadt, Land, Vorurteil.

¹⁸⁵ Vgl. United Nations Department for Economic & Social Affairs (2018) World Urbanization Prospects, S. 2.

¹⁸⁶ Alle Angaben aus 2015 Vgl. Radke (2017) Verkehr in Zahlen 17/18, S. 215.

Güterverkehr¹⁸⁷. Gebündelt ergibt sich in diesen beiden Kategorien eine Gesamtverkehrsleistung von 1.839 Milliarden Personen- und Tonnenkilometern in 2017¹⁸⁸.

Der Modal Split

Eine der wichtigsten Kenngrößen zur Beschreibung des Verkehrs ist der Modal Split. Dieser gibt wie in Kapitel 2.1 beschrieben, den prozentualen Anteil der Verkehrsmittel am Verkehrsaufkommen an.

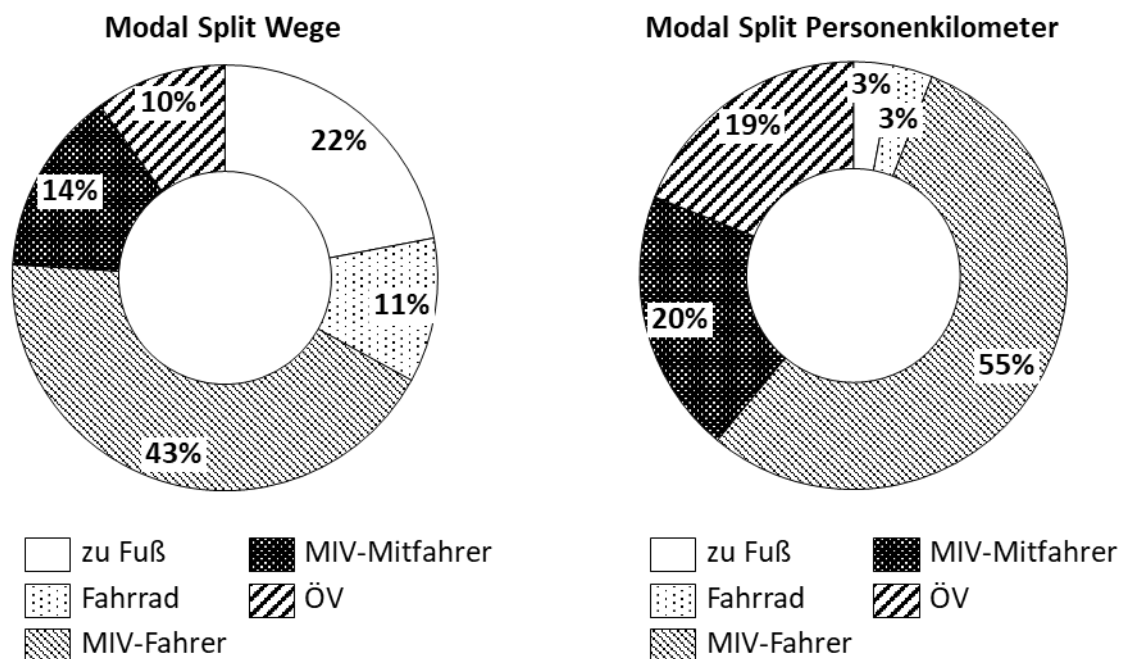


Abbildung 6-1 - Modal Split im Personenverkehr 2017¹⁸⁹

Teilt man den Modal Split nach Personenkilometern und Wegstrecken auf, so fällt auf, dass ca. 33 % der Wegstrecken durch Muskelkraft zurückgelegt werden, dies aber nur 6 % der gesamten Personenkilometer entspricht. Folglich werden meist kurz Wege mit dem Fahrrad oder zu Fuß zurückgelegt. Eine starke Veränderung des Modal Splits kann bei der Betrachtung verschiedener Raumtypen festgestellt werden. So steigt der Anteil des MIV mit abnehmender Bevölkerungsdichte an. Während in einer Metropole nur 38 % des Verkehrsaufkommens dem motorisierten Individualverkehr zufällt, liegt der Anteil der MIV-Fahrer und MIV-Mitfahrer im dörflichen Raum bei über 65 %.¹⁹⁰

¹⁸⁷ Vgl. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2019) Verkehr in Zahlen 18/19, 244f.

¹⁸⁸ Vgl. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2019) Verkehr in Zahlen 18/19, 152f.

¹⁸⁹ Vgl. Nobis et al. (2018) Mobilität in Deutschland - 2018, S. 53–54.

¹⁹⁰ Vgl. infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH (2019) Mobilität in Deutschland, S. 47–49.

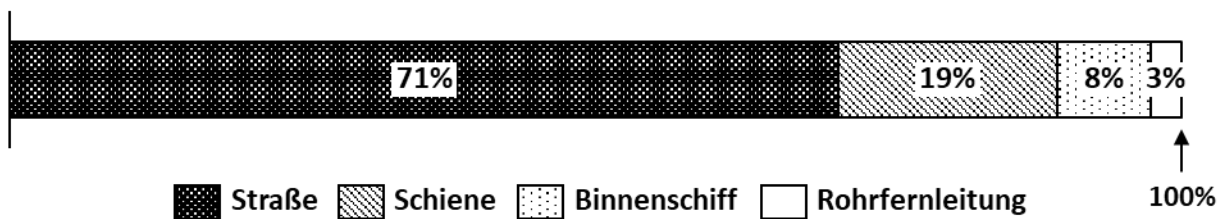


Abbildung 6-2 - Modal Split im Güterverkehr 2017¹⁹¹

In der Abbildung 6-2 ist der Modal Split des Güterverkehrs nach Tonnenkilometern aufgeteilt. Nicht aufgenommen wurden dabei die Luftfahrt und die Seeschifffahrt. Der Rahmen dieser Arbeit beschränkt sich auf den innerdeutschen Verkehr, in welchem die Luftfracht und Seeschifffahrt eine untergeordnete Rolle spielen¹⁹². Der Modal Split zeigt, dass es beim innerdeutschen Verkehr eine Übermachtstellung des Straßenverkehrs besteht¹⁹³.

Aufbau und Ergebnisse der Referenzstrecken

Der Aufbau der Referenzstrecken für den IST-Zustand wurde bereits in Kapitel 4.3 beschrieben und daher nicht weiter thematisiert.

Kennziffern Personenverkehr

In Deutschland leben rund 37 % der Menschen multimodal. Die häufigste Kombination besteht aus dem Auto als Grundverkehrsmittel und dann mit dem Fahrrad oder öffentlichen Verkehrsmitteln als Zusatz.¹⁹⁴ Der Anteil an multimodalen Personen variiert mit dem Alter der Personen. So ist bis zu einem Alter von 18 Jahren die Multimodalität der Normalfall. Danach nimmt der Anteil sukzessiv ab, bis dieser ab dem Renteneintritt wieder zunimmt. Wie bereits festgestellt, hängt die Wahl des Verkehrsmittels außerdem vom Raumtyp ab.

Im Zusammenhang mit den Verkehrsmittelkombinationen des multimodalen Verkehrs fällt auf, dass Fahrräder und der öffentliche Verkehr die häufigste Kombination sind. Insgesamt beinhalten 18 % der multimodalen Kombinationen den ÖV und 30 % das Fahrrad. Aufgrund ihrer gesteigerten Bewertung für den multimodalen Verkehr werden die beiden daher ausführlicher betrachtet.¹⁹⁵

Der öffentliche Personenverkehr hat im Jahr 2017 Einnahmen in der Höhe von 16,9 Mrd. Euro generiert.¹⁹⁶ Dies entspricht einem Anteil von 0,005 % des Bruttoinlandproduktes. Die Personenkilometer teilen sich dabei wie folgt auf die Sparten Bus (40 %), Tram (38 %) und

¹⁹¹ Vgl. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2019) Verkehr in Zahlen 18/19, S. 247.

¹⁹² Vgl. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2019) Verkehr in Zahlen 18/19, S. 247.

¹⁹³ Vgl. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2019) Verkehr in Zahlen 18/19, S. 247.

¹⁹⁴ Vgl. Nobis et al. (2018) Mobilität in Deutschland - 2018, S. 124.

¹⁹⁵ Vgl. infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH (2019) Mobilität in Deutschland, S. 56–58.

¹⁹⁶ Vgl. Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V. (VDV) (2017) VDV-Statistik 2017, S. 30.

Eisenbahn (22 %) auf. Insgesamt entspricht dies einem Anstieg an Personenkilometern im Vergleich zu 2016 um 1,4%.¹⁹⁷

Die Gründe für die Wahl des öffentlichen Verkehrs für einen Weg sind dabei unterschiedlich gemäß einer Umfrage von STATISTA. 51 % der befragten Personen geben an, dass sie den öffentlichen Personenverkehr nutzen, da dieser bequem ist. Weitere 48 % geben an diesen zu nutzen, da er die einzig umweltverträgliche Alternative darstellt. Weniger als ein Viertel hat angegeben, den öffentlichen Verkehr zu nutzen, da ihnen keine Alternative zur Verfügung steht.¹⁹⁸

In einer Umfrage der SPLENDID RESEARCH, welche 2000 Fahrgäste in den zehn größten deutschen Städten befragt hat, gaben die Befragten zu 71,6 % an mit dem Service und Angebot des örtlichen Verkehrsbetriebs zufrieden zu sein. Lediglich 28,5 % waren eher unzufrieden. Die Unzufriedenheit der befragten Personen begründete sich in der mangelnden Sicherheit an den Haltestelle, der unzureichenden Taktung und der fehlenden Pünktlichkeit beim ÖPNV.¹⁹⁹ Fraglich ist allerdings ob die Umfrage repräsentativ für Deutschland gilt, da wie oben bereits festgestellt, der ÖPNV in Metropolen wesentlich besser organisiert ist als im ländlichen Raum.

Die Fahrradbranche hat in Deutschland 2017 einen Umsatz von 2,9 Mrd. Euro generiert. Der Anstieg im Vergleich zu den Vorjahren begründet sich vor allem durch den Anstieg im Verkauf von E-Bikes. Im Jahr 2018 wurden ca. 1 Million E-Bikes verkauft²⁰⁰. In Zuge dessen erhöhte sich der Verkauf um 200.000 Fahrräder²⁰¹. Der durchschnittliche Verbrauch von E-Bikes beläuft sich auf 7 Wh/100km²⁰². Im Gegensatz zu anderen Ländern der Welt hat sich Bike-Sharing in Deutschland noch nicht durchgesetzt²⁰³. Insgesamt beläuft sich die Anzahl an Fahrrädern in Deutschland auf 72 Millionen Fahrräder²⁰⁴..

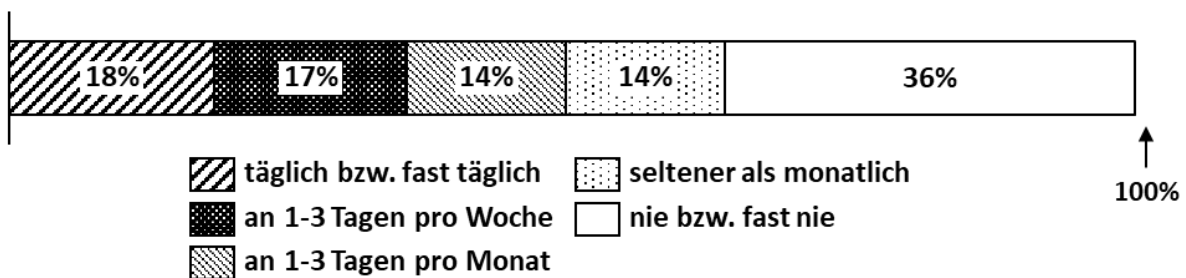


Abbildung 6-3 - Bevölkerung nach Häufigkeit der Fahrradnutzung 2017²⁰⁵

¹⁹⁷ Vgl. Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V. (VDV) (2017) VDV-Statistik 2017, S. 26–29.

¹⁹⁸ Vgl. Statista (2018) Statistiken zum ÖPNV in Deutschland, S. 13.

¹⁹⁹ Vgl. SPLENDID RESEARCH GmbH (2017) Studie: ÖPNV und Zufriedenheit, S. 4–11.

²⁰⁰ Vgl. Statista (2018) Absatz von E-Bikes.

²⁰¹ Vgl. ZIV (2019) Zahlen-Daten-Fakten zum Fahrradmarkt, S. 16.

²⁰² Annahme des Autors aus eigenen Messungen an mehreren E-Bikes.

²⁰³ Vgl. Mathias Brandt (2019) Bike-Sharing boomt.

²⁰⁴ Vgl. ZIV (2019) Zahlen-Daten-Fakten zum Fahrradmarkt, S. 20.

²⁰⁵ eigene Darstellung nach Vgl. infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH (2019) Mobilität in Deutschland, S. 92.

In Abbildung 6-3 ist die Häufigkeit der Fahrradnutzung dargestellt. Dabei fällt auf, dass nur ein kleiner Teil der Bevölkerung (35 %) sein Fahrrad regelmäßig (mehr als einmal pro Woche) benutzt.

Der intermodale Verkehr in Deutschland ist nicht weit verbreitet. In den meisten Fällen beschränkt er sich auf Routine-Wege. In der Umfrage MiD gaben 12 % der Befragten an, am Stichtag einen intermodalen Weg zurückgelegt zu haben²⁰⁶. Diese Zahl differiert stark nach verwendeter Definition der Intermodalität. In Abbildung 6-4 sind die Ergebnisse aufgeschlüsselt nach Definition dargestellt. Die Zahlengrundlage dafür bildet die Umfrage „Mobilität in Städten 2008“ mittels Stichprobe in Berlin.²⁰⁷

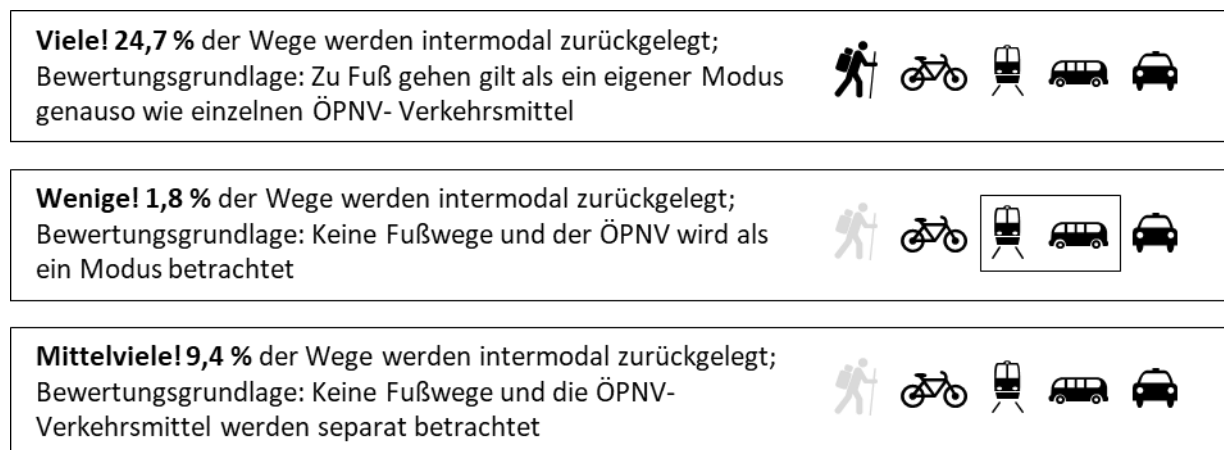


Abbildung 6-4 - Intermodalität? Eine Frage der Definition²⁰⁸

HEINRICHS et. al verweisen weiterhin auf mehrere Gründe, welche für einen multi- bzw. intermodalen Aufschwung sprechen. Neben der steigenden Anzahl an Angeboten, der pragmatischeren Verkehrsmittelwahl, erwähnen sie in diesem Zusammenhang auch die verbesserte Möglichkeit, sein Verkehrsmittel stationär zu wechseln. Zu diesen stationsbedingten Wechseln gehört auch die Integration von Bike-Sharing Diensten in Bahnhalttestellen.²⁰⁹

Allerdings besteht noch weiterer Verbesserungsbedarf. In einer Umfrage von HINE und SCOTT haben die Befragten angegeben, dass für sie die Pünktlichkeit und Abstimmung der Züge untereinander das größte Verbesserungspotenzial hat. Sie begründen dies mit der Hilflo-sigkeit als Passagier im Fall von Verspätungen. Weitere Verbesserungsgrößen sind akkurate, leicht zugängliche Informationen über Fahrpläne und Verspätungen sowie kurze Wege innerhalb der Stationen.²¹⁰

²⁰⁶ Vgl. Heinrichs et al. (2015) Mobilität zukünftig intermodal?, S. 18.

²⁰⁷ Vgl. Heinrichs et al. (2015) Mobilität zukünftig intermodal?

²⁰⁸ in Anlehnung an Heinrichs et al. (2015) Mobilität zukünftig intermodal?, S. 19.

²⁰⁹ Vgl. Heinrichs et al. (2015) Mobilität zukünftig intermodal?, S. 18.

²¹⁰ Vgl. Hine et al. (2000) Seamless, accessible travel, S. 225.

Die meisten intermodalen Wege beinhalten weiterhin den ÖPNV als Hauptverkehrsmittel (gemessen an den Personenkilometern). Kombinationen ohne den ÖPNV machen nur einen kleinen Teil der Wege aus.²¹¹

Der Wegezweck gibt an, warum eine Person einen räumlichen Wechsel vorgenommen hat.²¹² Die Wegezwecke werden aufgeteilt nach der Anzahl der Wege und den Personenkilometern. Bezogen auf die Personenkilometer, ist der häufigste Grund für die Zurücklegung von Wegen ist die Freizeit (35 %) gefolgt von dem Weg zur Arbeit (21 %) und dienstlichen Reisen (17 %).²¹³ Die Wegezwecke variieren über die Raumtypen nicht.²¹⁴

Kennziffern Güterverkehr

Unterteilt man den Straßengüterverkehr in den Nah- (bis 50 km), Regional- (51 bis 150 km) und Fernverkehr (über 150 km), fällt auf, dass der Nahverkehr nur einen Anteil von 10% an der Verkehrsleistung (bezogen auf Tkm), in Bezug auf das Verkehrsaufkommen (bezogen auf Tonnen) aber einen Anteil von ca. 51% hat.²¹⁵ Außerdem beginnen die Fahrten für den Regional- und Fernverkehr in oder im Umland der Städte und verursachen somit weitere Emissionen in den urbanen Regionen²¹⁶.

Im Güterverkehr ist die Intermodalität schon seit Ende des 19. Jahrhunderts Standard. Mit der Einführung des ISO-Containers wurde die Schifffahrt günstiger und effizienter²¹⁷. Dies führte zu einem rasanten Anstieg des Frachtvolumens und damit des gesamten Welthandels. Neben den ISO-Containern gibt es noch weitere Normungen im Güterverkehr, welche die Intermodalität fördern (z.B.: Euro-Paletten, Unit-Load-Devices)²¹⁸. Gerade im kombinierten Verkehr zwischen Schifffahrt, Zug und Straße zeigen sich die Einsparmöglichkeiten durch Verlagerungen des Gütertransports von der Straße auf Schiene oder Binnenschifffahrt. So wurden zwischen 1998 und 2010 rund 2 Mio. t CO₂ durch die Verlagerung auf die Schiene und die Binnenschifffahrt eingespart²¹⁹.

Die Logistikbranche ist der drittgrößte Industriezweig Deutschlands²²⁰. Die Kosten für einen Transportkilometer in dieser Branche betragen ca. 1,80 Euro. Der Hauptkostentreiber sind die Personalkosten mit einem Anteil von 55 %, gefolgt vom Treibstoffverbrauch mit 16 %.²²¹ Treibende Größe für die positive Entwicklung des Logistiksektors in den letzten Jahren war der steigende Umsatz im Bereich des E-Commerce. Besonders betroffen davon ist der KEP-

²¹¹ Vgl. Nobis et al. (2018) Mobilität in Deutschland - 2018, S. 57.

²¹² Vgl. Nobis et al. (2018) Mobilität in Deutschland - 2018, S. 61.

²¹³ Vgl. Nobis et al. (2018) Mobilität in Deutschland - 2018, S. 62.

²¹⁴ Vgl. Nobis et al. (2018) Mobilität in Deutschland - 2018, S. 63.

²¹⁵ Alle Werte aus 2016 und bezogen auf den gesamten Straßenverkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge Vgl. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2019) Verkehr in Zahlen 18/19, 243, 247.

²¹⁶ Vgl. Müller et al. (2006) Güterverkehr in der Stadt, S. 2.

²¹⁷ Vgl. Levinson (2016) The box, S. 2.

²¹⁸ Vgl. Levinson (2016) The box, S. 3–6.

²¹⁹ Vgl. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2018) Kombinierte Verkehr, S. 1.

²²⁰ Vgl. Statista Studien zur Transport- und Logistikbranche, S. 19.

²²¹ Vgl. EHI Retail Institute e. V (2019) Transport in der Handelslogistik.

Markt.²²² KEP steht in diesem Zusammenhang für den Kurier-, Express- und Paketmarkt, welcher ein Teilmarkt der Logistik ist. Bei den Waren des KEP handelt es sich um Stückgut mit einem relativ geringen Gewicht.²²³ Im Jahr 2017 wurden 3.350 Millionen Sendungen im KEP-Markt versendet²²⁴.

Die typische Verkehrsmittelkombination im KEP besteht aus dem gebündelten Transport der Sendungen zu einem Umschlagspunkt in räumlicher Nähe zum Zielort (Hauptlauf). An diesem werden die Pakete in kleinere Fahrzeuge geladen und zum Zustellort transportiert (Nachlauf).²²⁵ In urbanen Gebieten kann dieser Lieferverkehr oft nur in der zweiten Reihe anhalten und vermindert dadurch den Verkehrsfluss und die Verkehrssicherheit²²⁶.

Die Zusammensetzung der Fahrzeugkategorien

In Deutschland gab es zum 1. Januar 2019 57,3 Millionen Kraftfahrzeuge. Diese teilen sich auf in Personenkraftwagen (Pkw), Krafträdern, Omnibusse und Zugmaschinen. Insgesamt sind in Deutschland 47 Millionen Pkw zugelassen. Das entspricht einer Fahrzeugdichte von 581 Pkw je 1.000 Einwohner. Zusätzlich sind 4,4 Millionen Krafträder in Deutschland zugelassen.²²⁷

Von den 47 Millionen Pkw werden 98,10% der Fahrzeuge konventionell, d.h. mit Benzin oder Diesel betrieben. Nur 0,18 % aller Pkw fahren rein elektrisch, weitere 0,72 % aller Fahrzeuge sind Hybrid-Kfz und 0,14 % Plug-in Hybride.²²⁸

Im Bereich der Nutzfahrzeuge sind 5,9 Millionen Fahrzeuge registriert. Diese teilen sich in Lastkraftwagen, Sattelzugmaschinen und Kraftomnibusse auf.²²⁹ Eine Unterteilung nach Kraftstoffarten liegt nur für die Lastkraftwagen und Kraftomnibusse vor. Sowohl bei den Lastkraftwagen (94 %) als auch den Kraftomnibussen (91 %) dominiert der Anteil an Diesel betriebenen Fahrzeugen. Elektro-Fahrzeuge spielen bei den Nutzfahrzeugen bisher keine Rolle.

Im Schienenverkehr lässt sich die Zusammensetzung der Fahrzeuge nicht klar feststellen. Aussagen lassen sich allerdings über den Anteil elektrifizierter Strecken treffen. In Deutschland sind aktuell ca. 60% der Strecken elektrifiziert.²³⁰ Im Schienennahverkehr sind 76 % der Fahrzeuge mit einem elektrischen Antrieb ausgestattet²³¹.

²²² Vgl. KE-CONSULT Kurte&Esser GbR (2018) KEP-Studie 2018 – Analyse, 11f.

²²³ Vgl. Krieger (2018) KEP-Dienst.

²²⁴ Vgl. KE-CONSULT Kurte&Esser GbR (2018) KEP-Studie 2018 – Analyse, S. 13.

²²⁵ Vgl. Gudehus (2012) Logistik 2, S. 987.

²²⁶ Vgl. Böhl et al. (2014) Forschungsprojekt Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Städtischer Liefer- und Ladeverkehr, S. 7.

²²⁷ Vgl. Kraftfahrt-Bundesamt (2019) Jahresbilanz des Fahrzeugbestandes 2019.

²²⁸ Vgl. Kraftfahrt-Bundesamt (2019) Jahresbilanz des Fahrzeugbestandes 2019.

²²⁹ Vgl. Kraftfahrt-Bundesamt (2019) Jahresbilanz des Fahrzeugbestandes 2019.

²³⁰ Vgl. Deutscher Bundestag WD 5: Wirtschaft und Verkehr et al. (2018) Elektrifizierungsgrad der Schieneninfrastruktur, S. 4–5.

²³¹ Vgl. Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V. (VDV) (2017) VDV-Statistik 2017, S. 45.

Vornehmlich auf Nebenstrecken werden weiterhin Dieselfahrzeuge und in Pilotprojekten bereits hybride Antriebskonzepte genutzt²³².

Im Jahr 2016 gab es weltweit insgesamt 23,4 Tsd. kommerzielle Flugzeuge. Von diesen gehören 995 deutschen Luftfahrtunternehmen.²³³ Betrieben werden die Flugzeuge mit Kerosin, wobei in den letzten Jahren der Anteil an synthetischen Kraftstoffen weiter zu genommen hat²³⁴. Flugzeuge mit Elektroantrieben oder alternativen Antrieben sind aktuell in der Entwicklung.

Die Binnenschiffsfahrt wird unterteilt in die Funktion der verschiedenen Schiffe. Insgesamt gibt es 1,5 Tsd. deutsche Binnenschiffe (31. Dezember 2017), welche ein durchschnittliches Alter von 40 Jahren aufweisen. Diese unterteilen sich in Tageausflugschiffe, Schubboote, Schlepper, Bunkerboote, Fahrgastkabinenschiffe. Diese Schiffe werden meist mit Dieselmotoren betrieben, wobei bei neueren Schiffen eine Kombination aus Elektro- und Dieselantrieb verwendet wird²³⁵.

Ökologische Daten

Übersicht über die ökologischen Daten der betrachteten Fahrzeuge. Alle Daten der Tabelle 6-1 beziehen sich auf das Jahr 2017 und wurden zu einem Großteil aus den Emissionsdaten des Umweltbundesamtes bzw. des Analyse-Tools TREMOD gewonnen.

Tabelle 6-1 - Ökologische Daten des Personenverkehrs (Teil 1)²³⁶

Verkehrsmittel	THG	Feinstaub	Stickoxide	Energieverbrauch
Bus	75,00	0,002	0,28	1,00
Zug – Fernverkehr	36,00	0,000	0,04	0,50
Zug - Nahverkehr	60,00	0,002	0,18	0,85
U-Bahn	64,00	0,000	0,06	0,90
Tram	64,00	0,000	0,06	0,90
Einheit	<i>g/Pkm</i>	<i>g/Pkm</i>	<i>g/Pkm</i>	<i>MJ/Pkm</i>

²³² Vgl. Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen (2017) Marktuntersuchung Eisenbahn 2017, S. 32–33.

²³³ Vgl. Boeing (2017) Current market outlook, S. 4–21.

²³⁴ Vgl. Zech et al. (2015) Biokerosin und EE-Kerosin, S. 8–11.

²³⁵ Vgl. Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (2012) Binnenschiffe, S. 2.

²³⁶ Vgl. Umweltbundesamt (2018) Emissionsdaten,

Tabelle 6-2 - Ökologische Daten des Personenverkehrs (Teil 2) ²³⁷

Verkehrsmittel	THG	Feinstaub	Stickoxide	Energieverbrauch
E-Bike	3,66 ²³⁸	0,000	0,03	0,03
Fahrrad	0,00	0,000	0,00	0,00
zu Fuß	0,00	0,000	0,00	0,00
MIV	139,00	0,004	0,34	1,90
Flugzeug	201,00 ²³⁹	0,004	0,51	1,50
Einheit	<i>g/Pkm</i>	<i>g/Pkm</i>	<i>g/Pkm</i>	<i>MJ/Pkm</i>

Für alle Verkehrsmittel wird der Abrieb, welcher durch die Abrollbewegungen der Reifen auf dem Boden erfolgt, nicht in der Berechnung des Feinstaubes berücksichtigt.

Tabelle 6-3 - Ökologische Daten des Güterverkehrs²⁴⁰

Verkehrsmittel	THG	Feinstaub	Stickoxide	Energieverbrauch
Lkw	103,00	0,003	0,22	1,40
Güterbahn	20,00	0,001	0,07	0,02
Binnenschiffe	32,00	0,010	0,41	0,40
Leichte Nutzfahrzeuge ²⁴¹	662,50	0,020	1,39	9,00
Einheit	<i>g/Tkm</i>	<i>g/Tkm</i>	<i>g/Tkm</i>	<i>MJ/Tkm</i>

Der Wert für leichte Nutzfahrzeuge ergibt sich mit den für Deutschland verfügbaren spezifischen Flottenemissionen von 175 *g CO_{2-eq}/Fzg.-Km* aus dem Jahr 2017. Bezogen auf

²³⁷ Vgl. Umweltbundesamt (2018) Emissionsdaten,

²³⁸ Eigene Berechnung auf Basis des aktuellen Strommix (spezifischer Emissionsfaktor) und des durchschnittlichen Verbrauchs eines E-Bikes.

²³⁹ Der EWF = Emission Weighting Factor (2) wurde für den Luftverkehr berücksichtigt.

²⁴⁰ Vgl. Umweltbundesamt (2018) Emissionsdaten,

²⁴¹ Vgl. Umweltbundesamt Österreich (2018) Emissionskennzahlen Datenbasis 2017, S. 1.

Tonnenkilometer liegt dieser Wert nicht vor und muss daher berechnet werden. Im ersten Schritt wird der spezifische Wert pro Fahrzeugkilometer durch die Auslastung von $0,33 \text{ t/Fzg.}$ dividiert., wodurch sich ein spezifischer Verbrauch von $530 \text{ g CO}_2\text{-eq/Tkm}$ ergibt. Die spezifischen Emissionen je Tonnenkilometer müssen nun an die anderen Werte angeglichen werden, da es sich bei diesen um Realemissionen handelt. Dafür wird dieser mit dem Abweichungsfaktor zwischen Realverbrauch und WLTP-Zyklus (1,25) angepasst²⁴². Dadurch ergeben sich die spezifischen Emissionen von leichten Nutzfahrzeugen zu $662,5 \text{ g CO}_2\text{-eq/Tkm}$.

Ökonomische Daten

Insgesamt belaufen sich die Staukosten im Jahr 2017 auf mehr als 80 Milliarden Euro. Dies entspricht durchschnittlichen Kosten für jeden deutschen Autofahrer von 1.770 Euro pro Jahr.²⁴³ In diesen Werten sind die Kosten, welche durch verspätete Waren entstehen indirekt mit betrachtet, d.h. sie werden von den Unternehmen auf die Haushalte umgewälzt²⁴⁴.

Die Infrastrukturinvestitionen belaufen sich im Jahr 2017 auf insgesamt 27,9 Mrd. Euro und teilen sich gem. Abbildung 6-5 auf.

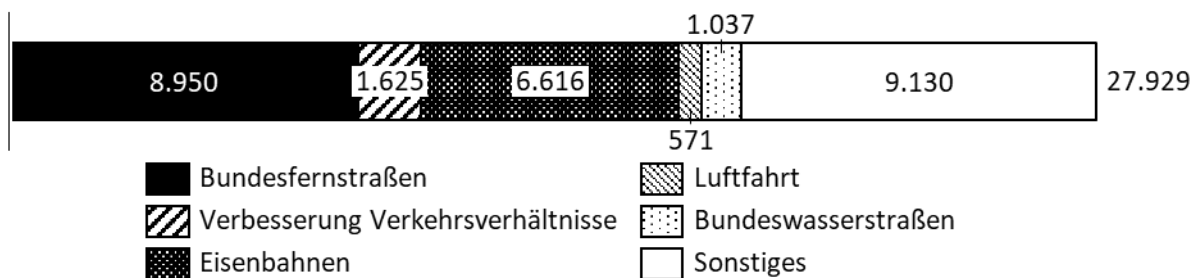


Abbildung 6-5 - Ausgaben für den Verkehr in Mio. Euro

Soziale Daten

Unabhängig von den Referenzstrecken wird im Rahmen dieser Arbeit eine Kategorie Sicherheit mit in die Betrachtung einbezogen. Für diese wird das Unfallrisiko je Verkehrsmittel für Personen- und Güterverkehr berechnet.

²⁴² Vgl. Adolf et al. (2016) SHELL Nutzfahrzeug-Studie: Diesel, alternative Antriebe, S. 53.

²⁴³ Vgl. Cookson (2018) Inrix Global Traffic Scorecard, S. 34.

²⁴⁴ Vgl. Cookson (2018) Inrix Global Traffic Scorecard, S. 7.

Tabelle 6-4 - Soziale Daten des Personenverkehrs²⁴⁵

Verkehrsmittel	Unfallrisiko ²⁴⁶
Bus	0,80
Zug – Fernverkehr	0,80
Zug - Nahverkehr	0,80
U-Bahn ²⁴⁷	0,80
Tram	1,70
E-Bike	9,30
Fahrrad	9,30
zu Fuß	14,20
MIV	2,20
Flugzeug	0,30
Einheit	Unfälle pro 10 ⁹ Pkm

Bei der Ermittlung des Unfallrisikos gibt es große Diskrepanzen zwischen den verschiedenen Studien (vgl. ADAC, ALLIANZ PRO SCHIENE)²⁴⁸. Dies begründet sich in den unterschiedlichen Berechnungsgrundlagen. Das Bundesamt für Statistik empfiehlt daher, die Anzahl der im Verkehr getöteten Personen durch die Verkehrsleistung zu teilen²⁴⁹. Dieses Vorgehen wurde hier adaptiert. Die zugrunde liegenden Daten und die jeweiligen Quellen werden im Anhang Tabelle A-2 dargestellt. Die Werte für den Personen- sowie Radverkehr erscheinen sehr hoch, sind aber durch die geringe Anzahl an Personenkilometern und die häufigen Beteiligungen in Verkehrsunfällen mit anderen Verkehrsmitteln zu erklären.

²⁴⁵ Vgl. Schönfelder (2018) Verkehrsbild Deutschland, S. 11–20, Vgl. Kraftfahrt-Bundesamt (2019) Jahresbilanz des Fahrzeugbestandes 2019,

²⁴⁶ eigene Berechnung siehe Anhang Tabelle A-2.

²⁴⁷ Eigene Annahme: Wird mit dem Unfallrisiko im Zug-Fernverkehr gleichgesetzt.

²⁴⁸ Vgl. Dr. Andreas Geißler (2010) Mit Sicherheit Bahn., Vgl. Wolfgang Steichele (2016) Aktuelles aus dem Verkehr

²⁴⁹ Vgl. Statistisches Bundesamt Verkehrsunfälle.

Tabelle 6-5 - Soziale Daten des Güterverkehrs

Verkehrsmittel	Unfallrisiko ²⁵⁰
Lkw	0,30
Güterbahn	0,80
Leichte Nutzfahrzeuge ²⁵¹	0,30
Einheit	Unfall pro 10 ⁹ Tkm

Zur Berechnung der Transportkosten werden für die öffentlichen Verkehrsmittel die realen Ticketpreise verwendet. Für den MIV werden die „Total-Costs of Ownership“ (TCO) verwendet. Diese TCO-Werte für den MIV werden je Antriebstechnologie aus KREYENBERG übernommen und mit Hilfe der Zusammensetzung des MIVs (nach Antriebsarten) auf einen allokierten Wert reduziert. Dieser beträgt für 2017: 0,30 Euro pro Personenkilometer²⁵².

Die Kosten für den öffentlichen Personenverkehr werden, wenn möglich, direkt über das Portal der deutschen Bahn bestimmt. Ist dies nicht möglich, werden für den ÖPNV die durchschnittlichen Kosten für eine Monatskarte mit angenommenen 40 Fahrten pro Monat verwendet. Der durchschnittliche Preis für eine Monatskarte wurde dem ADAC „Preisvergleich 2019“ entnommen²⁵³. Werte für 2017 (Bezugsjahr) liegen nicht vor. Eine Besonderheit stellt der Zug-Nah- und Zug-Fernverkehr dar, da diese Werte nicht in der ADAC-Studie aufgegriffen werden. Für den Zug-Fernverkehr wird, sollten die Daten nicht zur Verfügung stehen, der durchschnittliche Kaufpreis eine Woche vor Fahrtantritt angesetzt²⁵⁴.

