

## Bachelorarbeit

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

Matr.-Nr.: 354231

Thema: Entwicklung eines Modells zur ganzheitlichen Bewertung eines multimodalen Verkehrskonzepts

Betreuer 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

|            |  |     |
|------------|--|-----|
| <b>I</b>   | <b>Inhaltsverzeichnis.....</b>   | i   |
| <b>II</b>  | <b>Formelzeichen und Abkürzungen.....</b>                                | iii |
| <b>III</b> | <b>Abbildungsverzeichnis.....</b>  | vi  |
| <b>IV</b>  | <b>Tabellenverzeichnis.....</b>  | ix  |
| <b>1</b>   | <b>Einführung .....</b>  | 1   |
| 1.1        | Motivation.....  | 1   |
| 1.2        | Zielsetzung.....   | 2   |
| 1.3        | Vorgehensweise.....  | 3   |
| <b>2</b>   | <b>Grundlagen .....</b>  | 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  |
| <b>3</b>   | <b>Analyse bestehender Ansätze .....</b>                                 | 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  |
| <b>4</b>   | <b>Konzeption eines Bewertungsmodells .....</b>                          | 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  |
| <b>5</b>   | <b>Detaillierung des Modells.....</b>                                    | 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         |
| <b>6</b>   | <b>Beschreibung der Szenarien zur Entwicklung der multimodalen Mobilität.....</b> | <b>64</b>  |
| 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        |
| <b>7</b>   | <b>Ergebnisse .....</b>   | <b>115</b> |
| 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        |
| <b>8</b>   | <b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>  | <b>127</b> |
| <b>V</b>   | <b>Literaturverzeichnis.....</b>  | <b>129</b> |
| <b>VI</b>  | <b>Anhang .....</b>   | <b>147</b> |
| <b>VII</b> | <b>Eidesstattliche Erklärung.....</b>   | <b>162</b> |

## 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 <sub>x</sub> -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 |

| <b>Abkürzung</b> | <b>Beschreibung</b>                                       |
|------------------|---|
| 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 Individualverkehr<sup>1</sup>. Im Gegensatz zum allgemeinen Sprachgebrauch gehört zum Individualverkehr neben dem Auto, das Fahrrad und zu Fuß zurückgelegte Strecken<sup>2</sup>. 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%)<sup>3</sup>, ergibt sich ein erhöhtes Verkehrsaufkommen. Dieses führte im Jahr 2018 zur höchsten gemeldeten Anzahl an Staus überhaupt<sup>4</sup>.

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<sub>2</sub>-eq/Pkm nach dem Flugzeug die höchsten Treibhausgasemissionen aus<sup>5</sup>. 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 anderseits in den zu teuren Ticketpreisen des ÖPNV und einer zu langen Fahrtzeit 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.<sup>6</sup>

Im Güterverkehr hat sich der Anteil der Zustellungen auf der letzten Meile durch den E-Commerce deutlich erhöht<sup>7</sup>. Dies führt gerade in dicht besiedelten Regionen zu mehr Feinstaubemissionen und einem erhöhten Verkehrsaufkommen<sup>8</sup>. 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.<sup>9</sup> Ein

---

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

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

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

<sup>4</sup> Vgl. Matthias Janson (2019) So viel Stau.

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

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

<sup>7</sup> Vgl. Zanker (2018) Branchenanalyse Logistik, S. 26.

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

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

intermodales<sup>10</sup> Verkehrssystem könnte den CO<sub>2</sub> Ausstoß im Vergleich zu einem unimodalen Transportsystem um ca. 57% reduzieren<sup>11</sup>.

Um eine Verschiebung des Modal Splits im Personenverkehr hin zu mehr öffentlichen Verkehrsmittel und aktiveren Fortbewegungsmitteln zu erreichen, müssen daher die Umstieghemmisse 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 Umstiegvorgänge 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 Fahrzeiten. 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 [...]“<sup>12</sup> erreicht werden. Im Kontext dieser Arbeit soll die Bewertung daher in den Kategorien Ökonomie, Ökologie und

---

<sup>10</sup> Vgl. Kapitel 2.1 zur Unterscheidung zwischen einem inter- und unimodalen Verkehrssystem.

<sup>11</sup> Vgl. Craig et al. (2013) Estimating the CO<sub>2</sub> intensity, S. 49–53.

<sup>12</sup> 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 Teilespekte 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“<sup>13</sup>

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.<sup>14</sup> Im Rahmen dieser Arbeit wird das zugrunde liegende Problem mit dem Begriff Kategorie beschrieben. Mehrere Kategorien zusammen bilden eine Bewertungsdimension ab.

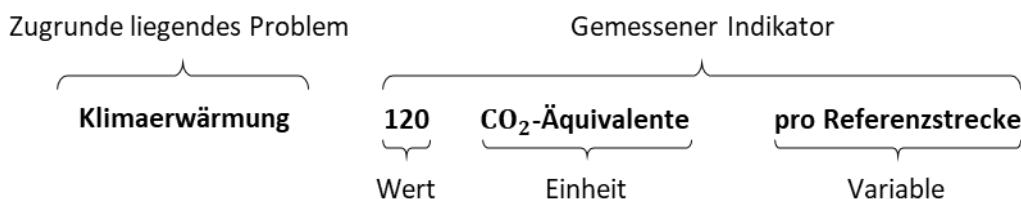


Abbildung 2-1 - Aufbau eines Indikators<sup>15</sup>

### 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 Themen 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.<sup>16</sup> Durch die

<sup>13</sup> Vgl. Gudmundsson (2016) Sustainable transportation, S. 140.

<sup>14</sup> Vgl. Gudmundsson (2016) Sustainable transportation, S. 139–141.

<sup>15</sup> in Anlehnung an Gudmundsson (2016) Sustainable transportation, S. 139.

<sup>16</sup> 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.“<sup>17</sup>

**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.<sup>18</sup> 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.<sup>19</sup> 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 festgelegt<sup>20</sup>.

Eine Teilmenge der multimodalen Mobilität stellt die intermodale Mobilität da. Eine Person ist intermodal, wenn sie innerhalb eines Weges das Verkehrsmittel wechselt.<sup>21</sup> Der klassische Fall der intermodalen Fortbewegung ist dabei die Kombination von Fernverkehr mit öffentlichen Verkehrsmitteln<sup>22</sup>. 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.<sup>23</sup>

---

<sup>17</sup> Vgl. Steierwald et al. (2005) Stadtverkehrsplanung, S. 4.

<sup>18</sup> Vgl. Dudenredaktion (o. J.) (2019) Definition Verkehr.

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

<sup>20</sup> Vgl. Viergutz et al. (2018) Inter, Multi, Mono: Modalität im Personenverkehr, S. 5.

<sup>21</sup> Vgl. Viergutz et al. (2018) Inter, Multi, Mono: Modalität im Personenverkehr, S. 5.

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

<sup>23</sup> 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.<sup>24</sup>

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:<sup>25</sup>

- 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 zugewiesen. 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.<sup>26</sup>

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

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

<sup>26</sup> 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.“<sup>27</sup>

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).“<sup>28</sup>

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.<sup>29</sup>

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.<sup>30</sup> 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.

---

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

<sup>28</sup> Vgl. Todd Litman (2003) Measuring Transportation, S. 31.

<sup>29</sup> Vgl. Todd Litman (2003) Measuring Transportation, S. 32.

<sup>30</sup> 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:<sup>31</sup>

- **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.<sup>32</sup>

**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 muss<sup>33</sup>. 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.<sup>34</sup> Die Einheit TEU beschreibt den Durchsatz an Container pro Verkehrsmittel normiert auf einen 20-Fuß-Container an.<sup>35</sup>

---

<sup>31</sup> Vgl. Pfohl (2010) Grundlagen der betriebswirtschaftlichen Logistik, S. 6.

<sup>32</sup> Vgl. Gudehus (2012) Logistik 1, S. 126.

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

<sup>34</sup> Vgl. Krieger (2018) Definition: Tonnenkilometer.

<sup>35</sup> Vgl. Krieger (2018) Definition: TEU.

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

- 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.<sup>37</sup>

## 2.2 Grundlagen zur Erstellung von Ökobilanzen<sup>38</sup>

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.<sup>39</sup>

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.

---

<sup>36</sup> 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.

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

<sup>38</sup> Vgl. Deutsche Norm (2006) 14040

<sup>39</sup> 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.<sup>40</sup> In diesen Normen werden Ökobilanzen definiert als:

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

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.<sup>42</sup>

- **Umweltbezogene Ausrichtung**

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

- **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.

---

<sup>40</sup> Vgl. Deutsche Norm (2006) 14040.

<sup>41</sup> Vgl. Deutsche Norm (2006) 14040, S. 4.

<sup>42</sup> Vgl. Schuh et al. (2014) Product Lifecycle Management.

<sup>43</sup> Vgl. Deutsche Norm (2006) 14040, S. 14.

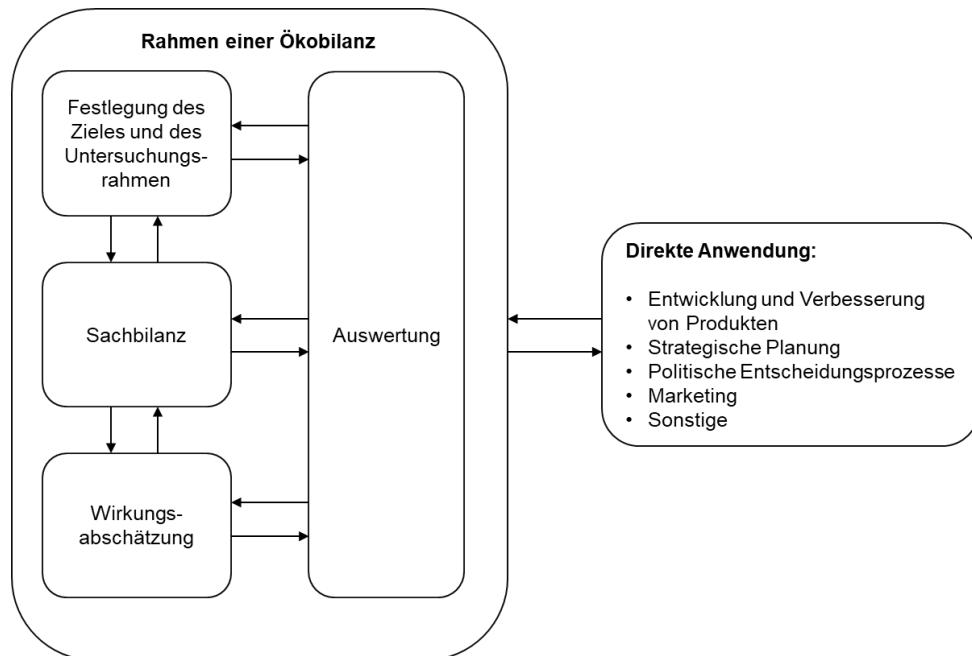


Abbildung 2-3 - Phasen einer Ökobilanz<sup>44</sup>

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 gewonnenen 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.<sup>45</sup>

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.:  $\text{CH}_4$ ) werden Wirkungsfaktoren verwendet. Von der Vorgehensweise ähneln sich Carbon Footprint und

<sup>44</sup> eigene Darstellung nach Deutsche Norm (2006) 14040, S. 20.

<sup>45</sup> 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 CO<sub>2</sub>-eq.<sup>46</sup>

Daneben hat die Kennzahl „kumulierter Energieaufwand (KEA)“ Bedeutung. Bei diesem wird der Verbrauch fossiler Rohstoffe, welche über den Lebenszyklus eines 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.<sup>47</sup>

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<sub>2</sub>-Äquivalent.<sup>48</sup>

## 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.<sup>49</sup> 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.<sup>50</sup> Die Makroökonomie beschäftigt sich im Gegensatz dazu mit einer gesamtwirtschaftlichen Betrachtung des Verhaltens von verschiedenen, gebündelten Wirtschaftseinheiten sowie deren Wechselwirkungen.<sup>51</sup>

---

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

<sup>47</sup> Vgl. Herrmann (2010) Lebensphasenübergreifende Disziplinen, S. 156.

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

<sup>49</sup> Vgl. Rittenbruch (2014) Makroökonomie, S. 3.