Im Güterverkehr sind der Kosten pro Tonnenkilometer in RENEWBILITY angegeben²⁵⁵. Da die Daten für 2017 nicht verfügbar sind, werden sie bis 2050 mit den Werten von 2010 gleichgesetzt. Diese ergeben sich daher wie folgt: für die Schiene – 0,06 EUR/Tkm, die Straße – 0,12 EUR/Tkm und die Binnenschifffahrt – 0,02 EUR/Tkm²⁵⁶. Daten für leichte Nutzfahrzeuge wurden aus HACKER et al. entnommen. In HACKER et al. wurden die TCO-Kosten für mehrere Nutzungsfälle berechnet. Im Rahmen dieser Arbeit werden diese gemittelt. Dadurch ergibt

²⁵⁰ Eigene Berechnung siehe Anhang (Tabelle A-2). Die Werte für den Luftverkehr wurden aufgrund fehlender Daten für den Güterverkehr aus dem Personenverkehr übernommen. Für die Binnenschifffahrt sind keine Werte verfügbar.

²⁵¹ Eine Differenzierung zwischen Lkw und leichten Nutzfahrzeugen liegt in der Datenbank des Bundesministeriums für Verkehr nicht vor. Daher wurden die beiden Werte gleichgesetzt.

²⁵² Vgl. Kreyenberg (2016) Fahrzeugantriebe Elektromobilität, S. 103.

²⁵³ Vgl. ADAC e.V. (2019) ADAC Preisvergleich: Tickets ÖPNV.

²⁵⁴ Vgl. European Commission Directorate General for Mobility and Transport (2016) Study on the prices and quality of rail passenger services, S. 73.

²⁵⁵ Vgl. Zimmer et al. (2016) Renewability III Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors, S. 157.

²⁵⁶ Vgl. Zimmer et al. (2016) Renewability III Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors, S. 157.

sich für die TCO eines leichten Nutzfahrzeugs ein Wert von 0,83 EUR/Tkm.²⁵⁷ Die deutlich teuren Kosten pro Tkm (im Vergleich zum Lkw) lassen sich durch die geringe Auslastung bei nahezu identischer Kostenstruktur zurückführen.

6.2 Prognose-Phase

Die Prognose-Phase schließt inhaltlich an die Analyse-Phase an und beschäftigt sich mit der Ableitung von Trends in den Betrachtungsfeldern. Wenn ein Trend eine disruptive Wirkung für unsere Gesellschaft hat, d.h. er fundamentale Auswirkungen auf Angebot und Nachfrage nach einer spezifischen Leistung bzw. einem spezifischen Produkt hat, spricht man von einem Megatrend²⁵⁸. Im Folgenden werden die Megatrends im Bereich der Mobilität, sowie einigen Bereichen, welche auf diese einwirken, vorgestellt.

Die Auswahl der Megatrends orientierte sich dabei an bereits veröffentlichten Studien zum Thema „Mobilität von morgen“. Zu diesen zählen:

- „Die Evolution der Mobilität“ (2017)²⁵⁹ – Eine Studie des Zukunftsinstituts im Auftrag des ADAC e.V.
- „An integrated perspective on the future of mobility Part: 1-3“ (2016-2019)²⁶⁰ – McKinsey & Company
- „The Future of Mobility 3.0“ (2018)²⁶¹ – Arthur D. Little in Zusammenarbeit mit UITP
- „ZF-Zukunftsstudie – Die letzte Meile“ (2016)²⁶² – ZF Friedrichshafen in Kooperation mit Fraunhofer IML

6.2.1 Megatrends mit Auswirkungen auf die Mobilität

Urbanisierung

Bereits heute leben 75,3% der deutschen Bevölkerung in Städten (vgl. Kapitel 6.1.2). Laut UN wird sich dieser Trend noch weiter verstärken, so dass 2050 2,5 Milliarden Menschen weltweit mehr in Städten leben werden²⁶³. Weltweit wird mehr als 60 % des BIPs in Städten produziert²⁶⁴.

Ein erhöhter Urbanisierungsgrad führt in der Regel durch mehr Stadtbewohner zu einem erhöhten Verkehrsaufkommen innerhalb der Städte. Bereits heute ist, wie in Kapitel 6.1.2

²⁵⁷ Vgl. Hacker et al. (2015) Wirtschaftlichkeit von Elektromobilität in gewerblichen Anwendungen, S. 72–77.

²⁵⁸ Vgl. Horx (2014) Das Megatrend-Prinzip, S. 8.

²⁵⁹ Vgl. Zukunftsinstitut GmbH (2017) Die Evolution der Mobilität.

²⁶⁰ Vgl. Bouton et al. (2017) future of mobility, part 2 ;Vgl. McKerracher et al. (2016) An integrated perspective on the future of mobility ;Vgl. Hannon et al. (2019) An integrated perspective on the future of mobility, part 3.

²⁶¹ Vgl. François-Joseph Van Audenhove, Guillaume Rominger, Guillaume Rominger, Aurelia Bettati, Nicolas Stey-lemans, Michael Zintel, Andrew Smith, Sylvain Haon (2018) The Future of Mobility 3.0.

²⁶² Vgl. Uwe Clausen, Sebastian Stütz, Arnd Bernsmann, Hilmar Heinrichmeyer (2016) ZF-Zukunftstudie 2016.

²⁶³ Vgl. United Nations Department for Economic & Social Affairs (2018) World Urbanization Prospects, S. 2.

²⁶⁴ Vgl. McKinsey&Company (2011) Urban world, S. 1.

gezeigt, das Verkehrsaufkommen in deutschen Städten sehr hoch. Dieses Problem wird sich durch eine zunehmende Urbanisierung ausweiten.

Durch das erhöhte Verkehrsaufkommen steigen außerdem die lokalen Feinstaub- und Lärmemissionen in den Städten. Diese verursachen wiederum erhöhte Gesundheitskosten. Außerdem dürften Transitzeiten durch mehr und längere Staus ansteigen.

Individualisierung

Durch die zunehmende Digitalisierung und Verknüpfung der Gesellschaft, entsteht eine Vielzahl an neuen Lebensstilen und -mustern. Diese führen zu einem Wechsel von „Biografien“ zu „Multigrafien“. „Multigrafien“ beschreiben Lebensverläufe mit einer erhöhten Komplexität und einer Vielzahl an verschiedenen Phasen.²⁶⁵

Unterschiedliche Lebensphasen führen zu variierenden Ansprüchen der Individuen an ihre persönliche Mobilität. Um diesen zu entsprechen, müssen auch die Mobilitätsdienstleistungen flexibler und besser anpassbar werden. Es reicht nicht, Mobilitätsdienstleistungen an Personengruppen anzupassen, vielmehr ist eine Individualisierung auf jede Person notwendig.²⁶⁶

Für den Mobilitätssektor bedeutet dies eine Diversifizierung des Modal Shift hin zu variableren, zeitlich flexibleren und intelligenteren Angeboten. Weiterhin steigt die Kundenerwartung an die Angebote²⁶⁷. Die flexibleren Angebote werden durch die neuen Lebensstile hinzu einer diversifizierten Gesellschaft notwendig, während intelligente Angebote sich schneller an die Bedürfnisse der Menschen anpassen können.

New Work

Digitalisierung und vor allem intelligente Computersysteme erledigen Routinearbeiten besser als Menschen. Die Frage nach dem Sinn der Arbeit wird gestellt. Das ZUKUNFTSINSTITUT beschreibt New Work daher wie folgt:

„New Work beschreibt einen epochalen Umbruch, der mit der Sinnfrage beginnt und die Arbeitswelt von Grund auf umformt. Das Zeitalter der Kreativökonomie ist angebrochen [...]“²⁶⁸

Folge der Kreativitätsökonomie ist u.a. die Umgestaltung des Arbeitslebens. Klassische Arbeitsgestaltung mit Arbeitszeiten von 9 bis 17 Uhr sind nachweislich nicht kreativitätsfördernd²⁶⁹. Im Jahr 2050 werden die Menschen daher mehr von zu Hause arbeiten und ihre Arbeit selbst einteilen. Dazu gehört auch eine flexiblere Gestaltung des Alltags.

Die Auswirkungen auf die Mobilität lassen sich nur schwer quantifizieren. Sicher ist, dass die Nachfrage nach Mobilität individueller wird. Die Arbeitnehmer möchten außerdem effizient und

²⁶⁵ Vgl. Zukunftsinstitut GmbH (2017) Die Evolution der Mobilität, S. 17.

²⁶⁶ Vgl. Zukunftsinstitut GmbH (2017) Die Evolution der Mobilität, S. 18.

²⁶⁷ Vgl. Kölmel et al. (2019) Mega-Trend Individualisierung, S. 244.

²⁶⁸ Vgl. Zukunftsinstitut GmbH Megatrend New Work.

²⁶⁹ Vgl. Krause (2013) Kreativität, Innovation, Entrepreneurship, S. 114.

unkompliziert zu ihrer Arbeitsstätte gelangen. Am liebsten würden sie die Zeit produktiv nutzen.²⁷⁰ Eine Folge der Individualisierung dürfte eine Entzerrung der Rush-Hour sein.

Silver Society – demographischer Wandel

Bereits heute zeichnet sich die Bevölkerungsentwicklung in den nächsten Jahrzehnten ab. Im Jahr 2030 werden in Deutschland rund 5,7 % weniger Menschen leben, wobei der Rückgang auf Kinder und Jugendlichen (-17 %) sowie Personen im erwerbsfähigen Alter (-15 %) zurück zu führen ist. Im Gegensatz dazu wächst der Anteil an Älteren (>65 Jahren) um 33 %.²⁷¹ Zeitgleich verändert sich das Bild über ältere Generationen zunehmend. Die „neuen Alten“ sind reiselustiger, sozialer und mobiler, dadurch leisten sie ihren eigenen Beitrag zur Gesellschaft.²⁷²

Die „neuen Alten“ werden in den nächsten Jahrzehnten die größte Bevölkerungsgruppe bilden. Dementsprechend muss die Mobilität von morgen auf deren Bedürfnisse ausgerichtet werden. Dies erfordert entsprechende Anpassungen und auch neue Mobilitätsformen.

6.2.2 Megatrends im Bereich der Mobilität

Sharing Economy

Die Sharing Economy hat ihren Ursprung in der zunehmenden technologischen Vernetzung. Bewährte Hierarchien werden durch neue Arbeits- und Communitykonzepte ersetzt. Die Grundidee hinter den „Sharing“-Gedanken ist die höhere Ausnutzung der Güter und somit geringere Kosten.

Anwendungsgegenstände, Autos, Fahrräder, Immobilien und Politik kollektives Besitzen wird immer präsenter²⁷³. In der Mobilität gehört in diese Kategorie neben dem Car Sharing und Bike Sharing weiterhin Ride Haling und Ride Sharing Dienste²⁷⁴. Beim Ride Sharing wird eine an sich private Fahrt öffentlich gemacht, so dass weitere Nutzer mit gleichem Fahrtziel mitfahren können. Beim Ride Haling fragen die Nutzer eine Fahrt bei einem Anbieter nach und werden auf der Strecke mit anderen Nutzern gepoolt.²⁷⁵

Insgesamt gehen die Analysten von DELOITTE von einem deutschlandweiten Wachstum im Car Sharing Markt auf 3,1 Millionen Nutzer im Jahr 2020 aus²⁷⁶. Aktuell nutzen 2,5 Mio. Menschen Car Sharing. In Deutschland existieren 20 Tsd. Car Sharing Fahrzeuge²⁷⁷. Der Bike

²⁷⁰ Vgl. Zukunftsinstitut GmbH (2017) Die Evolution der Mobilität, S. 21.

²⁷¹ Vgl. Statistische Ämter des Bundes und der Länder (2011) Demografischer Wandel in Deutschland, S. 8.

²⁷² Vgl. Cesinger et al. (2015) Die "Silver Society", S. 9–11.

²⁷³ Vgl. Pollozek et al. (2015) Die neue Wir-Kultur, S. 6.

²⁷⁴ Vgl. Münzel et al. (2018) Carsharing business models in Germany, S. 272.

²⁷⁵ Vgl. Münzel et al. (2018) Carsharing business models in Germany, S. 272.

²⁷⁶ Vgl. Schiller et al. (2017) Car Sharing in Europa, S. 2.

²⁷⁷ Vgl. Bundesverband CarSharing (2019) Datenblatt CarSharing Deutschland, S. 1.

Sharing Markt wächst seit mehreren Jahren mit ca. 30 % und wird dies in den nächsten Jahren fortsetzen²⁷⁸.

Laut LOOSE substituiert ein Car Sharing-Auto im Zentrum einer Großstadt bis zu 20 Fahrzeuge²⁷⁹. Eine weitere niederländische Studie kommt zu dem Ergebnis, dass Car Sharing Nutzer ca. 15-20 % weniger Kilometer fahren, als vergleichbare Autonutzer²⁸⁰. Gemäß CHEN et al. produzieren Car Sharing Nutzer 51 % weniger Treibhausgase und verbrauchen ebenso viel weniger Energie²⁸¹. Beim Bike Sharing gibt es vergleichbare Studien bisher nicht, jedoch kann davon ausgegangen werden, dass durch jede zusätzliche Fahrradfahrt, Fahrten mit anderen umweltschädlicheren Verkehrsmitteln eingespart werden können.

Postfossile, klimaneutrale Mobilität

Norwegen plant bereits für das Jahr 2025 keine weiteren Neuwagen mit konventionellen Verbrennungsmotoren zuzulassen²⁸². Dies wird langfristig auch in Deutschland geschehen. Laut einer Studie von Shell Deutschland werden 2040 ca. 50 % aller Pkw mit alternativen Antrieben ausgestattet sein²⁸³.

Für die Mobilität bedeutet dies Veränderungen in den Fahrzyklen durch längere Wartezeiten zum Nachladen (BEV) und veränderte Reichweiten. Weiterhin werden die Luftemissionen aus den Innenstädten zu den Kraftwerken verschoben. Die ökologische Effizienz von alternativen Fahrzeugkonzepten hängt hauptsächlich vom verwendeten Strommix ab.²⁸⁴

Neben dem Straßenpersonenverkehr werden auch im Straßengüterverkehr Forschungsvorhaben zur Reduzierung von Emissionen gestartet.²⁸⁵ Zu diesen zählen u.a. Oberleitungs-Lkws und elektrisch angetriebene Nutzfahrzeuge für kürzere Distanzen. Im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugantrieben stoßen diese keine Emissionen aus.

Neben dem Straßenverkehr, wird auch im Luftverkehr an einer emissionslosen Fortbewegung geforscht (z.B.: Airbus E-Fan X)²⁸⁶. Laut Experten von Roland Berger gibt es 2019 rund 100 Entwicklungsprogramme in diesem Bereich²⁸⁷. Die Entwicklung von hybriden Flugzeugen mit konventionellem und elektrischem Antrieb wird auf lange Sicht gesehen zu rein elektrischen Flugzeugen führen²⁸⁸. Diese Entwicklung wird im Einklang mit der Batteriezellenentwicklung vorangehen²⁸⁹.

²⁷⁸ Vgl. Schönberg et al. (2018) Bike Sharing 5.0, S. 1.

²⁷⁹ Vgl. Loose (2016) Mehr Platz zum Leben, S. 25.

²⁸⁰ Vgl. Nijland et al. (2017) Mobility and environmental impacts of car sharing in the Netherlands, S. 84–91.

²⁸¹ Vgl. Chen et al. (2016) Carsharing's life-cycle, S. 276.

²⁸² Vgl. Zukunftsinstitut GmbH (2017) Die Evolution der Mobilität, S. 25.

²⁸³ Vgl. Adolf. Jörg et al. (2014) Shell PKW-Szenarien bis 2040, S. 62–63.

²⁸⁴ Vgl. Europäisches Parlament (2019) CO₂-Emissionen von Autos.

²⁸⁵ Vgl. Kühnel et al. (2018) Oberleitungs-Lkw im Kontext, S. 27.

²⁸⁶ Vgl. Spinnler (2019) Tanken Flieger künftig Strom?

²⁸⁷ Vgl. Thomson et al. (2018) Aircraft electrical propulsion, S. 15–16.

²⁸⁸ Vgl. Spinnler (2019) Tanken Flieger künftig Strom?

²⁸⁹ Vgl. Thomson et al. (2018) Aircraft electrical propulsion, S. 6.

Autonomes Fahren

Autonome Fahrzeuge werden unterteilt in:²⁹⁰

- **Stufe 0 - händisch**

Alle Fahrfunktionen des Fahrzeuges werden manuell vom Fahrzeugführer durchgeführt.

- **Stufe 1 - assistiert**

Fahrassistenzsysteme, wie ABS (Antiblockiersystem) und ESP (Elektronisches Stabilitäts-Programm) erhöhen die Fahrsicherheit und erleichtern das Fahren. Stufe eins ist in nahezu allen aktuellen Wagen vorhanden.

- **Stufe 2 – teilautomatisiert**

Weiterentwickelte Fahrassistenten, die einfache Situationen beherrschen (z.B.: Tesla Model 3). Der Fahrer trägt während der Fahrt die komplette Verantwortung und muss seine Hände am Lenkrad halten.

- **Stufe 3 – hochautomatisiert**

Im Unterschied zu Stufe 2 trägt der Fahrer keine Verantwortung mehr. Das Auto übernimmt das Fahrgeschehen für einfache Umweltzustände und übergibt in Gefahrensituation das Fahrzeug an den Fahrer. Dieser muss das Verkehrsgeschehen nicht durchgängig beobachten.

- **Stufe 4 – vollautomatisiert**

Beim vollautomatisierten Fahren darf der Fahrer während der Fahrt schlafen oder sonstige komplett abweichenden Tätigkeiten vornehmen. In Ausnahmefällen übergibt der Autopilot den Wagen weiterhin an den Fahrer, fährt dafür allerdings an den Fahrbahnrand und hält an.

- **Stufe 5 – fahrerlos**

Die letzte Evolutionsstufe des autonomen Fahrens ist das fahrerlose Auto. Der Wagen hält sich eigenständig an die Verkehrsregeln und kann ohne Fahrer auskommen.

Wenn im allgemeinen Sprachgebrauch von autonomen Fahrzeugen gesprochen wird, ist die Stufe 5 gemeint²⁹¹. Die Stufen 3 - 5 stellen eine Evolution der bisherigen autonomen Mobilität dar. Vorteile des autonomen Fahrens liegen u.a. in dem Gewinn der Fahrzeit als produktive Zeit, der geringeren Anzahl an Unfällen, geringeren Kosten und geringeren Emissionen²⁹². Demgegenüber stehen mögliche negative Entwicklungen, wie ein erhöhtes Verkehrsaufkommen, mehr motorisierten Individualverkehr und einen insgesamt höheren Energieverbrauch durch mehr Personen- und Tonnenkilometern²⁹³.

²⁹⁰ Vgl. Ritz (2018) Mobilitätswende - autonome Autos, S. 28–31.

²⁹¹ Vgl. Ritz (2018) Mobilitätswende - autonome Autos, S. 32.

²⁹² Vgl. Alba (2018) Impacts and potential benefits of autonomous vehicles, S. 36–38.

²⁹³ Vgl. Alba (2018) Impacts and potential benefits of autonomous vehicles, S. 39–40.

Besonders in der Logistik, in welcher die Personalkosten den größten Anteil an den Gesamtkosten haben, würde autonomes Fahren zu deutlich geringeren Kosten führen²⁹⁴. Dies würde als direkte Wirkung ein erhöhtes Verkehrsaufkommen zur Folge haben.

Im Luftverkehr ist die Automatisierung bereits weit fortgeschritten. Die vollständige Entwicklung scheitert allerdings an technischen, regulatorischen und psychologischen Aspekten.²⁹⁵ Im Straßenverkehr rechnen Experten im Mittelwert mit den ersten hochautomatisierten Fahrzeugen im Jahr 2021 und der kompletten Marktpenetration im Jahr 2039²⁹⁶.

Digitalisierung

Die Digitalisierung ist einer der Megatrends des 21. Jahrhunderts und hat disruptive Auswirkungen in vielen Gesellschaftsbereichen²⁹⁷. In der Mobilität verändert diese vor allem die Konnektivität und schafft neue Geschäftsfelder im Personen- sowie Güterverkehr. Im Folgenden seien einige Beispiele für Trends im Bereich der Digitalisierung genannt:

- **Mobility on Demand**²⁹⁸

Unter dem Begriff „Mobility on Demand“ (MoD) versteht man ein bedarfsorientiertes, digitalgestütztes Konzept für den öffentlichen Nahverkehr. Im Gegensatz zur heutigen Situation fahren beispielsweise Kleinbusse nicht auf vordefinierten Linien, sondern poolen die Personen nach Bedarf. Erste Tests wurden u.a. im „Reallabor Schorndorf“ durchgeführt.

- **Einbindung von Elektromobilität in das Energienetz**²⁹⁹

Die Energiewende führt zu einer dezentraleren Netzversorgung mit einer Verschiebung der Versorgungsspitzen. Um diese abzufangen und das Netz weiter zu entlasten, spielen dezentrale Speicher in den Batterien von Elektroautos eine immer entscheidendere Rolle. Dies erfordert intelligentere und verknüpfte Stromnetze und Autos.

- **Autonomisierung in der Logistik**³⁰⁰

Im Zuge der zunehmenden Urbanisierung müssen auch Logistikzentren in die Städte wandern. Die Flächen für diese sind allerdings begrenzt und teuer. Eine effiziente Flächennutzung durch Autonomisierung ist daher notwendig, um die urbane Logistik nachhaltig zu gestalten.

Seamless Mobility

Unter dem Begriff „Seamless Mobility“ versteht man nahtlose Mobilität für den Kunden. Nahtlos bedeutet in diesem Zusammenhang die Verbesserung der Kompatibilität der verschiedenen Verkehrsmittel bei gleichzeitiger Nutzung des effizientesten Verkehrsmittels für einen Weg.³⁰¹

²⁹⁴ Vgl. Ritz (2018) Mobilitätswende - autonome Autos, S. 85–88.

²⁹⁵ Vgl. Wichter (2018) Are you ready to fly without a human pilot?

²⁹⁶ Vgl. Ritz (2018) Mobilitätswende - autonome Autos, S. 37.

²⁹⁷ Vgl. Zukunftsinstitut GmbH (2018) Megatrend Konnektivität.

²⁹⁸ Vgl. Proff et al. (2018) Mobilität und digitale Transformation, S. 295–305.

²⁹⁹ Vgl. Proff et al. (2018) Mobilität und digitale Transformation, S. 193–197.

³⁰⁰ Vgl. Proff et al. (2018) Mobilität und digitale Transformation, S. 377–390.

³⁰¹ Vgl. Zukunftsinstitut GmbH (2017) Die Evolution der Mobilität, S. 33–34.

Laut Experten von MCKINSEY wird es durch diese Mobilität günstiger, verfügbarer, effizienter, nachhaltiger und angenehmer werden³⁰².

Voraussetzung für Seamless Mobility ist, dass Mobilität in sog. Mobilitätsketten gedacht wird. Dies unterscheidet sich vom heutigen Ansatz, Mobilität in den verschiedenen Verkehrsmitteln zu organisieren. Zusätzlich müssen Plattformen geschaffen werden, welche als Routenplaner für die intermodale Mobilität konzipiert sind.³⁰³

Die Angebotspalette von Seamless Mobility wird ermöglicht durch sog. urbane Mobilität-Hubs. Diese stellen einen Umstiegspunkt zwischen den verschiedenen Verkehrsmitteln dar und bilden somit die Grundlage für eine intermodale Mobilität.³⁰⁴

Dash Delivery

Die letzte Meile verursacht in der Logistik den größten Kostenanteil mit 41 %³⁰⁵. Dem gegenüber steht der Wunsch der Kunden nach einer einfachen und nutzerfreundlichen Lieferung³⁰⁶. Abhilfe sollen die Trends des Dash Delivery, welche die letzte Meile inklusive der Interaktion mit dem Kunden verbessern wollen, schaffen. Zu diesen Trends gehören:³⁰⁷

- **Drohnen**

Im Jahr 2015 wurde die erste erlaubte Drohnenlieferung durchgeführt. Seitdem kongruieren mehrere Warenhäuser um weitere Projekte. Diese versprechen u.a. kürzere Lieferzyklen.³⁰⁸

- **Smart Lockers**

Um für den Kunden möglichst wenig Aufwand zu erzeugen, wird versucht die Paketstationen in den Alltag zu integrieren (Flughäfen, Bahnhöfe, Haltestellen). An diesen werden u.a. Kühlboxen für Einkäufe installiert.³⁰⁹

- **Autonome Mikromobilität**

Autonome Roboterfahrzeuge sollen die Kosten für die letzte Meile weiter senken und außerdem die Kapazität erhöhen. Der Innenraum dieser reicht für wenige Pakete, welche über eine kurze Distanz (3 bis 5 km) transportiert werden.³¹⁰

Insgesamt wird durch Dash Delivery eine höhere Kundenbindung bei gleichzeitiger Steigerung der Kundenzufriedenheit erwartet.³¹¹

³⁰² Vgl. Hannon et al. (2019) An integrated perspective on the future of mobility, part 3, S. 2.

³⁰³ Vgl. Zukunftsinstitut GmbH (2017) Die Evolution der Mobilität, S. 33–34.

³⁰⁴ Vgl. Proff et al. (2018) Mobilität und digitale Transformation, S. 311–330.

³⁰⁵ Vgl. Kees et al. (2019) The Last-Mile delivery, S. 20.

³⁰⁶ Vgl. Kees et al. (2019) The Last-Mile delivery, S. 3.

³⁰⁷ Vgl. Kees et al. (2019) The Last-Mile delivery, S. 11.

³⁰⁸ Vgl. Williams (2017) Future of retail.

³⁰⁹ Vgl. Schleier (2018) Dash Delivery: Mut zur neuen letzten Meile.

³¹⁰ Vgl. Kees et al. (2019) The Last-Mile delivery, S. 11.

³¹¹ Vgl. Schleier (2018) Dash Delivery: Mut zur neuen letzten Meile.

6.2.3 Zusammenfassung der Megatrends

Zum Ende der Prognosephase werden die Megatrends in Verbindung zu den Kategorien gesetzt. Dies entspricht der Phase vier der Szenarioanalyse (vgl. Kapitel 2.4). Die Entwicklungen in den Kategorien werden aufgrund der vorgehenden Beschreibungen der Trends abgeschätzt.

	Urbanisierung	Individualisierung	New Work	Silver Society	Sharing Economy	Postfossile Mobilität	Autonomes Fahren	Digitalisierung	Seamless Mobility	Dash Delivery
Verkehrsaufkommen	↑	↗	↘	●	↘		●	●	↘	↗
Klimaerwärmung					↓	↓	↗	↗	↓	↗
Luftverschmutzung					↘	↓	↗	↗	↓	↗
Energieverbrauch					↘	↘	●	↗	↓	↗
Zeit	↘		↘	↗	●		↘	↗	↓	↓
Kompatibilität der Verkehrsmittel	↓				↑			↑	↑	
Individuelle Kosten	↘	↗		↗	↓	↘	●	↘	↓	●
Verfügbarkeit	↑	↘			↗		↑	↗	↗	↗
Sicherheit	↘			↓	↘		↑	↗		↘
ΔBIP	↗		↗	↗			↑	↗	↗	
Kosten	↑	↗	↘	↑	↓	↘	↓	↘	↘	↑

Legende

↓ stark reduziert ↑ stark erhöht ● Entwicklung in beide Richtungen möglich
 ↘ schwach reduziert ↗ schwach erhöht

Leeres Feld: Dieser Megatrend hat keinen Einfluss auf die Kategorie.

Abbildung 6-6 - Auswirkungen der Megatrends auf die Kategorien

In Abbildung 6-6 sind die Auswirkungen der Megatrends (x-Achse) auf die Kategorien (y-Achse) aufgezeigt. Indirekte Auswirkungen der Trends auf andere Kategorien werden nicht

berücksichtigt. Ein Beispiel für eine indirekte Auswirkung ist die Wirkung der Urbanisierung, durch diese wird das Verkehrsaufkommen erhöht und somit auch indirekt die gesamte Luftverschmutzung. Zur Vermeidung von Redundanzen werden daher nur direkte Einflüsse aufgeführt.

6.3 Synthese-Phase mit Beschreibung der Zukunftsszenarien

In der Synthese-Phase werden die einzelnen Entwicklungsstränge (vgl. Kapitel 2.4), in dieser Arbeit entlang von Megatrends vorgestellt und zu Zukunftsbildern (den Szenarien) zusammengeführt. Die Beschreibung der Szenarien gliedert sich in eine allgemeine Beschreibung zu Beginn gefolgt von den Kategorien, welche für die Analyse des Untersuchungsumfelds verwendet wurden (vgl. Kapitel 6.1.2). Die Kategorien lauten: Allgemeine Bevölkerungsdaten, das Verkehrsaufkommen, der Modal Split, der Aufbau der Referenzstrecken, Kennziffern des Personenverkehrs, Kennziffern des Güterverkehrs, die Zusammensetzung der Fahrzeugkategorien, ökologischen Daten, ökonomischen Daten und der Dimension soziales bzw. individueller Nutzen.

6.3.1 Trendszenario

Im Trendszenario werden die aktuellen Entwicklungen im Mobilitätsbereich fortgeschrieben. Zusätzliche politische Maßnahmen, wie z.B. die Einführung einer Pkw-Maut, werden dabei nicht berücksichtigt. Größere technische Innovationen, welche sich flächendeckend durchsetzen, sind nicht vorgesehen. Die Mobilität entwickelt sich daher nahezu unverändert zur Ausgangslage.

Die Anzahl an Personen, welche multimodal leben, erhöht sich im Trendszenario nicht. Die meisten Strecken werden weiterhin mit dem motorisierten Individualverkehr zurückgelegt. Auch die Anzahl intermodaler Wege bleibt unverändert. Neuere Trends wie Car-Sharing entwickeln sich zwar weiter, werden aber keine bedeutende Rolle für die Mobilität der Menschen erlangen³¹².

Die von der Bundesregierung ausgerufene Marke von 1 Mio. Elektrofahrzeugen bis 2020 wird im Trendszenario erst 2035 erreicht. Weiterhin sind aufgrund der hohen Kosten und begrenzten Reichweiten von BEVs (Battery Electric Vehicle) auch 2050 Benziner und Diesel die vorherrschenden Antriebskonzepte. Die Diversität der Antriebskonzepte nimmt jedoch bis 2050 weiter zu³¹³. Im Luftverkehr steigt die Verkehrsleistung sowohl im Personen- als auch Güterverkehr weiter an. Die Flugzeuge verbessern sich durch Neuzulassungen und der Verbesserung an bestehenden Maschinen jedes Jahr um durchschnittlich 2 %³¹⁴.

³¹² Vgl. Zimmer et al. (2016) Renewability III Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors, S. 96–97., Vgl. Adolf. Jörg et al. (2014) Shell PKW-Szenarien bis 2040, S. 64

³¹³ Vgl. Adolf et al. (2016) SHELL Nutzfahrzeug-Studie: Diesel, alternative Antriebe, S. 64.

³¹⁴ Vgl. INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (2016) On board, S. 2.

Annahmen:

- Autonome Fahrzeuge sind hinsichtlich Ihrer Auswirkungen und ihres Zeitpunkts der Marktpenetration vom heutigen Standpunkt aus mit großen Unsicherheiten belegt. In dem Trendszenario werden autonome Fahrzeuge daher nicht berücksichtigt.³¹⁵
- Solange keine Messwerte vorliegen, verändern sich die NOx- und die PM-Emissionen mit dem gleichen Prozentsatz wie die THG-Emissionen.
- Es wird die komplette Elektrifizierung der Sektoren Schiene, Tram und U-Bahn angenommen. Dies entspricht im Schienenverkehr der deutschen Bahn einem Fehler von 8% für den Personen- und von 4% für den Güterverkehr.³¹⁶
- Die technischen Verbesserungen des Zug-Nahverkehrs werden auf die Verkehrsmittel U-Bahn und Tram übertragen.
- Die Auslastung von Nutzfahrzeugen bleibt identisch.

Daten zur Bevölkerungsentwicklung, zum Modal Split und zum Verkehrsaufkommen werden der Verkehrsprognose des Bundesverkehrswegeplan 2030 entnommen und durch RENEWBILITY III³¹⁷ und das Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (AMS) des Klimaschutzszenario 2050³¹⁸ fortgeschrieben. Auf die in RENEWBILITY getroffenen Annahmen wird nicht weiter eingegangen, für weitergehende Informationen sei auf diese Studie verwiesen.

Daten zur technischen Entwicklung werden aus drei verschiedenen Studien entnommen:

- „RENEWBILITY III“ - Öko-Institut, Institut für Verkehrsforschung am DLR, INFRAS und dem IFEU-Institut (2018) im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktor-sicherheit³¹⁹
- „Shell Pkw Szenarien bis 2040“ – Adolf et al. (2016); Shell Deutschland in Kooperation mit der Prognos AG³²⁰
- „Shell Nutzfahrzeug Szenario bis 2040“ – Adolf et al. (2016); Shell Deutschland in Kooperation mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt³²¹

Sind Daten für das Jahr 2050 nicht verfügbar, werden die Ergebnisse aus dem Jahr 2040 linear fortgeschrieben.

Zu Beginn werden die unterschiedlichen Ergebnisse verschiedener Studien in Abhängigkeit von der Betrachtungsweise dargestellt. In Abbildung 6-7 werden beispielsweise die verschiedenen Annahmen für die Entwicklung der spezifischen THG-Emissionen des MIV im Jahr 2050

³¹⁵ Vgl. Zimmer et al. (2016) Renewbility III Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors, S. 140–145.

³¹⁶ Vgl. Zimmer et al. (2016) Renewbility III Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors, S. 210.

³¹⁷ Vgl. Zimmer et al. (2016) Renewbility III Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors.

³¹⁸ Vgl. Öko-Institut e.V. et al. (2015) Klimaschutzszenario 2050.

³¹⁹ Vgl. Zimmer et al. (2016) Renewbility III Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors.

³²⁰ Vgl. Adolf, Jörg et al. (2014) Shell PKW-Szenarien bis 2040.

³²¹ Vgl. Adolf et al. (2016) SHELL Nutzfahrzeug-Studie: Diesel, alternative Antriebe.

aus RENEABILITY und dem SHELL Pkw Szenarien bis 2040 (fortgeschrieben auf das Jahr 2050)³²² gegenübergestellt. Bei beiden Werten handelt es sich um WTW-Ergebnisse.



Abbildung 6-7 - Vergleich der spezifischen THG-Emissionen pro Pkm (2050)³²³

Die Unterschiede in den spezifischen Emissionen lassen sich auf die unterschiedlichen Zusammensetzungen des Fahrzeugbestands zurückführen.

Allgemeine Bevölkerungsdaten

Die demografischen Leitdaten wurden vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) prognostiziert. Demnach wird die Einwohnerzahl Deutschlands von 80,2 Mio. im Jahr 2010 bis 2030 um gut zwei Prozent auf 78,2 Mio. Menschen abnehmen³²⁴. Im Klimaschutzszenario 2050 wird diese Entwicklung bis 2050 fortgeschrieben. Im Jahr 2050 werden danach 74 Mio. Menschen in Deutschland leben. Die Altersstruktur verschiebt sich wie im Megatrend demographischer Wandel dargestellt. Den größten Bevölkerungsanteil stellt die Altersgruppe zwischen 40 und 64 Jahre alt da (32%).³²⁵

Das Verkehrsaufkommen

In Abbildung 6-8 sind die Ergebnisse der Veränderungen der Verkehrsleistung des Personenverkehrs im Vergleich zum Referenzzustand aufgezeigt.

Auffällig ist dabei, dass die Verkehrsleistung (Pkm) trotz wesentlich verringerter Bevölkerung und einer älteren Gesellschaft nur leicht sinkt³²⁶. Der Anstieg im Verkehrsaufkommen bis 2030 begründet sich u.a. in der Vielfalt an neuen Alternativen, einer höheren Pkw-Verfügbarkeit und anderen Raumstrukturen³²⁷. Nach dem Jahr 2030 fällt die Verkehrsleistung im Personenverkehr bis 2050 deutlich ab (7%). Dies liegt an der geringeren Motorisierungsrate und der geringeren Nachfrage von älteren Menschen nach den Angeboten des Öffentlichen Verkehrs (ÖV)³²⁸.

³²² Entgegen der Definition des MIV, werden Motorräder, Mofas und sonstige Zweiräder auf Grund ihres geringen Anteils an der Verkehrsleistung nicht berücksichtigt (vgl. Vgl. Bundesanstalt für Straßenwesen (2018) Verkehrs- und Unfalldaten - Deutschland, S. 1)

³²³ Vgl. Zimmer et al. (2016) Renewability III Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors, S. 108, Vgl. Adolf. Jörg et al. (2014) Shell PKW-Szenarien bis 2040, S. 72.

³²⁴ Vgl. Datenbank: Bevölkerungsschätzung.

³²⁵ Vgl. Öko-Institut e.V. et al. (2015) Klimaschutzszenario 2050, S. 77.

³²⁶ Vgl. Zimmer et al. (2016) Renewability III Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors, S. 122–124.

³²⁷ Vgl. Zimmer et al. (2016) Renewability III Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors, S. 124.

³²⁸ Vgl. Zimmer et al. (2016) Renewability III Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors, S. 123.

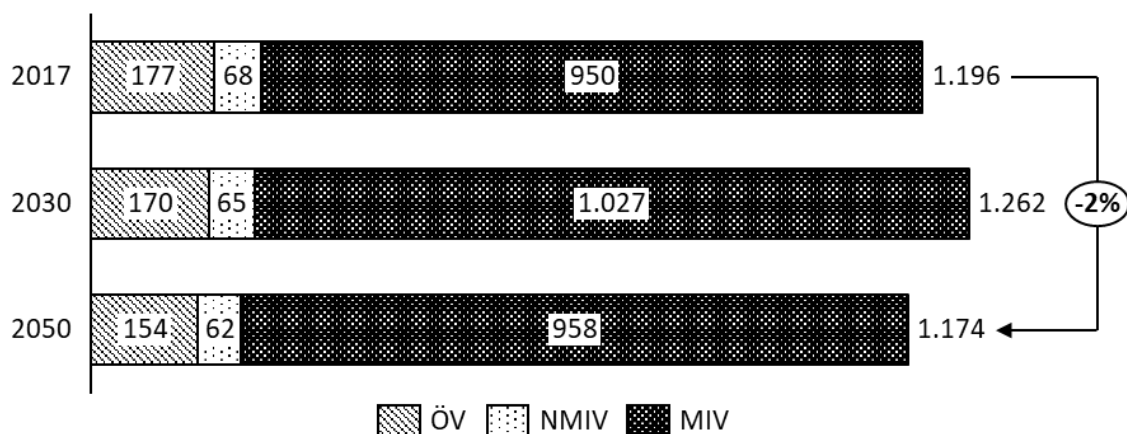


Abbildung 6-8 - Verkehrsleistung des Personenverkehrs im Trendszenario im Vergleich^{329,330}

Im Güterverkehr kommt es im Gegensatz zum Personenverkehr zu einer anhaltenden Steigerung der Verkehrsleistung (Tkm). Die Verbesserungen sind in Abbildung 6-9 dargestellt.

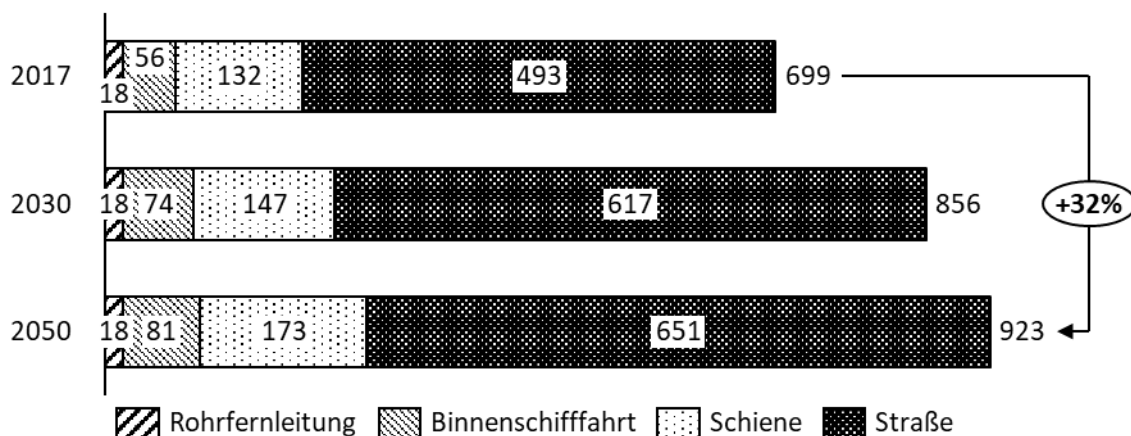


Abbildung 6-9 - Verkehrsleistung des Güterverkehrs im Trendszenario im Vergleich³³¹

Das anhaltende Wirtschaftswachstum, geringere Kosten im Transport und das anhaltende Wachstum im E-Commerce führen zu einem Wachstum der Verkehrsleistungen.³³²

Der Modal Split

In RENEWABILITY wird der Modal Split für den Personenverkehr einerseits für all Strecken angegeben und andererseits mit Fokus auf innerstädtische Strecken. Im Folgenden werden beide dargestellt, da der Modal Split für den Personenverkehr in der Stadt eine Aufteilung des NMIV auf die Fortbewegungsarten zu Fuß und per Fahrrad aufgreift³³³.

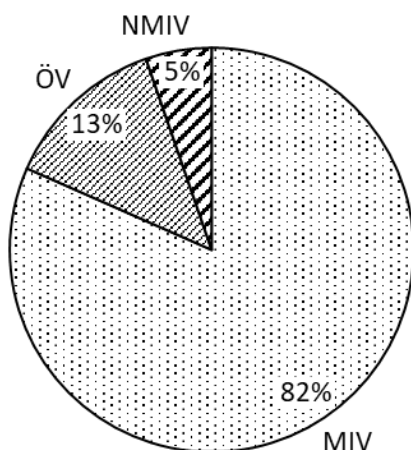
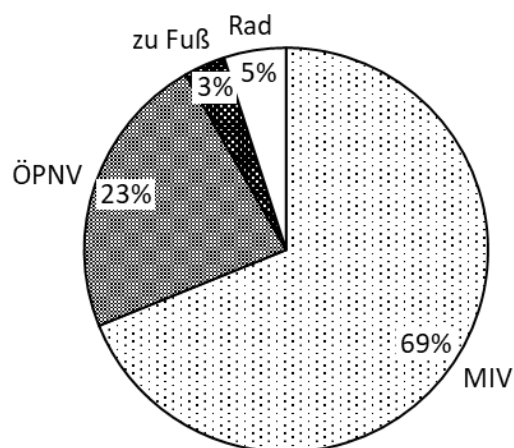
³²⁹ Vgl. Zimmer et al. (2016) Renewability III Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors, S. 123.

³³⁰ NMIV = Nicht motorisierter Individualverkehr (zu Fuß, Fahrrad)

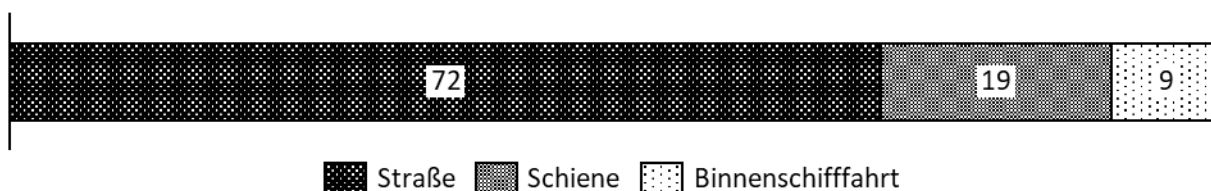
³³¹ Vgl. Zimmer et al. (2016) Renewability III Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors, S. 153.

³³² Vgl. Zimmer et al. (2016) Renewability III Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors, S. 148–153.

³³³ Vgl. Zimmer et al. (2016) Renewability III Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors, 131f, 135.

Modal Split Gesamt**Modal Split Stadt****Abbildung 6-10 - Modal Split des Personenverkehrs im Trendszenario³³⁴**

In Abbildung 6-10 ist der Modal Split (bezogen auf die Verkehrsleistung) im Trendszenario (2050) aufgezeigt. In dem Modal Split wurde der Luftverkehr nicht berücksichtigt. Die Verkehrsleistung der Passagiere national macht ca. 14 Mrd. Pkm aus³³⁵. Der Anstieg des Luftverkehrs (um 4,6 % – bezogen auf 2017) ist u.a. mit dem Wachstum des BIP zu begründen. Insgesamt fliegt jeder Deutsche 2,7 Mal so viel wie 2017³³⁶. Auffällig ist außerdem, dass im Trendszenario der Anteil des MIV an der gesamten Verkehrsleistung, im Gegensatz zu 2017, weiter ansteigt.

**Abbildung 6-11 - Modal Split des Güterverkehrs im Trendszenario³³⁷**

Im Modal Split des Güterverkehrs (Verkehrsleistung) nach der Studie RENEWBILITY sind die Rohrfernleitungen und der nationale Luftfrachtverkehr nicht aufgegriffen. Die Verkehrsleistungen für die Rohrfernleitungen werden über die Jahre als konstant angenommen. Der nationale Luftfrachtverkehr ist im Vergleich zu den anderen Größen zu vernachlässigen und wird daher ausgeklammert.

Aufbau der Referenzstrecken

Der grundlegende Aufbau der Referenzstrecken bleibt im Trendszenario identisch zur Ausgangslage. Lediglich die Transferzeiten innerhalb der Städte erhöhen sich, wie in

³³⁴ Vgl. Zimmer et al. (2016) Renewbility III Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors, 132, 136.

³³⁵ Vgl. Zimmer et al. (2016) Renewbility III Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors, S. 170.

³³⁶ Vgl. Zimmer et al. (2016) Renewbility III Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors, S. 169.

³³⁷ Vgl. Zimmer et al. (2016) Renewbility III Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors, S. 153.

RENEWABILITY vorgeschlagen. Trends wie Car- und Bike-Sharing werden sich weiterentwickeln und eine größere Marktdurchdringung erreichen, ihn aber nicht revolutionieren. Durch einen höheren Anteil an E-Bikes werden die durchschnittlich mit Fahrrädern zurückgelegten Strecken länger.

Die Zusammensetzung der Verkehrsmittel

Die Daten zur Zusammensetzung des Verkehrs sind der Studie „Shell Pkw-Szenarien bis 2040“ entnommen. Aufgrund einer fehlenden Datengrundlage für 2050 wurden diese basierend auf den Neuzulassungen im Jahr 2040 angenommen. Die Annahme, die Zusammensetzung der Neuzulassungen des Jahres 2040 auf das Jahr 2050 fortzuschreiben, begründet sich in dem durchschnittlichen Fahrzeugalter von 8,8 Jahren und somit einem durchschnittlichen Wechsel der Fahrzeugflotten in diesem Zeitraum³³⁸.

Die Zusammensetzung der Antriebstechnologien im motorisierten Individualverkehr gestaltet sich im Vergleich zum Ausgangsfall diversifizierter. Insgesamt 47 % der Fahrzeuge haben einen elektrischen oder hybriden Antrieb. Bei dem Großteil der elektrisch angetriebenen Fahrzeuge handelt es sich weiterhin um Hybridmodelle.³³⁹ Eine Übersicht über die genaue Zusammensetzung der Antriebstechnologien findet sich in Abbildung 6-12.

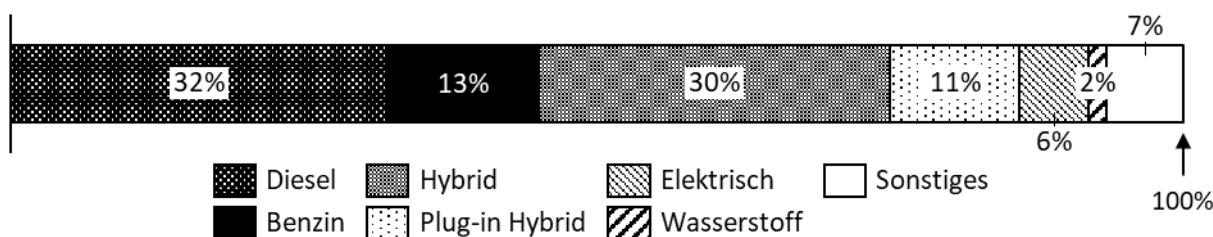


Abbildung 6-12 - Zusammensetzung der Fahrzeuge im Personenverkehr³⁴⁰

Bei Nutzfahrzeugen variiert die Lebensdauer stark nach Fahrzeugtyp. Im Jahr 2017 kamen die leichten Nutzfahrzeuge auf ein durchschnittliches Alter von 7,9 Jahren, Lkw (3,5-12 t) 7,6 Jahren, Busse 8,7 Jahre und Sattelzugmaschinen auf ein Alter von 4,3 Jahren³⁴¹. Geht man von einer analogen Entwicklung, wie im motorisierten Individualverkehr aus, sinkt die durchschnittliche Lebensdauer nur leicht³⁴². Dem folgend wird für die Zusammensetzung der Nutzfahrzeuge im Bestand 2050, die Zusammensetzung der Nutzfahrzeuge (Neuzulassungen) 2040 angenommen.

³³⁸ Vgl. Adolf. Jörg et al. (2014) Shell PKW-Szenarien bis 2040, S. 63.

³³⁹ Vgl. Adolf. Jörg et al. (2014) Shell PKW-Szenarien bis 2040, S. 62.

³⁴⁰ Vgl. Adolf. Jörg et al. (2014) Shell PKW-Szenarien bis 2040, S. 62–63.

³⁴¹ Vgl. Kraftfahrt-Bundesamt (2017) Fahrzeugzulassungen (FZ 15), S. 20–37.

³⁴² Vgl. Kraftfahrt-Bundesamt (2017) Fahrzeugzulassungen (FZ 15), S. 7.

Im Bereich der Nutzfahrzeuge fallen die Veränderungen in den Antriebstechnologien geringer aus. In allen Kategorien³⁴³ bleiben Diesel die dominierende Antriebsquelle³⁴⁴. Bei den leichten Nutzfahrzeugen (N1) diversifiziert sich die Zusammensetzung der Antriebstechnologien am signifikantesten, wobei elektrische und hybride Fahrzeuge auf einen Anteil von ca. 21 % kommen³⁴⁵. Bei den schweren Lkw (N3) erhöht sich der Anteil an Diesel betriebenen Fahrzeugen auf 99,5 %³⁴⁶.

AIRBUS geht in seinem „Global Market Forecast“ davon aus, dass bis 2037 ca. die Hälfte aller Flugzeuge aus dem Jahr 2018 ersetzt werden³⁴⁷. Schreibt man diesen Trend fort, werden 2050 nahezu alle Flugzeuge aus dem Bestand ausgetauscht worden sein. Die meisten Flugzeuge (75 %) ³⁴⁸ werden in der Kategorie S (bis zu 230 Sitze und Reichweiten bis 3.000nm)³⁴⁹ hinzukommen.

Ökologische Daten

Die ökologischen Daten für das Trendszenario ermitteln sich, wie oben bereits beschrieben aus den drei genannten Studien. Diese sind in Tabelle 6-6 und Tabelle 6-7 dargestellt.

Tabelle 6-6 - Ökologische Daten des Personenverkehrs (Trendszenario)³⁵⁰ (Teil 1)

Verkehrsmittel	THG	Feinstaub	Stickoxide	Energieverbrauch
Bus ³⁵¹	54,86	0,001	0,204	0,73
Zug - Fernverkehr	9,77	0,000	0,002	0,38
Zug - Nahverkehr	16,60	0,000	0,004	0,65
U-Bahn	17,58	0,000	0,004	0,68
Tram	17,58	0,000	0,004	0,68
Einheit	<i>g/Pkm</i>	<i>g/Pkm</i>	<i>g/Pkm</i>	<i>MJ/Pkm</i>

³⁴³ In der Shell Nutzfahrzeug-Studie werden die Nutzfahrzeuge in folgende Kategorien eingeteilt: N1 - Bis 3,5t, N2 - 3,5 - 12t, N3 - 12t + Sattelzugmaschinen und Busse.

³⁴⁴ Vgl. Adolf et al. (2016) SHELL Nutzfahrzeug-Studie: Diesel, alternative Antriebe, S. 63.

³⁴⁵ Vgl. Adolf et al. (2016) SHELL Nutzfahrzeug-Studie: Diesel, alternative Antriebe, S. 63.

³⁴⁶ Vgl. Adolf et al. (2016) SHELL Nutzfahrzeug-Studie: Diesel, alternative Antriebe, S. 63.

³⁴⁷ Vgl. Airbus (2018) Global Market Forecast, S. 6.

³⁴⁸ Vgl. Airbus (2018) Global Market Forecast, S. 7.

³⁴⁹ Vgl. Airbus (2018) Global Market Forecast, S. 45.

³⁵⁰ Vgl. Zimmer et al. (2016) Renewability III Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors.

³⁵¹ Vgl. Adolf et al. (2016) SHELL Nutzfahrzeug-Studie: Diesel, alternative Antriebe, S. 68–69.

Tabelle 6-7 - Ökologische Daten des Personenverkehrs (Trendszenario) (Teil 2)

Verkehrsmittel	THG	Feinstaub	Stickoxide	Energieverbrauch
MIV ³⁵²	83,00	0,255	0,22	1,14
Flugzeug ³⁵³	122,07 ³⁵⁴	0,024	0,31	0,91
Einheit	<i>g/Pkm</i>	<i>g/Pkm</i>	<i>g/Pkm</i>	<i>MJ/Pkm</i>

In Tabelle 6-7 sind die Daten für den Güterverkehr dargestellt.

Tabelle 6-8 - Ökologische Daten des Güterverkehrs (Trendszenario)³⁵⁵

Verkehrsmittel	THG	Feinstaub	Stickoxide	Energieverbrauch
Lkw	56,65	0,002	0,119	0,77
Güterbahn	5,86	0,000	0,001	0,23
Binnenschiffe	22,40	0,289	0,007	0,28
LNF ³⁵⁶	364,375	0,011	0,765	4,95
Einheit	<i>g/Tkm</i>	<i>g/Tkm</i>	<i>g/Tkm</i>	<i>MJ/Tkm</i>

Daten zum sozialen bzw. individuellen Nutzen

Die Kosten für den Güterverkehr können der Studie RENEWBILITY entnommen werden. Diese verändern sich nur marginal zum Referenzszenario. Die Transportkosten ergeben sich zu: Lkw – 0,15 Euro/Tkm, Schiene – 0,06 Euro/Tkm, Binnenschifffahrt – 0,04 Euro/Tkm³⁵⁷. Für die leichten Nutzfahrzeuge entwickeln sich die Transportkosten angelehnt an den Güterverkehr (Δ Güterverkehr: 125 %, Δ LNF: 105 %) zu 0,87 Euro/Tkm. Der Unterschied in der Entwicklung zwischen den leichten Nutzfahrzeugen und dem Güterverkehr liegt in der Diversifizierung der Antriebstechnologien bei den leichten Nutzfahrzeugen und somit eines höheren Anteils an Elektrofahrzeugen, welche geringere TCO haben³⁵⁸.

³⁵² Vgl. Adolf, Jörg et al. (2014) Shell PKW-Szenarien bis 2040, S. 72–73.

³⁵³ Vgl. Zimmer et al. (2016) Renewbility III Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors, S. 164.

³⁵⁴ Der EWF = Emission Weighting Factor (2) wurde für den Luftverkehr berücksichtigt.

³⁵⁵ Vgl. Adolf et al. (2016) SHELL Nutzfahrzeug-Studie: Diesel, alternative Antriebe, S. 68–69.

³⁵⁶ Für den LNF wurden die selben Verbesserungsfaktoren, wie für den Lkw angenommen.

³⁵⁷ Vgl. Zimmer et al. (2016) Renewbility III Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors, S. 157.

³⁵⁸ Vgl. Hacker et al. (2015) Wirtschaftlichkeit von Elektromobilität in gewerblichen Anwendungen, S. 73.

Für den motorisierten Individualverkehr werden die Werte, wie im Ausgangsszenario aus KREYENBERG übernommen³⁵⁹. Die Fortschreibung erfolgt linear, basierend auf der Differenz zwischen 2020 und 2030. Dadurch ergeben sich die TCO zu 0,2506 Euro/Pkm. Kreyenberg berücksichtigt in seiner Studie nicht die laut RENEWABILITY steigenden Benzin-, Diesel- und Stromkosten³⁶⁰. Demgegenüber stehen die oben besprochenen technologischen Verbesserungen. Der Wert für die TCO wird daher mit einem Faktor von 1,15 belegt.

Im öffentlichen Personenverkehr liegen keine Quellen über die Preisentwicklung vor. Im Bereich Bus, Schiene, Tram, U-Bahn wird daher eine analoge Entwicklung zum Güterverkehr angenommen. Der Faktor für Busse liegt aufgrund der größeren Diversifizierung der Antriebstechnologien zwischen dem Verbesserungsfaktor für leichte Nutzfahrzeuge und Lkws³⁶¹.

Die Entwicklungen der Unfallrisiken wurden aus der Vergangenheit abgeleitet. Für alle Verkehrsmittel, die am Straßenverkehr beteiligt sind oder durch diesen bei Unfällen hauptsächlich betroffen sind, wurden die Unfallrisiken der vergangenen fünf Jahre betrachtet und diese Werte dann extrapoliert. Im Luftverkehr und Zugverkehr wurde eine andere Vorgehensweise gewählt, da die Werte keine lineare Regression zuließen ($r^2 = 0.002$ für den Luftverkehr). Bei diesen wurden die Entwicklungen über einen längeren Zeitraum analysiert und dadurch Verbesserungsfaktoren abgeleitet. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in Tabelle 6-9 dargestellt.

Besonders auffällig sind die Daten für den Busverkehr. Diese wurden mit dem Faktor für den Straßenverkehr berechnet und fallen damit deutlich unter den Zugverkehr. Während sich der Zugverkehr um 20% verbessert, fallen die Verbesserungen im Busverkehr mit 26,85% höher aus.

Im Güterverkehr wurde dieselbe Vorgehensweise wie im Personenverkehr gewählt. Die Verbesserungsfaktoren für die Straße und den Güterverkehr wurden übernommen. Die Binnenschifffahrt wird aufgrund fehlender Werte nicht betrachtet.

³⁵⁹ Vgl. Kreyenberg (2016) Fahrzeugantriebe Elektromobilität, S. 103.

³⁶⁰ Vgl. Zimmer et al. (2016) Renewability III Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors, S. 37–39.

³⁶¹ Vgl. Adolf et al. (2016) SHELL Nutzfahrzeug-Studie: Diesel, alternative Antriebe, S. 63.

Tabelle 6-9 - Unfallrisiko und Verfügbarkeit im Trendszenario

Verkehrsmittel	Unfallrisiko
Bus	0,353
Zug - Fernverkehr	0,64
Zug - Nahverkehr	0,64
U-Bahn	0,64
Tram	0,75
E-Bike	4,102
Fahrrad	4,102
zu Fuß	6,263
MIV	0,97
Flugzeug	0,182
Einheit	Unfälle pro 10 ⁹ Pkm

Die Daten für den Güterverkehr können der Tabelle 6-10 entnommen werden.

Tabelle 6-10 - Unfallrisiko (Güterverkehr) im Trendszenario

Verkehrsmittel	Unfallrisiko
Lkw; leichte Nutzfahrzeuge ³⁶²	0,132
Güterbahn	0,64
Einheit	Unfall pro 10 ⁹ Tkm

Ökonomische Daten

Die Staukosten wurden von der Firma INRIX nicht für das Jahr 2050 fortgeschrieben. Die Experten gehen in „INRIX – Traffic Scorecard“ davon aus, dass sich aufgrund des Wachstums

³⁶² Eine Unterscheidung zwischen den Lkws und den leichten Nutzfahrzeugen wird in der Statistik nicht vorgenommen, daher werden diese gebündelt dargestellt.

der Verkehrsleistung im Güterverkehr um 33 % und einer konstanten Verkehrsleistung im Personenverkehr, die Anzahl an Staustunden je Person erhöhen werden.³⁶³

6.3.2 Unregulierte autonome Mobilität

Das Szenario unregulierte autonome Mobilität basiert auf den Erkenntnissen der Studie „Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr“ vom Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI)³⁶⁴. Die Beschreibung des Szenarios orientiert sich an der Beschreibung der Studie. In dieser Studie werden hauptsächlich die ökologischen und ökonomischen Auswirkungen auf den motorisierten Individualverkehr vorgestellt, welche im Rahmen dieser Arbeit durch die Ergebnisse weiterer Studien ergänzt werden³⁶⁵.

Im Szenario unregulierte autonome Mobilität nimmt der Anteil des motorisierten Individualverkehrs an der Gesamtfahrleistung zu. Im Gegensatz zu nicht automatisierten Fahrzeugen kann die Reisezeit effektiv genutzt werden und verkürzt sich außerdem pro Kilometer. Die Veränderungen der Reisezeit hängt nach einer Studie des OECD vor allem davon ab, wie viel Prozent der Personen weiterhin den öffentlichen Personenverkehr nutzen³⁶⁶. Ein höherer Anteil an ÖPV-Nutzern erhöht die Auslastung der Fahrzeuge auf der Straße und führt somit zu zusätzlichen Kapazitäten.

Durch die oben beschriebene effektive Nutzung der Reisezeit verändert sich das Mobilitätsverhalten der Menschen. In autonomen Fahrzeugen des Levels 5 können auch Personen ohne Führerschein oder mit einer Beeinträchtigung der Mobilität sich fortbewegen (s. Megatrend – Silver Society). In Kombination mit der effektiven Nutzung der Reisezeit erhöht sich die Verkehrsleistung und in größerem Maßstab die Fahrleistung des Personenverkehrs³⁶⁷. Durch sekundäre Effekte, wie die Steigerung der Distanz zwischen Wohn- und Arbeitsort, wird die Verkehrsleistung weiter erhöht³⁶⁸.

Im Szenario der unregulierten autonomen Mobilität wächst die Anzahl an Fahrten im eigenen Wagen. Dementsprechend wächst der Anteil am Modal Split³⁶⁹. Analog zu KRAIL et al. wird sich der öffentliche Verkehr auf die Hauptachsen zurückziehen. Im ländlichen Raum wird durch

³⁶³ Vgl. Cookson (2018) Inrix Global Traffic Scorecard, 2-3.

³⁶⁴ Vgl. Krail et al. (2019) Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr, S. 71–76.

³⁶⁵ Vgl. Hannon et al. (2019) An integrated perspective on the future of mobility, part 3, S. 3–4.; Vgl. SYSTRA (2016) automated and autonomous public transport, S. 12–17

³⁶⁶ Vgl. International Transport Forum at the OECD (2015) Urban Mobility System, S. 30.

³⁶⁷ Im Unterschied zur Verkehrsleistung misst die Fahrleistung die gesamten gefahrenen Kilometer (mit und ohne Personen an Bord). Im Fall der Autonomisierung erhöht sich die Fahrleistung durch zusätzliche Leerfahrten.

³⁶⁸ Vgl. Krail et al. (2019) Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr, S. 71.

³⁶⁹ Vgl. Krail et al. (2019) Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr, S. 72.

den Einsatz von On-Demand Lösungen die Verfügbarkeit erhöht. Zusätzlich steigt die Gesamtanzahl an Fahrzeugen an³⁷⁰.

Flächen für Parkplätze in den Innenstädten können anderweitig genutzt werden. Gemäß OECD Studie entspricht beispielsweise die in Lissabon reduzierte Fläche, ca. 20 % der gesamten Parkflächen und 80 % der Parkflächen am Straßenrand³⁷¹.

Für den öffentlichen Schienenverkehr werden die Auswirkungen der Autonomisierung (spezifische Kennwerte) als geringer angenommen³⁷². Die oben beschriebenen Entwicklungstendenzen führen laut KRAIL et al. zu den folgenden Entwicklungen:

Tabelle 6-11 - Entwicklungen im Personenverkehr („Unregulierte autonome Mobilität“)³⁷³

Kategorien	Entwicklungstendenz
MIV	
Verkehrsaufkommen	Steigt deutlich
Fahrleistung	Nimmt zu
Anzahl an Wegen	Steigt wenig
Verkehrsfluss	Bleibt konstant
ÖPNV	
Verkehrsaufkommen	Sinkt
Fahrleistung	Steigt aufgrund von mehr Punkt-zu-Punkt Verbindungen
Relevanz Kleinbusse	Steigt
Relevanz Stadtbusse	Sinkt
Verkehrsfluss	Konstant

Im Güterverkehr verändert sich das Verkehrsbild aufgrund der Verringerung der Transportkosten essenziell. Im Bereich der City-Logistik werden kleine autonome Fahrzeuge, welche für

³⁷⁰ Vgl. Krail et al. (2019) Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr, S. 72.

³⁷¹ Vgl. International Transport Forum at the OECD (2015) Urban Mobility System, S. 5.

³⁷² Vgl. SYSTRA (2016) automated and autonomous public transport, S. 12–17.

³⁷³ in Anlehnung an Krail et al. (2019) Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr, S. 73.

eine geringere Anzahl an Waren ausgelegt sind, hauptsächlich von Logistikdienstleistern verwendet³⁷⁴. Über regionale Logistikzentren werden die Waren im Privatkundensegment zu den einzelnen Senken (Empfänger) transportiert³⁷⁵.

Der Güterfernverkehr werden die Fahrzeuggrößen durch den Wegfall der Fahrerkosten zunehmen kleiner. Der kombinierte Verkehr wird laut KRAIL et al. abnehmen. Zusätzlich werden weniger Sattelschlepper eingesetzt. Auf den gesamten Verkehr bezogen, verschiebt sich die Verkehrsleistung zum Straßenverkehr³⁷⁶.

Tabelle 6-12 - Entwicklungen im Güterverkehr ("Unregulierte autonome Mobilität")³⁷⁷

Kategorien	Entwicklungstendenz
City-Logistik	
Verkehrsaufkommen	Steigt
Fahrleistung	Nimmt leicht zu
Relevanz kleiner Nutzfahrzeuge	Steigt an
Relevanz schwerer Nutzfahrzeuge	Geht zurück
Fernverkehr	
Verkehrsaufkommen	ansteigend
Fahrleistung	Gleichbleibend
Relevanz kleiner Nutzfahrzeuge	Stark wachsend (zwischen 12t und 18t)
Relevanz schwerer Nutzfahrzeuge	Gleichbleibend
Verkehrsfluss	Konstant

³⁷⁴ Vgl. Krail et al. (2019) Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr, S. 73.

³⁷⁵ Vgl. Krail et al. (2019) Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr, S. 74.

³⁷⁶ Vgl. Krail et al. (2019) Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr, S. 76.

³⁷⁷ in Anlehnung an Krail et al. (2019) Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr, S. 73–76.

Die Daten zur Bevölkerung bleiben im Vergleich zum Referenzszenario gleich. Auch die Zusammensetzung der Fahrzeuge bleibt identisch. Durch zusätzliche Verbesserungen (u.a. eco-driving, angepasste Geschwindigkeiten und Platooning) nehmen die Emissionen sowie der spezifische Energieverbrauch der Verkehrsmittel ab. Die Verbesserungsfaktoren können der Tabelle A-3 im Anhang entnommen werden.

Die Auswirkungen auf den Luftverkehr halten sich in Grenzen, da bereits heute ein Großteil der Strecken vollkommen autonom geflogen wird. Ebenso sind im Schienenverkehr nur geringe Verbesserungen im Vergleich zum Trendverkehr vorherzusagen³⁷⁸. Die limitierenden Faktoren sind dabei der Bremsweg und die Signalanlagen³⁷⁹.

Das Verkehrsaufkommen

Die Experten/-innen von MCKINSEY gehen davon aus, dass durch die höhere Verfügbarkeit und die geringeren Kosten bereits 2030 das Verkehrsaufkommen im Vergleich zum Referenzszenario um ca. 9 % ansteigt³⁸⁰. In Ihrer Studie nehmen Sie im Gegensatz zu dieser Arbeit an, dass bis 2030 bereits alle Autos elektrifiziert sind. In HANNON et al. werden die Veränderungen im Verkehrsaufkommen nicht quantifiziert. Die Autoren gehen von einer Erhöhung des Verkehrsaufkommens aus.³⁸¹

Gemäß KRAIL et al. wird das Verkehrsaufkommen im Bereich der City-Logistik und des Fernverkehrs weiter ansteigen³⁸².

Der Modal Split

Die Verschiebungen des Modal Splits im Vergleich zum Ausgangsszenario sind in KRAIL et al. und HANNON et al. nicht vergleichbar quantifiziert worden. Im Folgenden werden daher ausschließlich die Entwicklungstendenzen vorgestellt.

In beiden Studien wird davon ausgegangen, dass der öffentliche Straßenpersonenverkehr sich auf die Hauptachsen zurückzieht und der Anteil dementsprechend zurückgeht. Der Anteil des motorisierten Individualverkehrs wächst und diversifiziert sich, während der Schienenverkehr laut HANNON et al. gleichbleibt und gemäß KRAIL et al. zurückgeht.³⁸³ Beide gehen davon aus, dass autonome Fahrzeuge keine Auswirkungen auf die nicht motorisierten Wege haben werden.

Im Güterverkehr findet laut KRAIL et al. eine geringe Verschiebung zum Schienenverkehr statt, während die Nutzung straßengebundener Verkehrsmittel gleichbleibt³⁸⁴.

³⁷⁸ Vgl. SYSTRA (2016) automated and autonomous public transport, S. 12–17.

³⁷⁹ Vgl. SYSTRA (2016) automated and autonomous public transport, S. 15–17.

³⁸⁰ Vgl. Hannon et al. (2019) An integrated perspective on the future of mobility, part 3, S. 7–9.

³⁸¹ Vgl. Krail et al. (2019) Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr, S. 75–76.

³⁸² Vgl. Hannon et al. (2019) An integrated perspective on the future of mobility, part 3, S. 73–76.

³⁸³ Vgl. Hannon et al. (2019) An integrated perspective on the future of mobility, part 3, S. 8; Vgl. Krail et al. (2019) Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr, S. 143.

³⁸⁴ Vgl. Krail et al. (2019) Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr, S. 144.

Aufbau und Ergebnisse der Referenzstrecken

Analog zu der Studie „Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr“ wird angenommen, dass sich in der Logistik die Verkehrsmittelwahl nicht signifikant ändert.³⁸⁵ Im Bereich der City-Logistik nimmt die Studie an, dass die Zustellfahrzeuge kleiner und vollautomatisiert werden³⁸⁶. Die Zustellfahrzeuge starten von regionalen Logistikzentren, zu welchen der Fernverkehr geleitet wird. Unter den Transportdienstleistern bestehen keine gemeinsamen Nutzungen.³⁸⁷

Im Straßenpersonenverkehr wird es gemäß der Studie zu Veränderungen der Kosten und Transferzeiten, nicht der Verkehrsmittelwahl, kommen. Die Fahrzeiterhöhung wird laut KRAIL et al. auf max. 4 % festgeschrieben³⁸⁸. Dem entgegen, geht die HANNON et al. davon aus, dass die Fahrzeiterhöhung 2030 15 % betragen wird³⁸⁹. Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Mittelwert zwischen den beiden Werten (9,5 %) gewählt.

Im Schienen gebundenen Personenverkehr, kann eine durchschnittliche Geschwindigkeitserhöhung von bis zu 20 % durch ein voll automatisiertes System erreicht werden³⁹⁰. Diese bezieht sich auf ein geschlossenes System. Aufgrund fehlender anderer Quellen wird eine Fahrzeitreduktion von 10 % angesetzt. Diese wird analog für den Schienengüterverkehr angesetzt.

Alle Fahrten der Verkehrsmittelkategorie MIV können sowohl mit einem privaten Fahrzeug, einem Taxi, als auch einem über eine Mitfahrzentrale vermittelten Fahrzeugs durchgeführt werden. Entsprechend ihrer Anteile an der Gesamtfahrleistung werden diese in die spezifischen Kennwerte eingerechnet. Eine Ausnahme stellen Taxifahrten am Zielort dar (bei intermodalen Reisen), da diese nicht mit dem eigenen Fahrzeug durchgeführt werden können und daher separat betrachtet werden.

Der Rückzug des ÖPV auf die nachfragestarken Strecken ist schwer zu quantifizieren und wird im Rahmen dieser Arbeit daher nicht modelliert.

Die Zusammensetzung der Verkehrsmittel

Die Zusammensetzung der Verkehrsmittel bleibt bezogen auf die Antriebstechnologien im Vergleich zum Trendszenario gleich. In KRAIL et al. wurden die Marktpenetrationsraten für die Straßenverkehrsmittel festgelegt. Diese geben an, zu wieviel Prozent die Fahrzeuge mit der jeweiligen Automatisierungsstufe ausgerüstet sind. In der Studie wird im motorisierten Individualverkehr unterschieden zwischen der Klein- und Kompakt-, Mittel- sowie Oberklasse. In

³⁸⁵ Vgl. Krail et al. (2019) Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr, S. 73–75.

³⁸⁶ Vgl. Krail et al. (2019) Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr, S. 73.

³⁸⁷ Vgl. Krail et al. (2019) Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr, S. 74–75.

³⁸⁸ Vgl. Krail et al. (2019) Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr, S. 143.

³⁸⁹ Vgl. Hannon et al. (2019) An integrated perspective on the future of mobility, part 3, S. 15.