<sup>50</sup> Vgl. Jochen Schumann (1992) Grundzüge Makroökonomie, S. 1–2.

<sup>51</sup> 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 betrachtet<sup>52</sup>. Ökonomische Nachhaltigkeit beschreibt die langfristigen Folgen von Veränderungen. Zur Analyse dieser Auswirkungen gibt es eine Vielzahl von Indikatorensets<sup>53</sup>. Die Einflüsse von Mobilität auf diese Indikatorensets darzustellen, scheitert allerdings an den Dependenzen der Merkmale untereinander. LAKSHAMANAN stellt in seinem Bericht eine Möglichkeit dar, diese Dependenzen sichtbar zu machen.<sup>54</sup>

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.<sup>55</sup>

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.<sup>56</sup>

---

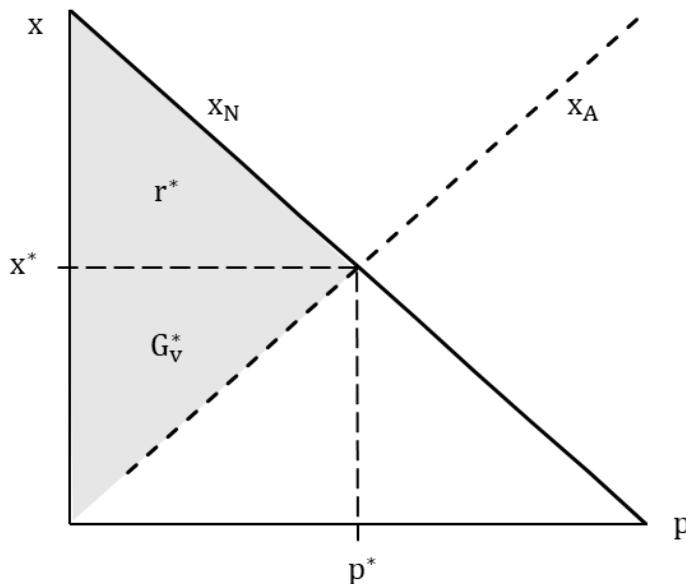
<sup>52</sup> Vgl. Doll et al. (2013) Wirtschaftliche Aspekte nichttechnischer Massnahmen zur Emissionsminderung im Verkehr, S. 44.

<sup>53</sup> Vgl. Bardt (2011) Indikatoren ökonomischer Nachhaltigkeit, S. 16.

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

<sup>55</sup> Vgl. Woeckener (2013) Volkswirtschaftslehre, S. 21–77.

<sup>56</sup> Vgl. Woeckener (2013) Volkswirtschaftslehre, S. 81–83.



**Abbildung 2-4 - Marktgleichgewicht<sup>57</sup>**

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.<sup>58</sup>

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  $x$

<sup>57</sup> Eigene Darstellung nach Woeckener (2013) Volkswirtschaftslehre, S. 97.

<sup>58</sup> 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.<sup>59</sup>

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:<sup>60</sup>

---

<sup>59</sup> Vgl. Stock et al. (2014) Verkehrsökonomie, S. 66–73.

<sup>60</sup> 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:<sup>61</sup>

- 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.<sup>62</sup>

---

<sup>61</sup> Vgl. Stock et al. (2014) Verkehrsökonomie, S. 79–81.

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

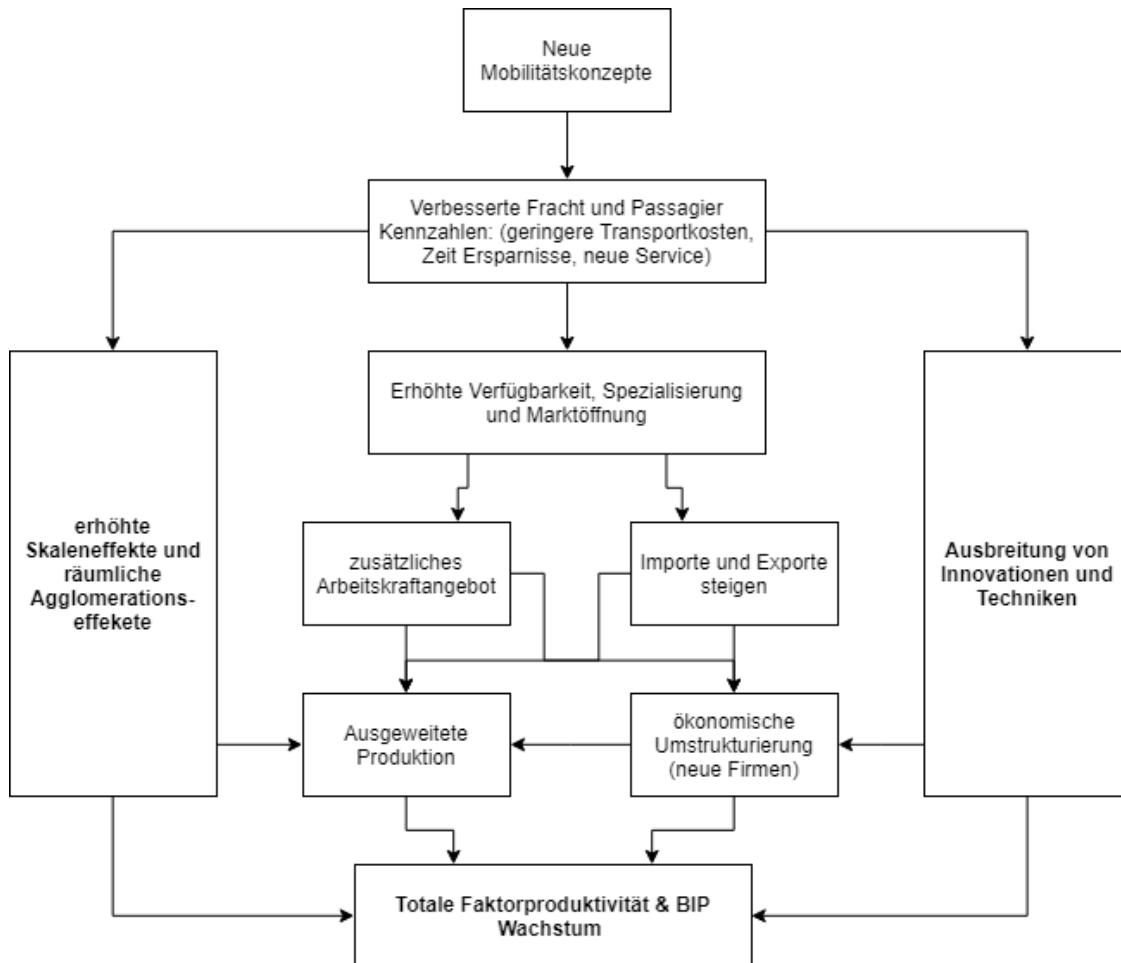


Abbildung 2-5 - The wider Benefits of transportation<sup>63</sup>

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

<sup>63</sup> 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.<sup>64</sup>

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.<sup>65</sup> Die Opportunitätskosten entsprechen gem. Definition den Kosten der entgangenen Gelegenheit.<sup>66</sup> 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.<sup>67</sup>

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.<sup>68</sup>

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.<sup>69</sup> 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.<sup>70</sup>

## 2.4 Einführung in die Szenarioanalyse

Im Rahmen dieser Arbeit soll das Szenario eines multimodalen 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.<sup>71</sup> Im Rahmen dieser Arbeit wird folgende Definition des Begriffs Szenarios verwandt:

---

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

<sup>65</sup> Vgl. Stock et al. (2014) Verkehrsökonomie, S. 66.

<sup>66</sup> Vgl. Woeckener (2013) Volkswirtschaftslehre, S. 86.

<sup>67</sup> Vgl. Stock et al. (2014) Verkehrsökonomie, S. 114–118.

<sup>68</sup> Vgl. Stock et al. (2014) Verkehrsökonomie, S. 115.

<sup>69</sup> Vgl. Wardman (2004) Public transport values, S. 363–369.

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

<sup>71</sup> Vgl. Steinmüller (1997) Grundlagen Zukunftsorschung, 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.“<sup>72</sup>*

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:<sup>73</sup>

- **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.<sup>74</sup>

**Tabelle 2-1 - Unterscheidung Prognose und Szenario<sup>75</sup>**

|  | <b>Prognosebegriff</b>                          | <b>Szenariobegriff</b>     |
|--|---|----------------------------|
| <b>Multiplizität</b>                       | Simple  | Erhöhte Freiheitsgrade     |
| <b>Berücksichtigung von Unsicherheiten</b> | Explorativ                                      | Explorativ und normativ    |
| <b>Methoden</b>                            | Trendextrapolation, Befragungen, Delphi-Studien | Mehrere Szenario-Techniken |
| <b>Endscheidungsaspekte</b>                | Deterministisch                                 | Verschieden Szenarien      |

<sup>72</sup> Vgl. Ute von Reibnitz (1992) Szenario-Technik, S. 14.

<sup>73</sup> Vgl. Wilson (1978) Scenarios, S. 224.

<sup>74</sup> Vgl. Klaus Wübbenhörst, Gustav A. Horn, Udo Kamps (2018) Prognose.

<sup>75</sup> 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.<sup>76</sup>

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.<sup>77</sup>

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.<sup>78</sup>

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.<sup>79</sup>

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

---

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

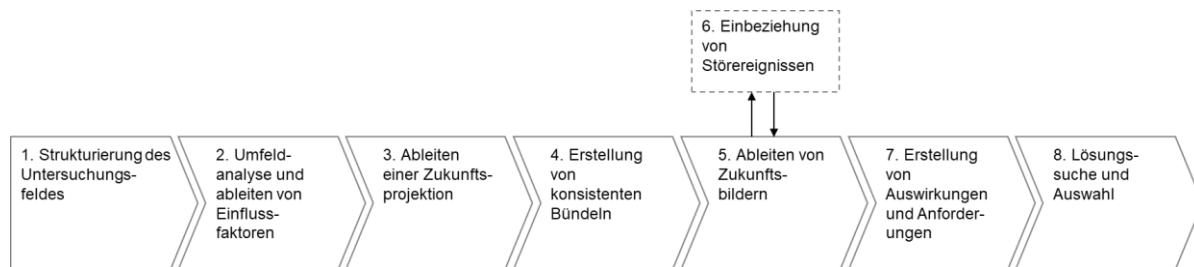
<sup>77</sup> Vgl. Mißler-Behr (1993) Methoden der Szenarioanalyse, S. 9.

<sup>78</sup> Vgl. Mißler-Behr (1993) Methoden der Szenarioanalyse, S. 9.

<sup>79</sup> Vgl. Mißler-Behr (1993) Methoden der Szenarioanalyse, S. 9.

<sup>80</sup> 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 achtgliedrigen 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.<sup>81</sup>



**Abbildung 2-6 - Vorgehensweise Szenarioanalyse<sup>82</sup>**

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 Untersuchungsrahmen 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.<sup>83</sup>

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.<sup>84</sup>

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

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

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

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

Aus den in Schritt 3 gewonnenen 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.<sup>85</sup>

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 beschäftigten, welche im Rahmen dieser Arbeit eine untergeordnete Rolle spielen.

---

<sup>85</sup> 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 Vorteile 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“<sup>86</sup> 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:

---

<sup>86</sup> 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-Modell<sup>87</sup>

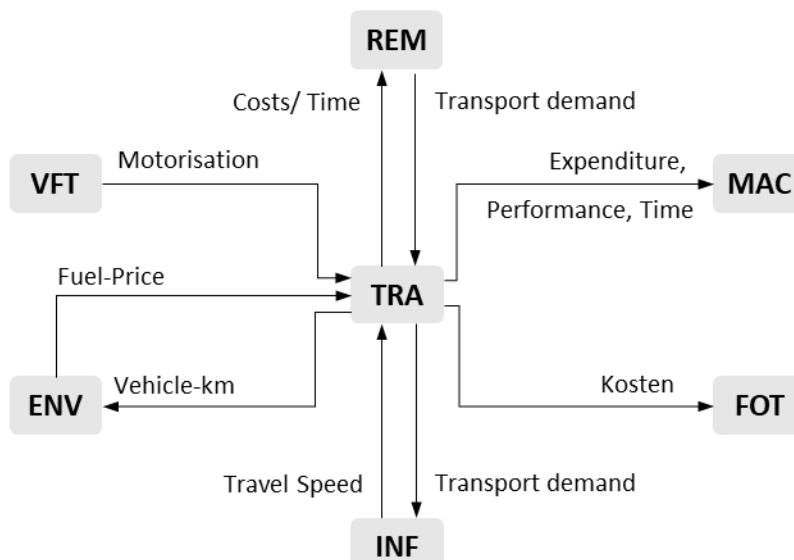
Tabelle 3-1 - Übersicht ASTRA-Modell

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

<sup>87</sup> 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 gehen<sup>88</sup>. Das Modell basiert dabei auf dem „System Dynamics“-Ansatz. System Dynamics wurde in den 1950er-Jahren von Jay W. Forrester entwickelt und ist eine Methodik um dynamisch-komplexe Sachverhalte zu modellieren, zu analysieren und zu simulieren.<sup>89</sup>

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 eingesetzt<sup>90</sup>. Im Rahmen des Projektes RENEWBILITY 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.



#### Legende

|      |                |      |                    |
|------|----------------|------|--------------------|
| VFT: | Vehicle Fleet  | MAC: | Macroeconomics     |
| ENV: | Environment    | REM: | Regional Economics |
| INF: | Infrastructure | TRA: | Transport          |
| FOT: | Foreign Trade  |      |                    |

Abbildung 3-1 - Aufbau des ASTRA Modells<sup>91</sup>

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

<sup>89</sup> Vgl. Coyle (2000) Qualitative and quantitative modelling, S. 226.

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

<sup>91</sup> 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:<sup>92</sup>

- **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.<sup>93</sup>

- **Regional-ökonomisches Modul**

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

- **Fahrzeugfлотten Modul**

Neben der Kapazität des Transportnetzwerks wird im Fahrzeugfлотten 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.

---

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

<sup>93</sup> 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.<sup>94</sup>

Das ASTRA-EC Modell wurde bereits im Rahmen von mehreren EU-Projekten eingesetzt, um die Auswirkungen verkehrspolitischer Szenarien zu analysieren<sup>95</sup>. 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 sind<sup>96</sup>. Schwachstellen hat das ASTRA-EC Modell in der Bewertung der ökologischen Auswirkungen der Maßnahmen.

### **Renewbility I-III (2006-2016)<sup>97</sup>**

**Tabelle 3-2 - Übersicht Renewbility I-III**

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

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

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

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

<sup>97</sup> 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 Verkehrsaukommen 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 Verkehrs nachfrage 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<br>5% Biokraftstoffe | 95% Ptx<br>5% Biokraftstoffe  | 95% Ptx<br>5% Biokraftstoffe |
| Kraftstoffpreise          | Niedrige Kraftstoffpreise | Hohe Kraftstoffpreise        | Hohe Kraftstoffpreise         | Hohe Kraftstoffpreise        |
| PKW-Grenzwert             | 95 g                      | 60g (2030)<br>10g (2050)     | 60g (2030)<br>10g (2050)      | 60g (2030)<br>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 III<sup>98</sup>

<sup>98</sup> 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 Politiksszenarien.

### **Wirtschaftliche Aspekte nicht-technischer Maßnahmen zur Emissionsminderung im Verkehr - WANTM<sup>99</sup>**

**Tabelle 3-3 - Übersicht WANTM**

|                                     |  |
|-------------------------------------|--|
| <b>Institut/ Unternehmen/ Autor</b> | Auftraggeber: <u>Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit</u><br><br>Durchführung: <u>Frauenhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI</u> |
| <b>Erscheinungsdatum</b>            | 2013   |
| <b>Zielsetzung</b>                  | Ziel der Studie ist es die Auswirkungen von verschiedenen nicht-technischen Maßnahmen zur Emissionsminderung im Straßenverkehr zu messen.                                      |
| <b>Studie oder Modell?</b>          | Studie   |
| <b>Auswahlgrund</b>                 | 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 Renewability 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-Szenario<sup>100</sup> bewertet. Umgesetzt werden die verschiedenen Maßnahmen über Wirkungsmechanismen wie Infrastrukturmaßnahmen oder preisliche Anreize. Die Szenarien lauten:<sup>101</sup>

- 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.

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

<sup>100</sup> Ein BAU-Szenario (Business-as-usual Szenario) schreibt die aktuellen Entwicklungstrends linear fort. Dadurch entsteht ein Vergleichsszenario für den Endzustand.

<sup>101</sup> 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 CO<sub>2</sub>-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.<sup>102</sup>

### **EFFECT – evaluation framework of environmental impacts and costs of transport initiatives<sup>103</sup>**

Tabelle 3-4 - Übersicht EFFECT

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

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

<sup>103</sup> 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 - ÖÖPMKM<sup>104</sup>**

Tabelle 3-5 - Übersicht ÖÖPMKM

|   |  |
|---|--|
| <b>Institut/ Unternehmen/<br/>Autor</b> | Auftraggeber: <u>Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit</u><br><br>Durchführung: <u>Innovationszentrum für Mobilität und gesellschaftlichen Wandel; Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Verkehrswesen</u> |
| <b>Erscheinungsdatum</b>                | 2019   |
| <b>Zielsetzung</b>                      | Ziel der Studie ist es Wege aufzuzeigen, um den Verkehr in bestimmten Regionen zu verlagern und effizienter zu gestalten.  |
| <b>Studie oder Modell?</b>              | Studie   |
| <b>Auswahlgrund</b>                     | 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 CO<sub>2</sub>-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

<sup>104</sup> 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 Fahrtdauer) an sich und die volkswirtschaftliche Entwicklung (z.B.: Investitionskosten).

#### **Framework for evaluating sustainability of transport system in megalopolis and it's Application - FFESM<sup>105</sup>**

**Tabelle 3-6 - Übersicht FFESM**

|   |  |
|---|--|
| <b>Institut/ Unternehmen/<br/>Autor</b> | Autor: Liling Wang, <u>School of Traffic and Transportation, Beijing University</u>  |
| <b>Erscheinungsdatum</b>                | 2014   |
| <b>Zielsetzung</b>                      | Ziel des Modells ist es eine nachhaltige Bewertung des Verkehrssektors innerhalb von Groß- bzw. Megastädten zu ermöglichen.  |
| <b>Studie oder Modell?</b>              | Modell   |
| <b>Auswahlgrund</b>                     | 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.

<sup>105</sup> 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 WANG<sup>106</sup>

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

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

<sup>106</sup> Vgl. Wang (2014) Framework for Evaluating, S. 113.

### ADL – Urban mobility index<sup>107</sup>

Tabelle 3-8 - Übersicht ADL-Urban mobility index

|   |   |
|---|---|
| <b>Institut/ Unternehmen/<br/>Autor</b> | Durchgeführt: <u>Arthur D. Little, UTIP</u>   |
| <b>Erscheinungsdatum</b>                | 2018  |
| <b>Zielsetzung</b>                      | Bewertung der Mobilität in Städten mit Spezialisierung auf die Innovationen im Bereich der Mobilität.                                       |
| <b>Studie oder Modell?</b>              | Studie  |
| <b>Auswahlgrund</b>                     | Unterteilung der Bewertung entlang der verschiedenen Stadttypologien. 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 Flächennutzung 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.

<sup>107</sup> 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

#### Ökoeffizienzbewertung<sup>108</sup>

Tabelle 3-9 - Übersicht Ökoeffizienzbewertung

|   |   |
|---|---|
| <b>Institut/ Unternehmen/<br/>Autor</b> | Normiert durch: <u>Deutsches Institut für Normung</u>   |
| <b>Erscheinungsdatum</b>                | 2012  |
| <b>Zielsetzung</b>                      | Produkte und Prozesse an der Schnittstelle zwischen ökologischer Nachhaltigkeit und ökonomischen Interessen zu bewerten.                    |
| <b>Studie oder Modell?</b>              | Modell  |
| <b>Auswahlgrund</b>                     | Unterteilung der Bewertung entlang der verschiedenen Stadttypologien. 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

<sup>108</sup> 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.

### **SEEBALANCE<sup>109</sup>**

**Tabelle 3-10 - Übersicht SEEBALANCE**

|                                     |   |
|-------------------------------------|---|
| <b>Institut/ Unternehmen/ Autor</b> | Entwickelt von <u>BASF</u>  |
| <b>Erscheinungsdatum</b>            | 2005  |
| <b>Zielsetzung</b>                  | Die Entwicklungen in Prozessen und Produkten auf der Ebene der Nachhaltigkeit messbar machen.               |
| <b>Studie oder Modell?</b>          | Modell  |
| <b>Auswahlgrund</b>                 | 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.

---

<sup>109</sup> 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 - FFE<sup>110</sup>**

Tabelle 3-11 - Übersicht FFE

|                                     |   |
|-------------------------------------|---|
| <b>Institut/ Unternehmen/ Autor</b> | Autor: Danny Kreyenberg   |
| <b>Erscheinungsdatum</b>            | 2016  |
| <b>Zielsetzung</b>                  | Analyse der wirtschaftlichen und technischen Sinnhaftigkeit von Elektromobilität. |
| <b>Studie oder Modell?</b>          | Studie  |
| <b>Auswahlgrund</b>                 | 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 (CO<sub>2</sub>-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

<sup>110</sup> Vgl. Kreyenberg (2016) Fahrzeugantriebe Elektromobilität.

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

Aus der Aggregierung 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.

---

<sup>111</sup> 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                             |              |       |        |        |       |       |         |                       |            |     |
| Endscheidungshilfe 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 Detailierungsebene 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 hohe 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.

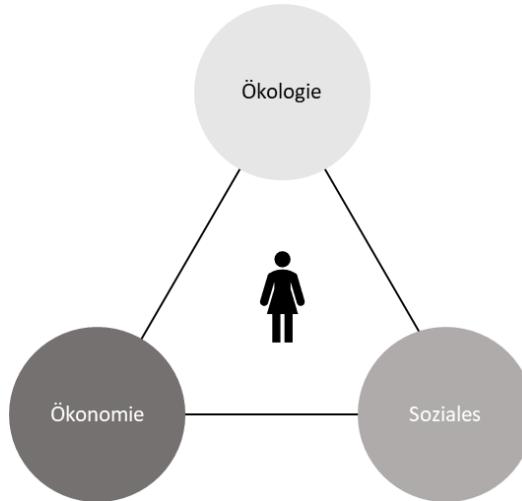
### 4.2 Entwicklung der Bewertungsdimensionen

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 etabliert<sup>112</sup>. Dieses umfasst die drei Säulen Ökonomie, Ökologie

---

<sup>112</sup> 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 Integrierung 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.<sup>113</sup> Die Interessen aus den drei Säulen sollen dabei gleichberechtigt und gleichwertig zu einander stehen<sup>114</sup>. Verknüpft man Ziele des Nachhaltigkeitskonzepts mit den Zielen von „THE PEP“ ergeben sich die Zieldimensionen für die vorliegenden Arbeit.

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

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.

<sup>113</sup> Vgl. Arseni et al. (2018) Making the Link, S. 1.

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

<sup>115</sup> 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 anderseits in der Erhöhung der Gesundheit und Sicherheit (Ziel 4). Während die ökologische Dimension ihr Abbild in Ziel 3 findet.<sup>116</sup>

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 verantwortlich<sup>117</sup>. 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.

---

<sup>116</sup> Vgl. Arseni et al. (2018) Making the Link, S. 11.

<sup>117</sup> 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 Warenkorbs, 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 ermitteln.<sup>118</sup>

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 Verkehrsutzer erfassen.<sup>119</sup>

### 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.

---

<sup>118</sup> Vgl. Woeckener (2013) Volkswirtschaftslehre, S. 169.

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

Tabelle 4-1 - Durchschnittliche Weglänge in Deutschland<sup>120</sup>

| 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-Langstrecke“, 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:

<sup>120</sup> 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.