³⁹⁰ Vgl. Hannon et al. (2019) An integrated perspective on the future of mobility, part 3, S. 8–9.

allen Kategorien des MIVs sind die meisten Fahrzeuge automatisiert und in wenigen Fällen fahrerlos.³⁹¹

Nutzfahrzeuge werden gem. Studie entweder autonom oder auf Stufe 1 (assistiert) sein. Dies gilt für schwere und leichte Nutzfahrzeuge. Das Segment Bus wird unterteilt in Klein-, Stadt- und Reisebusse. Stadt- und Reisebusse sind hauptsächlich fahrerlos und in Ausnahmesituationen assistiert. Kleinbusse haben ausschließlich Assistenzsysteme der Stufen 4 und 5.³⁹²

Ökologische Daten

Die ökologischen Kennwerte für die Verkehrsmittel werden in Anlehnung an KRAIL et al. über Verbesserungsfaktoren zum Referenzszenario beschrieben. In diese Betrachtung fließt bereits eine unvollständige Marktpenetration ein.³⁹³ Die Verbesserungsfaktoren sind im Anhang unter „Verbesserungsfaktoren“ dargestellt.

Für autonome Taxen und gepoolte autonome Fahrzeuge werden die Grunddaten für den MIV um die veränderten Besetzungsgrade und Streckenlängen angepasst.

Ökonomische Daten

Durch die zunehmende Automatisierung sinkt der Value of Time (VOT), da die Zeit im Fahrzeug anderweitig verwendet werden kann. Der neue VOT für den MIV ist um 16 % im Vergleich zu dem VOT von 2017 gesunken.³⁹⁴ Für die Nutzfahrzeuge sinkt der VOT aufgrund der Steigerung an fahrerlosen Strecken.³⁹⁵ Zusammen mit der minimalen Reduktion der Kapazität bei dem geringen Anstieg des Verkehrsaufkommens, ergibt sich somit eine Reduktion der Staukosten.

Soziale Daten

In KRAIL et al. wurde für die angenommene Marktpenetration die Entwicklung der Vollkosten durch Wegfall des Fahrers je Verkehrsmittel prognostiziert.

Kosten Degression:³⁹⁶

- SNF – 17,5 %
- LNF, Busse – 17 %
- Binnenschifffahrt und Schienenverkehr – 14 %

³⁹¹ Vgl. Krail et al. (2019) Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr, S. 102–104.

³⁹² Vgl. Krail et al. (2019) Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr, S. 105–107.

³⁹³ Vgl. Krail et al. (2019) Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr, S. 134.

³⁹⁴ Vgl. Krail et al. (2019) Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr, S. 142.

³⁹⁵ Vgl. Krail et al. (2019) Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr, S. 105–106.

³⁹⁶ Vgl. Krail et al. (2019) Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr, S. 141.

Diese wurden im Rahmen der Studie übernommen. Die Kostendegression wird ebenso auf den Schienen gebundenen Nahverkehr angewandt. Nicht berücksichtigt werden die Effizienzgewinne durch die Automatisierung, da diese nur gebündelt mit den sonstigen Einsparungen betrachtet werden. Die Kostendegressionsfaktoren für autonome Taxen und gepoolte Fahrzeuge werden aus BÖSCH et al. übernommen. Diese belaufen sich zu:³⁹⁷

- Taxi – 83,4 %
- Gepoolte Fahrzeuge – 81,4 %

Wie an den Werten zu erkennen, besteht eine große Diskrepanz zwischen der Kostendegression bei Taxen und gepoolten Fahrzeugen im Vergleich zu LNF, SNF, Bussen, Binnenschifffahrt und Schienenverkehr. Die unterschiedlichen Kostendegressionsfaktoren werden im Folgenden für die Verkehrsmittel einzeln erklärt.

Im Schienenverkehr gibt das Gutachten „Revision der Regionalisierungsmittel – Mittelbedarf der Bundesländer für den Revisionszeitraum 2015-2030“ Aufschluss über die Betriebskosten³⁹⁸. Gemäß diesem setzen sich die Betriebskosten zu lediglich 9 % aus Kosten für das Fahrpersonal zusammen. Der größte Anteil von 32,1 % kommt durch die Entgelte für die Nutzung der Trassen zustande.³⁹⁹ Durch die Autonom- bzw. Automatisierung werden die Kosten für Wartung und Verwaltung weiter gesenkt, so dass eine Kostendegression von 14 % realistisch ist. Für die Binnenschifffahrt wird eine ähnliche Aufteilung angenommen.

Für Taxi und gepoolte Fahrzeuge ist der größte Kostenanteil laut BÖSCH et al. der Fahrer mit einem Anteil von 88 %. Der Wegfall dieser Kosten reduziert somit die Gesamtkosten deutlich. Durch die höheren Anschaffungskosten und gestiegene Reinigungskosten verringern sich die Kosten auf ca. 80 %.

Der Unterschied zwischen den Ergebnissen für Busse und gepoolten Taxen lässt sich erklären, da BÖSCH et al. analysiert haben, welche Kosten theoretisch durch ein autonomes Fahrzeug eingespart werden können⁴⁰⁰. KRAIL et al. bestimmten im Gegensatz dazu über die Marktpenetrationen, welche Einsparungen für alle Autos (autonom und nicht autonom) für eine Kategorie möglich sind⁴⁰¹. Die Marktpenetrationen sind für die beiden autonomen Szenarien im Anhang Tabelle A-8 dargestellt.

Zur Reduktion des Unfallrisikos gibt es, wie in LITMAN dargestellt unterschiedliche Reduktionspotentiale⁴⁰². Die Mehrheit der Experten geht von einer Reduktion um 90 % aus⁴⁰³. Diese

³⁹⁷ Vgl. Bösch et al. (2018) Cost-based analysis of autonomous mobility services, S. 83.

³⁹⁸ Vgl. Holzhey et al. (2014) Revision der Regionalisierungsmittel.

³⁹⁹ Vgl. Holzhey et al. (2014) Revision der Regionalisierungsmittel, S. 16.

⁴⁰⁰ Vgl. Bösch et al. (2018) Cost-based analysis of autonomous mobility services, S. 76.

⁴⁰¹ Vgl. Krail et al. (2019) Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr, S. 140–141.

⁴⁰² Vgl. Litman (2019) Autonomous Vehicle Implementation Predictions, S. 9–10.

⁴⁰³ Vgl. Litman (2019) Autonomous Vehicle Implementation Predictions, S. 10.

setzt allerdings voraus, dass alle Fahrzeuge autonom fahren. Dies ist wie oben bereits beschrieben nicht der Fall. Das Reduktionspotential im Mischverkehr beträgt gemäß Schätzungen 10 %⁴⁰⁴.

6.3.3 Optimierte multimodale Mobilität

Das Szenario „optimierte multimodale Mobilität“ (OMM) basiert auf dem Szenario „Welt der Mobilitätsdienstleistungen“ aus der Studie „Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr“⁴⁰⁵. Annahmen zum Modal Split wurden aus der Studie „An integrated Perspective on the future of mobility: Part 3“ übernommen⁴⁰⁶. Die nachfolgenden Ausführungen stammen, wenn nicht anders zitiert, aus KRAIL et al.

Im Szenario OMM wird die geteilte Nutzung von Fahrzeugen (Sharing-Economy) stark anwachsen. Die Nutzer ändern ihr Mobilitätsverhalten und reduzieren damit den individuellen Fahrzeugbesitz. Nach KRAIL et. al. setzt sich der Trend zur Urbanisierung weiter fort, so dass kurze Wege zwischen den Orten des täglichen Lebens entstehen. In Kombination mit einem gut ausgebauten öffentlichen Nahverkehrssystem führt dies zu einer Entwicklung der Gesellschaft hin zu einer SharingEconomy.

Laut KRAIL et. al. steigen die Anschaffungskosten für Fahrzeuge stark an. Dies führt zu einer Abnahme des Pkw Privatbesitzes. Im öffentlichen Personenverkehr und für private Anwendungen amortisieren sich die Kosten durch hohe Laufleistungen und Besetzungsgrade.

Wie im Trend „Digitalisierung“ beschrieben, nehmen die Experten um KRAIL an, dass sich multimodale Mobilitätsplattformen bilden werden, welche zu mehr multi- bzw. intermodalen Strecken führen. In dicht besiedelten Gebieten setzen sich Pay-on-Demand Services weiter durch. Der klassische ÖPNV, bestehend aus Linienbussen, Straßen- und U-Bahnen, wird zunehmend auf die Hauptachsen zurückgedrängt und wird automatisiert. In den restlichen Gebieten setzt der ÖPNV zunehmend auf Kleinbusse, welche auch in ländlichen Gebieten die Anzahl an Point-to-Point Verbindungen erhöhen. In den ländlichen Gebieten wird der klassische Verkehr durch die Kleinbusse verdrängt.

Auf Strecken der Kategorien „Intercity“ und „Langstrecke“ werden zunehmend Kleinbusse eingesetzt, welche zwischen mehreren Personen geteilt werden. Diese Fahrzeuge werden in auslastungsschwachen Zeiten für Pakettransporte verwendet. Dadurch steigen die spezifischen Fahrleistungen je Fahrzeug weiter an. Fahrzeuge, welche für mehrere Verwendungszwecke genutzt werden können, werden für Flottenbetreiber attraktiver.

⁴⁰⁴ Vgl. Litman (2019) Autonomous Vehicle Implementation Predictions, S. 9–10.

⁴⁰⁵ Vgl. Krail et al. (2019) Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr, 76ff.

⁴⁰⁶ Vgl. Hannon et al. (2019) An integrated perspective on the future of mobility, part 3, S. 2–8.

Tabelle 6-13 - Entwicklungen Personenverkehr ("Optimierte multimodale Mobilität ")⁴⁰⁷

Kategorien	Entwicklungstendenz
PKW	
Verkehrsaufkommen	Geht zurück
Fahrleistung	Nimmt zu
Anzahl an Wegen	Steigt wenig
Verkehrsfluss	Reduktion durch Sharing und autonomes Parken
ÖPNV	
Verkehrsaufkommen	steigt
Fahrleistung	Steigt aufgrund von mehr Punkt-zu-Punkt Verbindungen
Relevanz Kleinbusse	Steigt
Relevanz Stadtbusse	Konstant
Verkehrsfluss	Reduktion durch Sharing

Im Güterverkehr erwarten die Experten eine gemeinsame Nutzung von City-Hubs, um die Waren gemeinschaftlich in die Stadtzentren zu transportieren. Durch fahrerlose Fahrzeuge werden die Waren zwischen den Knotenpunkten, außerhalb der Stadtzentren bewegt. Durch ihre autonome und elektrische Fahrweise kann die Warenversorgung sowohl in Morgenstunden als auch bis spät in den Abend aufrechterhalten werden.

Mit dem Einsatz von mobilen Packstationen und der Belieferung von Geschäftskunden in den frühen Morgenstunden geht der Einsatz von Zustellungsfahrzeugen mit größeren Gefäßgrößen zurück. Die mobilen Packstationen verringern darüber hinaus die Fahrleistung, da mehrere Zustellversuche vermieden werden.

Im Güterfernverkehr findet keine Verschiebung des Modal Splits statt, da Schienengüter und Wasserstraßensystem sich ebenfalls automatisieren. Die Effizienzsteigerung im Straßenverkehr fällt identisch aus. Es findet eine zunehmende Vernetzung der Verkehrsmittel statt. Die Anzahl an intermodalen Verbindungen erhöht sich dadurch weiter.

⁴⁰⁷ in Anlehnung an Krail et al. (2019) Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr, S. 78–79.

Tabelle 6-14 - Entwicklung des Güterverkehrs ("Optimierte multimodale Mobilität")⁴⁰⁸

Kategorien	Entwicklungstendenz
City-Logistik	
Verkehrsaufkommen	Steigt
Fahrleistung	Nimmt leicht ab
Relevanz kleiner Nutzfahrzeuge	Steigt an
Relevanz schwerer Nutzfahrzeuge	Geht zurück
Fernverkehr	
Verkehrsaufkommen	Rückläufig (durch gemeinschaftliche Lade- raumnutzung)
Fahrleistung	ansteigend
Relevanz kleiner Nutzfahrzeuge	rückläufig
Relevanz schwerer Nutzfahrzeuge	Leicht ansteigend

Das Verkehrsaufkommen

HANNON et al. folgend wächst die Verkehrsleistung im Personenverkehr bis 2030 um 30 % im Vergleich zur Ausgangssituation 2017.⁴⁰⁹ Zum Vergleich wird in RENEWBILITY davon ausgegangen, dass sich die Verkehrsleistung bis 2030 um 12 % erhöht.⁴¹⁰ Zur Fortschreibung der Ergebnisse wird unter Berücksichtigung des Bevölkerungsrückgangs und der Urbanisierung, die Entwicklung bis 2030 mit den Entwicklungen im Trendszenario ins Verhältnis gesetzt und fortgeschrieben. Im Güterverkehr fällt das Wachstum aufgrund des generellen Anstiegs der Verkehrsleistung signifikanter aus.

Der Modal Split

Der Modal Split bezogen auf die Verkehrsleistung verschiebt sich im Personenverkehr zum motorisierten Individualverkehr. Dieser bietet mit autonomen Taxen und gepoolten

⁴⁰⁸ in Anlehnung an Krail et al. (2019) Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr, S. 81.

⁴⁰⁹ Vgl. Hannon et al. (2019) An integrated perspective on the future of mobility, part 3, S. 8.

⁴¹⁰ Vgl. Zimmer et al. (2016) Renewability III Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors, S. 127.

Fahrzeugen neue Angebote und biete dadurch eine kostengünstige Alternative zum ÖPV. Der ÖPV und schienengebunden Verkehr verlieren im Vergleich dazu.⁴¹¹

Im Güterverkehr steigt bei gleichbleibender Fahrleistung die Verkehrsleistung durch höhere Auslastungen der Fahrzeuge an. Die Auslastungsgrade werden durch geteilte Fahrzeugkonzepte erhöht.⁴¹² Im Schienenverkehr kommt es zu einem leichten Anstieg der Fahrleistung, während die Binnenschifffahrt leicht zurück geht. Die Auslastung der beiden Verkehrsträger bleibt gleich, weshalb die Verkehrsleistung sich analog zur Fahrleistung verhält. Der Differenz zwischen Binnenschifffahrt und Schienenverkehr begründet sich durch die Annahme der Autoren, dass die Automatisierung im Schienenverkehr schneller voranschreitet.⁴¹³

Aufbau und Ergebnisse der Referenzstrecken

Die Annahmen und Entwicklungen für den Personenverkehr werden aus dem Szenario „unregulierte autonome Mobilität“ entnommen. Die gestiegene Wichtigkeit von autonomen geteilten Fahrzeugen wird über ihren Anteil an der gesamten Fahrleistung des MIVs berücksichtigt.

2017 gehen ca. 50 % der Wartezeiten bei Bussen auf Einstiegvorgänge zurück⁴¹⁴. Durch die zunehmende Digitalisierung und mobiles Bezahlungssystem können diese Wartezeiten eingespart werden. Weitere Reduktionspotentiale bestehen durch die Analyse der Fahrgastströme und einer einhergehenden Reduktion der Wartezeiten zwischen den Verkehrsmitteln auf intermodalen Reisen⁴¹⁵. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Einsparungspotentiale für Tram, U-Bahn, Zug-Nah und Zug-Fernverkehr mit 25 % bzgl. der Wartezeit angesetzt.

Die Zusammensetzung der Fahrzeugkategorien

Die Zusammensetzung der Fahrzeugkategorien gleicht in großen Teilen der Zusammensetzung im Szenario „unregulierte autonome Mobilität“. Ausschließlich bei der Automatisierung des MIVs steigt der Automatisierungsanteil (Stufe 4 und 5) im Vergleich zum Szenario „unregulierte autonome Mobilität“ an.⁴¹⁶

Ökologische Daten

Die Ausgangsdaten für die ökologische Betrachtung (Emissionen/ Verbräuche je km) bleiben identisch. Veränderungen werden durch höhere Auslastungsgrade erreicht. Diese werden im Personenverkehr durch eine zunehmende Vernetzung und der Wahl des effizientesten Verkehrsmittels je Reise erreicht. Im Güterverkehr verändert die gemeinsame Nutzung von

⁴¹¹ Vgl. Krail et al. (2019) Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr, S. 430.

⁴¹² Vgl. Krail et al. (2019) Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr, S. 142.

⁴¹³ Vgl. Krail et al. (2019) Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr, S. 144.

⁴¹⁴ Vgl. Hasse et al. (2017) Digital mobil in Deutschlands Städten, S. 19.

⁴¹⁵ Vgl. Hasse et al. (2017) Digital mobil in Deutschlands Städten, S. 34.

⁴¹⁶ Vgl. Krail et al. (2019) Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr, S. 121.

schweren Nutzfahrzeugen und die Reduktion der Fahrten in die Stadt die Emissionen und Verbräuche. Die Veränderungen in den Auslastungen belaufen sich auf:⁴¹⁷

- MIV – 7 %
- LNF, Lkw – 2.5 %

Im Schienen- und öffentlichen Verkehr werden die Auslastungen als konstant angenommen.

Ökonomische Daten

Die Staukosten sinken weiter, da der VOT für den motorisierten Individualverkehr um 20 % im Vergleich zum Ausgangsszenario sinkt und die Fahrleistung aufgrund höherer Auslastungen und besser abgestimmter Verkehrsmittelkombinationen zurückgeht⁴¹⁸.

Soziale Daten

Die Kostendegressionen für den motorisierten Individualverkehr ergeben sich analog zu denen in Kapitel „unregulierte autonome Mobilität“. Die gesamte Kostendegression für den MIV verändert sich aufgrund der größeren Anteile an der gesamten Verkehrsleistung:⁴¹⁹

- LNF, Busse – 18 %
- Lkw – 18 %
- Schiene – 14 %

6.3.4 Pod-basierte multimodale Mobilität

Die Ausführungen zur Pod-basierten Mobilität beruhen auf der Konzeptskizze der Siemens Mobility GmbH, mehreren Vorträgen von Herrn Schlaht (Siemens Mobility – Leiter Innovationsmanagement) und eigenen Abschätzungen des Autors.

Der Pod-basierte Verkehr zeichnet sich durch die Trennung von Antriebstrang (Carrier) und Beförderungsgefäß (Pod) aus. Die Schnittstelle zur Verbindung zwischen Pod und Carrier muss an beiden Gefäßen vorhanden sein. Diese soll Informationen zwischen den beiden übertragen und den Pod mit Strom des Carriers beliefern. Für jeden Untergrund wechselt der Carrier (z.B.: Schiene -> Schienenskateboard, Wasser -> Trägerschiff).

Es gibt einerseits Personen-Pods, welche wie kleine Linienbusse ausgestattet sind und somit Sitz- und Stehplätze bieten und andererseits Fracht-Pods, welche je nach Anwendungsfall u.a. Schüttgut und Pakete transportieren können.

Der modulare Aufbau von Pod und Carrier ermöglicht einen unabhängigen Austausch der Einheiten und somit einfache Wartungsarbeiten, keine Reichweitenprobleme und einen schnellen Wechsel der Carrier. Nachteilig wirken sich allerdings die Effizienzverluste durch größere

⁴¹⁷ Vgl. Krail et al. (2019) Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr, S. 142.

⁴¹⁸ Vgl. Krail et al. (2019) Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr, S. 142.

⁴¹⁹ Vgl. Krail et al. (2019) Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr, S. 141.

Verkehrsmittel und der notwendigen hohen Investitionskosten aus, da die Carrier, welche den größten Kostenanteil ausmachen, in großen Stückzahlen vorhanden sein müssen.

Im Güterverkehr bezeichnet man eine Strecke, welche ohne Unterbrechung in einem Gefäß (Pod) durchgeführt wird und bei der der Carrier gewechselt wird als intramodal. Durch Pod-basierten Verkehr werden die meisten Personenverkehrsstrecken ebenfalls intramodal, da die Personen an ihrem Ausgangsort einsteigen und erst am Ziel wieder aussteigen, ohne das Verkehrsmittel zu wechseln, d.h. sie bleiben im Pod, der Carrier hingegen kann wechseln.

Im Folgenden wird der Pod-basierte Verkehr entlang der zur Beschreibung der vorherigen Szenarien verwendeten Kategorien vorgenommen. Annahmen über die Bevölkerungsentwicklung können dem Trendszenario entnommen werden.

Aufbau der Referenzstrecken

Entgegen der bisherigen Vorgehensweise werden erst die Referenzstrecken vorgestellt, da diese für das Verständnis des Pod-basierten Verkehrs notwendig sind.

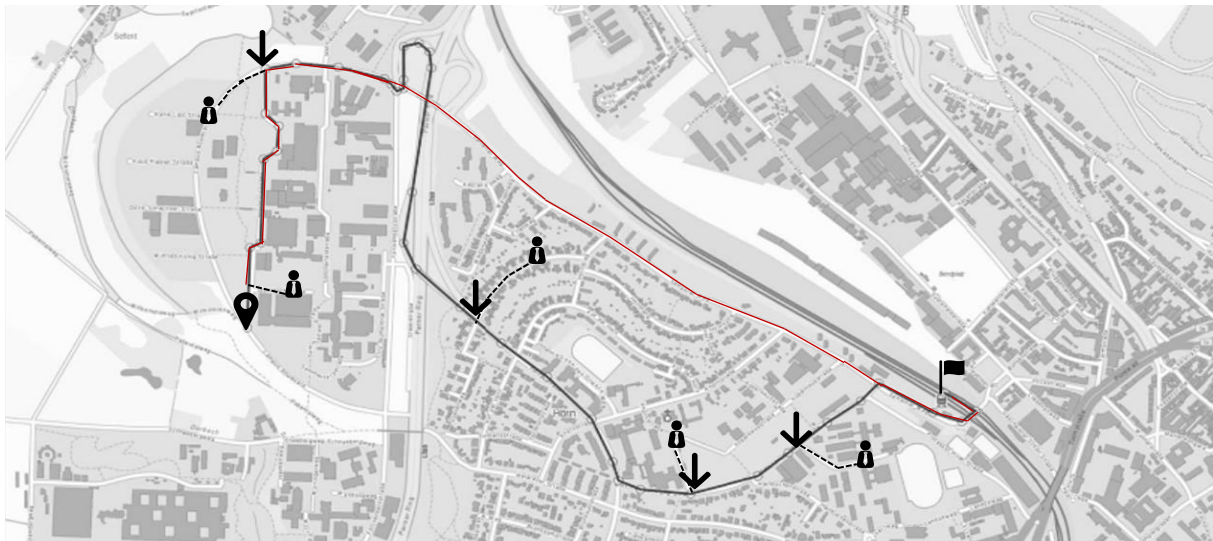


Abbildung 6-13 - Dynamische Haltestellen⁴²⁰

In Abbildung 6-13 ist eine mögliche Route vom Cluster Produktionstechnik in Aachen zum Bahnhof Aachen West dargestellt. In Rot ist die direkte Verbindung zwischen Start und Ziel dargestellt, während der Pod der schwarzen Linie folgt.

Das Konzept der dynamischen Routenführung wird verwendet, um den zusätzlichen Weg, welchen ein gepooltes Fahrzeug beim Einsammeln der Passagiere fährt, zu minimieren. Dafür müssen die Passagiere eine Strecke von weniger als 200 Metern zurücklegen, um an einer dynamisch auf der Route generierten Haltestelle einzusteigen.

⁴²⁰ Eigene Darstellung, mit Daten ausVgl. Tim-Online-NRW.

In dem Modell wird dies durch einen zusätzlichen Fußweg von 100 Metern bis zur dynamischen Haltestelle modelliert. Der zusätzliche Weg, den das Fahrzeug zurücklegt wird aus den Referenzstrecken ermittelt.

Für jede Route wird entsprechend der zu erwartenden Auslastung eine passende Gefäßgröße gewählt (Pod). Die Kosten für den Endverbraucher passen sich dabei, analog zu dem Geschäftsmodell von UBER und LYFT an den Besetzungsgrad des Fahrzeuges an⁴²¹. Im Rahmen dieser Arbeit wird dies durch eine günstigere Route mit längeren Fahrt- und Wartezeiten (Pod Big) und einer kostenintensiveren Route mit kürzeren Fahrt- und Wartezeiten (Pod Small), dargestellt.⁴²² Der Verteilung der Personen auf die beiden Klassen fließt als Variable in das Modell ein.

Eine Besonderheit stellen Bahnhöfe da, an diesen sammeln sich mehrere Pods und werden gesammelt auf einen Zug verladen. Für diesen Vorgang müssen die Bahnhöfe umgebaut werden, um eine Beladung mit Fahrzeugen von beiden Seiten zu erlauben.

Für den Personenverkehr wird angenommen, dass immer der Carrier mit der höchsten Effizienz (geringe Fahrzeit, Emissionen und Komfort) gewählt wird. Dies führt in der Praxis zu einem schnellen Wechsel des Pods auf die Schiene bzw. zum Flugzeug. Weiterhin wird angenommen, dass es sich um einen fließenden Verkehr handelt, d.h. die Passagiere auf ihrem Weg nicht umsteigen. Eine Ausnahme stellt der Transport mit dem Flugzeug da.

Die Integration von U-Bahnen in das System gestaltet sich aufgrund der Höhendifferenz schwierig. Die Pods müssten zunächst über mehrere Fahrstühle auf die U-Bahn-Ebene gebracht werden, könnten dort jedoch aufgrund der Tunnelbreite von über 2,95 m⁴²³ das vorhandene Netz verwenden. Als Besonderheit können auf den Schienen des U-Bahn Systems auch Cargo Pods transportiert werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird für die U-Bahn derselben Zugtyp, wie für den Nahverkehr angenommen.

Die Zusammensetzung der Fahrzeugkategorien

Für die Zusammensetzung der Fahrzeugkategorien wurden die Daten des Szenarios „optimierte multimodale Mobilität“ übernommen. Den verschiedenen Carrier-Pod-Kombinationen wurden klassische Verkehrsmittel zugeordnet und um die neuen Besetzungsgrade angepasst. Im Straßenverkehr erfolgt die Unterscheidung nach der Größe des Pods.

- Small Pod (max. 6 Personen) – MIV
- Big Pod (max. 50 Personen) – Bus
- Cargo Small Pod (max. 2 Tonnen Zuladung) – LNF
- Cargo Big Pod (max. 26 Tonnen Zuladung) - Lkw

⁴²¹ Vgl. Uber – UberPool.

⁴²² Durch die Zunahme an Stopps und den längeren Ein- und Ausstiegszeiten wird für die straßengebundenen Big Pods eine längere Fahrzeit von 15 % angenommen und die Wartezeit um 10 % im Vergleich zum Pod Small erhöht.

⁴²³ Stichprobenhafte Durchsicht der Münchener Verkehrsbetriebe und Berliner Verkehrsbetriebe bzgl. der technischen Daten ihrer Züge.

Im Schienenverkehr wird dagegen nach der Distanz unterschieden, da die Pods gebündelt auf einen Schienenskiboard (Carrier) transportiert werden. Auf einem Nahverkehrs Schienen-Carrier können 12 Pod-Einheiten (Fernverkehr: 24 Pod-Einheiten) transportiert werden. Eine Pod-Einheit entspricht einem 20 Fuß Container (6 Meter Länge und 2,5 Meter Breite) und daher der Größe eines kleinen Pods (Small Pod oder Cargo Small Pod). Der große Pod (Big Pod oder Cargo Big Pod) ist doppelt so lang und entspricht einem 40 Fuß Container (12 m x 2,5 m). Die Unterscheidung im Schienenverkehr zwischen Nah- und Fernverkehr wird dabei fortgeführt. Im Luftverkehr werden die Daten aus dem Szenario OMM übernommen, da es hier zu einem Bruch im Verkehr kommt. Eine direkte Integration des

Soziale Daten

Zusätzlich zu den bisherigen Kosten kommen die Schnittstellenkosten und Zusatzkosten durch die Trennung die Trennung von Antriebseinheit und Personen- bzw. Frachtraum⁴²⁴. Eine Schnittstelle kostet nach Schätzungen des SLA (Institut für Strukturmechanik und Leichtbau der RWTH Aachen) ca. 5000 Euro. Für den Carrier sind vier Schnittstellen und für den Pod acht Schnittstellen (vier für die Verbindung mit Bodencarriern und vier für die Verbindung mit Luftcarriern) erforderlich. Dies verursacht pro Pod extra Kosten von 40.000 Euro und pro Carrier von 20.000 Euro.

Die Ermittlung der Kosten für die Pods erfolgt in sechs Schritten:

1. Bestimmung Anschaffungskosten für Pod und Carrier
2. Lineare Abschreibung des Pods über 300.000 km (\approx 6 Jahren a 50.000 km)
3. Berechnung des Mehrpreises der Carrier durch die Schnittstellen und Automatisierung im Vergleich zum Referenzszenarios
4. Bestimmung der neuen Carrier-Kosten pro Pod-km (Anteil Anschaffungskosten an Vollkosten * Mehrpreisfaktor * Kosten pro Pod-km (Szenario OMM))
5. Subtraktion durch Personenzahl
6. Kosten für die Carrier (bezogen auf Pkm) + Kosten für die Pods (bezogen auf Pkm)

Die Annahmen zur Bestimmung der Kosten können dem Anhang S. 155 entnommen werden.

Daraus ergeben sich die in Tabelle 6-15 dargestellten Kosten. Die hohen Kosten für den kleineren Pod (Small) auf der Schiene ergeben sich durch den geringen Besetzungsgrad bei gleichzeitig hoher Fläche. So werden auf der halben Größe eines großen Pods nur durchschnittlich sechs Personen mitgenommen (im Vergleich zu 25 bei dem Big Pod).

⁴²⁴ Viele Teile werden doppelt ausgelegt werden müssen um den Anforderungen an die Sicherheit folge zu leisten.

Tabelle 6-15 - Kosten der Pod-Carrier Kombinationen Personenverkehr

Verkehrsmittel	Anteil an Vollkosten ⁴²⁵	Kosten pro Pkm
Straße		
Small Pod	18 % ⁴²⁶	0,25
Big Pod	14 % ⁴²⁷	0,07
Schiene⁴²⁸		
Nahverkehr: Small Pod	11 %	0,40
Nahverkehr: Big Pod	11 %	0,10
Fernverkehr: Small Pod	11 %	0,20
Fernverkehr: Big Pod	11 %	0,05
Einheit	%	Euro/Pkm

Die Kosten für die Pod-Carrier Kombinationen für den Güterverkehr sind in Tabelle 6-17 und Tabelle 6-17 dargestellt.

Tabelle 6-16 - Kosten der Pod-Carrier Kombinationen Güterverkehr (Teil 1)

Verkehrsmittel	Anteil an Vollkosten ⁴²⁹	Kosten pro Tkm
Straße		
Cargo Small Pod	14 % ⁴³⁰	0,68
Cargo Big Pod	10 % ⁴³¹	0,10
Einheit	%	Euro/Tkm

⁴²⁵ Gibt den Anteil der Anschaffungskoten an den Vollkosten wieder.

⁴²⁶ Annahme des Autors basierend auf den anderen Anteilen.

⁴²⁷ Annahme des Autors aufgrund der Vergleichbarkeit mit der Kostenstruktur beim Bus.

⁴²⁸ Für den Schienenverkehr wird angenommen, dass der Anteil der Anschaffungskosten an den Vollkosten für den Nah- und Fernverkehr gleich ist.

⁴²⁹ Gibt den Anteil der Anschaffungskoten an den Vollkosten wieder.

⁴³⁰ Annahme des Autors basierend auf den anderen Anteilen.

⁴³¹ Annahme des Autors aufgrund der Vergleichbarkeit mit der Kostenstruktur beim Bus.

Tabelle 6-17 - Kosten der Pod-Carrier Kombinationen Güterverkehr (Teil 2)

Verkehrsmittel	Anteil an Vollkosten ⁴³²	Kosten pro Tkm
Schiene⁴³³		
Nahverkehr: Cargo Small Pod	11 %	0,90
Nahverkehr: Cargo Big Pod	11	0,21
Fernverkehr: Cargo Small Pod	11 %	0,50
Fernverkehr: Cargo Big Pod	11 %	0,11
Einheit	%	Euro/Tkm

Der Unterschied in den Kosten pro Transportkilometer für einen Cargo Pod im Vergleich zu einem LNF bzw. Lkw lassen sich durch die höhere Auslastung erklären. Während bei einem klassischen Lkw die durchschnittliche Beladung über alle Lkw Klassen (3,5 Tonnen bis 24 Tonnen) gemittelt wird, ist der Cargo Big Pod auf den Transport von größeren Lasten ausgelegt und hat mit 13 Tonnen eine höhere Nutzlast. Gleiches gilt für den Cargo Small Pod, welcher im Gegensatz zur durchschnittlichen Nutzlast eines LNF (0,33 Tonnen⁴³⁴) ebenfalls deutlich mehr transportiert (1,5 Tonnen). Den Kostenvorteil eines Güterzuges kann der Cargo Pod nicht ausnutzen, da die Länge des Zuges geringer ist. Während bei einem klassischen Güterzug 527 Tonnen pro Zug transportiert werden⁴³⁵, liegt der Wert für den Zug-Carrier bei maximal 96 Tonnen (maximale Bestückung mit Big Cargo Pods).

Das Unfallrisiko bleibt im Vergleich zum Szenario optimierte multimodalen Mobilität gleich.

Ökologische Daten

Entsprechend der Zusammensetzung der Fahrzeuge und der Zuordnung zu den klassischen Verkehrsmittel errechnen sich die spezifischen Kennwerte über die Veränderungen in den Auslastungen und den Effizienzfaktoren, welche auf der Bauweise und den zusätzlichen Gewicht durch doppelte Strukturen bestehen. Zur Umrechnung auf die veränderten Personenanzahlen wurden die durchschnittlichen Besetzungsgrade der deutschen Bahn verwendet.⁴³⁶ Die ökologischen Daten (Personenverkehr) für den Pod ergeben sich somit zu den in Tabelle 6-18 dargestellten Werten:

⁴³² Gibt den Anteil der Anschaffungskosten an den Vollkosten wieder.

⁴³³ Für den Schienenverkehr wird angenommen, dass der Anteil der Anschaffungskosten an den Vollkosten für den Nah- und Fernverkehr gleich ist.

⁴³⁴ Vgl. Umweltbundesamt Österreich (2018) Emissionskennzahlen Datenbasis 2017, S. 1.

⁴³⁵ Vgl. Deutsche Bahn (2019) Integrierter Bericht 2018, S. 138.

⁴³⁶ Vgl. Deutsche Bahn (2019) Integrierter Bericht 2018, 117, 123.

Tabelle 6-18 - Kennzahlen des Personenverkehr Pods

Kategorien	THG	NOx	PM	Energieverbrauch
Straße				
Small Pod	47,29	0,12	0,14	0,61
Big Pod	34,30	0,13	0,01	0,46
Schiene				
Nahverkehr: Small Pod	51,88	0,01	0,00	2,01
Nahverkehr: Big Pod	12,45	0,00	0,00	0,48
Fernverkehr: Small Pod	36,38	0,01	0,00	1,42
Fernverkehr: Big Pod	8,73	0,00	0,00	0,33
Einheit	$\frac{g\ CO_2-eq}{Pkm}$	$\frac{g\ NO_x}{Pkm}$	$\frac{g\ PM}{Pkm}$	$\frac{MJ}{Pkm}$

Die Kennzahlen für den Cargo Pod sind in Tabelle 6-19 dargestellt.

Tabelle 6-19 - Kennzahlen des Güterverkehr Pods

Kategorien	THG	NOx	PM	Energieverbrauch
Straße				
Cargo Small Pod	86,06	0,18	0,00	1,14
Cargo Big Pod	21,17	0,4	0,00	0,29
Schiene				
Nahverkehr: Cargo Small Pod	103,76	0,02	0,00	4,04
Nahverkehr: Cargo Big Pod	23,95	0,00	0,00	0,47
Fernverkehr: Cargo Small Pod	72,76	0,02	0,00	2,83
Fernverkehr: Cargo Big Pod	16,79	0,00	0,00	0,65
Einheit	$\frac{g\ CO_2-eq}{Tkm}$	$\frac{g\ NO_x}{Tkm}$	$\frac{g\ PM}{Tkm}$	$\frac{MJ}{Tkm}$

Das Verkehrsaufkommen

Um eine Aussage über die Entwicklung des Verkehrsaufkommens treffen zu können, wird zuerst die Entwicklung der Fahrleistung und im Anschluss daran die Verkehrsleistung analysiert.

Im Szenario optimierte multimodale Mobilität wird angenommen, dass das Verkehrsaufkommen aufgrund der zusätzlichen Personen, analog zum Szenario optimierte multimodale Mobilität ansteigt. Der Anstieg wird durch die günstigeren Kosten pro km weiter beschleunigt. Besonders im Güterverkehr werden die reduzierten Kosten zu einem Anstieg der Tonnenkilometer führen.