- **Bikesharing<sup>121</sup>**

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 beobachten<sup>122</sup>. 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 Bevölkerungsanzahl<sup>123</sup>**

| 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                |

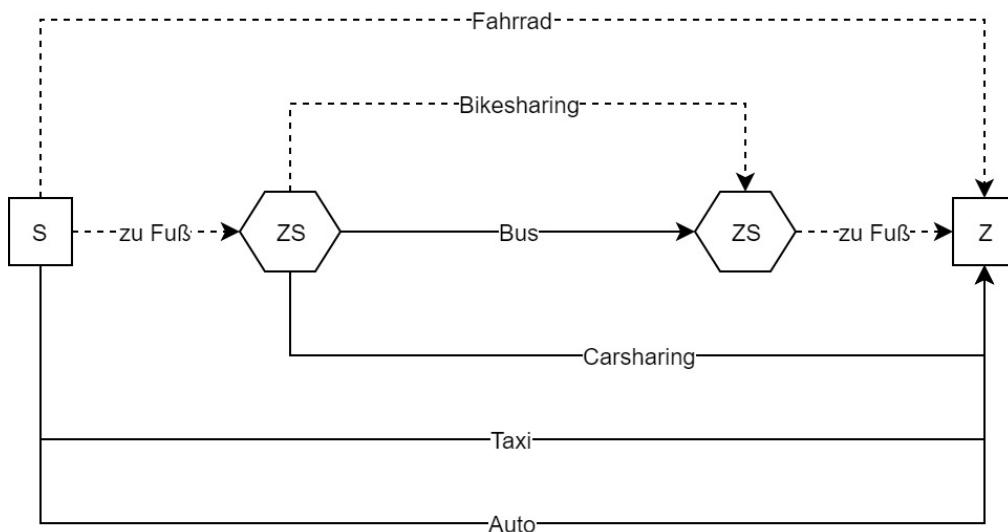
Die Szenarien werden für den heutigen Stand der multimodalen Mobilität aufgestellt und im weiteren Verlauf an die Ausbaustufen angepasst. Wegstrecken, die vollständig emissionsfrei zurückgelegt werden, werden in den Grafiken gestrichelt dargestellt. Außerdem sind Zwischenstationen (ZS) nicht automatisch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

<sup>121</sup> Vgl. Timo Stukenberg Leihfahrräder in deutschen Städten.

<sup>122</sup> Vgl. Mager (2017) Mobilitätslösungen für den ländlichen Raum, S. 217.

<sup>123</sup> 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 Umsteigezügen 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.<sup>124</sup>

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. **Verteilfahrten** sind das Gegenteil der Sammelfahrt. Waren von einem Lieferanten werden auf einer Fahrt an mehrere Empfänger geliefert. Die Kombination von Sammel- und Verteilfahrten werden **Umschlagsfahrten** genannt. Bei diesen werden sowohl Waren an verschiedenen Empfänger ausgeliefert als auch eingesammelt und zum Ausgangspunkt der Fahrt gebracht.<sup>125</sup>

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 Umschlageplätzen 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.<sup>126</sup>

---

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

<sup>125</sup> Vgl. Gudehus (2012) Logistik 2, S. 948.

<sup>126</sup> 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 Sattelschlepper 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).<sup>127</sup>

GUDENHUS hat für die Transportlogistik fünf Standardstrecken<sup>128</sup> 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 behandelt<sup>129</sup>.

Aus einer Kombination der beiden Standardwerke zur Logistik sind die Referenzstrecken dieser Arbeit für den Güterverkehr abgeleitet worden. Die Referenzstrecken sind in den **Güternahverkehr** (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.

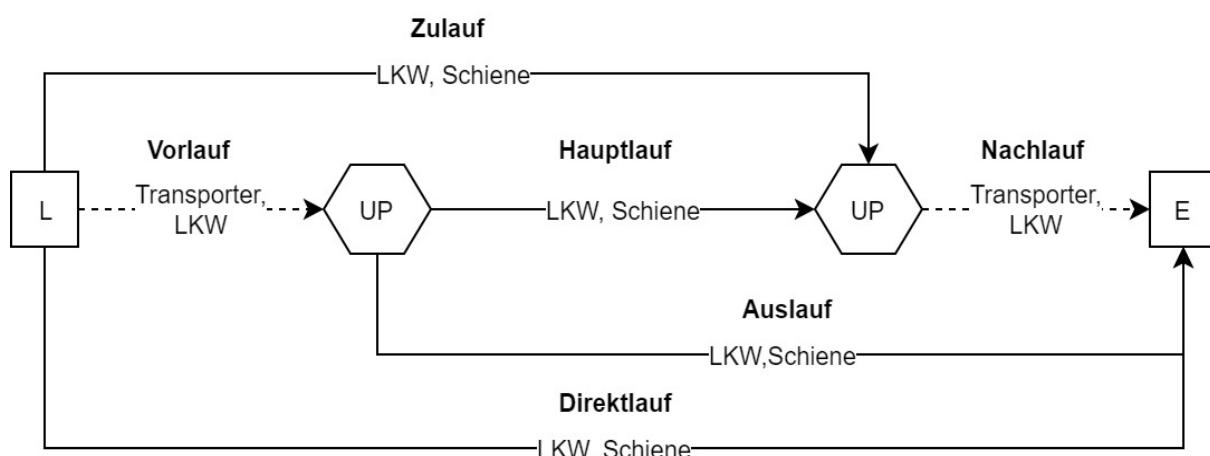
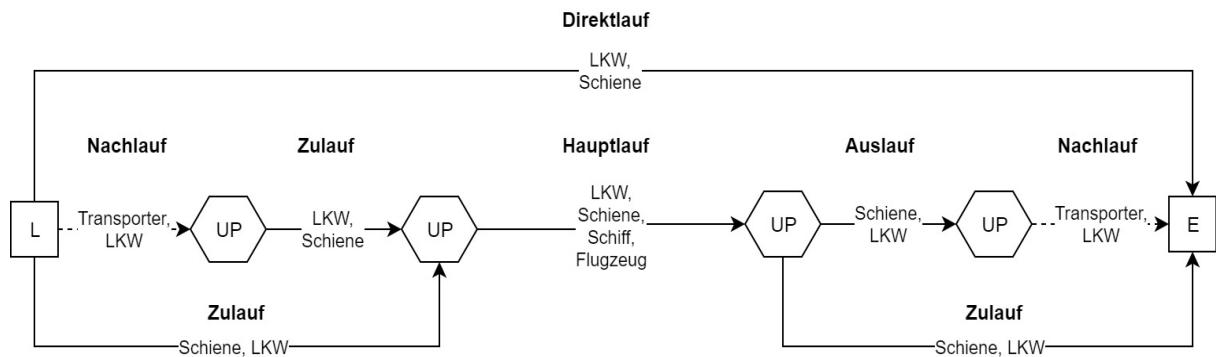


Abbildung 4-3 - Referenzstrecke Güternahverkehr

<sup>127</sup> Vgl. Koether (2012) Distributionslogistik, S. 189–193.

<sup>128</sup> Vgl. Gudehus (2012) Logistik 2, S. 991.

<sup>129</sup> 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.<sup>130</sup>

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?).<sup>131</sup>

**Deskriptive Indikatoren** beschreiben die aktuelle Situation mit Blick auf das zugrunde liegende Problem.<sup>132</sup> **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<sub>2</sub>-Grenzwert pro Personenkilometer).<sup>133</sup>

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

---

<sup>130</sup> Vgl. Gudmundsson (2016) Sustainable transportation, S. 144–145.

<sup>131</sup> Vgl. Smeets et al. (1999) Environmental indicators, S. 8.

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

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

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

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

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.<sup>136</sup> 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-Kriterien<sup>137</sup>**

| 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 be- schafft 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 eingeführt<sup>138</sup>. Das Verkehrsaufkommen wird gemessen mit Hilfe der Verkehrsleitung, 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.

<sup>135</sup> Vgl. Smeets et al. (1999) Environmental indicators, S. 13.

<sup>136</sup> Vgl. Gudmundsson (2016) Sustainable transportation, S. 159.

<sup>137</sup> Vgl. Gudmundsson (2016) Sustainable transportation, S. 160.

<sup>138</sup> 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   |
|------------------------------|---|
| <b>Dimension 1: Ökologie</b> |   |
| Klimaerwärmung               | <i>THG-Emissionen</i><br>Alle Treibhausgasemissionen werden auf ein CO <sub>2</sub> -Äquivalente pro Verkehrsmittel umgerechnet. Die CO <sub>2</sub> -Äquivalent werden mit dem jeweiligen Anteil eines Verkehrsmittels auf einer Referenzstrecke multipliziert |
| Luftverschmutzung (I)        | <i>Feinstaub</i><br>Multiplikation der durchschnittlichen Feinstaub-Emissionen mit dem Anteil des Verkehrsmittels an der Referenzstrecke.   |
| Luftverschmutzung (II)       | <i>NO<sub>x</sub>-Emissionen</i><br>Durchschnittliche NO <sub>x</sub> -Emissionen der Verkehrsmittel multipliziert mit dem jeweiligen Anteil des Verkehrsmittels an der Referenzstrecke.  |
| Energieverbrauch             | <i>Energieverbrauch</i><br>Multiplikation des durchschnittlichen Energieverbrauchs mit dem Anteil des Verkehrsmittels an der Referenzstrecke.   |

Tabelle 5-3 - Die Bewertungsindikatoren (Teil 2)

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

### 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“<sup>139</sup>, und anderen Umfragen<sup>140</sup>. Dabei werden die Kategorien Treibhausgase,

<sup>139</sup> Vgl. Gudmundsson (2016) Sustainable transportation.

<sup>140</sup> Vgl. Haghshenas 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.<sup>141</sup> Die Lärm-Emissionen werden im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet.

### Energie

Energie beschreibt in diesem Zusammenhang die Fähigkeit, mechanische Arbeit zu verrichten.<sup>142</sup> 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 zurückgelegenen Kilometer korreliert.<sup>143</sup> 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 Transportsektor<sup>144</sup>. Zur Minderung des gesamt 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:<sup>145</sup>

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 Zyklus<sup>146</sup> 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 verwendete 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

---

<sup>141</sup> Vgl. Haghshenas et al. (2012) Urban sustainable transportation indicators for global comparison, S. 115–121.

<sup>142</sup> Vgl. Tipler et al. (2015) Energie und Arbeit, S. 168.

<sup>143</sup> Vgl. Tipler et al. (2015) Energie und Arbeit, S. 169.

<sup>144</sup> Vgl. DIW Berlin et al. (2018) Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland.

<sup>145</sup> Vgl. Deutsches Institut für Normung e.V. (2013) 16258.

<sup>146</sup> 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.<sup>147</sup> Im Sinne der DIN EN 16258 sind durch diese Be- trachtung Vergleiche zwischen den Verkehrsmitteln möglich und erlaubt.

Die Werte für die Energieverbräuche können dabei laut DIN EN 16258 aus drei Quellen stam- men. 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 gemes- ner Wert vor
- **Spezifische Werte des Transportdienstleisters** – Für einzelne Verkehrsmitteltypen liegt ein Durchschnittswert vor
- **Flottenwerte des Transportdienstleisters** – Der Energieverbrauch liegt für eine ge- samte Flotte vor.

TREMOD 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.<sup>148</sup> Es stellt eine umfangreiche Datenbasis dar, welche für das Umwelt- bundesamt entwickelt wurde. Die Daten über den spezifischen Energiebedarf liegen bezogen auf Personen- und Tonnenkilometer (Berechnungsbasis: Well-to-Wheel) vor und werden über- nommen.

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.<sup>149</sup> Dem folgt die UN, welche in Ziel 13 der Sustainable Development Goals die Maßnahmen zum Klimaschutz aufgreift<sup>150</sup>.

---

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

<sup>148</sup> Vgl. Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (2016) TREMOD.

<sup>149</sup> Vgl. World Health Organization (2019) Ten threats to.

<sup>150</sup> 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-Protokoll<sup>151</sup> werden CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O und synthetischen Gasen als sog. Treibhausgase definiert<sup>152</sup>. Sie wirken sich in Abhängigkeit von ihren Umweltauswirkungen (Global Warming Potential, GWP) auf das CO<sub>2</sub>-eq aus. Ausschlaggebend für die Gewichtung der Treibhausgase im CO<sub>2</sub>-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.<sup>153</sup> Die Entwicklung der CO<sub>2</sub>-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.