Die Anzahl der Fahrzeugkilometer der Carrier erhöht sich aufgrund der konstant hohen Auslastung über den Tag (morgens – Passagiere, mittags – Güter, abends – Passagiere, nachts – Güter). Durch den höheren Anteil des Schienenverkehrs an der Gesamtfahrleistung, werden mehr Fahrten von der Straße auf die Schiene verlagert. Gleichzeitig sind die Pod/ Carrier Kombinationen im Durchschnitt wesentlich höher ausgelastet (50 % Auslastung beim Pod im Vergleich zu 25 % bei Bus und Bahn). Die Auslastung steigt von durchschnittlich 1,5 Personen pro Autos auf 3 Personen (100 % Verbesserung). Die Anzahl der Fahrten erhöht sich analog zum Szenario OMM um weitere 10 %, da die Kosten je km sinken. Vergleich man die beiden Werte, ist von einem Rückgang der gesamten Fahrzeugkilometer auszugehen.

Es kommt somit zu einem Anstieg des Verkehrsaufkommens (d.h. mehr Fahrgäste) einhergehend mit einer Reduktion der Fahrleistung (bei weniger Fahrten).

Der Modal Split

Der Modal Split wird im Gegensatz zu den vorherigen Szenarien exotherm festgelegt. Es wird davon ausgegangen, dass die Strecken, welche vorher mit dem Fahrrad oder zu Fuß zurückgelegt werden, auch im Pod-Szenario nicht motorisiert zurückgelegt werden. Der Anteil der NMIV (nicht motorisierte Vehicle) bleibt daher bei 10 % gleichbleibend.

Der Anteil des motorisierten Individualverkehrs reduziert sich zugunsten des Pod-basierten Verkehrs. Der motorisierte Individualverkehr lässt sich für einige Anwendungsfälle nicht substituieren (z.B.: Handwerker mit privaten Fahrzeugen, Außendienstmitarbeiter). Der Anteil des motorisierten Individualverkehrs liegt daher weiterhin bei 10 %. Die verbleibenden 80 % wird durch den Pod-basierten Verkehr ersetzt.

Ökonomische Daten

Zur Bestimmung der Investitionskosten musste im ersten Schritt die benötigte Menge an Pods bestimmt werden, welche notwendig wären, um bspw. alle Bewegung in Aachen durch Pods zu substituieren. Zur Bestimmung dieser Anzahl wurde in einem Top-Down Mechanismus, ausgehend von Tagesbevölkerung⁴³⁷ in Aachen die Anzahl an Fahrten je Stunde und mithilfe dieser die notwendige Anzahl an Pods bestimmt. Es wird angenommen, dass durch die

⁴³⁷ Die Tagesbevölkerung gibt an, wie viele Personen am Tag in der Stadt leben. Dies entspricht der Anzahl an Einpendlern minus den Auspendlern.

Auslegung über die maximalen Fahrten in der Spitze auch alle Fahrten des Güterverkehrs ausgeführt werden können.

Die Bestimmung der Maximalauslastung wurde aus BÖSCH et al. übernommen. Die Zeit der Maximalauslastung beträgt 3,8 Stunden und umfasst 50 % aller Fahrten. In den Off-Peak-Zeiten werden 30 % der täglichen Fahrten über eine Zeitspanne von 7,6 Stunden durchgeführt. In den Nachtstunden (9,6 Stunden) werden die übrigen 20 % der Fahrten durchgeführt. Die gesamte Betriebszeit beläuft sich damit auf 21 Stunden.⁴³⁸ In Kombination mit der Tagesbevölkerung in Aachen (270.000 Personen)⁴³⁹ und der durchschnittlichen Anzahl von Fahrten pro Tag (3,1 Wege pro Person und Tag)⁴⁴⁰ ergeben sich somit die Fahrten im Peak zu 418.000 Fahrten, im Off-Peak zu 251.000 Fahrten und in der Nacht zu 167.000 Fahrten.

Für jeden Zeitraum (Peak, Off-Peak, Nacht) wird die Anzahl an Fahrten durch die Dauer der Periode dividiert. Dadurch wird eine durchschnittliche Anzahl an Fahrten pro Stunde für jeden Zeitraum gewonnen. Der maximale Wert wird für die Berechnung der notwendigen Pods verwendet. Für Aachen wird der maximale Durchschnitt im Peak mit 110.132 Fahrten pro Stunde erreicht. Von diesen werden aufgrund des angenommenen Modal Splits 88.105 Fahrten pro Stunde mit Pods zurückgelegt.

Diese werden nun mit Kennzahlen u.a. die durchschnittliche Fahrtlänge (12 km)⁴⁴¹ der durchschnittlichen Auslastung der Pods (50 %) und den Platzangeboten der Pods verbunden. Die Aufteilung zwischen dem großen und kleinen Pod wird auf 70 % großer Pod zu 30 % kleiner Pod angenommen. Zusammen mit der Aufteilung der Pods zwischen Schiene und Straße, welche aus den Referenzstrecken entnommen wurden, ergibt sich eine Anzahl an notwendigen Pods. Diese beläuft sich in Aachen auf 1.541 Pods. Mit der Verteilung auf Schienen und Straße ergeben sich daraus 1.079 Straßen-Carrier und 96 Schienen-Carrier, um alle Pod-Wege bedienen zu können.

Die Kosten für die Pods wurden bereits oben ermittelt. Daraus ergeben sich Investitionskosten von 649,05 Mio. Euro für die Anschaffung der Pods und Carrier. Zusätzlich sind Kosten für den Aufbau der Infrastruktur (Umbau von Bahnhöfen mit Rampen) notwendig. Würden sich alle Personen in Aachen, welche ein Auto besitzen, beschließen einen Neuwagen zu kaufen und die Kosten für diese durchschnittlich 25.000 Euro betragen, würden dies 3,7 Mrd. Euro kosten. Die Investitionskosten für die reinen Anschaffungskosten würden daher wesentlich geringer liegen.

Die Staukosten gehen durch die Verlagerung eines Teils des Verkehrs auf die Schiene und den höheren Auslastungsgraden, stärker als im Szenario optimierte multimodale Mobilität zurück. Das Plus an Fahrten kann wie weiter oben beschrieben vernachlässigt werden.

⁴³⁸ Vgl. Bösch et al. (2018) Cost-based analysis of autonomous mobility services, S. 88–89.

⁴³⁹ Vgl. Landesbetrieb Information und Technik Nordrhein-Westfalen (IT.NRW) (2017) Pendleratlas NRW.

⁴⁴⁰ Vgl. Nobis et al. (2018) Mobilität in Deutschland - 2018, S. 3.

⁴⁴¹ Vgl. Nobis et al. (2018) Mobilität in Deutschland - 2018, S. 3.

7 Ergebnisse

In der Motivation der Arbeit (Kapitel 1.1) wurden die Erwartungen an ein multimodales Pod-System erläutert. Diese werden nun in vier Fragestellungen überführt, welche zu Beginn des Kapitels einzeln ausgewertet werden.

1. Reduzieren sich die Transferzeit in dem Szenario „Pod-basierte multimodale Mobilität“ im Vergleich zu den anderen Szenarien?
2. Wie verändern sich die ökologischen Indikatoren im Vergleich zu den anderen Szenarien?
3. Welche Auswirkungen hat ein Pod-System auf die individuellen Kosten?
4. Welche Auswirkungen hat ein Pod-System auf den Güterverkehr?

Im Anschluss an die Beantwortung der Hauptfragen, werden die sonstigen Indikatoren erklärt und die Ergebnisse erklärt. Es wird darauf verzichtet auf detailliert auf die Entwicklungen zwischen den Szenarien einzugehen, da diese bereits in der Szenarioanalyse ausführlich beschrieben wurden.

7.1 Vier Schwerpunkfragestellungen

7.1.1 Reduziert sich die Transferzeit durch Pod-basierte Mobilität?

Die Transferzeit besteht aus zwei Teilaspekten. Einerseits kann die Wartezeit durch weniger Umsteigvorgänge vermindert werden, andererseits die Fahrzeit durch kürzere Routen oder höhere Durchschnittsgeschwindigkeiten verringert werden. Im Pod-Szenario entfallen die Wartezeiten zwischen Verkehrsmitteln, bleiben aber als Wartezeit auf den Pod vorhanden. Diese unterscheidet sich zwischen dem Pod Big und Small nur minimal.

In Abbildung 7-1 sind die Fahrt-, Warte und Transferzeit im Personenverkehr für den Streckentyp urbane Kurzstrecke dargestellt. Bei den klassischen Verkehrsmitteln (zu Fuß, Fahrrad, MIV, ÖV) sind nur geringe Veränderungen der Fahrtzeiten über alle Verkehrsmittel zu beobachten. Das Verkehrsmittel mit der geringsten Fahrzeit ist in dem Szenario das Fahrrad, gefolgt von dem motorisierten Individualverkehr und den beiden Pods.

Im Vergleich zum motorisierten Individualverkehr und dem Fahrrad erhöhen Stopps und längere Strecken die Fahrzeit der Pods. Zusätzlich wird für urban Kurzstrecke angenommen, dass zwischen der Buchung der Pods und der Abholung eine Wartezeit von drei Minuten entsteht. Insgesamt hat der Pod somit eine doppelte (Big) bzw. anderthalbfache (Small) Transferzeit im Vergleich zum schnellsten Verkehrsmittel.

Zum Verständnis der Ergebnisse ist darauf hinzuweisen, dass in der Zeit für den MIV eine Pauschale von 0,4 km – 0,1 km (in Abhängigkeit vom Stadtyp) für den Weg zum Auto zeitlich eingerechnet wurde. Die Zeiten für die Parkplatzsuche allerdings nicht berücksichtigt wurden. Unter Berücksichtigung dieser Einschränkung kann zumindest der Pod Small als zeitlich gleichwertige Alternative zum MIV angesehen werden.

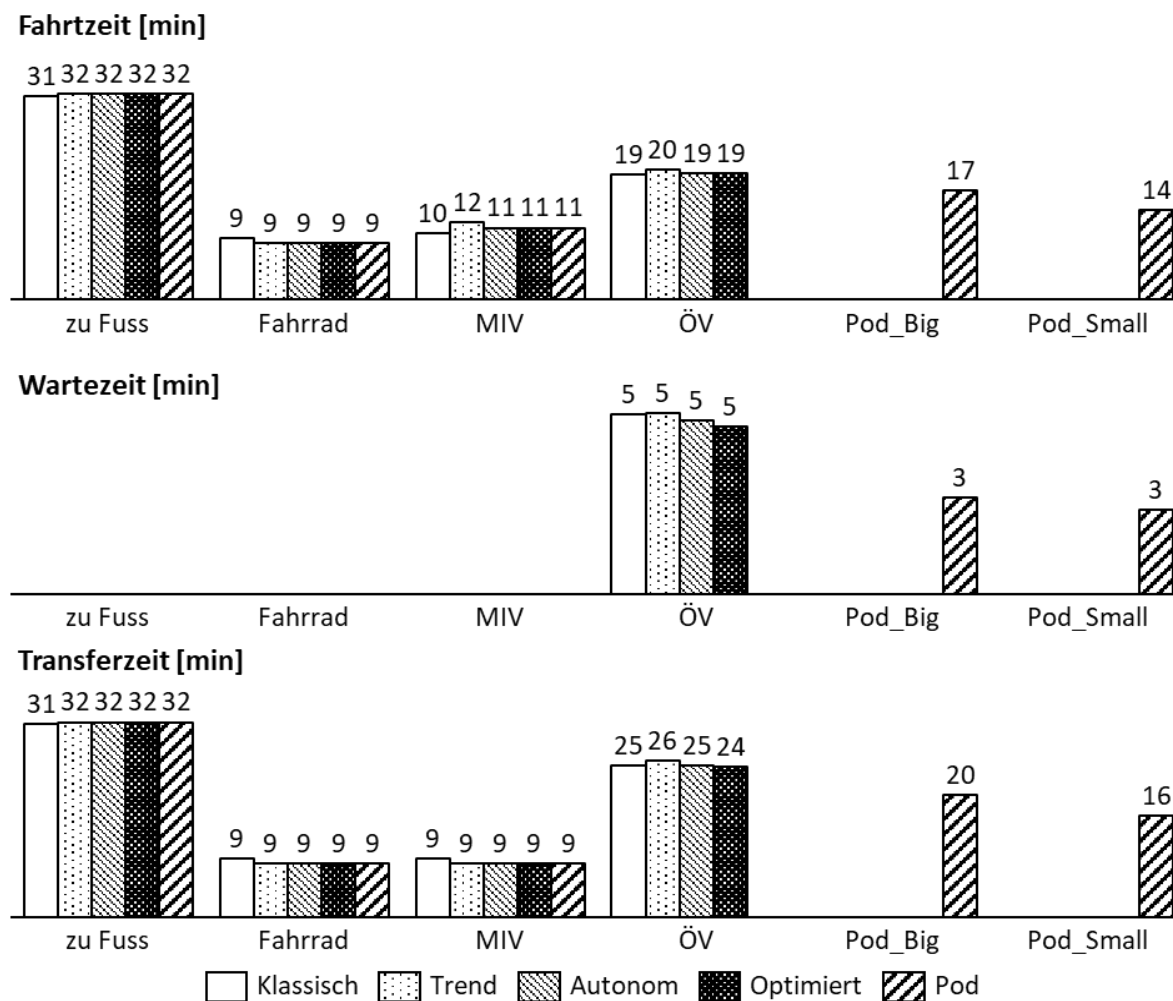


Abbildung 7-1 - Entwicklung der Fahrt-, Warte- und Transferzeit (UK)

In Abbildung A-3 im Anhang sind die Entwicklungen für den Streckentyp urbane Langstrecke (UL) dargestellt. In diesem ist die zeitliche Differenz zwischen dem Pod und dem schnellsten Verkehrsmittel (MIV), deutlich geringer (1,2-fache Transferzeit beim Pod Small und 1,3-fache Transferzeit beim Pod Big). Die weiterhin längere Transferzeit begründet sich in der Wartezeit von 5 (Pod Small) bzw. 6 (Pod Big). Auffällig ist für den Streckentyp UL, dass das Fahrrad durch den höheren Anteil von E-Bikes im Vergleich zum Pod und MIV ähnliche Transferzeiten besitzt (vgl. Anhang Abbildung A-3).

Ab dem Streckentyp Intercity spielt der Pod die Vorteile der hohen Durchschnittsgeschwindigkeit auf der Schiene aus (s. Abbildung 7-2.). Durch die effiziente Kombination der Verkehrsmittel ist der Pod im Vergleich zu allen anderen Szenarien schneller. Im Vergleich zu ÖV, für den eine ähnliche Fahrtzeit wie beim Pod ermittelt wurde, ist die geringere Wartezeit ausschlaggebend. Während die Wartezeiten im ÖV durch die Umstiege zwischen den Verkehrsmitteln hoch ausfallen, sind diese beim Pod um 47 Minuten geringer.⁴⁴² Im Vergleich zum MIV ergeben sich zeitliche Einsparungen i.H.v. 25 min (bezogen auf die Transferzeit).

⁴⁴² Vergleich zwischen dem PMM und OMM Szenario.

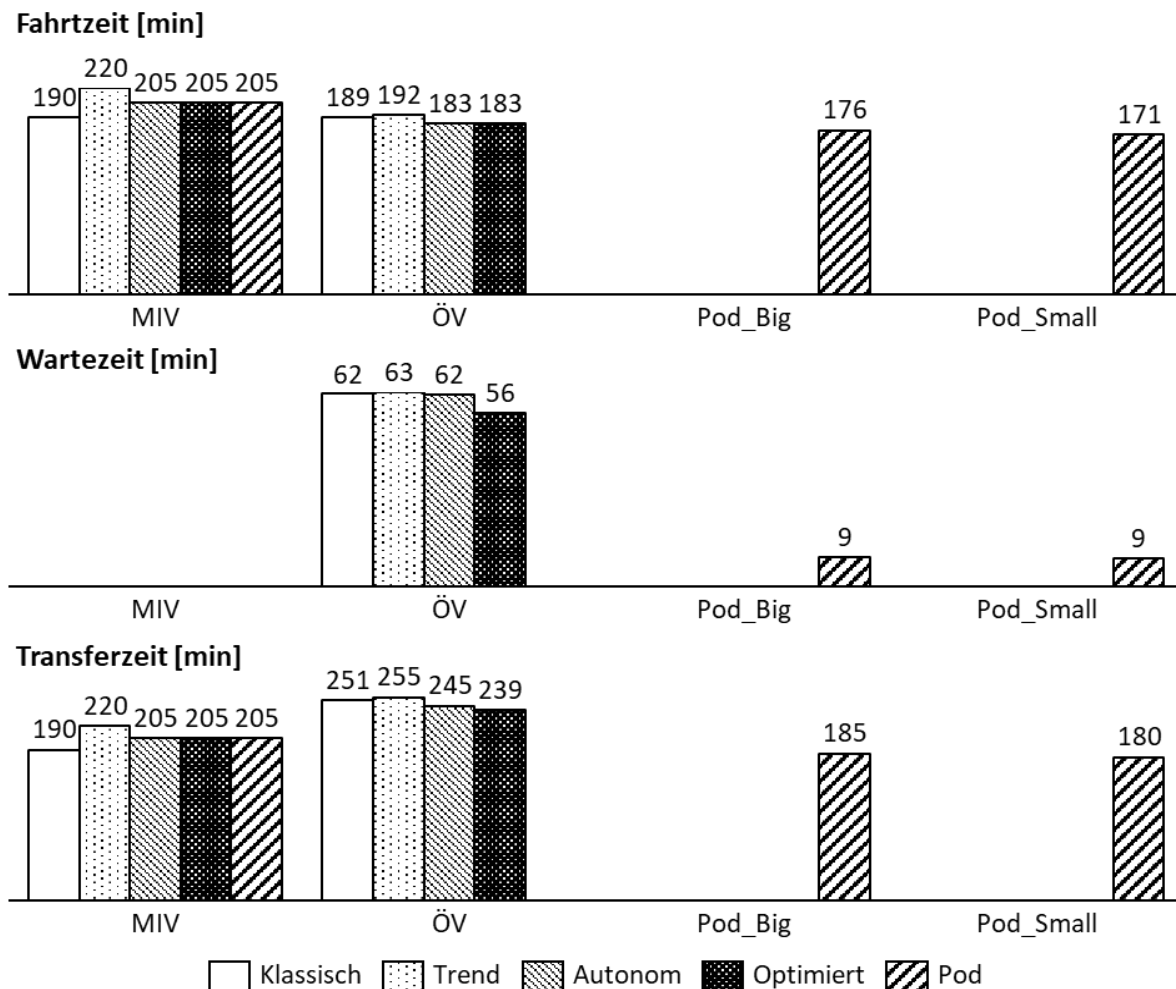


Abbildung 7-2 - Entwicklung der Fahrt-, Warte- und Transferzeit (I)

Für alle Szenarien des Streckentyps Langstrecke verstärkt sich dieser Effekt weiter (s. Abbildung A-4. Auch hier ist der Pod das schnellste Verkehrsmittel. Durch den gebrochenen Verkehr⁴⁴³ im Bereich der Luftfahrt erhöhen sich die Wartezeiten im Vergleich zu den Intercity Strecken deutlich. Auffällig ist, dass der öffentliche Verkehr durch geringere Fahrt- und Wartezeiten den zeitlichen Abstand zum Luftverkehr verkürzt. Das langsamste Verkehrsmittel ist auf der Langstrecke über alle Szenarien gesehen der motorisierte Individualverkehr.

Mit Blick auf die Ausgangsfragestellung ist festzustellen, dass der Pod auf allen Strecken zu den übrigen Verkehrsmitteln zumindest konkurrenzfähig ist. Mit zunehmender Streckenlänge verringert sich der zeitliche Nachteil zunächst (UK, UL) und wandelt sich ab einer Streckenlänge von ungefähr 200 km zu einem Vorteil des Pods (I, L). Im Vergleich zum ÖV sind die Wartezeiten für alle Streckentypen geringer. Die Wartezeiten nehmen beim ÖV im Vergleich zum Pod mit zunehmender Streckenlänge zu und begründen damit den Vorteil des Pods⁴⁴⁴.

⁴⁴³ Der Luftverkehr wird nicht direkt durch den Pod angebunden. Zum Wechsel müssen die Passagiere aussteigen und über den Zwischenstopp eines Flughafens ins Flugzeug wechseln.

⁴⁴⁴ Eine Ausnahme bildet der Streckentyp Langstrecke (Die Begründung findet sich auf S. 120).

7.1.2 Sind Pods das ökologischste Verkehrskonzept?

In Abbildung 7-3 sind die Entwicklungen in der ökologischen Dimension für den Streckentyp Urban-Kurzstrecke dargestellt.

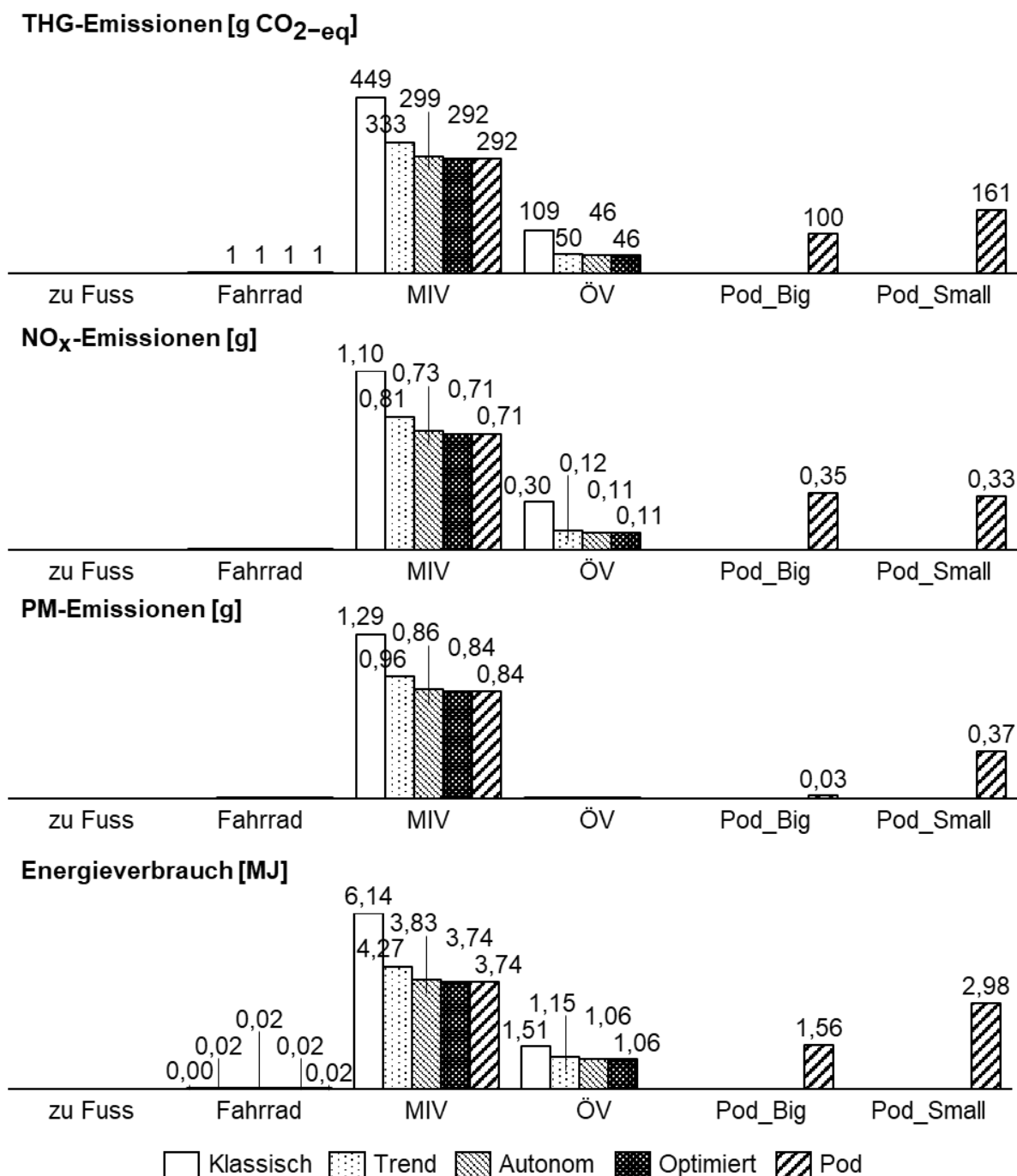


Abbildung 7-3 - Entwicklung in der ökologischen Dimension (UK)

Im Vergleich zum MIV weist der Pod für alle Emissionskennwerte bessere und damit geringere Werte auf. Der Energieverbrauch des Small Pod ist höher als der des Big Pod, da dieser auf dem Carrier Zug einen höheren Flächenbedarf (1/12 Nahverkehrszug) aber eine geringe Anzahl an transportierten Personen (3) hat. Der Ausreißer des Small Pods bei den Feinstaub-Emissionen ist durch den hohen Anteil des Carriers Straße an der gesamten Länge der

Verbindung zu erklären und dessen hohen spezifischen Verbrauch. Bei den NO_x -Emissionen weist der große Pod höhere Emissionen auf, da Busse (als für die Berechnung des großen Pods zugrunde liegendes Verkehrsmittel) höhere spezifische NO_x -Emissionen aufweisen.

Im Bereich des MIVs und des ÖVs sind die Verbesserungen zwischen den Szenarien hoch ausgefallen. Dies liegt in erster Linie an der Diversifizierung der Antriebstechnologien und der damit einhergehenden Verbesserung im Bereich der spezifischen Emissionen. Weiterhin wirken ab dem autonomen Szenarien Effizienzverbesserungen durch ökologischere Fahrweisen.

Im Vergleich zum Szenario OMM kann der Pod nicht mit dem öffentlichen Verkehr kongruieren. Dies liegt in erster Linie daran, dass Strecken zu den Haltestellen, welche vormals zu Fuß zurückgelegt wurden, in der Pod-basierten Mobilität durch einen straßengebundenen Carrier substituiert werden. Dadurch steigen der Energiebedarf und die Emissionskennwerte. Aufgrund der kurzen Streckenlänge ist der Anteil der straßengebundenen Fortbewegung an der gesamten Strecke sehr hoch. Dadurch werden die Vorteile des Pods nicht wirksam. Die Fortbewegungsformen mit den geringsten Emissionen sind die Muskelbetriebenen.

In Abbildung 7-4 und Abbildung 7-5 ist die Entwicklung der Indikatoren innerhalb der ökologischen Dimension für den Streckentyp Intercity dargestellt.

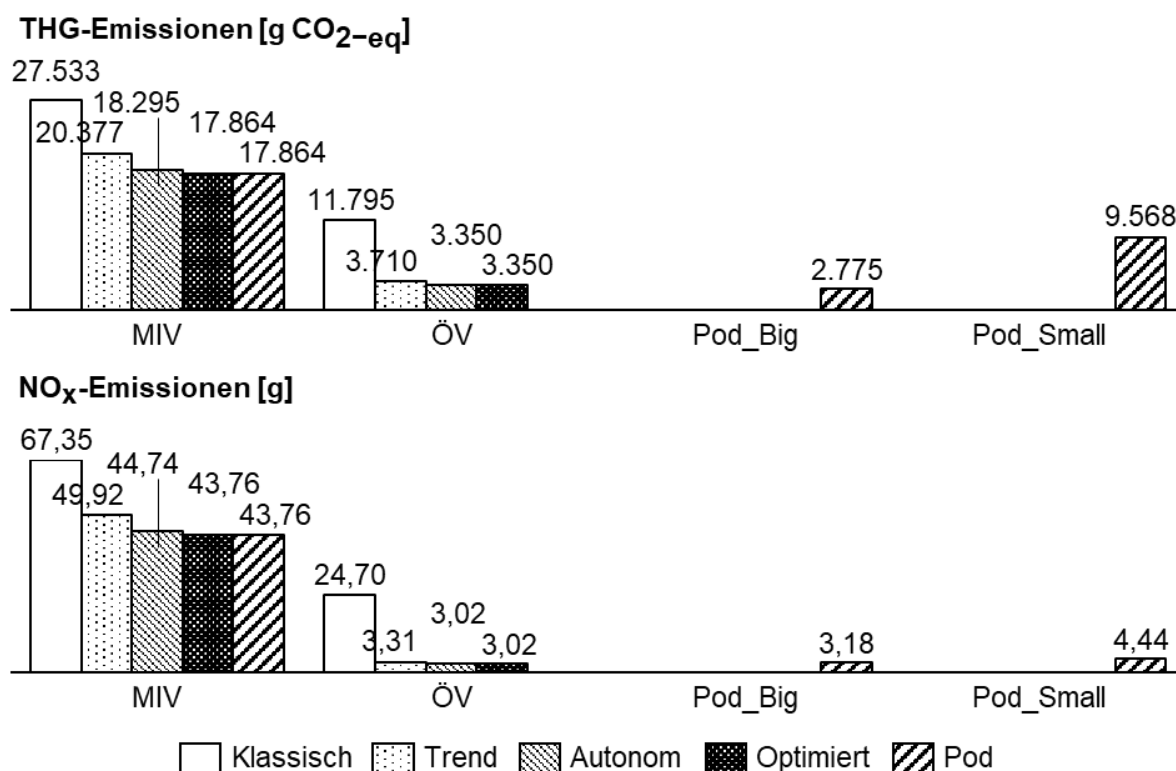
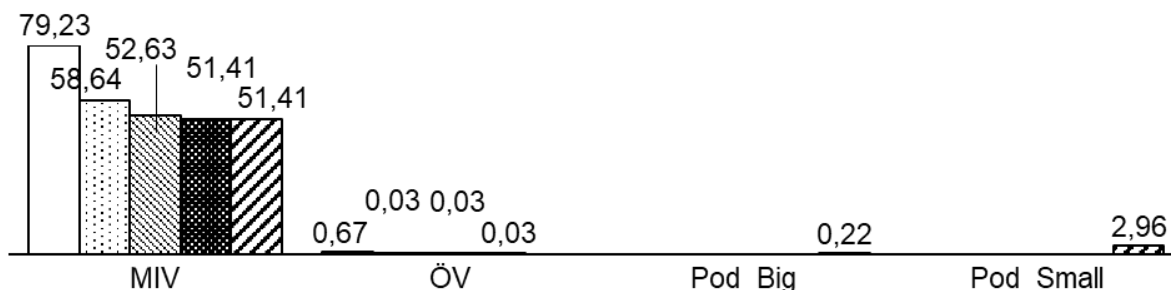


Abbildung 7-4 - Entwicklung der ökologischen Dimension - Teil 1 (I)

Wie bereits bei der Fahrt-, Warte- und Transferzeit ist der Pod mit zunehmender Streckenlänge das ökologischste Verkehrsmittel und kann mit dem ÖV konkurrieren. Der Big Pod kann im Vergleich zum ÖV im Szenario OMM bei allen ökologischen Indikatoren die geringen Werte des ÖVs erreichen. Der Pod Big kann die THG-, PM-Emissionen und den Energieverbrauch

sogar unterbieten. Im Vergleich dazu erreicht der Small Pod bei den THG-Emissionen nur die Werte des ÖVs aus dem Ausgangsszenario, weist aber geringere NO_x -Emissionen auf. Bei dem Energieverbrauch sind die Werte, analog zum Streckentyp „Urban-Kurzstrecke“, durch die geringen Personendichte zu erklären⁴⁴⁵.

PM-Emissionen [g]



Energieverbrauch [MJ]

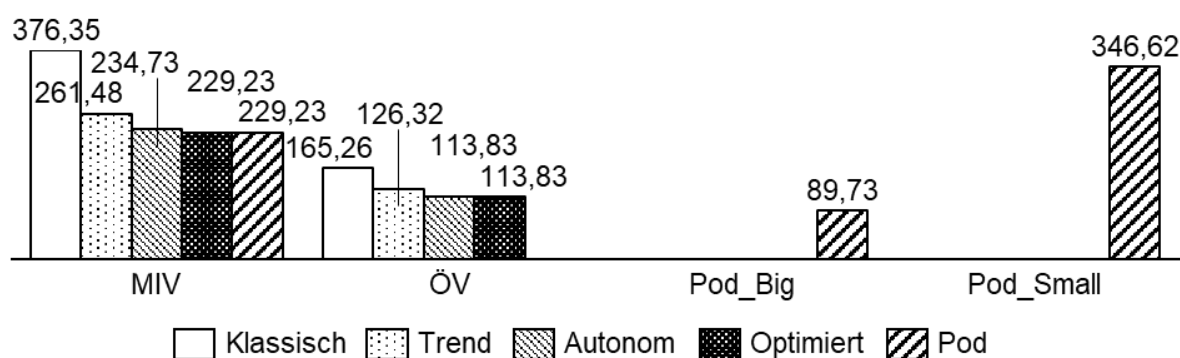


Abbildung 7-5 - Entwicklung der ökologischen Dimension - Teil 2 (I)

Beim Streckentyp Langstrecke kommt es ebenso wie bei den Fahrt-, Warte- und Transferzeiten zu einem Bruch, da der Luftverkehr als gebrochener Verkehr hinzukommt (s. Abbildung 7-5). Mit dem Flugzeug, welches auf den Strecken in der Regel den größten Streckenanteil aufweist, erhöhen sich die Emissionen im Vergleich zum ÖV deutlich, bleiben allerdings unter dem Niveau des MIV und der klassischen Luftfahrt.

THG-Emissionen [g CO₂-eq]

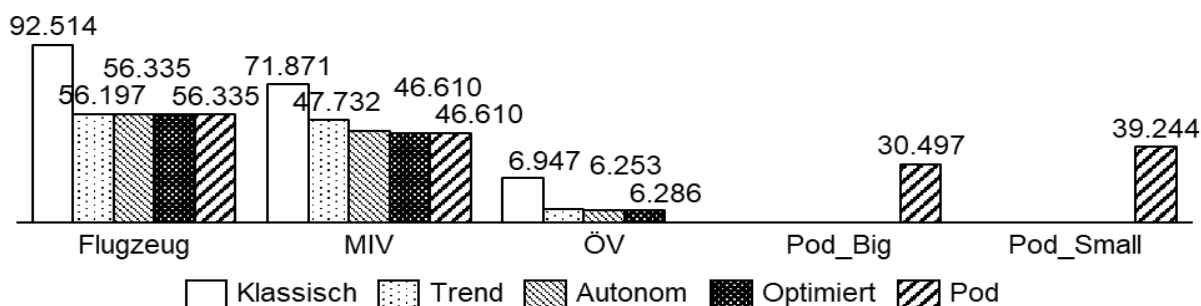


Abbildung 7-6 - Entwicklung der THG-Emissionen (L)

⁴⁴⁵ Bei einem Small Pod werden auf 1/12 der Zuglänge nur 3 Personen transportiert, während ein Big Pod auf doppelter Länge 25 Personen transportiert.

Insgesamt ergibt sich ein ähnliches Bild wie bei der ersten Fragestellung. Die Pod-basierten Verkehrsmittel werden mit zunehmender Streckenlänge und damit einhergehendem zunehmenden Anteil des Schienenverkehrs an der gesamten Strecke effizienter und umweltfreundlicher⁴⁴⁶ als der motorisierte Individualverkehr. Ab dem Streckentyp Intercity (ohne die Luftfahrt) ist der Big Pod auch effizienter als der öffentliche Verkehr. Der Small Pod ist in allen Emissionsindikatoren effizienter als der MIV, weist aber durch seine geringe Flächennutzung einen höheren Energieverbrauch auf.

7.1.3 Können Pods die Kosten im Personenverkehr reduzieren?

In Abbildung 7-7 und Abbildung 7-8 sind die Kosten für alle Referenzstrecken gegenübergestellt. Dabei fällt der signifikante Unterschied zwischen den Kosten für den Pod Big und den Pod Small auf. Dieser basiert, wie in Kapitel 7.1.2 beschrieben auf der geringen Flächennutzung bei den Schienen-Carriern und den damit verbundenen hohen spezifischen Kosten. Im Folgenden werden die Entwicklung für den Pod Big und den Pod Small getrennt analysiert.

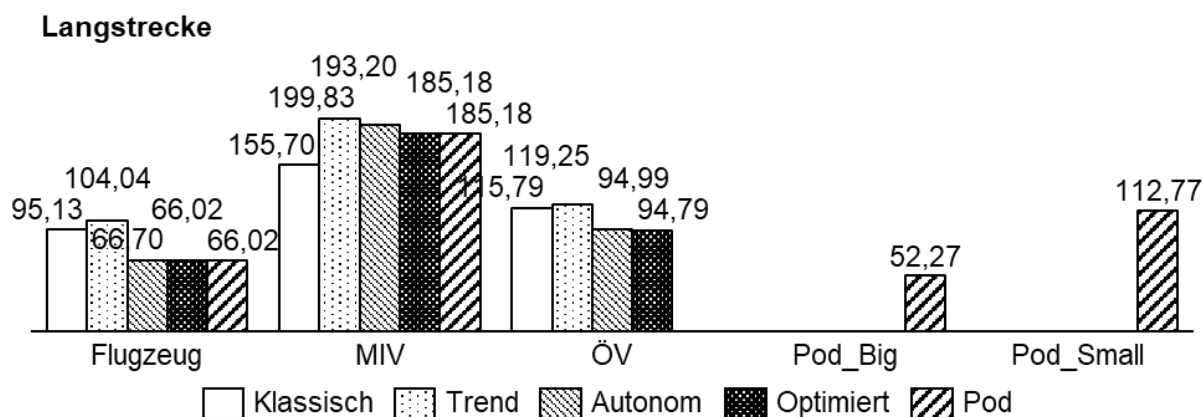


Abbildung 7-7 - Die Entwicklung der Kosten für alle Streckentypen (Teil 1)⁴⁴⁷

Für den Streckentyp Langstrecke besteht die Wahlmöglichkeit des Flugzeugs für den Weg. Das Flugzeug weist über alle Szenarien vergleichsweise geringe Preise auf, welche durch den Vor- und Nachlauf (Weg zum und vom Flughafen meistens mit dem ÖV, MIV oder Taxi) erhöht werden. Durch die geringen Kosten auf der Schiene, kann der Pod Big die Gesamtkosten des Flugzeugwege unterbieten und ist das günstigste Verkehrsmittel für den Streckentyp. Trotz der Preiseinsparungen pro Kilometer im MIV, ist der Pod Small durch die Integration des Flugverkehrs günstiger als der MIV.

Der Pod Big weist für alle Streckentypen geringere Kosten als der Pod Small auf. Besonders deutlich wird dieser Unterschied für den Streckentyp Intercity. Für diesen Streckentyp ist der Pod Small (68,35 Euro) mehr als dreimal so teuer wie der Pod Big (19,53 Euro). Mit

⁴⁴⁶ Mit Hinsicht auf die betrachteten Indikatoren.

⁴⁴⁷ Alle Angaben in Euro

zunehmender Streckenlänge würde sich dieser Effekt intensivieren, aber durch die Einbindung der Luftfahrt (höchster Streckenanteil) sinkt der Unterschied auf das dreifache ab.

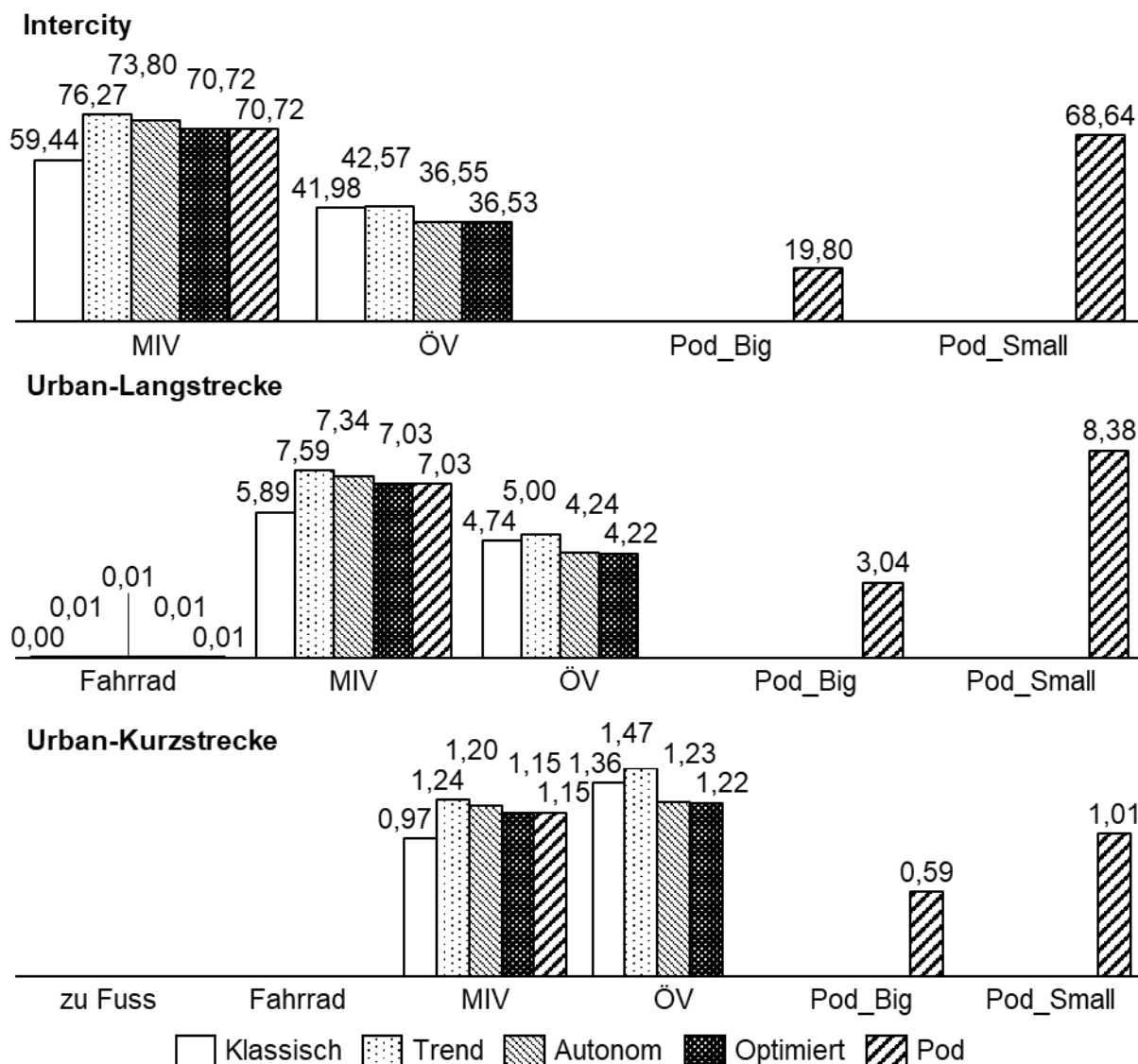


Abbildung 7-8 - Die Entwicklung der Kosten für alle Streckentypen (Teil 2)

Auf der Urban-Kurzstrecke sind sowohl der Pod Big als auch der Pod Small günstiger als der MIV oder ÖV. Auffällig ist, dass der öffentliche Verkehr im Szenario OMM mit dem MIV auf einem Preisniveau liegt. Dieses Ergebnis ist zu relativieren, da beim MIV die Parkkosten pro Strecke nicht mit eingerechnet werden. Werden diese berücksichtigt, wird der MIV im Vergleich zum ÖV teurer. Das günstigste Verkehrsmittel für die Distanz Urban-Kurzstrecke ist das Fahrrad.

Für den Streckentyp Urban-Langstrecke wird der Anteil der schienengebundenen Strecke für die Pods höher (ca. 60 %). Dadurch erhöhen sich die Kosten für den Pod Small (0,45 Euro/Pkm) weiter, da die Kosten pro Personenkilometer für diesen viermal so hoch wie für den Pod Big (0,11 Euro/Pkm) sind. Der Anstieg der Kosten ist wie oben bereits beschrieben durch die geringe Personendichte im Small Pod zu erklären. Die Kosten für den Pod Big sind im Vergleich zum öffentlichen Verkehr und dem motorisierten Verkehr deutliche geringer (37 %

zum ÖV (OMM) und 65 % zum MIV (Pod)). Der Pod Small ist im Gegensatz dazu doppelt so teuer wie der ÖV und ca. einen Euro teurer als der MIV⁴⁴⁸.

Bei der Kostenbetrachtung ist der Pod Big über alle Streckentypen (ausgenommen muskelbetriebene Verkehrsmittel) das günstigste Verkehrsmittel. Im Vergleich zum Pod Small hat er dabei den Vorteil einer höheren Flächennutzung. Der Pod Small ist hingegen für die Streckentypen UK, I und L konkurrenzfähig. Im Szenario Urban-Langstrecke fallen die hohen Kosten für die Kombination Pod Small und Schiene ins Gewicht. Eine Ausnahme stellt wie in den vorherigen Fragestellungen der Streckentyp Langstrecke dar, da dieser im Pod-basierten Verkehr die Möglichkeit zulässt, Flugzeug einzubinden, was die Preise sinken lässt.

7.1.4 Können Pods den Güterverkehr revolutionieren?

Um diese Frage zu beantworten, müssen die Emissionen, Kosten und Transferzeiten betrachtet werden. Unterschieden wird dabei zwischen dem Güter-Nah- und Fernverkehr.

Zunächst werden die Transferzeiten betrachtet (s. Abbildung 7-9). Im Güterverkehr wird dabei zwischen dem Direktverkehr (von Ausgangsort zum Zielort ohne Zwischenstation) und dem Hub-Spoke-Verkehr (im Folgenden als kombiniert bezeichnet). Im Güternahverkehr ist die Transferzeit im Vergleich zum OMM Szenario, sowohl im kombinierten Verkehr als auch im Direktverkehr kürzer. Die deutlichen Zeiteinsparungen im kombinierten Verkehr ergeben sich durch einen schnelleren Wechsel auf die Schiene und somit höheren Durchschnittsgeschwindigkeiten. Diese fallen im Direktverkehr geringer aus, da die Durchschnittsgeschwindigkeit zwischen dem Zug und der Ware auf der Straße, verbunden mit den längeren Distanzen auf der Schiene, nur geringfügig höher ist. Ein analoges Bild ergibt sich für den Güterfernverkehr.

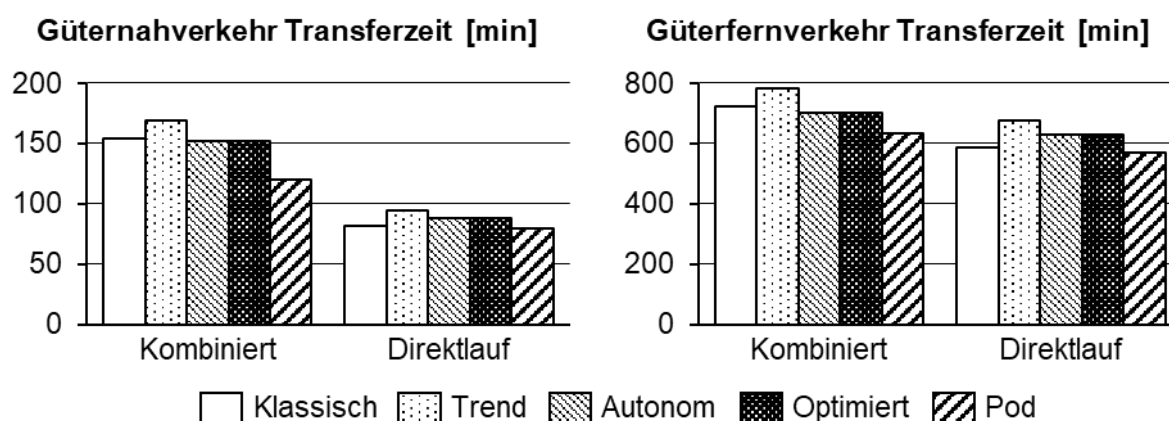


Abbildung 7-9 - Entwicklung der Transferzeiten im Güterverkehr

Die Vorteile des Pods werden besonders bei den Emissionen deutlich (s. Abbildung 7-10). Bei diesen machen sich die kurzen Distanzen auf der Straße und der Hauptfahrtanteil auf der Schiene bemerkbar. Dadurch werden die Stickstoffdioxid- und die Feinstaub-Emissionen besonders reduziert. Auch die THG-Emission werden um mehr als die Hälfte reduziert. Lediglich

⁴⁴⁸ Bezogen auf das Szenario OMM

der Energieverbrauch bleibt aufgrund der geringen Flächennutzung vergleichsweise hoch. Auch bei den Emissionswerten und dem Energieverbrauch ergibt sich für den Güterfernverkehr ein analoges Bild (vgl. Anhang Abbildung A-7).

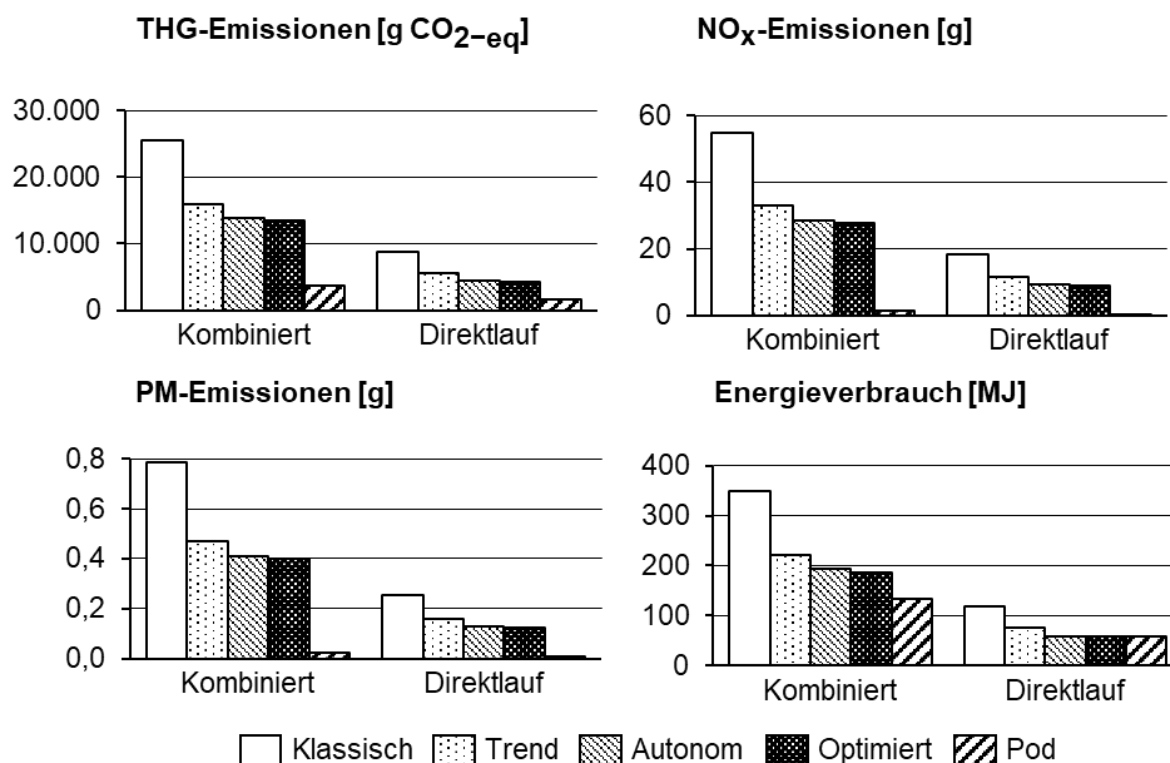


Abbildung 7-10 - Entwicklung der ökologischen Dimension im Güternahverkehr

In Abbildung 7-11 sind die Kosten für den Güternah- und Güterfernverkehr gegenübergestellt. Auch bei diesen spielt der Cargo Pod die Vorteile der hohen Fahrtanteile auf der Schiene aus. Im Vergleich zu den Werten des Szenarios OMM sind die Kosten minimal geringer.

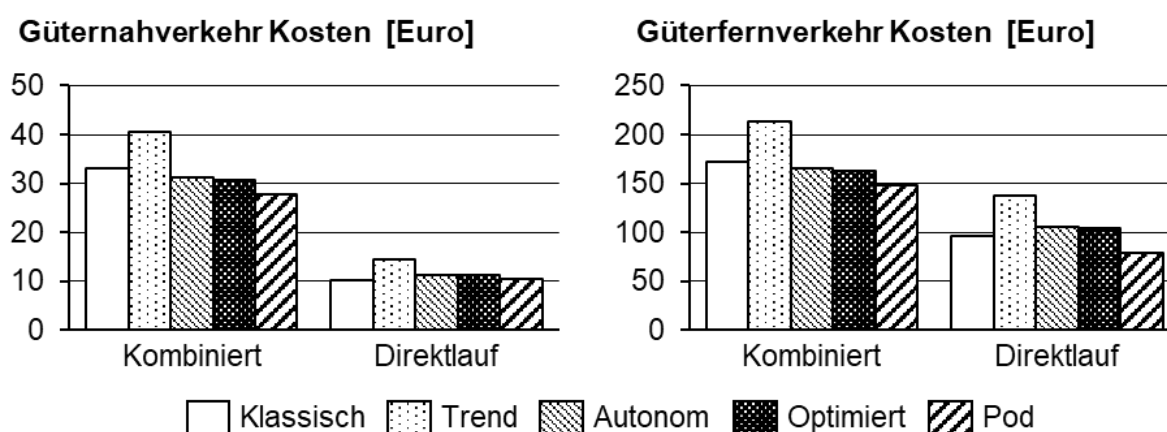


Abbildung 7-11 - Entwicklung der Kosten im Güterverkehr

Für alle Strecken ist bei der Analyse zu berücksichtigen, dass im Gegensatz zu den Alternativszenarien die Nutzlast bei den Pod-Szenarien für den LNF (Anhebung von 0,33 Tonnen auf 1,5 Tonnen) und für den LKW (Anhebung von 7,5 Tonnen auf 13 Tonnen) jeweils deutlich

erhöht wurden. Ohne diese Anpassungen sind gerade die Kosten für den Cargo Pod auf der Schiene deutlich höher als auf der Straße.

Die in den vorherigen beschriebenen Ergebnissen zeigt sich, dass der Pod viele Vorteile gegenüber der klassischen Logistik bietet, solange eine Erhöhung der Auslastung realisierbar ist. Wenn sich die Auslastungen wie im Szenario optimierte multimodale Mobilität verhalten, sind die Kosten und Emissionen für den Pod-basierten Verkehr, welche durch den schienen-gebundenen Verkehr entstehen, nicht konkurrenzfähig.

7.2 Entwicklungen in den verbleibenden Kategorien

Um die Bewertungen abzurunden, sollen zum Schluss die Kategorien betrachtet werden:

- Sicherheit mit dem Indikator Unfallrisiko
- Verkehrsaufkommen mit dem Indikator Fahrleistung und Verkehrsleistung
- Kosten mit den Indikatoren (Infrastruktur-) Investitionen und Staukosten

Die Staukosten, (Infrastruktur-) Investitionen und das Verkehrsaufkommen wurden bereits innerhalb der Szenarien beschrieben. Eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse besteht aufgrund fehlender Zahlenwerte nicht. Für eine qualitative Abschätzung zum Vergleich der Szenarien wird daher auf die verbalen Ausführungen bei der Beschreibung der Szenarien verwiesen. Im Folgenden wird daher ausschließlich die Kategorie Sicherheit mit dem Indikator Unfallrisiko betrachtet. Für eine detaillierte Herleitung der Ergebnisse auf die textuelle Beschreibung in den Szenarien verwiesen.

Sicherheit

Die Kategorie Sicherheit wird anhand des Indikators „Unfallrisiko“ betrachtet. Es beschreibt die Wahrscheinlichkeit pro Pkm/Tkm bei einem Unfall zu sterben (vgl. Kapitel 5.1.2). Diese wird mit dem Anteil des Verkehrsmittels je Strecke multipliziert und über alle Verkehrsmittel der Strecke aufaddiert.

Die Ergebnisse für den Personenverkehr sind in Abbildung 7-12 und Abbildung 7-13 unterteilt nach den verschiedenen Streckentypen dargestellt.

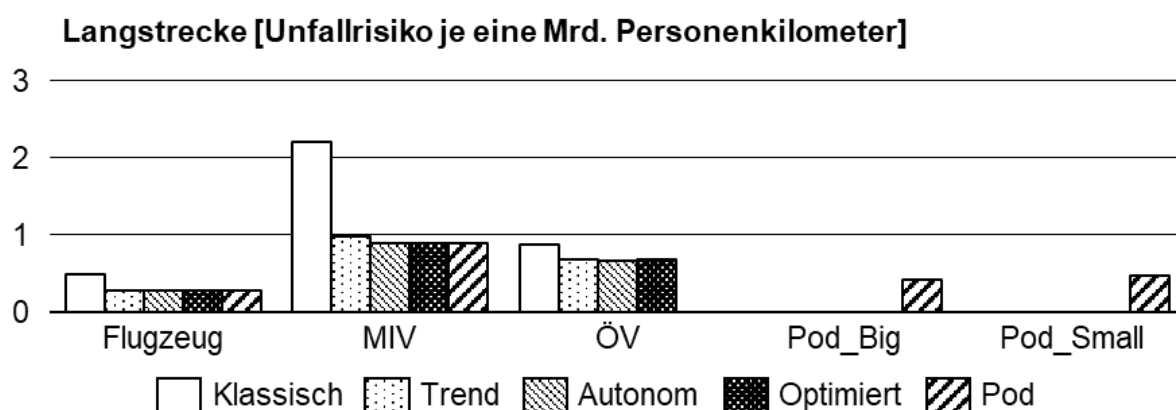


Abbildung 7-12 - Entwicklung des Unfallrisikos (Teil 1)

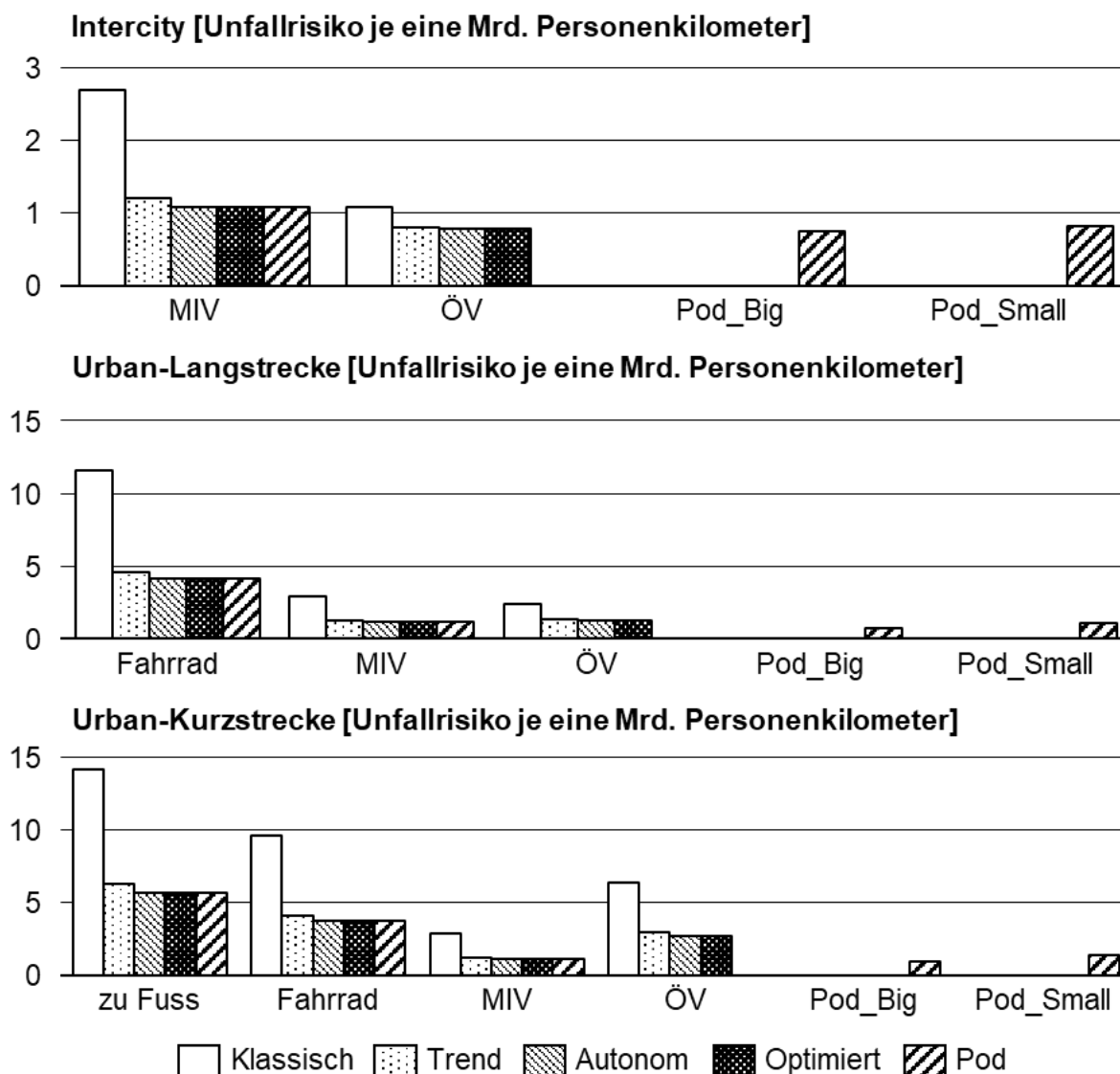


Abbildung 7-13 - Entwicklung des Unfallrisikos (Teil 2)

Über alle Streckentyp gebündelt ist die starke Reduktion des Unfallrisikos für den motorisierten Individualverkehr auffällig. Diese ist eine Folge der kontinuierlich sinkenden Unfallzahlen (vgl. Kapitel 6.3.1), welche linear in die Zukunft fortgeschrieben wurden. Der sichere Straßenverkehr hat auch Auswirkungen auf die anderen Verkehrsmittel. So verringert sich durch die Sicherheitstechnologien im Auto auch die Anzahl an getöteten Personen, welche zu Fuß oder mit dem Fahrrad unterwegs sind.

Generell ist weiterhin festzustellen, dass sich mit zunehmender Streckenlänge, das Risiko je eine Mrd. Personenkilometer zu sterben weiter reduziert. Dies liegt an dem größer werdenden Anteil der schienengebundenen Verkehrsmittel an den Wegen und einer Reduktion des Anteils, welcher zu Fuß zurückgelegt wird.

Über alle Streckentypen gehört der Pod zu den Verkehrsmitteln mit dem geringsten Unfallrisiko. Dies liegt an zwei Eckpunkten: Einerseits die Reduktion der Strecken zu Fuß, welche mit ein hohes Unfallrisiko haben, und andererseits den schnellen Wechsel auf die Schiene und das geringe Unfallrisiko auf der Schiene.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Zum Abschluss dieser Arbeit wird der Frage nachgegangen, ob und inwieweit das in dieser Arbeit entwickelte Bewertungsmodell aus Sicht des Verfassers die Frage beantworten kann, ob die Pod-basierte Mobilität eine nachhaltige Form der Mobilität für die Zukunft darstellen kann. Daneben werden im Rahmen dieser Arbeit identifizierte, offene Forschungsfragen kurz dargestellt.

In Kapitel 3.3 wurden auf Basis einer Analyse der bestehenden Ansätze Forschungsfragen abgeleitet. Diese werden im Folgenden kurz wiederholt und auf ihre Beantwortung in der Arbeit eingegangen.

Die erste Forschungsfrage behandelte die fehlende Integration von multimodalen Verkehrskonzepten in den bisherigen Forschungsprojekten. Im Rahmen dieser Arbeit wurden zunächst Referenzstrecken definiert, um die multimodale Mobilität abzubilden und ihre Vielfältigkeit zu demonstrieren (vgl. Kapitel 4.3). Anhand dieser Referenzstrecken wurde eine Bewertung der Verkehrsmittel bzw. -kombinationen (u.a. MIV, ÖV und zu Fuß) vorgenommen.

Die zweite Forschungsfrage beschäftigte sich mit der in den bisherigen Modellen fehlenden Möglichkeit zur nachträglichen Modellanpassung. Die Referenzstrecken können durch ihren modularen Aufbau einfach um weitere (neue) Verkehrsmittel erweitert werden. Dasselbe gilt für die Verkehrsmittel in der Technologiedatenbasis. Die hinzugefügten Werte müssen lediglich den in der Arbeit verwandten Erhebungsarten entsprechen. Darauf aufbauend wird in der dritten Forschungsfrage gefordert, dass eine Analysemöglichkeit zur Auswertung der Ergebnisse nachgeschaltet sein soll. Dies wurde durch die Auswertungsmöglichkeiten nach allen Kategorien, Streckentypen und Verkehrsmittel realisiert.

Während sich die vorherigen Fragestellungen, Anforderungen an die Implementierung und den grundsätzlichen Aufbau des Bewertungstools definieren, wurde in der vierten Fragestellung ein ganzheitlicher Aufbau bei gleichzeitig reduzierter Komplexität gefordert. Diese wurde durch die Konzeption des Modells entsprechend des „Dreiecks der Nachhaltigkeit“ realisiert. Danach sind bei der Bewertung von technischen und nicht-technischen Fragestellungen die drei Dimensionen Ökonomie, Ökologie und Soziales gleichgewichtet zu behandeln. Entsprechend wurde in Kapitel 5 das Bewertungsmodell nach drei Dimensionen aufgebaut und die Bewertungsdimensionen mit Kategorien verbunden. Um die Komplexität des Bewertungsmodells zu begrenzen, wurden nur einfache mit zahlunterlegbare Indikatoren ausgewählt. So wurden eine Bewertung und ein Vergleich der unterschiedlichen Szenarien möglich.

Mittels des so konzipierten Bewertungsmodells sollte Aussagen über die Zukunft der Mobilität möglich werden sowie untersucht werden, ob und welche Rolle die Pod-basierte Mobilität dabei spielen kann. Dazu wurde in der Analyse-Phase die Mobilität von heute als Ausgangssituation für die weitere Analyse ausgewählt. Ausgehend von dieser wurden in der Prognose-Phase basierend auf verschiedenen Studienergebnissen die Megatrends mit ihren Auswirkungen auf die Mobilität der Zukunft zusammengestellt. Zu diesen Megatrends gehört auch die

Autonomisierung der Mobilität, welche aufgrund ihrer vermutlich disruptiven Auswirkungen in drei Szenarien aufgegriffen wird.

Dies Szenarien wurden in der Synthese-Phase entwickelt. In dieser Phase wurden die Entwicklungsstränge der Prognose-Phase zu gesamtheitlichen Zukunftsbildern zusammengeführt. Für die einzelnen Zukunftsbilder wurden die Veränderungen mittels Referenzstrecken analysiert, die Technologiedaten bestimmt und als Inputs an das Bewertungsmodell übergeben.

Die Ergebnisse des Szenarioanalyse aus Kapitel 7 sollten Aufschluss über die Fragestellung ob der Pod eine nachhaltige Form der Mobilität der Zukunft sein kann. Zumindest für die untersuchten Kategorien und unter den getroffenen Annahmen kann die Frage bejaht werden. Sowohl für die zeitliche Dimension, die Kosten und die ökologische Dimension weist der Pod im Vergleich zu den anderen Verkehrsmitteln gleich gute oder sogar bessere Werte auf. Die Vorteile, welche der Pod durch den schnellen Wechsel zwischen der Schiene und der Straße hat, werden mit zunehmender Streckenlänge deutlicher. Im Vergleich zum öffentlichen Verkehr kann der Pod durch den Wegfall der Wartezeiten die Transferzeit auf allen Strecken reduzieren, hinzu kommen seine ökologischen Vorteile. Diese können nur ausgenutzt werden, wenn die Schieneninfrastruktur vor Ort ausreichend ausgebaut und eine ausreichende Zahl von Zugangspunkte vorhanden ist. Gleichzeitig sinken die Kosten für die Wege mit dem Pod Big im Vergleich zu allen motorisierten Verkehrsmitteln. Im Güterverkehr bietet der Pod Vorteile durch seine flexible Einsetzbarkeit und der Geschwindigkeitsvorteile im Vergleich zum klassischen Stadtverkehr.

Um diese Aussage zu bestätigen, sollten in zukünftigen Forschungsvorhaben versucht werden, die Annahmen dieser Arbeit zu verifizieren und ggf. zu verfeinern. Eine der wichtigsten Fragestellungen dabei dürfte sein, ob die getroffenen Annahmen zur Auslastung der Pods realisierbar sind. Bereits eine geringe Veränderung der Annahmen zur Auslastung kann zu komplett abweichenden Ergebnissen führen. Zusätzlich sollten weitere Indikatoren definiert werden, welche die Verfügbarkeit, die Lärmemissionen und die Kapazität eines Pod-Systems untersuchen. Zur Bewertung der Kapazität und Verfügbarkeit könnte analog zur Lissabon Studie ein MATSim-Modell⁴⁴⁹ mit den Pods aufgestellt werden⁴⁵⁰. Dadurch wäre auch eine präzisere Abschätzung der benötigten Anzahl von Pods möglich. So könnte dann auch eine präzisere Investitionsrechnung für die Pods erstellt werden. Der Top-Down Berechnung in dieser Arbeit könnte dabei als erste Grobabschätzung bzw. als Plausibilisierung dienen.

⁴⁴⁹ MatSim ist ein Tool um Agenten basiert die Mobilität innerhalb von Städten abzubilden.

⁴⁵⁰ Vgl. International Transport Forum at the OECD (2015) Urban Mobility System.