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

Mit: thg<sub>WTW</sub> : spezifische THG-Emissionen je Verkehrsmittel  $\left[ \frac{\text{CO}_2\text{-eq}}{\text{Pkm}} / \frac{\text{CO}_2\text{-eq}}{\text{Tkm}} \right]$ .

Notwendige Werte für die Bewertung sind daher:

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

### **Luftverschmutzung - NO<sub>x</sub>- Emissionen**

Neben der WHO geben, gemäß einer forsa-Umfrage die meisten Deutschen an, dass Luftverschmutzung nach ihrer Wahrnehmung den größten Einfluss auf ihre Gesundheit hat<sup>154</sup>. Unter Luftverschmutzung werden hier sowohl Stickstoffdioxid-Emissionen als auch Feinstaub-Emissionen verstanden.

---

<sup>151</sup> Vgl. UNFCCC (1997) Kyoto Protocol to the United Nations.

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

<sup>153</sup> Vgl. Demirel (2014) Thermoconomics, S. 277.

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

Dabei ist Stickstoff der Grundbaustein des menschlichen Lebens<sup>155</sup>. Der menschliche Körper besteht bei einem Gewicht von 70 Kg aus 2 Kg Stickstoff. Weiterhin besteht die Atmosphäre zu 80% aus Stickstoff.<sup>156</sup> 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.<sup>157</sup> Die Stickstoffdioxide bezeichnen alle Elemente der Gruppe NO<sub>x</sub> und werden meist gemessen.<sup>158</sup>

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.<sup>159</sup> In den Fokus sind dabei die durch den Verkehr emittierten Stickstoffoxide und Grenzwerte gerückt.<sup>160</sup> Gemäß Umweltbundesamt gehört der Straßenverkehr zu den bedeutendsten Stickstoffdioxid Emittenten.<sup>161</sup> 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.

$$NO_x - \text{Emissionen} = \sum_{i=1}^I l_i * no_i \quad (5-3)$$

Mit:      no<sub>i</sub> :      spezifische NO<sub>x</sub>-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<sub>x</sub>-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.<sup>162</sup> Dem folgend stellt die American Heart Association in 2010 fest, dass Personen, welche

<sup>155</sup> Vgl. Ittershausen (2011) Stickstoff - lebensnotwendiger Nährstoff, S. 1.

<sup>156</sup> Vgl. Schütze et al. Stickstoff - Zuviel des Guten?, S. 3.

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

<sup>158</sup> Vgl. Schütze et al. Stickstoff - Zuviel des Guten?, S. 13.

<sup>159</sup> Vgl. Schütze et al. Stickstoff - Zuviel des Guten?, S. 13.

<sup>160</sup> Vgl. Zimmermann (2019) Diskussion um Stickstoffoxid-Grenzwert.

<sup>161</sup> Vgl. Umweltbundesamt (2016) Stickstoffoxide.

<sup>162</sup> Vgl. World Health Organization The World Health Report 2002, S. 69.

mehrere Stunden pro Tag PM < 2,5 µm (Feinstaubpartikel mit einer Größe kleiner als 2,5 µm) ausgesetzt sind, mehrere Monate bis Jahre früher sterben.<sup>163</sup>

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.<sup>164</sup> Zu den Quellen des von Menschen produzierten Feinstaub gehören die Industrie, der Verkehr und Tabakrauch.<sup>165</sup> 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.<sup>166</sup> Die Werte für den Transportsektor bezogen auf einen Personen- oder Tonnenkilometer liegt in TREMOD vor. Diese werden analog zu den NO<sub>x</sub>-Emissionen auf die Referenzstrecke aggregiert.

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

Mit:  $pm_i$ : spezifische Feinstaub-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 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 zusammengefasst<sup>167</sup>. Dies liegt in der Tatsache begründet, dass bspw. Unfallstatistiken für Bahnhöfe und Haltestellen nur

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

<sup>164</sup> Vgl. Anderson et al. (2012) Clearing the air, S. 168.

<sup>165</sup> Vgl. Anderson et al. (2012) Clearing the air, S. 169.

<sup>166</sup> Vgl. Anderson et al. (2012) Clearing the air, S. 168.

<sup>167</sup> Vgl. Buzási et al. (2015) Sustainability Indicators, Vgl. Nicolas et al. (2003) Towards sustainable mobility indicators, Vgl. Shiau 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 spielen<sup>168</sup>. Entsprechend sind auch im Güterverkehr die Transportkosten die wichtigste Entscheidungsgrundlage. Daher werden in vielen Studien die direkten Kosten pro Pkm/Tkm als Bewertungsindikator gewählt.<sup>169</sup>

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

---

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

<sup>169</sup> Vgl. Haghshenas 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.<sup>170</sup> 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.<sup>171</sup> Unterschieden werden die Kategorien Erhaltung/Ersatz, Aus- und Neubau sowie einer Dringlichkeitseinstufung innerhalb der Verkehrsträger<sup>172</sup>. 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.<sup>173</sup>

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

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

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

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

<sup>173</sup> 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.<sup>174</sup> 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.<sup>175</sup> 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.<sup>176</sup> 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)<sup>177</sup>. 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 \$.<sup>178</sup>

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.<sup>179</sup> In den Zukunftsszenarien werden die Werte für den Stau geschätzt. Einflussgrößen für die Reduktion von Stau sind nach GERIKE:<sup>180</sup>

- **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.

---

<sup>174</sup> Vgl. Gerike (2018) Das Phänomen Stau, S. 245.

<sup>175</sup> Vgl. Gerike (2018) Das Phänomen Stau, S. 246–247.

<sup>176</sup> Vgl. Cookson (2018) Inrix Global Traffic Scorecard.

<sup>177</sup> Vgl. Cookson (2018) Inrix Global Traffic Scorecard, S. 36.

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

<sup>179</sup> Vgl. Cookson (2018) Inrix Global Traffic Scorecard, S. 4.

<sup>180</sup> 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 beschrieben Tools handelt es sich um Open Source Anwendungen, welche zur freien Verwendung sind.

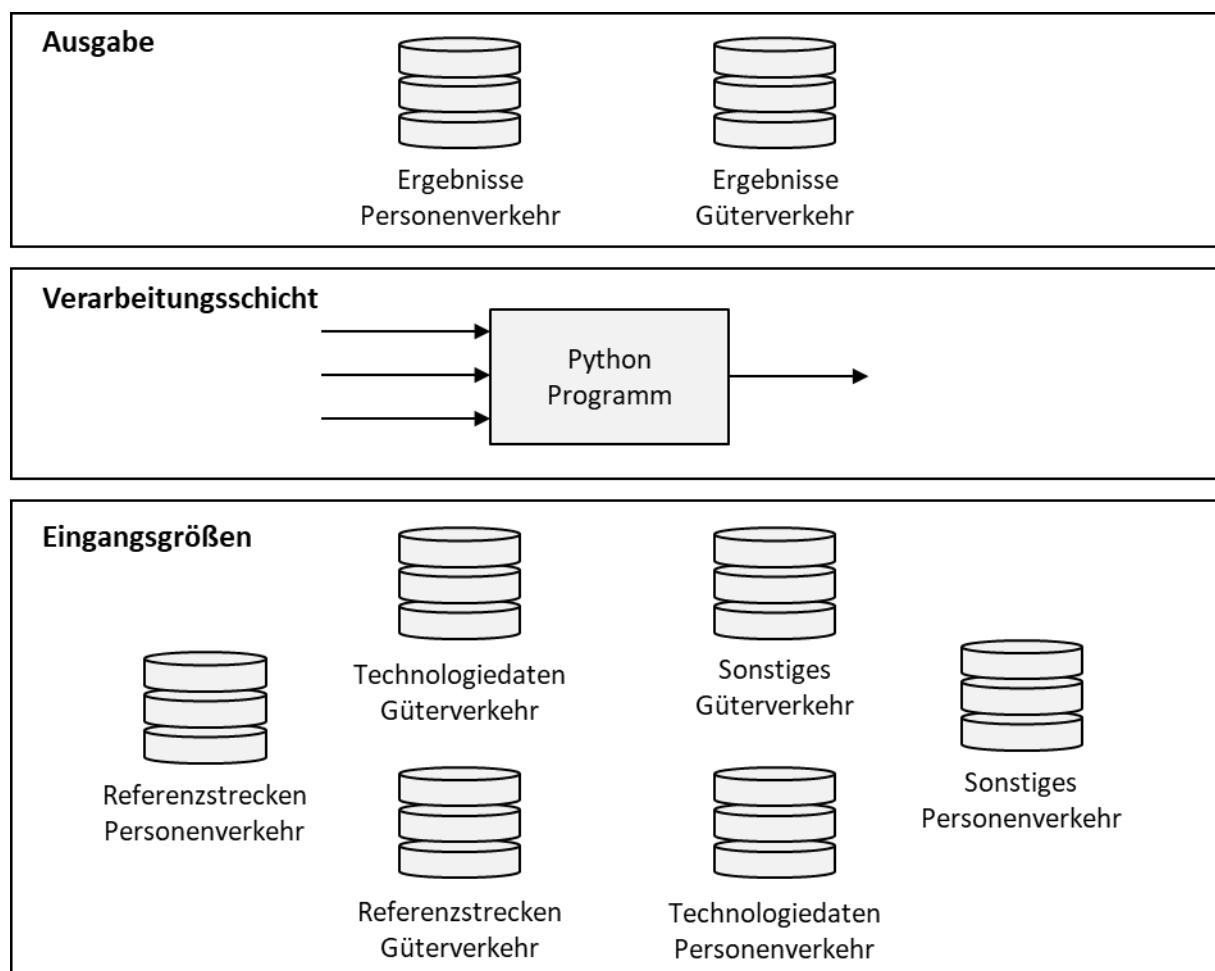


Abbildung 5-1 - Aufbau Bewertungstool

## 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 „unregulierte 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 berücksichtigt<sup>181</sup>.

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 autonomem Fahrzeugen gestaltet. Mobility on Demand (MoD)-Systeme bauen darauf, dass autonome Fahrzeuge in möglichst naher Zukunft zur Verfügung stehen, um rentabel zu werden<sup>182</sup>. 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

---

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

<sup>182</sup> 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 Deutschland<sup>183</sup>. 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.<sup>184</sup> Der Urbanisierungsgrad, d.h. der Anteil der Bevölkerung, welche in Städten lebt, lag im Jahr 2015 bei 75,3 %<sup>185</sup>.

#### 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.<sup>186</sup> Zusätzlich kommen 696 Milliarden Tonnenkilometer im

---

<sup>183</sup> Vgl. Statistisches Bundesamt (2019) Bevölkerungsdaten.

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

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

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

Güterverkehr<sup>187</sup>. Gebündelt ergibt sich in diesen beiden Kategorien eine Gesamtverkehrsleistung von 1.839 Milliarden Personen- und Tonnenkilometern in 2017<sup>188</sup>.