V Literaturverzeichnis

(Datenbank: Bevölkerungsschätzung):

Datenbank: Bevölkerungsschätzung Eurostat

Tim-Online-NRW. <https://www.tim-online.nrw.de/tim-online2/>, Abruf 03.09.2019

ADAC e.V. (ADAC Preisvergleich: Tickets ÖPNV):

ADAC Preisvergleich: Tickets im ÖPNV. <https://www.adac.de/rund-ums-fahr-zeug/tests/reise/oepnv-preise-vergleich/?redirectId=quer.oepnv-preisvergleich>, Abruf 23.08.2019

ADAC e.V. (Empfehlungen für den ÖPNV in Ballungsräumen):

Empfehlungen für einen anwenderorientierten ÖPNV in Ballungsräumen . München, 2019

Adolf, J.; Lenz, B.; Balzer, C.; Lishke, A.; Haase, F.; Knitschky, G. (SHELL Nutzfahrzeug-Studie: Diesel, alternative Antriebe):

SHELL Nutzfahrzeug-Studie: Diesel oder alternative Antriebe -Womit fahren Lkw und Bus morgen? Fakten, Trends und Perspektiven bis 2040 . Hamburg, 2016

Adolf, Jörg; Rommerskirchen, S. (Shell PKW-Szenarien bis 2040):

Shell PKW-Szenarien bis 2040. Fakten, Trends und Perspektiven für Auto-Mobilität . Hamburg, 2014

Airbus (Global Market Forecast):

Global Market Forecast. Global Networks, Global Citizens 2018-2037 , 2018

Alba, D. (Impacts and potential benefits of autonomous vehicles):

Impacts and potential benefits of autonomous vehicles . Paris, 2018

Anderson, J. O.; Thundiyil, J. G.; Stolbach, A. (Clearing the air):

Clearing the air. a review of the effects of particulate matter air pollution on human health. In: Journal of medical toxicology official journal of the American College of Medical Toxicology, 8. Jg., 2012, Nr. 2, S. 166–175

Arras, H. E. (Notwendigkeit und Methodik von Szenarien):

Zur Notwendigkeit und Methodik von Szenarien. In: Verwaltungsrundschau, Zeitschrift für Verwaltung in Praxis und Wissenschaft, 1987, Nr. 6

Arseni, O.; Racioppi, F. (Making the Link):

Making the (Transport, Health and Environment) Link. Transport, Health and Environment Pan-European Programme and the Sustainable Development Goals , 2018

Bangel, C.; Faigle, P.; Gortana, F.; Loos, A.; Mohr, F.; Speckmeier, J.; Stahnke, J.; Venohr, S.; Blickle, P. (Stadt, Land, Vorurteil):

Stadt, Land, Vorurteil. <https://www.zeit.de/feature/deutsche-bevoelkerung-stadt-land-unterschiede-vorurteile>, Abruf 18.07.2019

Banse, G. (Das Einfachheitsprinzip in den Technikwissenschaften):

„Nicht so exakt wie möglich, sondern so genau wie nötig!“–Das Einfachheitsprinzip in den Technikwissenschaften. In: Sommerfeldt, E.; Hörz, H.; Krause, W.(Hg.): Einfachheit als Wirk-, Erkenntnis- und Gestaltungsprinzip. Berlin, S, 2011, S. 93–104

Bardt, H. (Indikatoren ökonomischer Nachhaltigkeit):

Indikatoren ökonomischer Nachhaltigkeit (Reihe: IW-Analysen - Forschungsberichte aus dem Institut der deutschen Wirtschaft Köln, Bd. Bd. 72). Köln: Institut der deutschen Wirtschaft Köln Medien GmbH, 2011

Beutler, F. (Intermodalität, Multimodalität und Urbanability):

Intermodalität, Multimodalität und Urbanability: Vision für einen nachhaltigen Stadtverkehr (Bd. 2004-107), 2004

Boeing (Current market outlook):

Current market outlook. 2017-2036 , 2017

Böhl, B.; Maus, I.; Kloppe, U.; Brückner, B. (Forschungsprojekt Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Städtischer Liefer- und Ladeverkehr):

Bericht zum Forschungsprojekt Quellenverzeichnis FE 77.478/2004 des Bundesministers für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Städtischer Liefer- und Ladeverkehr – eine Analyse der kommunalen Praktiken zur Entwicklung eines Instrumentariums für die StVO (Reihe: Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen). Bremerhaven, 2014

Bösch, P. M.; Becker, F.; Becker, H.; Axhausen, K. W. (Cost-based analysis of autonomous mobility services):

Cost-based analysis of autonomous mobility services. In: Transport Policy, 64. Jg., 2018, S. 76–91

Bouchery, Y.; Fransoo, J. (Cost, carbon emissions, modal shift):

Cost, carbon emissions and modal shift in intermodal network design decisions. In: International Journal of Production Economics, 164. Jg., 2015, S. 388–399

Bouton, S.; Hannon, E.; Haydamous, L.; Heid, B.; Knupfer, S.; Naucner, T. (future of mobility, part 2):

An integrated perspective on the future of mobility, part 2: Transforming urban delivery , 2017

Bretzke, W.-R. (Nachhaltige Logistik):

Nachhaltige Logistik . Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014

Brook, R. D.; Rajagopalan, S.; Pope, C. A.; Brook, J. R.; Bhatnagar, A.; Diez-Roux, A. V.; Holguin, F.; Hong, Y.; Luepker, R. V.; Mittelman, M. A.; Peters, A.; Siscovick, D.; Smith, S. C.; Whitsel, L.; Kaufman, J. D. (Particulate matter air pollution and cardiovascular disease):

Particulate matter air pollution and cardiovascular disease: An update to the scientific statement from the American Heart Association. In: Circulation, 121. Jg., 2010, Nr. 21, S. 2331–2378

Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (Binnenschiffe):

Binnenschiffe - Potential zur Verbesserung der Abgasstandards , 2012

Bundesanstalt für Straßenwesen (Verkehrs- und Unfalldaten - Deutschland):

Verkehrs- und Unfalldaten - Kurzzusammenstellung der Entwicklung in Deutschland . Bergisch Gladbach, 2018

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Bundesverkehrswegeplan 2030):

Bundesverkehrswegeplan 2030 , 2016

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Kombinierter Verkehr):

Kombinierter Verkehr - Die Zukunft ist intermodal . Berlin, 2018

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Verkehr in Zahlen 18/19):

Verkehr in Zahlen 2018/2019 , 2019

Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen (Marktuntersuchung Eisenbahn 2017):

Marktuntersuchung Eisenbahn 2017 . Bonn, 2017

Bundesverband CarSharing (Datenblatt CarSharing Deutschland):

Datenblatt CarSharing in Deutschland , 2019

Buzási, A.; Csete, M. (Sustainability Indicators):

Sustainability Indicators in Assessing Urban Transport Systems. In: Periodica Polytechnica Transportation Engineering, 43. Jg., 2015, Nr. 3, S. 138–145

Cesinger, B.; Baumann, A.; Fellnhöfer, K. (Die "Silver Society"):

Die "Silver Society": Chance und Herausforderung für Unternehmen (Reihe: NDU Trendreport), 2015

Chen, T. D.; Kockelman, K. M. (Carsharing's life-cycle):

Carsharing's life-cycle impacts on energy use and greenhouse gas emissions. In: Transportation Research Part D: Transport and Environment, 47. Jg., 2016, S. 276–284

Cookson, G. (Inrix Global Traffic Scorecard):

Inrix Global Traffic Scorecard , 2018

Coyle, G. (Qualitative and quantitative modelling):

Qualitative and quantitative modelling in system dynamics: some research questions. In: System Dynamics Review, 16. Jg., 2000, Nr. 3, S. 225–244

Craig, A. J.; Blanco, E. E.; Sheffi, Y. (Estimating the CO2 intensity):

Estimating the CO2 intensity of intermodal freight transportation. In: Transportation Research Part D: Transport and Environment, 22. Jg., 2013, S. 49–53

Crainic, T. G.; Kim, K. H. (Chapter 8 Intermodal Transportation):

Chapter 8 Intermodal Transportation. In: Transportation (Reihe: Handbooks in Operations Research and Management Science): Elsevier, 2007, S. 467–537

Demir, E.; Huang, Y.; Scholts, S.; van Woensel, T. the negative externalities of the freight transportation:

A selected review on the negative externalities of the freight transportation modeling and pricing. In: Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, Nr. 114, 2015

Demirel, Y. (Thermoeconomics):

Thermoeconomics. In: Nonequilibrium Thermodynamics Elsevier, 2014, S. 265–302

Deutsche Bahn (Integrierter Bericht 2018):

Integrierter Bericht 2018. Auf dem Weg zu einer besseren Bahn . Berlin, 2019

Deutsche Norm (14040):

14040. Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006), 2006

Deutscher Bundestag WD 5: Wirtschaft und Verkehr; Ernährung, L. u. V. (Elektrifizierungsgrad der Schieneninfrastruktur):

Elektrifizierungsgrad der Schieneninfrastruktur , 2018

Deutsches Institut für Normung e.V. (16258):

16258. Methode zur Berechnung und Deklaration des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen bei Transportdienstleistungen (Güter- und Personenverkehr). Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V., 2013

Directorate-General for Mobility and Transport (European Commission) , Gruppo CLAS S.p.A , Intermodality Ltd , KombiConsult GmbH , PLANCO Consulting GmbH (Analysis of the combined transport):

Analysis of the EU combined transport. Final report - Study , 2017

DIW Berlin; Energy Environment Forecast Analysis (Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland):

Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland. 1990 bis 2017 , 2018

Doll, C.; Hartwig, J.; Senger, F.; Schade, W.; Maibach, M.; Sutter, D.; Bertschmann, D.; Lambrecht, U.; Knörr, W.; Dünnebeil, F. (Wirtschaftliche Aspekte nichttechnischer Massnahmen zur Emissionsminderung im Verkehr):

Wirtschaftliche Aspekte nichttechnischer Massnahmen zur Emissionsminderung im Verkehr. In: Texte, 2013, Nr. 11

Dr. Andreas Geißler (Mit Sicherheit Bahn):

Mit Sicherheit Bahn. Warum Sie mit der Eisenbahn am sichersten fahren . 5 Aufl. Berlin, 2010

Dudenredaktion (o. J.) (Definition Verkehr):

Verkehr. auf Duden online. <https://www.duden.de/node/194476/revision/194512>, Abruf 16.05.2019

EC-European Commission (Roadmap to a Single European Transport Area):

Roadmap to a Single European Transport Area-Towards a competitive and resource efficient transport system. In: White Paper, Communication, 144. Jg., 2011

EHI Retail Institute e. V (Transport in der Handelslogistik):

EHI-Studie. Transport in der Handelslogistik . Köln, 2019

Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt - Ziele und (Konzept Nachhaltigkeit):

Konzept Nachhaltigkeit. Vom Leitbild zur Umsetzung . Bonn, 1998

Europäisches Parlament (CO2-Emissionen von Autos):

CO2-Emissionen von Autos: Zahlen und Fakten. <http://www.europarl.europa.eu/news/de/headlines/society/20190313STO31218/co2-emissionen-von-autos-zahlen-und-fakten-infografik>, Abruf 30.07.2019

European Commission Directorate General for Mobility and Transport (Study on the prices and quality of rail passenger services):

Study on the prices and quality of rail passenger services , 2016

forsa Gesellschaft für Sozialforschung und statistische Analysen mbH (Umweltbewusstsein in Deutschland 2018):

Umweltbewusstsein in Deutschland 2018. Ergebnisse einer repräsentativen Bevölkerungsumfrage , 2018

François-Joseph Van Audenhove, Guillaume Rominger, Guillaume Rominger, Aurelia Bettati, Nicolas Steylemans, Michael Zintel, Andrew Smith, Sylvain Haon (The Future of Mobility 3.0):

The Future of Mobility 3.0. Reinventing mobility in the era of disruption and creativity, 2018

Gerike, R. (Das Phänomen Stau):

Das Phänomen Stau. In: Schwedes (Hrsg.): Verkehrspolitik . Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018, S. 243–269

Geschka, H.; Hammer, R. (Die Szenario-Technik in der Unternehmensplanung):

Die Szenario-Technik in der strategischen Unternehmensplanung. In: Hahn, D.; Taylor, B. (Hrsg.): Strategische Unternehmensplanung . Heidelberg: Physica-Verlag HD, 1990, S. 311–336

Gudehus, T. (Logistik 1):

Logistik 1 . Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012

Gudehus, T. (Logistik 2):

Logistik 2 . Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012

Gudmundsson, H. (Hrsg.) (Sustainable transportation):

Sustainable transportation. Reihe: Springer Texts in Business and Economics, Heidelberg: Springer, 2016

Haase, K. (Fahrzeugkostenkalkulation):

Fahrzeugkostenkalkulation (Reihe: Einführung in Verkehr und Logistik), WS 2013/14

Hacker, F.; Waldenfels, R. von; Mottschall, M. (Wirtschaftlichkeit von Elektromobilität in gewerblichen Anwendungen):

Wirtschaftlichkeit von Elektromobilität in gewerblichen Anwendungen . Berlin, 2015

Haghshenas, H.; Vaziri, M. (Urban sustainable transportation indicators for global comparison):

Urban sustainable transportation indicators for global comparison. In: Ecological Indicators, 15. Jg., 2012, Nr. 1, S. 115–121

HandelsblattDB Kosten der ICE-Züge:

Kosten der ICE-Züge der Deutschen Bahn. In: Handelsblatt, 2012, S. 6

Hannon, E.; Knapfer, S.; Stern, S.; Sumers, B.; Nijssen, J. T. (An integrated perspective on the future of mobility, part 3):

An integrated perspective on the future of mobility, part 3: Setting the direction toward seamless mobility , 2019

Hasse, F.; Jahn, M.; Ries, J. N.; Wilkens, M.; Barthelmess Andreas, Heinrichs, Dirk; Goletz, M. (Digital mobil in Deutschlands Städten):

Digital mobil in Deutschlands Städten . Berlin, 2017

Heineberg, H.; Busch, P. (Hrsg.) (Grundriß allgemeine Geographie):

Grundriß allgemeine Geographie. Reihe: UTB für Wissenschaft, Paderborn: Schöningh

Heinrichs, D.; Oostendorp, R. (Mobilität zukünftig intermodal?):

Mobilität -- in Zukunft intermodal? In: ATZextra, 20. Jg., 2015, Nr. 4, S. 18–21

Henkel, S.; Tomczak, T.; Henkel, S.; Hauner, C. (Mobilität aus Kundensicht):

Mobilität aus Kundensicht . Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015

Herget, M.; Hunsicker, F.; Koch, J.; Chlond, B.; Minster, C.; Soylu Tamer (Ökologische und ökonomische Potenziale von Mobilitätskonzepten in Klein- und Mittelzentren):

Ökologische und ökonomische Potenziale von Mobilitätskonzepten in Klein- und Mittelzentren . Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 2018

Herrmann, C. (Lebensphasenübergreifende Disziplinen):

Lebensphasenübergreifende Disziplinen. In: Herrmann, C. (Hrsg.): Ganzheitliches Life Cycle Management . Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010, S. 131–234

Hine, J.; Scott, J. (Seamless, accessible travel):

Seamless, accessible travel: users' views of the public transport journey and interchange. In: Transport Policy, 7. Jg., 2000, Nr. 3, S. 217–226

Holzhey, M.; Kühl, I.; Naumann, R.; Petersen, T.; Brümmer, H.; Clausing, M.; Niemann, J. (Revision der Regionalisierungsmittel):

Revision der Regionalisierungsmittel. Mittelbedarf der Bundesländer für den Revisionszeitraum 2015-2030, 2014

Hooper, A. (Cost of Congestion):

Cost of Congestion to the Trucking Industry: 2018 Update, 2018

Horx, M. (Das Megatrend-Prinzip):

Das Megatrend-Prinzip. Wie die Welt von morgen entsteht. 1. Aufl. München: Pankh, 2014

infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH (Mobilität in Deutschland):

Mobilität in Deutschland - Ergebnisbericht, 2019

infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH; Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. v. (Mobilität in Deutschland):

Mobilität in Deutschland 2008. Ergebnisbericht. Bonn, Berlin, 2010

Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (TREMOD):

TREMOD. Heidelberg: Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, 2016

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (On board):

On board. A sustainable future. Montreal, 2016

International Transport Forum at the OECD (Urban Mobility System):

Urban Mobility System Upgrade. How shared self-driving cars could change city traffic, 2015

Ittershagen, M. (Stickstoff - lebensnotwendiger Nährstoff):

Stickstoff - lebensnotwendiger Nährstoff und gefährlicher Schadstoff. Dessau-Roßlau, 26.01.2011

Ittershagen, M. (Klimabilanz 2017):

Klimabilanz 2017: Emissionen gehen leicht zurück. Dessau-Roßlau, 2018

Jochen Schumann (Grundzüge Makroökonomie):

Grundzüge der mikroökonomischen Theorie (Reihe: Springer-Lehrbuch). Sechste, überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1992

Kaltschmitt, M.; Schebek, L. (Umweltbewertung für Ingenieure):

Umweltbewertung für Ingenieure. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015

KE-CONSULT Kurte&Esser GbR (KEP-Studie 2018 – Analyse):

KEP-Studie 2018 – Analyse des Marktes in IV Deutschland. Köln, 2018

Kees, J.; Warner, S.; Rietra, M.; Mazza, L.; Buvat, J.; Khadikar, A.; Cherian, S.; Khemka, Y. (The Last-Mile delivery):

The Last-Mile delivery challenge. Giving retail and consumer product customers a superior delivery experience without impacting profitability , 2019

Klaus Wübbenhorst, Gustav A. Horn, Udo Kamps (Prognose):

Prognose. <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/prognose-43498/version-266827>, Abruf 19.05.2019

Knörr, W.; Heidt, C.; Schacht, A. (Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland):

Aktualisierung Daten-und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030 "(TREMODO, Version 5.2) für die Emissionsberichtserstattung 2012 (Berichtsperiode 1990-2010). In: Institut für Energie-und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Heidelberg, 2012

Koether, R. (Distributionslogistik):

Distributionslogistik. Effiziente Absicherung der Lieferfähigkeit . 1 Aufl.: Gabler Verlag, 2012

Kölmel, B.; Pfefferle, T.; Bulander, R. (Mega-Trend Individualisierung):

Mega-Trend Individualisierung: Personalisierte Produkte und Dienstleistungen am Beispiel der Verpackungsbranche. In: e, D. D. V. (Hrsg.): Dialogmarketing Perspektiven 2018/2019 . Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019, S. 243–260

Kölsch, D. (Sozioökonomische Bewertung von Chemikalien):

Sozioökonomische Bewertung von Chemikalien: Entwicklung und Evaluation einer neuartigen und umfassenden sozioökonomischen Bewertungsmethode, basierend auf der SEEBALANCE-Methode zur Bewertung von Chemikalien unter REACH (Reihe: Karlsruher Schriften zur Geographie und Geoökologie, Bd. 26): KIT Scientific Publishing, 2011

Kraftfahrt-Bundesamt (Fahrzeugzulassungen (FZ 15)):

Fahrzeugzulassungen (FZ 15). Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Fahrzeugalter 1. Januar 2017 . Flensburg, 2017

Kraftfahrt-Bundesamt (Jahresbilanz des Fahrzeugbestandes 2019):

Jahresbilanz des Fahrzeugbestandes am 1. Januar 2019. https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/b_jahresbilanz.html?nn=644526

Krail, M. (System-based analysis of income distribution impacts on mobility behaviour):

System-based analysis of income distribution impacts on mobility behaviour (Reihe: Karlsruher Beiträge zur wirtschaftspolitischen Forschung Karlsruhe papers in economic policy research, Bd. Bd. 28). 1. Aufl. Aufl. Baden-Baden: Nomos, 2009

Krail, M. (Energie- und Treibhausgaswirkungen autonomes, vernetztes Fahren):

Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr. Wissenschaftliche Beratung des BMWI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie . Karlsruhe, 2019

Krail, M.; Hellekes, J.; Schneider, U.; Dütschke, E.; Schellert, M.; Rüdiger, D.; Steindl, A.; Luchmann, I.; Waßmuth, V.; Flämig, H.; Schade, W.; Mader, S. (Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr):

Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr. Wissenschaftliche Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie . Karlsruhe, 2019

Krause, D. E. (Kreativität, Innovation, Entrepreneurship):

Kreativität, Innovation, Entrepreneurship . Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013

Kreyenberg, D. (Fahrzeugantriebe Elektromobilität):

Fahrzeugantriebe für die Elektromobilität . Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016

Krieger, W. (Definition: TEU):

Definition: Twenty Foot Equivalent Unit (TEU). <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/twenty-foot-equivalent-unit-teu-49988/version-273214>, Abruf 05.06.2019

Krieger, W. (KEP-Dienst):

KEP-Dienst. <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/kep-dienst-41845/version-265202>, Abruf 19.07.2019

Krieger, W. (Definition: Tonnenkilometer):

Definition: Tonnenkilometer (tkm). <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/tonnenkilometer-tkm-50606/version-273824>, Abruf 05.06.2019

Krieger, W.; Malina, R. (Definition: kombinierter Verkehr):

Definition: kombinierter Verkehr. <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/kombinierter-verkehr-41099/version-264471>

Kühnel, S.; Hacker, Florian, Görz, Wolf (Oberleitungs-Lkw im Kontext):

Oberleitungs-Lkw im Kontext weiterer Antriebs- und Envergieversorgungsoptionen für den Straßengüterfernverkehr . Berlin, 2018

Lakshmanan, T. R. (The wider economic benefits of transportation: an overview):

The wider economic benefits of transportation: an overview , 2007

Landesbetrieb Information und Technik Nordrhein-Westfalen (IT.NRW) (Pendleratlas NRW):

Pendleratlas NRW. Aachen. <https://www.pendleratlas.nrw.de/>, Abruf 04.09.2019

Lehr, U.; Mönning, A.; Wolter, M. I.; Lutz, C.; Schade, W.; Krail, M. (ASTRA und PANTA RHEI im Vergleich):

Die Modelle ASTRA und PANTA RHEI zur Abschätzung gesamtwirtschaftlicher Wirkungen umweltpolitischer Instrumente-ein Vergleich . 4 Aufl., 2011

Levinson, M. (The box):

The box . 2 Aufl. Princeton: Princeton Univers. Press, 2016

Liebl, J.; Lederer, M.; Rohde-Brandenburger, K.; Biermann, J.-W.; Roth, M.; Schäfer, H. (Energiemanagement im Kraftfahrzeug):

Energiemanagement im Kraftfahrzeug . Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014

Litman, T. (Autonomous Vehicle Implementation Predictions):

Autonomous Vehicle Implementation Predictions. Implications for Transport Planning . Victoria, 2019

LNVG (Kosten Im SPNV):

Kosten Im SPNV. <https://www.lnvg.de/spnv/finanzierung/kosten-im-spnv>, Abruf 07.09.2019

Loose, W. (Mehr Platz zum Leben):

Mehr Platz zum Leben—wie CarSharing Städte entlastet. In: Ergebnisse des bcs-Projektes CarSharing im innerstädtischen Raum—eine Wirkungsanalyse Endbericht. Berlin, 2016

Mager, T. J. (Mobilitätslösungen für den ländlichen Raum):

Mobilitätslösungen für den ländlichen Raum. In: Standort, 41. Jg., 2017, Nr. 3, S. 217–223

Mathias Brandt (Bike-Sharing boomt):

Bike-Sharing boomt , 2019

Matthias Janson (So viel Stau):

So viel Stau in Deutschland wie noch nie. <https://de.statista.com/infografik/10466/gemeldete-staus-auf-deutschen-autobahnen/>, Abruf 30.06.2019

McKerracher, C.; Orlandi, I.; Wilshire, M.; Tryggestad, C.; Mohr, D.; Hannon, E. (An integrated perspective on the future of mobility):

An integrated perspective on the future of mobility , 2016

McKinsey&Company (Urban world):

Urban world: Mapping the economic power of cities , 2011

Melo, S.; Macharis, C. (City distribution and urban freight transport):

City distribution and urban freight transport. Multiple perspectives (Reihe: NECTAR series on transportation and communications networks research). Cheltenham, UK, Northampton, MA: Edward Elgar Publishing, 2011

Mißler-Behr, M. (Methoden der Szenarioanalyse):

Methoden der Szenarioanalyse . Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag, 1993

Müller, M.; Görnert, S.; Voklamer, A. (Güterverkehr in der Stadt):

Güterverkehr in der Stadt. Ein unterschätztes Problem (Reihe: VCD Fakten). Berlin, 2006

Münzel, K.; Boon, W.; Frenken, K.; Vaskelainen, T. (Carsharing business models in Germany):

Carsharing business models in Germany: characteristics, success and future prospects. In: Information Systems and e-Business Management, 16. Jg., 2018, Nr. 2, S. 271–291

Nicolas, J.-P.; Pochet, P.; Poimboeuf, H. (Towards sustainable mobility indicators):

Towards sustainable mobility indicators: application to the Lyons conurbation. In: Transport Policy, 10. Jg., 2003, Nr. 3, S. 197–208

Nijland, H.; van Meerkerk, J. (Mobility and environmental impacts of car sharing in the Netherlands):

Mobility and environmental impacts of car sharing in the Netherlands. In: Environmental Innovation and Societal Transitions, 23. Jg., 2017, S. 84–91

Nobis, C.; Kuhnimhof, T. (Mobilität in Deutschland - 2018):

Mobilität in Deutschland. Ergebnisbericht . Bonn, Berlin, 2018

Normenausschuss Grundlagen des Umweltschutzes (NAGUS) (14045):

14045. Umweltmanagement - Ökoeffizienzbewertung von Produktsystemen, 2012

Öko-Institut e.V.; Fraunhofer ISI (Klimaschutzszenario 2050):

Klimaschutzszenario 2050. 2. Endbericht . Berlin, 2015

Petersen, Rudolf, and Karl O. Schallaböck. (Mobilität für morgen):

Mobilität für morgen. Chancen einer zukunftsfähigen Verkehrspolitik Springer-Verlag GmbH Deutschland, 2013

Pfohl, H.-C. (Grundlagen der betriebswirtschaftlichen Logistik):

Grundlagen der betriebswirtschaftlichen Logistik. In: Pfohl, H.-C. (Hrsg.): Logistiksysteme . Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010, S. 2–65

Pollozek, S.; Brühl, K. (Die neue Wir-Kultur):

Die neue Wir-Kultur Zukunftsinstitut, 2015

Proff, H.; Fojcik, T. M. (Mobilität und digitale Transformation):

Mobilität und digitale Transformation . Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018

Radke, S. (Verkehr in Zahlen 17/18):

Verkehr in Zahlen 2017/2018 (Reihe: Verkehr in Zahlen). 46 Aufl. Hamburg: DVV Mdia Group, 2017

Rebstock, M.; Herfert, A. (Einsatzgrenzen von Niederflurbussen im Regionalverkehr):

Einsatzgrenzen von Niederflurbussen im Regionalverkehr. Vorstellung einer Studie des Instituts Verkehrs und Raum der FH Erfurt . Erfurt, 25. November

Redaktion NGIN Mobility (Mit On-Demand-Shuttles lässt sich nur Geld verdienen, wenn sie fahrerlos sind):

Mit On-Demand-Shuttles lässt sich nur Geld verdienen, wenn sie fahrerlos sind , 2018

Rittenbruch, K. (Makroökonomie):

Makroökonomie . 11 Aufl.: Walter de Gruyter, 2014

Ritz, J. (Mobilitätswende - autonome Autos):

Mobilitätswende - autonome Autos erobern unsere Straßen Springer, 2018

Rogall, H. (Netzwerk Nachhaltige Ökonomie):

Netzwerk Nachhaltige Ökonomie . Abgeordnetenhaus von Berlin, 2000

Schade, W. (Strategic sustainability analysis):

Strategic sustainability analysis. Concept and application for the assessment of European Transport Policy (Reihe: Karlsruher Beiträge zur Wirtschaftspolitischen Forschung /Karlsruhe Papers in Economic Policy Research, Bd. 17). 1. Aufl. Aufl. Baden-Baden: Nomos-Verl.-Ges, 2005

Schebek, L. (Ökobilanzen heute – Praxis oder Experten-Werkzeug?):

Ökobilanzen heute – Tool für die Praxis oder Experten-Werkzeug? In: uwf UmweltWirtschaftsForum, 24. Jg., 2016, Nr. 1, S. 97–99

Schiller, T.; Pottebaum, T.; Scheidl, J. (Car Sharing in Europa):

Car Sharing in Europa. Business Models, National Variations and Upcoming Disruptions , 2017

Schleier, T. (Dash Delivery: Mut zur neuen letzten Meile):

Dash Delivery: Mut zur neuen letzten Meile. <https://www.zukunftsinstitut.de/artikel/handel/dash-delivery-mut-zur-neuen-letzten-meile/>, Abruf 30.07.2019

Schmied, M.; Mottschall, M. (Berechnung des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen des ÖPNV):

Berechnung des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen des ÖPNV. Leitfaden zur Anwendung der europäischen Norm EN 16258 , 2012

Schönberg, T.; Dyskin, A.; Ewer, K. (Bike Sharing 5.0):

Bike Sharing 5.0. Market insights and outlook . Berlin, 2018

Schönfelder, S. (Verkehrsbild Deutschland):

Verkehrsbild Deutschland. Angebotsqualitäten und Erreichbarkeiten im öffentlichen Verkehr (Reihe: BSSR-Analysen). Bonn, 2018

Schuh, G.; Rudolf, S.; Schrey, E. (Product Lifecycle Management):

Product Lifecycle Management. <http://www.enzyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de/lexikon/informationssysteme/Sektorspezifische-Anwendungssysteme/Product-Life-Cycle-Management/index.html/?searchterm=PLM>, Abruf 18.05.2019

Schütze, G.; Greupel, M. (Stickstoff - Zuviel des Guten?):

Stickstoff - Zuviel des Guten? Überlastung des Stickstoffkreislaufs zum Nutzen von Umwelt und Mensch wirksam reduzieren . Dessau-Roßlau

Shiau, T.-A.; Liu, J.-S. (Developing an indicator system for local governments to evaluate transport sustainability strategies):

Developing an indicator system for local governments to evaluate transport sustainability strategies. In: Ecological Indicators, 34. Jg., 2013, S. 361–371

Smeets, E.; Weterings, R. (Environmental indicators):

Environmental indicators: Typology and overview (Reihe: Technical Report). Kopenhagen, 1999

Spinnler, T. (Tanken Flieger künftig Strom?):

Tanken Flieger künftig Strom? , 2019

SPLENDID RESEARCH GmbH (Studie: ÖPNV und Zufriedenheit):

Studie: ÖPNV und Zufriedenheit, 2017

Stadler, K. (Conjoint measurement):

Conjoint measurement. In: Planung & Analyse, 1993, S. 32–38

Statista (Studien zur Transport- und Logistikbranche):

Studien zur Transport- und Logistikbranche in Deutschland

Statista (Absatz von E-Bikes):

Absatz von E-Bikes in Deutschland von 2009 bis 2018 , 2018

Statista (Statistiken zum ÖPNV in Deutschland):

Statista-Dossier zum öffentlichen Personenverkehr in Deutschland, 2018

Statistische Ämter des Bundes und der Länder (Demografischer Wandel in Deutschland):

Demografischer Wandel in Deutschland. In: Bevölkerungs- und Haushaltsentwicklung im Bund und in den Ländern, 2011, Nr. 1, S. 1–39

Statistisches Bundesamt (Verkehrsunfälle):

Verkehrsunfälle. https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Verkehrsunfaelle/_inhalt.html, Abruf 27.07.2019

Statistisches Bundesamt (Verkehrsunfälle Zeitreihen 2018):

Verkehrsunfälle Zeitreihen 2018 , 2018

Statistisches Bundesamt (Bevölkerungsdaten):

Bevölkerung - Zahl der Einwohner in Deutschland von 2008 bis 2018 (in 1.000).

<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1217/umfrage/entwicklung-der-gesamtbevoelkerung-seit-2002/>, Abruf 18.07.2019

Steierwald, G.; Künne, H. D.; Vogt, W. (Stadtverkehrsplanung):

Stadtverkehrsplanung . Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005

Steinmüller, K. (Grundlagen Zukunftsforschung):

Grundlagen und Methoden der Zukunftsforschung. Szenarien, Delphi, Technikvorausschau (Reihe: Werkstattberichte / SFZ, Sekretariat für Zukunftsforschung, Bd. 21). Gelsenkirchen: SFZ, 1997

Stiglitz, J. E.; Walsh, C. E. (Volkswirtschaftslehre):

Volkswirtschaftslehre. Mikroökonomie und Makroökonomie (Reihe: Internationale

Standardlehrbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften). 4. Aufl. Aufl. München: Oldenbourg, R, 2010

Stock, W.; Bernecker, T. (Verkehrsökonomie):

Verkehrsökonomie . Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014

SYSTRA (automated and autonomous public transport):

automated and autonomous public transport . Paris, 2016

Thomson, R.; Baum, M.; Kirschstein, T.; Martinez, N.; Sachdev, N.; Lepine, P.-L.;

Bailly, N. (Aircraft electrical propulsion):

Aircraft electrical propulsion - Onwards and upwards. It is not a question of it, but when . London, 2018

Timo Stukenberg Leihfahrräder in deutschen Städten:

Tausende Leihfahrräder fluten deutsche Städte. In: Welt

Tipler, P. A.; Mosca, G. (Energie und Arbeit):

Energie und Arbeit. In: Tipler, P. A.; Mosca, G.; Wagner, J. (Hrsg.): Physik . Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015, S. 159–210

Todd Litman (Measuring Transportation):

Measuring Transportation. Traffic, Mobility Accessibility. In: ITE Journal, 73. Jg., 2003, Nr. 10, S. 28–32

TRT Transporti e Territorio (Description Trust Model):

Description of the Trust model , 2018

Tsamboulas, D.; Mikroudis, G. (EFFECT):

EFFECT – evaluation framework of environmental impacts and costs of transport initiatives. In: Transportation Research Part D: Transport and Environment, 5. Jg., 2000, Nr. 4, S. 283–303

Uber (UberPool):

UberPool. <https://www.uber.com/de/de/ride/uberpool/>, Abruf 08.09.2019

Umweltbundesamt (Stickstoffoxide):

Stickstoffoxide. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe/stickstoffoxide>, Abruf 08.07.2019

Umweltbundesamt (Emissionsdaten):

Emissionsdaten. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/emissionsdaten#textpart-1>, Abruf 25.07.2019

Umweltbundesamt Österreich (Emissionskennzahlen Datenbasis 2017):

Emissionskennzahlen Datenbasis 2017 , 2018

UNFCCC (Kyoto Protocol to the United Nations):

Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change adopted at COP3 in Kyoto . Japan, 1997

United Nations (Sustainable Development Goals):

Sustainable Development Goals. Knowledge Platform. <https://sustainabledevelopment.un.org/>, Abruf 11.09.2019

United Nations Department for Economic & Social Affairs (World Urbanization Prospects):

World Urbanization Prospects: The 2018 Revision. key facts , 2018

Ute von Reibnitz (Szenario-Technik):

Szenario-Technik. Instrumente für die unternehmerische und persönliche Erfolgsplanung . 2. Auflage Aufl. Wiesbaden: Gabler Verlag, 1992

Uwe Clausen, Sebastian Stütz, Arnd Bernsmann, Hilmar Heinrichmeyer (ZF-Zukunftstudie 2016):

ZF-Zukunftstudie 2016. Die letzte Meile, 2016

VCD (VCD Bahntest 14/15):

VCD Bahntest 2014/2015 . VCD, 2014

Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V. (VDV) (VDV-Statistik 2017):

VDV-Statistik 2017 . Köln, 2017

Viergutz, K.; Scheier, V. (Inter, Multi, Mono: Modalität im Personenverkehr):

Inter, Multi, Mono: Modalität im Personenverkehr. Eine Begriffsbestimmung (Reihe: Internationales Verkehrswesen), 2018

Wang, L. (Framework for Evaluating):

Framework for Evaluating Sustainability of Transport System in Megalopolis and its Application. In: IERI Procedia, 9. Jg., 2014, S. 110–116

Wardman, M. (Public transport values):

Public transport values of time. In: Transport Policy, 11. Jg., 2004, Nr. 4, S. 363–377

Weyerstraß, K. (Entwicklung, Determinanten und Bedeutung der totalen Faktorproduktivität):

Entwicklung, Determinanten und Bedeutung der totalen Faktorproduktivität (Reihe: FIW-Policy Brief). Wien, 2018

Wichter, Z. (Are you ready to fly without a human pilot?):

Are you ready to fly without a human pilot? <https://www.nytimes.com/2018/07/16/business/airplanes-unmanned-flight-autopilot.html>, Abruf 30.07.2019

Williams, C. (Future of retail):

Future of retail: Drones to play a big role in the next 10 to 20 years , 2017

Wilson, I. H. (Scenarios):

Scenarios. In: Jib Fowles (Hrsg.): Handbook of futures research Greenwood Press, 1978, S. 220–230

Woeckener, B. (Volkswirtschaftslehre):

Volkswirtschaftslehre. Eine Einführung (Reihe: Springer-Lehrbuch). 2 Aufl.: Gabler Verlag, 2013

Wolfgang Steichele (Aktuelles aus dem Verkehr):

Zahlen, Fakten, Wissen. Aktuelles aus dem Verkehr . München, 2016

World Health Organization (Ten threats to):

Ten threats to global health in 2019. <https://www.who.int/emergencies/ten-threats-to-global-health-in-2019>, Abruf 11.09.2019

World Health Organization (The World Health Report 2002):

The World Health Report 2002: Reducing Risks, Promoting Healthy Life (Reihe: Public Health Series). Geneva: WHO

Zanker, C. (Branchenanalyse Logistik):

Branchenanalyse Logistik. Der Logistiksektor zwischen Globalisierung, Industrie 4.0 und On-line-Handel (Reihe: Study, Bd. Nr. 390). Düsseldorf: Hans-Böckler-Stiftung, Juni 2018

Zech, K.; Naumann, K.; Müller-Langer, F.; Ponitka, J.; Majer, S.; Schmidt, P.; Weindorf, W.; Altmann, M.; Michalski, J.; Niklaß, M.; Meyer, H.; Lischke, A.; Fehrenbach, H.; Jöhrens, J.; Markwardt, S. (Biokerosin und EE-Kerosin):

Biokerosin und EE-Kerosin für die Luftfahrt der Zukunft – von der Theorie zu Pilotvorhaben . Leipzig, München, Berlin, Heidelberg, 2015

Zimmer, W.; Blanck, R.; Bergmann, T.; Mottschall, M.; Waldenfels, R. von; Cyganski, R.; Wolfermann, A.; Winkler, C.; Heinrichs, M.; Dünnebeil, F. (Renewability III Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors):

Endbericht RENEWBILITY III-Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors, 2016

Zimmer, W.; Hacker, F.; Rausch, L.; Cyganski, R.; Justen, A.; Knitschky, G.; Lischke, A.; Mehlin, M.; Müller, S.; Schade, W.; Hartwig, J.; Sievers, L. (Renewability II Szenario für einen anspruchsvollen Klimaschutzbeitrag des Verkehrs):

Weiterentwicklung des Analyseinstruments Renewability. Renewability II - Szenario für einen anspruchsvollen Klimaschutzbeitrag des Verkehrs. In: Texte, 2013, Nr. 84

Zimmermann, F. (Diskussion um Stickstoffoxid-Grenzwert):

Diskussion um Stickstoffoxid-Grenzwert WISO, 2019

ZIV (Zahlen-Daten-Fakten zum Fahrradmarkt):

Zahlen-Daten-Fakten zum Fahrradmarkt in Deutschland 2018 . Berlin, 2019

Zukunftsinstitut GmbH (Megatrend New Work):

Megatrend New Work. <https://www.zukunftsinstitut.de/dossier/megatrend-new-work/>, Abruf 28.07.2019

Zukunftsinstitut GmbH (Die Evolution der Mobilität):

Die Evolution der Mobilität . München, 2017

Zukunftsinstitut GmbH (Megatrend Konnektivität):

Megatrend Konnektivität. <https://www.zukunftsinstitut.de/dossier/megatrend-konnektivitaet/>,
Abruf 30.07.2019

VI Anhang

Tabelle A-1 - Modal Split des Verkehrsaufkommens

Basis Wege	MiD 2002 ⁴⁵¹	MiD 2008 ⁴⁵²	MiD 2017 ⁴⁵³
Zu Fuß	22	23	22
Fahrrad	9	10	11
MIV-Fahrer	48	47	43
MIV-Mitfahrer	13	12	14
ÖV	9	9	10

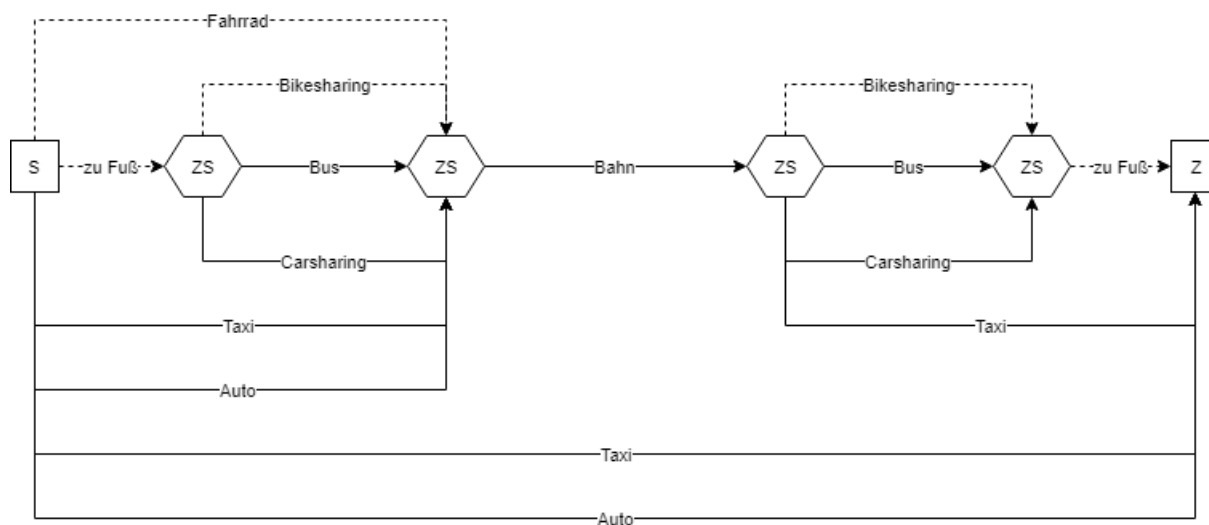


Abbildung A-1 - Referenzstrecke Personenverkehr Intercity

⁴⁵¹ Vgl. infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH et al. (2010) Mobilität in Deutschland, S. 22.