### 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.

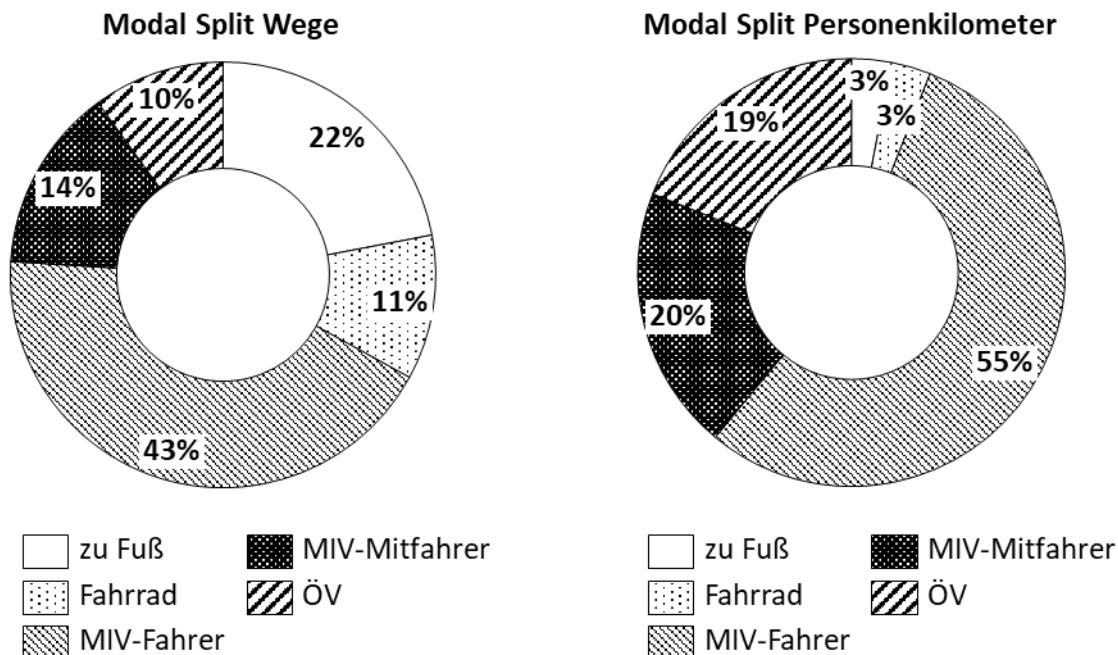


Abbildung 6-1 - Modal Split im Personenverkehr 2017<sup>189</sup>

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 %.<sup>190</sup>

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

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

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

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

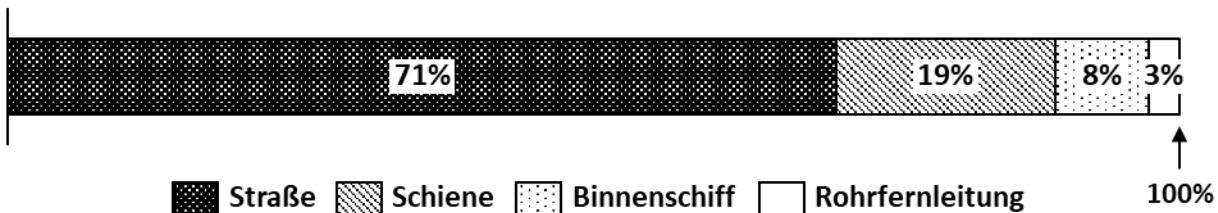


Abbildung 6-2 - Modal Split im Güterverkehr 2017<sup>191</sup>

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 spielen<sup>192</sup>. Der Modal Split zeigt, dass es beim innerdeutschen Verkehr eine Übermachtstellung des Straßenverkehrs besteht<sup>193</sup>.

### 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.<sup>194</sup> 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.<sup>195</sup>

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

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

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

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

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

<sup>195</sup> Vgl. ifas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH (2019) Mobilität in Deutschland, S. 56–58.

<sup>196</sup> 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%.<sup>197</sup>

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 einzige umweltverträgliche Alternative darstellt. Weniger als ein Viertel hat angegeben, den öffentlichen Verkehr zu nutzen, da ihnen keine Alternative zur Verfügung steht.<sup>198</sup>

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 Verkehrsunternehmens 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.<sup>199</sup> 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 verkauft<sup>200</sup>. In Zuge dessen erhöhte sich der Verkauf um 200.000 Fahrräder<sup>201</sup>. Der durchschnittliche Verbrauch von E-Bikes beläuft sich auf 7 Wh/100km<sup>202</sup>. Im Gegensatz zu anderen Ländern der Welt hat sich Bike-Sharing in Deutschland noch nicht durchgesetzt<sup>203</sup>. Insgesamt beläuft sich die Anzahl an Fahrrädern in Deutschland auf 72 Millionen Fahrräder<sup>204</sup>..

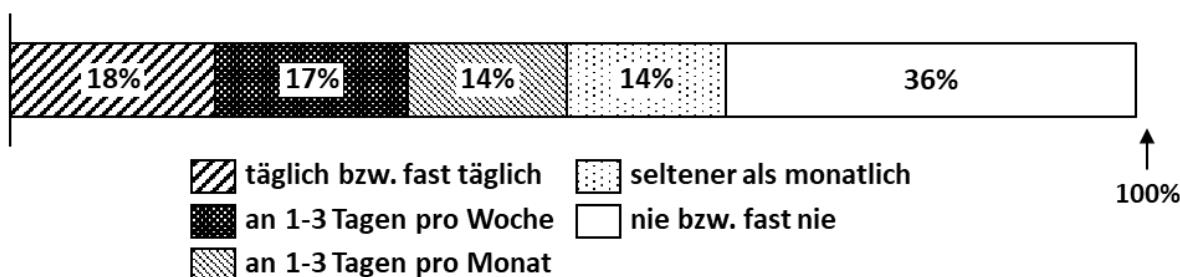


Abbildung 6-3 - Bevölkerung nach Häufigkeit der Fahrradnutzung 2017<sup>205</sup>

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

<sup>198</sup> Vgl. Statista (2018) Statistiken zum ÖPNV in Deutschland, S. 13.

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

<sup>200</sup> Vgl. Statista (2018) Absatz von E-Bikes.

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

<sup>202</sup> Annahme des Autors aus eigenen Messungen an mehreren E-Bikes.

<sup>203</sup> Vgl. Mathias Brandt (2019) Bike-Sharing boomt.

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

<sup>205</sup> 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 haben<sup>206</sup>. 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.<sup>207</sup>

**Viele!** 24,7 % der Wege werden intermodal zurückgelegt;  
Bewertungsgrundlage: Zu Fuß gehen gilt als ein eigener Modus  
genauso wie einzelnen ÖPNV- Verkehrsmittel



**Wenige!** 1,8 % der Wege werden intermodal zurückgelegt;  
Bewertungsgrundlage: Keine Fußwege und der ÖPNV wird als  
ein Modus betrachtet



**Mittelvele!** 9,4 % der Wege werden intermodal zurückgelegt;  
Bewertungsgrundlage: Keine Fußwege und die ÖPNV-  
Verkehrsmittel werden separat betrachtet



Abbildung 6-4 - Intermodalität? Eine Frage der Definition<sup>208</sup>

HEINRICHSEN 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 Bahnhaltestellen.<sup>209</sup>

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 Hilflosigkeit als Passagier im Fall von Verspätungen. Weitere Verbesserungsgrößen sind akkurate, leicht zugängliche Informationen über Fahrpläne und Verspätungen sowie kurze Wege innerhalb der Stationen.<sup>210</sup>

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

<sup>207</sup> Vgl. Heinrichs et al. (2015) Mobilität zukünftig intermodal?

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

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

<sup>210</sup> 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.<sup>211</sup>

Der Wegezweck gibt an, warum eine Person einen räumlichen Wechsel vorgenommen hat.<sup>212</sup> 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 %).<sup>213</sup> Die Wegezwecke variieren über die Raumtypen nicht<sup>214</sup>.

### 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.<sup>215</sup> Außerdem beginnen die Fahrten für den Regional- und Fernverkehr in oder im Umland der Städte und verursachen somit weitere Emissionen in den urbanen Regionen<sup>216</sup>.

Im Güterverkehr ist die Intermodalität schon seit Ende des 19. Jahrhunderts Standard. Mit der Einführung des ISO-Containers wurde die Schifffahrt günstiger und effizienter<sup>217</sup>. 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)<sup>218</sup>. 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 CO<sub>2</sub> durch die Verlagerung auf die Schiene und die Binnenschifffahrt eingespart<sup>219</sup>.

Die Logistikbranche ist der drittgrößte Industriezweig Deutschlands<sup>220</sup>. 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 %.<sup>221</sup> 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-

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

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

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

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

<sup>215</sup> 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.

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

<sup>217</sup> Vgl. Levinson (2016) The box, S. 2.

<sup>218</sup> Vgl. Levinson (2016) The box, S. 3–6.

<sup>219</sup> Vgl. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2018) Kombinierter Verkehr, S. 1.

<sup>220</sup> Vgl. Statista Sutdien zur Transport- und Logistikbranche, S. 19.

<sup>221</sup> Vgl. EHI Retail Institute e. V (2019) Transport in der Handelslogistik.

Markt.<sup>222</sup> 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.<sup>223</sup> Im Jahr 2017 wurden 3.350 Millionen Sendungen im KEP-Markt versendet<sup>224</sup>.

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).<sup>225</sup> In urbanen Gebieten kann dieser Lieferverkehr oft nur in der zweiten Reihe anhalten und vermindert dadurch den Verkehrsfluss und die Verkehrssicherheit<sup>226</sup>.

### Die Zusammensetzung der Fahrzeugkategorien

In Deutschland gab es zum 1.Januar 2019 57,3 Millionen Kraftfahrzeuge. Diese teilen sich auf in Personenkraftwagen (Pkw), Krafträder, 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.<sup>227</sup>

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.<sup>228</sup>

Im Bereich der Nutzfahrzeuge sind 5,9 Millionen Fahrzeuge registriert. Diese teilen sich in Lastkraftwagen, Sattelzugmaschinen und Kraftomnibusse auf.<sup>229</sup> 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.<sup>230</sup> Im Schienennahverkehr sind 76 % der Fahrzeuge mit einem elektrischen Antrieb ausgestattet<sup>231</sup>.

---

<sup>222</sup> Vgl. KE-CONSULT Kurte&Egger GbR (2018) KEP-Studie 2018 – Analyse, 11f.

<sup>223</sup> Vgl. Krieger (2018) KEP-Dienst.

<sup>224</sup> Vgl. KE-CONSULT Kurte&Egger GbR (2018) KEP-Studie 2018 – Analyse, S. 13.

<sup>225</sup> Vgl. Gudehus (2012) Logistik 2, S. 987.

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

<sup>227</sup> Vgl. Kraftfahrt-Bundesamt (2019) Jahresbilanz des Fahrzeugbestandes 2019.

<sup>228</sup> Vgl. Kraftfahrt-Bundesamt (2019) Jahresbilanz des Fahrzeugbestandes 2019.

<sup>229</sup> Vgl. Kraftfahrt-Bundesamt (2019) Jahresbilanz des Fahrzeugbestandes 2019.

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

<sup>231</sup> 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 genutzt<sup>232</sup>.

Im Jahr 2016 gab es weltweit insgesamt 23,4 Tsd. kommerzielle Flugzeuge. Von diesen gehören 995 deutschen Luftfahrtunternehmen.<sup>233</sup> Betrieben werden die Flugzeuge mit Kerosin, wobei in den letzten Jahren der Anteil an synthetischen Kraftstoffen weiter zu genommen hat<sup>234</sup>. Flugzeuge mit Elektroantrieben oder alternativen Antrieben sind aktuell in der Entwicklung.

Die Binnenschiffssfahrt 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 wird<sup>235</sup>.

### 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)<sup>236</sup>

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

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

<sup>233</sup> Vgl. Boeing (2017) Current market outlook, S. 4–21.

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

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

<sup>236</sup> Vgl. Umweltbundesamt (2018) Emissionsdaten,

Tabelle 6-2 - Ökologische Daten des Personenverkehrs (Teil 2)<sup>237</sup>

| Verkehrsmittel  | THG                   | Feinstaub    | Stickoxide   | Energieverbrauch |
|-----------------|-----------------------|--------------|--------------|------------------|
| <b>E-Bike</b>   | 3,66 <sup>238</sup>   | 0,000        | 0,03         | 0,03             |
| <b>Fahrrad</b>  | 0,00                  | 0,000        | 0,00         | 0,00             |
| <b>zu Fuß</b>   | 0,00                  | 0,000        | 0,00         | 0,00             |
| <b>MIV</b>      | 139,00                | 0,004        | 0,34         | 1,90             |
| <b>Flugzeug</b> | 201,00 <sup>239</sup> | 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 Feinstaubs berücksichtigt.

Tabelle 6-3 - Ökologische Daten des Güterverkehrs<sup>240</sup>

| Verkehrsmittel                             | THG          | Feinstaub    | Stickoxide   | Energieverbrauch |
|--|--------------|--------------|--------------|------------------|
| <b>Lkw</b>                                 | 103,00       | 0,003        | 0,22         | 1,40             |
| <b>Güterbahn</b>                           | 20,00        | 0,001        | 0,07         | 0,02             |
| <b>Binnenschiffe</b>                       | 32,00        | 0,010        | 0,41         | 0,40             |
| <b>Leichte Nutzfahrzeuge<sup>241</sup></b> | 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<sub>2-eq</sub>/Fzg.-Km* aus dem Jahr 2017. Bezogen auf

<sup>237</sup> Vgl. Umweltbundesamt (2018) Emissionsdaten,

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

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

<sup>240</sup> Vgl. Umweltbundesamt (2018) Emissionsdaten,

<sup>241</sup> 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 t/Fzg. dividiert., wodurch sich ein spezifischer Verbrauch von 530 g CO<sub>2</sub>-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) angepasst<sup>242</sup>. Dadurch ergeben sich die spezifischen Emissionen von leichten Nutzfahrzeugen zu 662,5 g CO<sub>2</sub>-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.<sup>243</sup> In diesen Werten sind die Kosten, welche durch verspätete Waren entstehen indirekt mit betrachtet, d.h. sie werden von den Unternehmen auf die Haushalte umgewälzt<sup>244</sup>.

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

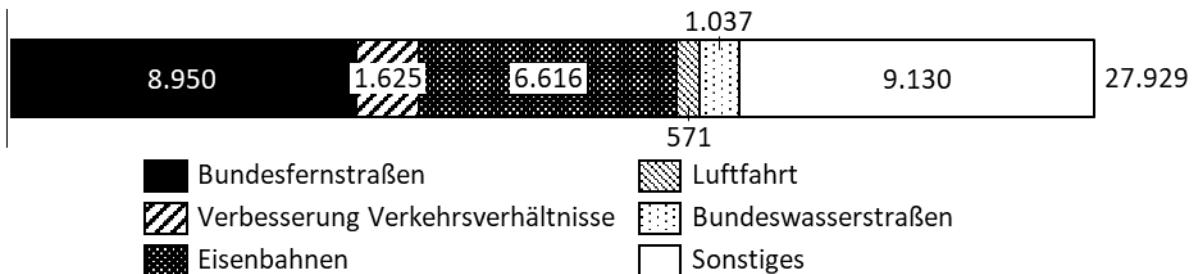


Abbildung 6-5 - Ausgaben für den Verkehr in Mio. Euro

### 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.

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

<sup>243</sup> Vgl. Cookson (2018) Inrix Global Traffic Scorecard, S. 34.

<sup>244</sup> Vgl. Cookson (2018) Inrix Global Traffic Scorecard, S. 7.

**Tabelle 6-4 - Soziale Daten des Personenverkehrs<sup>245</sup>**

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

Bei der Ermittlung des Unfallrisikos gibt es große Diskrepanzen zwischen den verschiedenen Studien (vgl. ADAC, ALLIANZ PRO SCHIENE)<sup>248</sup>. Dies begründet sich in den unterschiedlichen Berechnungsgrundlagen. Das Bundesamt für Statistik empfiehlt daher, die Anzahl der im Verkehr getöteten Personen durch die Verkehrsleistung zu teilen<sup>249</sup>. 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.

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

<sup>246</sup> eigene Berechnung siehe Anhang Tabelle A-2.

<sup>247</sup> Eigene Annahme: Wird mit dem Unfallrisiko im Zug-Fernverkehr gleichgesetzt.

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

<sup>249</sup> Vgl. Statistisches Bundesamt Verkehrsunfälle.

Tabelle 6-5 - Soziale Daten des Güterverkehrs

| Verkehrsmittel                       | Unfallrisiko <sup>250</sup>    |
|--------------------------------------|--------------------------------|
| Lkw                                  | 0,30                           |
| Güterbahn                            | 0,80                           |
| Leichte Nutzfahrzeuge <sup>251</sup> | 0,30                           |
| Einheit                              | Unfall pro 10 <sup>9</sup> 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 Personenkilometer<sup>252</sup>.

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“ entnommen<sup>253</sup>. 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 angesetzt<sup>254</sup>.

Im Güterverkehr sind der Kosten pro Tonnenkilometer in RENEWBILITY angegeben<sup>255</sup>. 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/Tkm<sup>256</sup>. 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

<sup>250</sup> 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.

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

<sup>252</sup> Vgl. Kreyenberg (2016) Fahrzeugantriebe Elektromobilität, S. 103.

<sup>253</sup> Vgl. ADAC e.V. (2019) ADAC Preisvergleich: Tickets ÖPNV.

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

<sup>255</sup> Vgl. Zimmer et al. (2016) Renewbility III Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors, S. 157.

<sup>256</sup> Vgl. Zimmer et al. (2016) Renewbility III Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors, S. 157.

sich für die TCO eines leichten Nutzfahrzeugs ein Wert von 0,83 EUR/Tkm.<sup>257</sup> 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 Megatrend<sup>258</sup>. 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)<sup>259</sup> – Eine Studie des Zukunftsinstituts im Auftrag des ADAC e.V.
- „An integrated perspective on the future of mobility Part: 1-3“ (2016-2019)<sup>260</sup> – McKinsey & Company
- „The Future of Mobility 3.0“ (2018)<sup>261</sup> – Arthur D. Little in Zusammenarbeit mit UITP
- „ZF-Zukunftsstudie – Die letzte Meile“ (2016)<sup>262</sup> – 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 werden<sup>263</sup>. Weltweit wird mehr als 60 % des BIPs in Städten produziert<sup>264</sup>.

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

---

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

<sup>258</sup> Vgl. Horx (2014) Das Megatrend-Prinzip, S. 8.

<sup>259</sup> Vgl. Zukunftsinstitut GmbH (2017) Die Evolution der Mobilität.

<sup>260</sup> 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.

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

<sup>262</sup> Vgl. Uwe Clausen, Sebastian Stütz, Arnd Bernsmann, Hilmar Heinrichmeyer (2016) ZF-Zukunftsstudie 2016.

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

<sup>264</sup> 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.<sup>265</sup>

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.<sup>266</sup>

Für den Mobilitätssektor bedeutet dies eine Diversifizierung des Modal Shift hin zu variableren, zeitlich flexibleren und intelligenteren Angeboten. Weiterhin steigt die Kundenerwartung an die Angebote<sup>267</sup>. 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 [...]“<sup>268</sup>

Folge der Kreativitätsökonomie ist u.a. die Umgestaltung des Arbeitslebens. Klassische Arbeitsgestaltung mit Arbeitszeiten von 9 bis 17 Uhr sind nachweislich nicht kreativitätsfördernd<sup>269</sup>. 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

<sup>265</sup> Vgl. Zukunftsinstutit GmbH (2017) Die Evolution der Mobilität, S. 17.

<sup>266</sup> Vgl. Zukunftsinstutit GmbH (2017) Die Evolution der Mobilität, S. 18.

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

<sup>268</sup> Vgl. Zukunftsinstutit GmbH Megatrend New Work.

<sup>269</sup> Vgl. Krause (2013) Kreativität, Innovation, Entrepreneurship, S. 114.

unkompliziert zu ihrer Arbeitsstätte gelangen. Am liebsten würden sie die Zeit produktiv nutzen.<sup>270</sup> 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 %.<sup>271</sup> 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.<sup>272</sup>

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 präsenter<sup>273</sup>. In der Mobilität gehört in diese Kategorie neben dem Car Sharing und Bike Sharing weiterhin Ride Haling und Ride Sharing Dienste<sup>274</sup>. 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.<sup>275</sup>

Insgesamt gehen die Analysten von DELOITTE von einem deutschlandweiten Wachstum im Car Sharing Markt auf 3,1 Millionen Nutzer im Jahr 2020 aus<sup>276</sup>. Aktuell nutzen 2,5 Mio. Menschen Car Sharing. In Deutschland existieren 20 Tsd. Car Sharing Fahrzeuge<sup>277</sup>. Der Bike

<sup>270</sup> Vgl. Zukunftsinstitut GmbH (2017) Die Evolution der Mobilität, S. 21.

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

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

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

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

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

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

<sup>277</sup> 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 fortsetzen<sup>278</sup>.

Laut LOOSE substituiert ein Car Sharing-Auto im Zentrum einer Großstadt bis zu 20 Fahrzeuge<sup>279</sup>. Eine weitere niederländische Studie kommt zu dem Ergebnis, dass Car Sharing Nutzer ca. 15-20 % weniger Kilometer fahren, als vergleichbare Autonutzer<sup>280</sup>. Gemäß CHEN et al. produzieren Car Sharing Nutzer 51 % weniger Treibhausgase und verbrauchen ebenso viel weniger Energie<sup>281</sup>. 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 zuzulassen<sup>282</sup>. Dies wird langfristig auch in Deutschland geschehen. Laut einer Studie von Shell Deutschland werden 2040 ca. 50 % aller Pkw mit alternativen Antrieben ausgestattet sein<sup>283</sup>.

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.<sup>284</sup>

Neben dem Straßenpersonenverkehr werden auch im Straßengüterverkehr Forschungsvorhaben zur Reduzierung von Emissionen gestartet.<sup>285</sup> 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)<sup>286</sup>. Laut Experten von Roland Berger gibt es 2019 rund 100 Entwicklungsprogramme in diesem Bereich<sup>287</sup>. Die Entwicklung von hybriden Flugzeugen mit konventionellem und elektrischem Antrieb wird auf lange Sicht gesehen zu rein elektrischen Flugzeugen führen<sup>288</sup>. Diese Entwicklung wird im Einklang mit der Batteriezellenentwicklung vorangehen<sup>289</sup>.

---

<sup>278</sup> Vgl. Schönberg et al. (2018) Bike Sharing 5.0, S. 1.

<sup>279</sup> Vgl. Loose (2016) Mehr Platz zum Leben, S. 25.

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

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

<sup>282</sup> Vgl. Zukunftsinstitut GmbH (2017) Die Evolution der Mobilität, S. 25.

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

<sup>284</sup> Vgl. Europäisches Parlament (2019) CO2-Emissionen von Autos.

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

<sup>286</sup> Vgl. Spinnler (2019) Tanken Flieger künftig Strom?

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

<sup>288</sup> Vgl. Spinnler (2019) Tanken Flieger künftig Strom?

<sup>289</sup> Vgl. Thomson et al. (2018) Aircraft electrical propulsion, S. 6.

## Autonomes Fahren

Autonome Fahrzeuge werden unterteilt in:<sup>290</sup>

- **Stufe 0 - händisch**  
Alle Fahrfunktionen des Fahrzeuges werden manuell vom Fahrzeugführer durchgeführt.
- **Stufe 1 - assistiert**  
Fahrassistentenzsysteme, 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 gemeint<sup>291</sup>. Die Stufen 3 - 5 stellen eine Evolution der bisherigen autonomen Mobilität dar. Vorteile des autonomen Fahrens liegen u.a. in dem Gewinn der Fahrtzeit als produktive Zeit, der geringeren Anzahl an Unfällen, geringeren Kosten und geringeren Emissionen<sup>292</sup>. Demgegenüber stehen mögliche negative Entwicklungen, wie ein erhöhtes Verkehrsaufkommen, mehr motorisierten Individualverkehr und einen insgesamt höheren Energieverbrauch durch mehr Personen- und Tonnenkilometern<sup>293</sup>.

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

<sup>291</sup> Vgl. Ritz (2018) Mobilitätswende - autonome Autos, S. 32.

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

<sup>293</sup> 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 führen<sup>294</sup>. 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.<sup>295</sup> Im Straßenverkehr rechnen Experten im Mittelwert mit den ersten hochautomatisierten Fahrzeugen im Jahr 2021 und der kompletten Marktpenetration im Jahr 2039<sup>296</sup>.

### Digitalisierung

Die Digitalisierung ist einer der Megatrends des 21. Jahrhunderts und hat disruptive Auswirkungen in vielen Gesellschaftsbereichen<sup>297</sup>. 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<sup>298</sup>**

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<sup>299</sup>**

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<sup>300</sup>**

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.<sup>301</sup>

---

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

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

<sup>296</sup> Vgl. Ritz (2018) Mobilitätswende - autonome Autos, S. 37.

<sup>297</sup> Vgl. Zukunftsinstutit GmbH (2018) Megatrend Konnektivität.

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

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

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

<sup>301</sup> Vgl. Zukunftsinstutit GmbH (2017) Die Evolution der Mobilität, S. 33–34.

Laut Experten von MCKINSEY wird es durch diese Mobilität günstiger, verfügbarer, effizienter, nachhaltiger und angenehmer werden<sup>302</sup>.