⁴⁵² Vgl. infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH et al. (2010) Mobilität in Deutschland, S. 22.

⁴⁵³ Vgl. Nobis et al. (2018) Mobilität in Deutschland - 2018, S. 45.

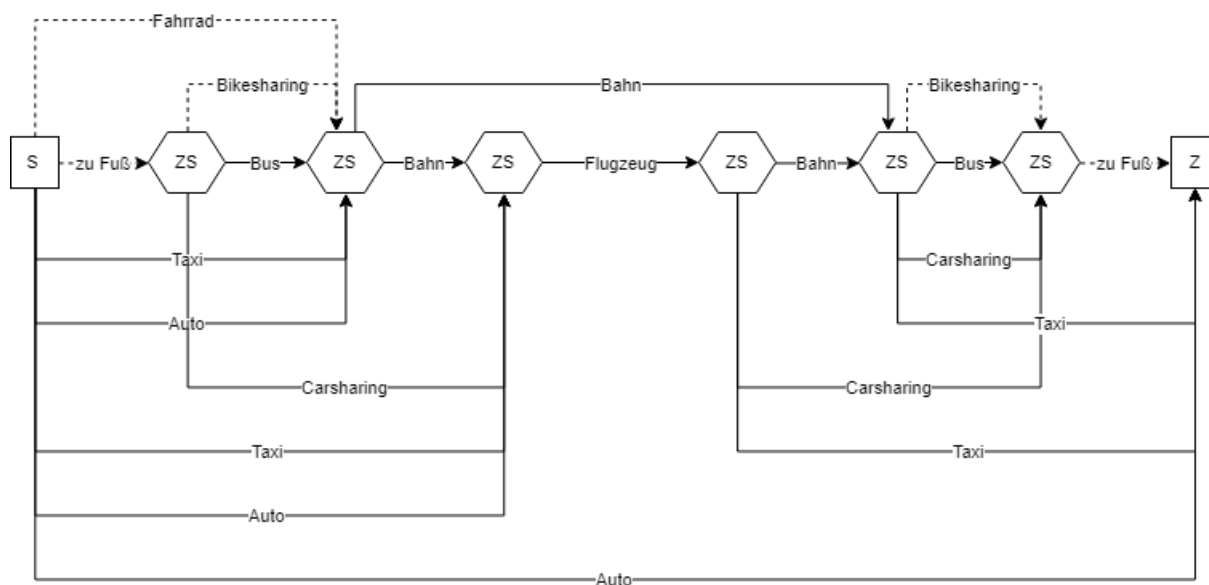


Abbildung A-2 - Referenzstrecke Personenverkehr Langstrecke

Tabelle A-2 - Unfallrisiko Personen- und Güterverkehr

Verkehrsmittel	Getötet	Quelle	Verkehrsleistung	Quelle
Rad	382	DeStatista ⁴⁵⁴	40,9 Mrd.	MID ⁴⁵⁵
MIV	2073	DeStatista	950,4 Mrd.	VIZ ⁴⁵⁶
Bus	22	DeStatista	28,49 Mrd.	VDV
Lkw	167	DeStatista	491 Mrd.	VIZ
Zu Fuß	483	DeStatista	33,9 Mrd.	MID
Tram	30	DeStatista	17,71 Mrd.	VDV ⁴⁵⁷
Zug	179	DeStatista	225,7 Mrd.	VIZ
Flugzeug	20	Statista ⁴⁵⁸	69,12 Mrd.	VIZ

⁴⁵⁴ Vgl. Statistisches Bundesamt (2018) Verkehrsunfälle Zeitreihen 2018, S. 15.

⁴⁵⁵ Vgl. Nobis et al. (2018) Mobilität in Deutschland - 2018, S. 45–46.

⁴⁵⁶ Vgl. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2019) Verkehr in Zahlen 18/19, S. 153.

⁴⁵⁷ Vgl. Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V. (VDV) (2017) VDV-Statistik 2017, S. 29.

⁴⁵⁸ Vgl. Statistisches Bundesamt (2018) Verkehrsunfälle Zeitreihen 2018, S. 350.

Verbesserungsfaktoren

Die Herleitung der Verbesserungsfaktoren beruht für das Trendszenario aus drei Studien: Renewability⁴⁵⁹, Shell Nutzfahrzeugstudie⁴⁶⁰ und Shell Pkw Studie⁴⁶¹. Die drei Studien wurden bereits im Text vorgestellt. Für die Szenarien „Unregulierte Autonome Mobilität“ und „Optimierte multimodale Mobilität“ wurden die Werte aus KRAIL et al.⁴⁶² und SYSTRA⁴⁶³ übernommen.

Die Verbesserungsfaktoren ergeben sich dabei aus den in den Studien angenommenen Werte dividiert durch den Ausgangswert der Studien. Für den LNF, Lkws und MIV wurden die Verbesserungspotentiale im Vergleich zum Trendszenario, über die höhere Auslastung berechnet. Dafür wurden die beiden Auslastungen ins Verhältnis gesetzt und so die Verbesserung berechnet. Für das Szenario OMM wurden die Werte aus dem Szenario UAM übernommen, solange es keine weiteren Verbesserungen gab.

Im Szenario „Pod-basierte multimodale Mobilität“ wurden die Werte aus dem Szenario OMM übernommen.

Wie bereits in Kapitel 6.3.1 beschrieben wurden die Verbesserungsfaktoren für den Energieverbrauch auf die anderen Emissionsfaktoren übertragen, wenn für diese keine Verbesserungsfaktoren vorhanden waren. Die Verbesserungsfaktoren für die spezifischen Emissionswerte sind in den Tabellen Tabelle A-3,

Tabelle A-4, Tabelle A-5 und Tabelle A-6 dargestellt.

Die Quellen für die Verbesserungsfaktoren für das Unfallrisiko wurden bereits im Text dargelegt und sind in Tabelle A-7 zusammengefasst.

⁴⁵⁹ Vgl. Zimmer et al. (2016) Renewability III Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors.

⁴⁶⁰ Vgl. Adolf et al. (2016) SHELL Nutzfahrzeug-Studie: Diesel, alternative Antriebe.

⁴⁶¹ Vgl. Adolf, Jörg et al. (2014) Shell PKW-Szenarien bis 2040.

⁴⁶² Vgl. Krail et al. (2019) Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr.

⁴⁶³ Vgl. SYSTRA (2016) automated and autonomous public transport.

Tabelle A-3 - Verbesserungsfaktoren des spezifischen Energieverbrauchs

Verkehrsmittel	Trendszenario	Unregulierte Autonome Mobilität ⁴⁶⁴	Optimierte multimodale Mobilität ⁴⁶⁵	Pod-basierte Mobilität ⁴⁶⁶
Bus	0,73	0,92	0,92	0,92
Tram	0,76	1,00	1,00	1,00
U-Bahn	0,76	0,85	0,85	0,85
Zug-Nahverkehr	0,76	0,90	0,90	0,90
MIV	0,60	0,97	0,90	0,97
Zug-Fernverkehr	0,76	0,90	0,90	0,90
Flugzeug	0,61	1,00	1,00	1,00
Leichte Nutzfahrzeuge	0,55	0,95	0,93	0,90
Lkw	0,55	0,85	0,83	0,85
Güterzug	0,76	0,95	1,00	0,95
Binnenschiffe	0,7	1,00	1,00	1,00

⁴⁶⁴ Bezogen sind die Faktoren auf das Trendszenario.⁴⁶⁵ Bezogen sind die Faktoren auf das Trendszenario.⁴⁶⁶ Bezogen sind die Faktoren auf das Trendszenario.

Tabelle A-4 - Verbesserungsfaktoren der spezifischen THG-Emissionen⁴⁶⁷

Verkehrsmittel	Trendszenario ⁴⁶⁸	Unregulierte Autonome Mobilität ⁴⁶⁹⁴⁷⁰	Optimierte multimodale Mobilität ⁴⁷¹	Pod-basierte Mobilität ⁴⁷²
Bus	0,73	0,92	0,92	0,92
Tram		1,00	1,00	1,00
U-Bahn		0,85	0,85	0,885
Zug-Nahverkehr		0,90	0,90	0,90
MIV	0,64	0,97	0,90	0,94
Zug-Fernverkehr		0,90	0,90	0,90
Flugzeug	0,61	1,00	1,00	1,00
Leichte Nutzfahrzeuge	0,55	0,95	0,93	0,93
Lkw	0,55	0,85	0,83	0,83
Güterzug		0,95	0,95	0,95
Binnenschiffe	0,7	1,00	1,00	1,00

⁴⁶⁷ Leerstellen in der Tabelle entsprechen einem Verkehrsmittel, welches ausschließlich elektrisch betrieben wird und sich die Verbesserungen daher über den Energieverbrauch und den Strommix berechnet werden.

⁴⁶⁸ Die Verbesserungsfaktoren für alle rein elektrisch angetriebenen Verkehrsmittel sind der Tabelle A-3 zu entnehmen.

⁴⁶⁹ Bezogen sind die Faktoren auf das Trendszenario.

⁴⁷⁰ Bezogen sind die Faktoren auf das Trendszenario.

⁴⁷¹ Bezogen sind die Faktoren auf das Trendszenario.

⁴⁷² Bezogen sind die Faktoren auf das Trendszenario.

Tabelle A-5 - Verbesserungsfaktoren der spezifischen NOx-Emissionen⁴⁷³

Verkehrsmittel	Trendszenario	Unregulierte Autonome Mobilität ⁴⁷⁴	Optimierte multimodale Mobilität ⁴⁷⁵	Pod-basierte Mobilität ⁴⁷⁶
Bus	0,73	0,92	0,92	0,92
Tram		1,00	1,00	1,00
U-Bahn		0,85	0,85	0,885
Zug-Nahverkehr		0,90	0,90	0,90
MIV	0,64	0,97	0,90	0,94
Zug-Fernverkehr		0,90	0,90	0,90
Flugzeug	0,61	1,00	1,00	1,00
Leichte Nutzfahrzeuge	0,55	0,95	0,93	0,93
Lkw	0,55	0,85	0,83	0,83
Güterzug		0,95	0,95	0,95
Binnenschiffe	0,7	1,00	1,00	1,00

⁴⁷³ Leerstellen in der Tabelle entsprechen einem Verkehrsmittel, welches ausschließlich elektrisch betrieben wird und sich die Verbesserungen daher über den Energieverbrauch und den Strommix berechnet werden.

⁴⁷⁴ Bezogen sind die Faktoren auf das Trendszenario.

⁴⁷⁵ Bezogen sind die Faktoren auf das Trendszenario.

⁴⁷⁶ Bezogen sind die Faktoren auf das Trendszenario.

Tabelle A-6 - Verbesserungsfaktoren der spezifischen Feinstaub-Emissionen⁴⁷⁷

Verkehrsmittel	Trendszenario	Unregulierte Autonome Mobilität ⁴⁷⁸	Optimierte multimodale Mobilität ⁴⁷⁹	Pod-basierte Mobilität ⁴⁸⁰
Bus	0,73	0,92	0,92	0,92
Tram		1,00	1,00	1,00
U-Bahn		0,85	0,85	0,885
Zug-Nahverkehr		0,90	0,90	0,90
MIV	0,64	0,97	0,90	0,94
Zug-Fernverkehr		0,90	0,90	0,90
Flugzeug	0,61	1,00	1,00	1,00
Leichte Nutzfahrzeuge	0,55	0,95	0,93	0,93
Lkw	0,55	0,85	0,83	0,83
Güterzug		0,95	0,95	0,95
Binnenschiffe	0,7	1,00	1,00	1,00

⁴⁷⁷ Leerstellen in der Tabelle entsprechen einem Verkehrsmittel, welches ausschließlich elektrisch betrieben wird und sich die Verbesserungen daher über den Energieverbrauch und den Strommix berechnet werden.

⁴⁷⁸ Bezogen sind die Faktoren auf das Trendszenario.

⁴⁷⁹ Bezogen sind die Faktoren auf das Trendszenario.

⁴⁸⁰ Bezogen sind die Faktoren auf das Trendszenario.

Tabelle A-7 - Verbesserungsfaktoren des spezifischen Unfallrisikos

Verkehrsmittel	Trendszenario	Unregulierte Autonome Mobilität ⁴⁸¹	Optimierte multimodale Mobilität ⁴⁸²	Pod-basierte Mobilität ⁴⁸³
Zu Fuss	0,44	0,90	0,90	0,90
Fahrrad	0,44	0,90	0,90	0,90
E-Bike	0,44	0,90	0,90	0,90
Bus	0,44	0,90	0,90	0,90
Tram	0,80	0,90	0,90	0,90
U-Bahn	0,80	1,00	1,00	1,00
Zug-Nahverkehr	0,80	1,00	1,00	1,00
MIV	0,44	0,90	0,90	0,90
Zug-Fernverkehr	0,80	1,00	1,00	1,00
Flugzeug	0,61	1,00	1,00	1,00
Leichte Nutzfahrzeuge	0,44	0,90	0,90	0,90
Lkw	0,44	0,90	0,90	0,90
Güterzug	0,80	1,00	1,00	1,00
Binnenschiffe	1,00	1,00	1,00	1,00

⁴⁸¹ Bezogen sind die Faktoren auf das Trendszenario.⁴⁸² Bezogen sind die Faktoren auf das Trendszenario.⁴⁸³ Bezogen sind die Faktoren auf das Trendszenario.

Marktpenetrationen Autonomes Fahren

Tabelle A-8 - Marktpenetrationen in den autonomen Szenarien

Verkehrsmittel	Unreguliertes autonomes Fahren ⁴⁸⁴	Optimierte multimodale Mobilität ⁴⁸⁵
Pkw	36 %	50 %
1	2 %	8 %
2	0 %	1 %
3	0 %	0 %
4	28 %	34 %
5	6 %	7 %
Lkw	58 %	57 %⁴⁸⁶
1	16 %	13 %
2	0 %	0 %
3	0 %	0 %
4	0 %	2 %
5	42 %	42 %
Busse	73 %	79%
1	15 %	8 %
2	0 %	0 %

⁴⁸⁴ Vgl. Krail et al. (2019) Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr, S. 114.

⁴⁸⁵ Vgl. Krail et al. (2019) Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr, S. 119.

⁴⁸⁶ Der relativ geringe Automatisierungsgrad für Lkw lässt sich auf die Zusammenführung von Lkws und leichten Nutzfahrzeugen zurückführen. Die leichte Nutzfahrzeuge sind laut KRAIL et Al. zu knapp 50 % automatisiert. Vgl. Krail et al. (2019) Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr, S. 114.

3	0 %	0 %
4	10 %	17 %
5	48 %	53 %

Annahmen zur Berechnung der Pod Kosten

Zur Bestimmung der Kosten wurden die folgenden Annahmen getroffen:

- Die Automatisierungskosten der Fahrzeuge werden pauschal mit einem Faktor von 1.2 angenommen⁴⁸⁷
- Die Kosten für Pod und Carrier entsprechen jeweils 2/3 der Anschaffungskosten der Kategorie (kein Innenraum und Aufbau / doppelte Ausführungen und teure Technik)
- Anschaffungskosten für die Kategorie Pod Small entsprechen den Kosten für einen Klein- bzw. Kompaktklassewagen (35.000 Euro⁴⁸⁸)
- Anschaffungskosten für die Kategorie Pod Big entsprechen den Kosten für einen Bus (225.000 Euro⁴⁸⁹) für einen Cargo Big Pod entsprechen diese einem Lkw (200.000 Euro⁴⁹⁰)
- Anschaffungskosten für den Schienen-Carrier (6.500.000 Euro⁴⁹¹)
- Die Kosten pro Zug-km belaufen sich auf 14,56 Euro/Zug-km⁴⁹² bei einer Auslastung von 298 Personen pro Zug im Fernverkehr und 125 Personen pro Zug im Nahverkehr
- Die Kosten für einen Cargo Pod Kilometer belaufen sich auf 0,8826 Euro/Fzg.-km⁴⁹³
- Die Auslastung des Cargo Small Pod wird dabei auf 1,5 Tonnen und des Cargo Big Pods auf 13 Tonnen⁴⁹⁴

⁴⁸⁷ Vgl. Bösch et al. (2018) Cost-based analysis of autonomous mobility services, S. 79.

⁴⁸⁸ Vgl. Bösch et al. (2018) Cost-based analysis of autonomous mobility services, S. 78.

⁴⁸⁹ Vgl. Rebstock et al. (25. November) Einsatzgrenzen von Niederflurbussen im Regionalverkehr, S. 25.

⁴⁹⁰ Vgl. Haase (WS 2013/14) Fahrzeugkostenkalkulation, S. 14.

⁴⁹¹ Annahme des Autors Vgl. Handelsblatt (2012) DB Kosten der ICE-Züge, S. 6.

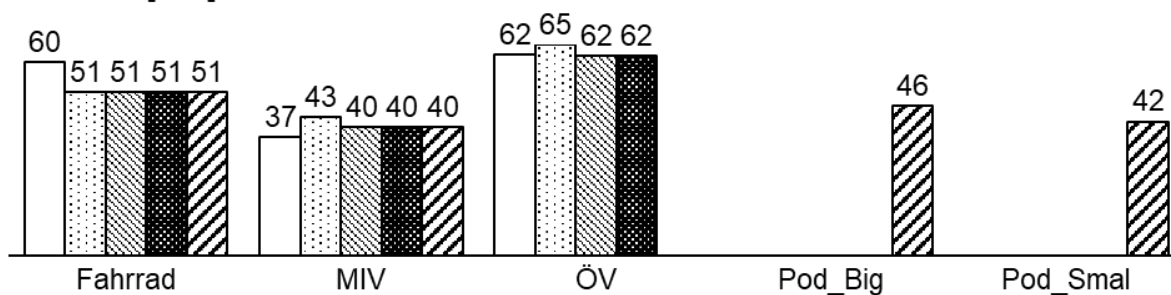
⁴⁹² Vgl. LNVG (2014) Kosten Im SPNV.

⁴⁹³ Vgl. Haase (WS 2013/14) Fahrzeugkostenkalkulation, S. 17.

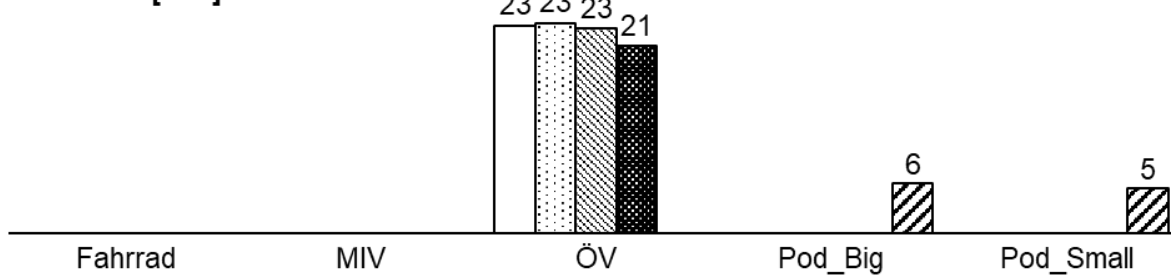
⁴⁹⁴ Die Annahmen für den Cargo Pod Big begründen sich in den ISO-Containern Maßen und deren Nutzlast, sowie einer durchschnittlichen Auslastung von 50 %. Der Wert für den Cargo Small Pod wird vom Autor geschätzt.

Auswertungen

Fahrtzeit [min]



Wartezeit [min]



Transferzeit [min]

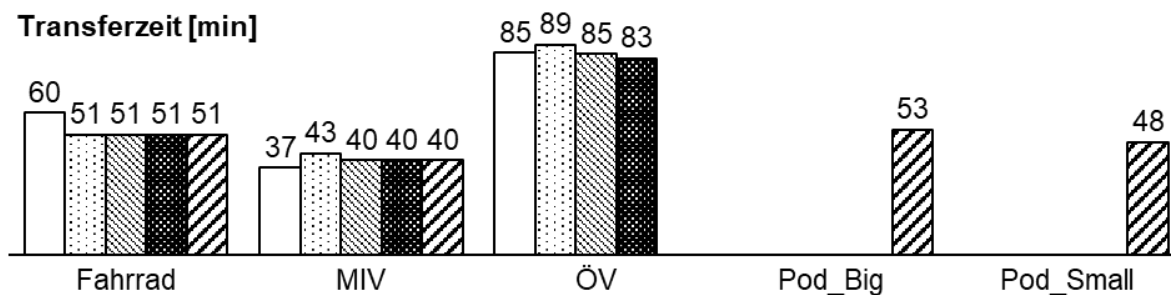


Abbildung A-3 - Entwicklung der Fahrt-, Warte- und Transferzeit (UL)

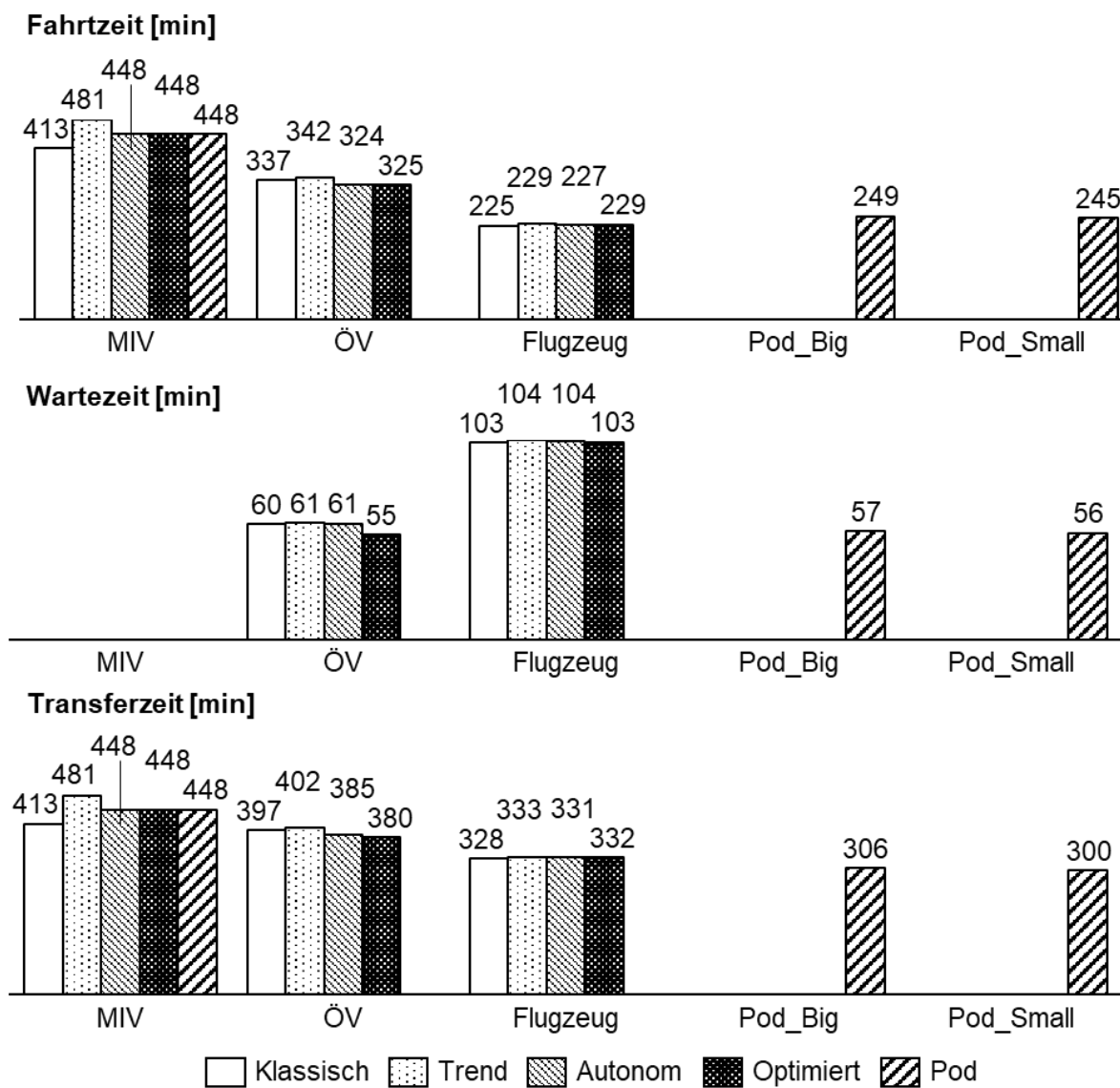


Abbildung A-4 - Entwicklung der Fahrt-, Warte- und Transferzeit (L)

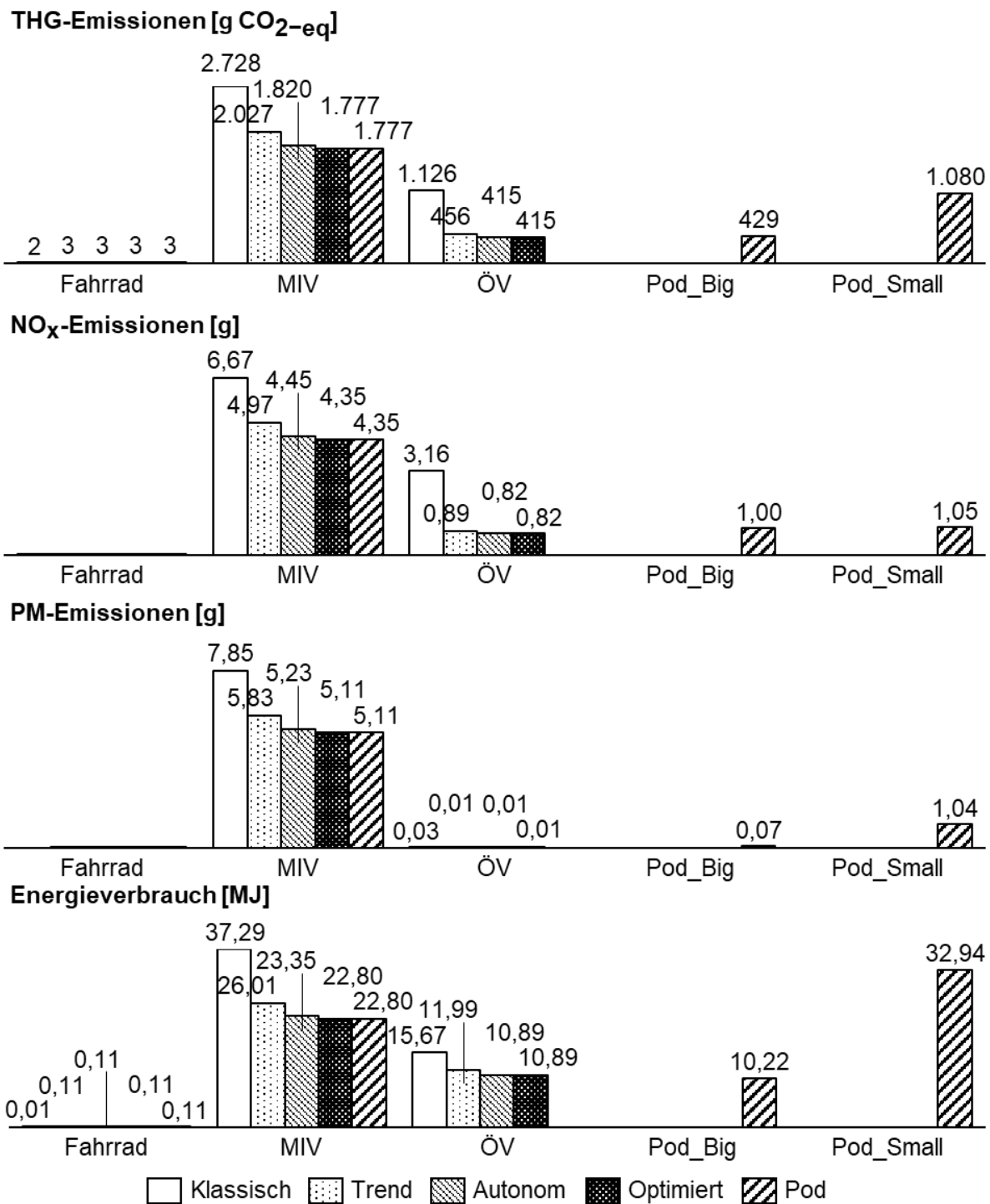


Abbildung A-5 - Entwicklung der ökologischen Dimension (UL)

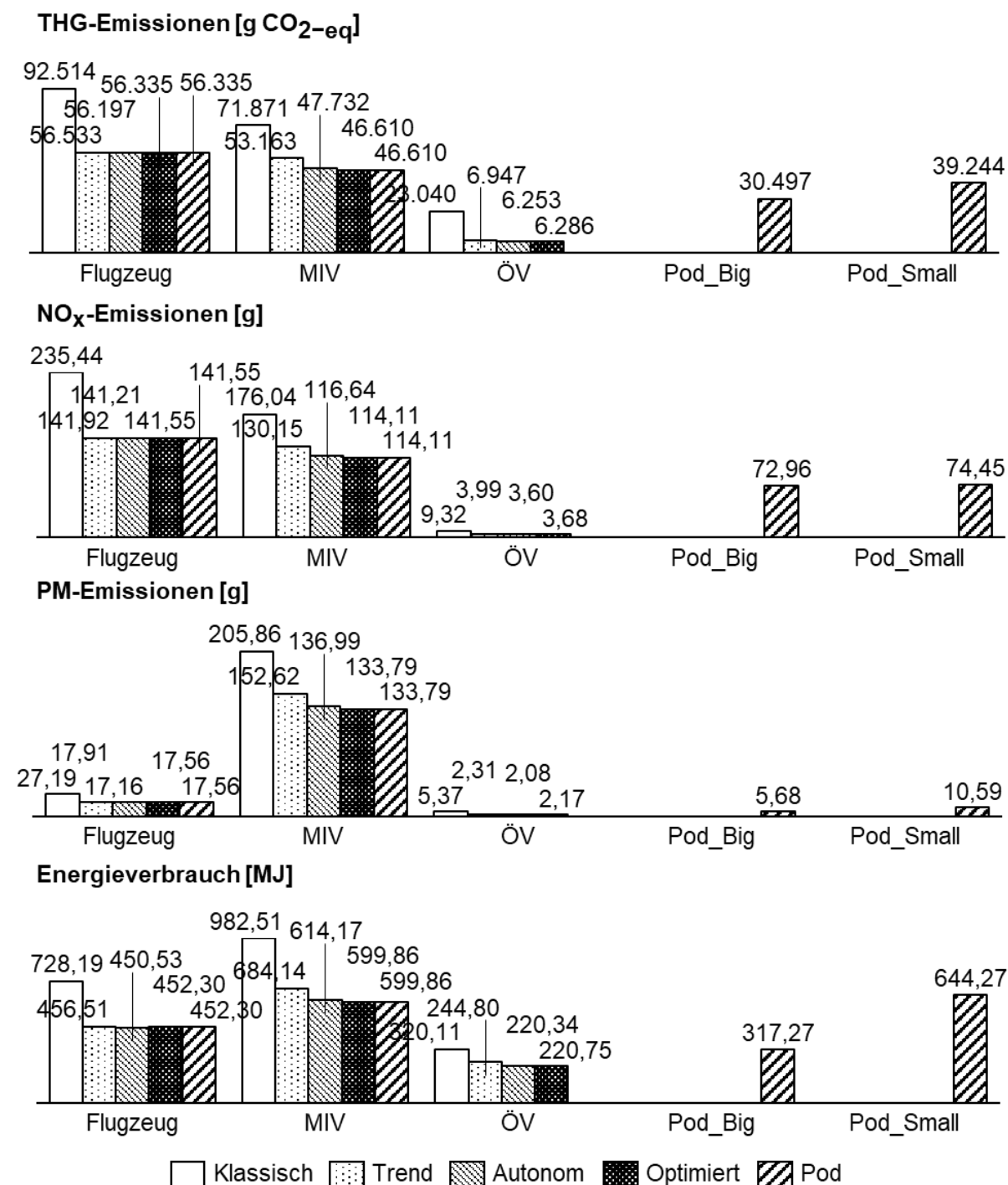


Abbildung A-6 - Entwicklung der ökologischen Dimension (L)

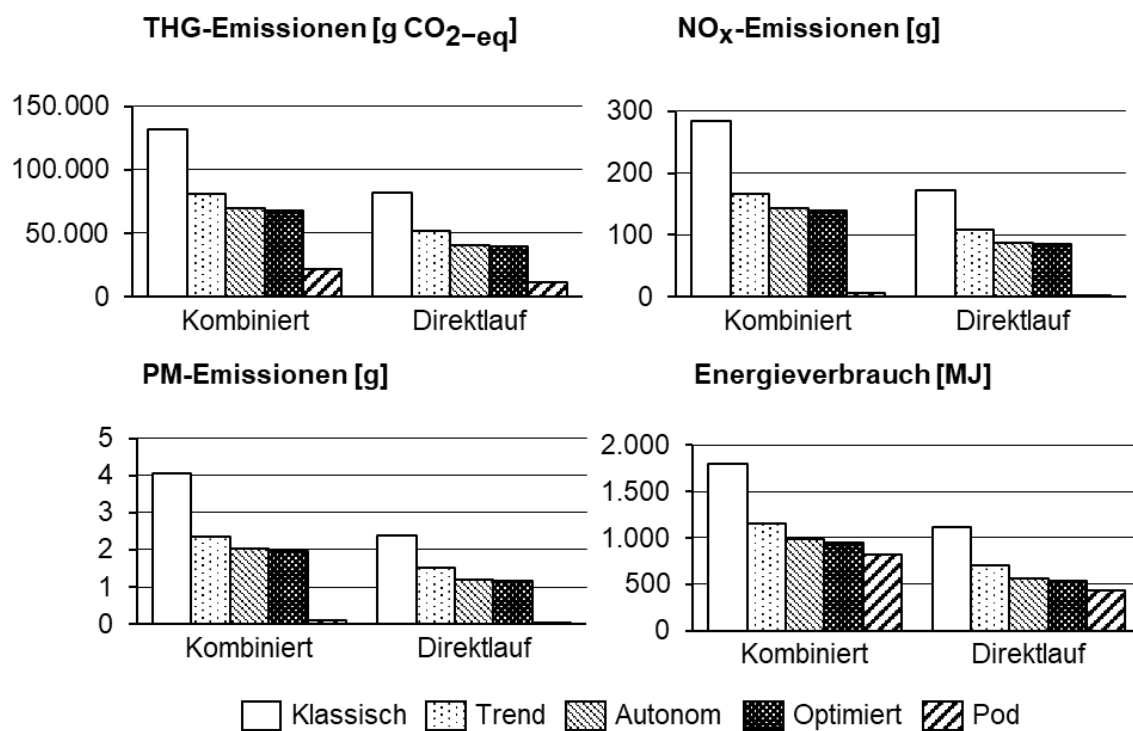


Abbildung A-7 - Entwicklung der ökologischen Dimension Güterfernverkehr

VII Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet habe.

I hereby declare, that I have written this thesis on my own and have not used any other but the mentioned tools.

Aachen, 12. September 2019

Unterschrift des Verfassers