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.<sup>303</sup>

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

### **Dash Delivery**

Die letzte Meile verursacht in der Logistik den größten Kostenanteil mit 41 %<sup>305</sup>. Dem gegenüber steht der Wunsch der Kunden nach einer einfachen und nutzerfreundlichen Lieferung<sup>306</sup>. Abhilfe sollen die Trends des Dash Delivery, welche die letzte Meile inklusive der Interaktion mit dem Kunden verbessern wollen, schaffen. Zu diesen Trends gehören:<sup>307</sup>

- **Drohnen**

Im Jahr 2015 wurde die erste erlaubte Drohnenlieferung durchgeführt. Seitdem konkurrieren mehrere Warenhäuser um weitere Projekte. Diese versprechen u.a. kürzere Lieferzyklen.<sup>308</sup>

- **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.<sup>309</sup>

- **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.<sup>310</sup>

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

---

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

<sup>303</sup> Vgl. Zukunftsinstutit GmbH (2017) Die Evolution der Mobilität, S. 33–34.

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

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

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

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

<sup>308</sup> Vgl. Williams (2017) Future of retail.

<sup>309</sup> Vgl. Schleier (2018) Dash Delivery: Mut zur neuen letzten Meile.

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

<sup>311</sup> 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.

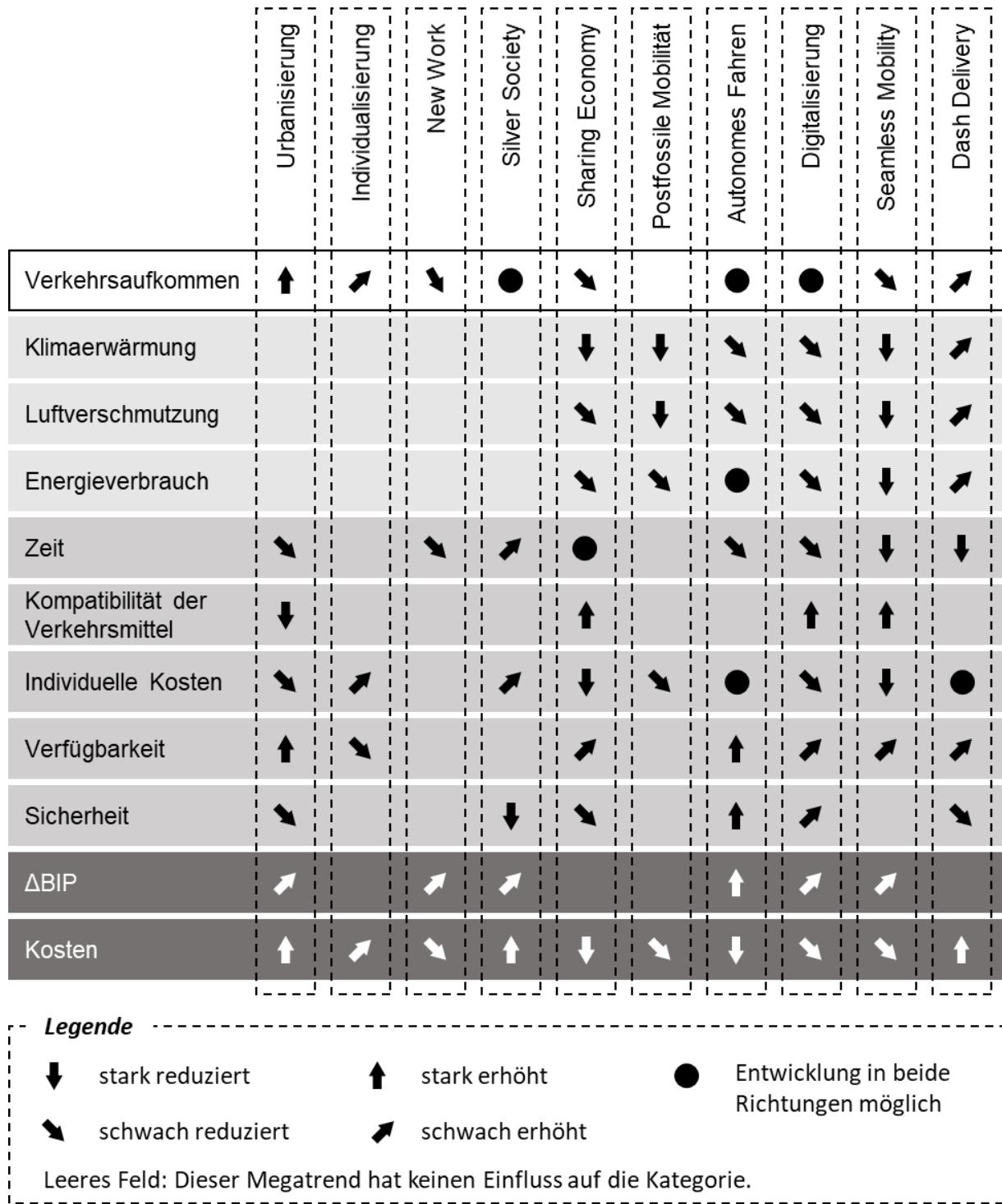


Abbildung 6-6 - Auswirkungen der Megatrends auf die Kategorien

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 erlangen<sup>312</sup>.

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 zu<sup>313</sup>. 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 %<sup>314</sup>.

---

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

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

<sup>314</sup> 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.<sup>315</sup>
- 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.<sup>316</sup>
- 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 III<sup>317</sup> und das Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (AMS) des Klimaschutzszenario 2050<sup>318</sup> 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 Reaktorsicherheit<sup>319</sup>
- „Shell Pkw Szenarien bis 2040“ – Adolf et al. (2016); Shell Deutschland in Kooperation mit der Prognos AG<sup>320</sup>
- „Shell Nutzfahrzeug Szenario bis 2040“ – Adolf et al. (2016); Shell Deutschland in Kooperation mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt<sup>321</sup>

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

---

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

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

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

<sup>318</sup> Vgl. Öko-Institut e.V. et al. (2015) Klimaschutzszenario 2050.

<sup>319</sup> Vgl. Zimmer et al. (2016) Renewbility III Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors.

<sup>320</sup> Vgl. Adolf. Jörg et al. (2014) Shell PKW-Szenarien bis 2040.

<sup>321</sup> 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)<sup>322</sup> gegenübergestellt. Bei beiden Werten handelt es sich um WTW-Ergebnisse.



**Abbildung 6-7 - Vergleich der spezifischen THG-Emissionen pro Pkm (2050)<sup>323</sup>**

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 abnehmen<sup>324</sup>. 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%).<sup>325</sup>

### 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 verringrigerer Bevölkerung und einer älteren Gesellschaft nur leicht sinkt<sup>326</sup>. Der Anstieg im Verkehrsaufkommen bis 2030 begründet sich u.a. in der Vielfalt an neuen Alternativen, einer höheren Pkw-Verfügbarkeit und anderen Raumstrukturen<sup>327</sup>. 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)<sup>328</sup>.

<sup>322</sup> 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)

<sup>323</sup> Vgl. Zimmer et al. (2016) Renewbility III Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors, S. 108, Vgl. Adolf. Jörg et al. (2014) Shell PKW-Szenarien bis 2040, S. 72.

<sup>324</sup> Vgl. Datenbank: Bevölkerungsschätzung.

<sup>325</sup> Vgl. Öko-Institut e.V. et al. (2015) Klimaschutzszenario 2050, S. 77.

<sup>326</sup> Vgl. Zimmer et al. (2016) Renewbility III Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors, S. 122–124.

<sup>327</sup> Vgl. Zimmer et al. (2016) Renewbility III Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors, S. 124.

<sup>328</sup> Vgl. Zimmer et al. (2016) Renewbility III Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors, S. 123.

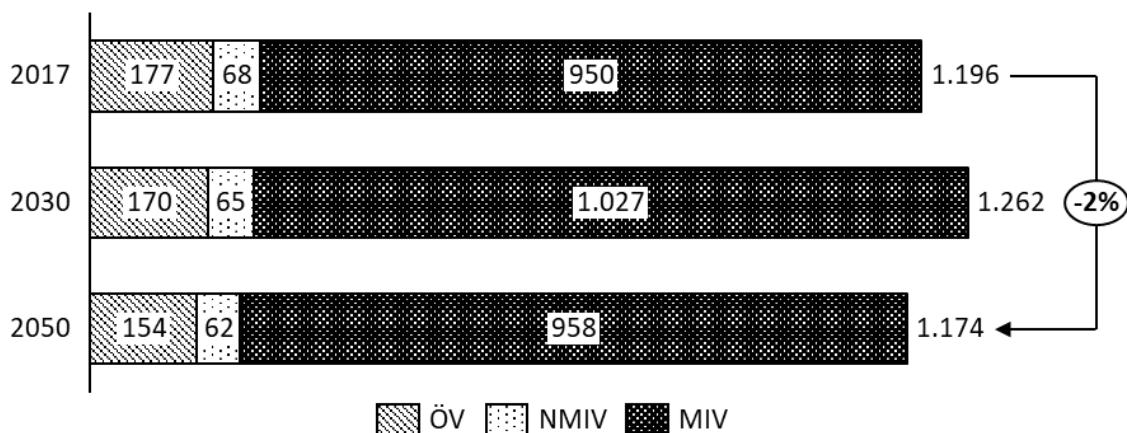


Abbildung 6-8 - Verkehrsleistung des Personenverkehrs im Trendszenario im Vergleich<sup>329330</sup>

Im Güterverkehr kommt es im Gegensatz zum Personenverkehr zu einer anhaltenden Steigerung der Verkehrsleistung (Tkm). Die Verbesserungen sind in Abbildung 6-9 dargestellt.

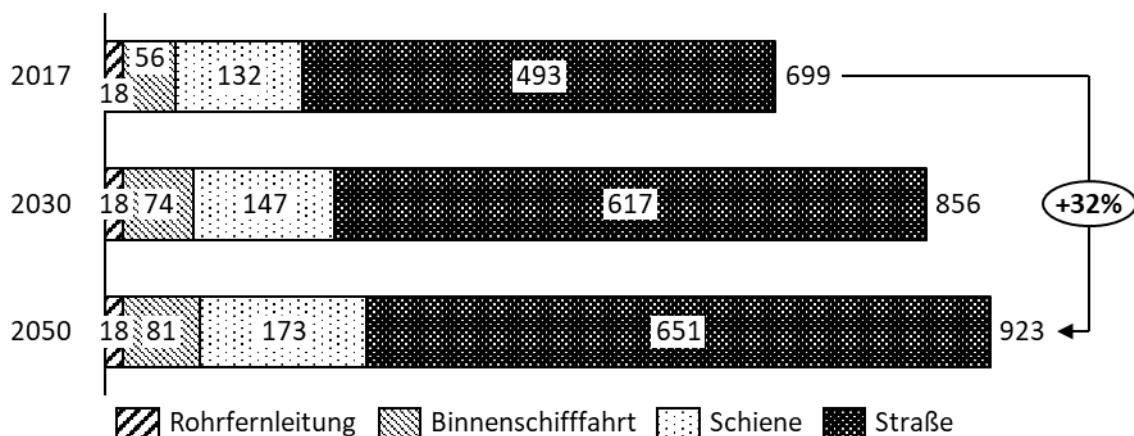


Abbildung 6-9 - Verkehrsleistung des Güterverkehrs im Trendszenario im Vergleich<sup>331</sup>

Das anhaltende Wirtschaftswachstum, geringere Kosten im Transport und das anhaltende Wachstum im E-Commerce führen zu einem Wachstum der Verkehrsleistungen.<sup>332</sup>

### Der Modal Split

In RENEWBILITY wird der Modal Split für den Personenverkehr einerseits für all Strecken angegeben und anderseits 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 aufgreift<sup>333</sup>.

<sup>329</sup> Vgl. Zimmer et al. (2016) Renewbility III Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors, S. 123.

<sup>330</sup> NMIV = Nicht motorisierter Individualverkehr (zu Fuß, Fahrrad)

<sup>331</sup> Vgl. Zimmer et al. (2016) Renewbility III Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors, S. 153.

<sup>332</sup> Vgl. Zimmer et al. (2016) Renewbility III Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors, S. 148–153.

<sup>333</sup> Vgl. Zimmer et al. (2016) Renewbility III Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors, 131f, 135.

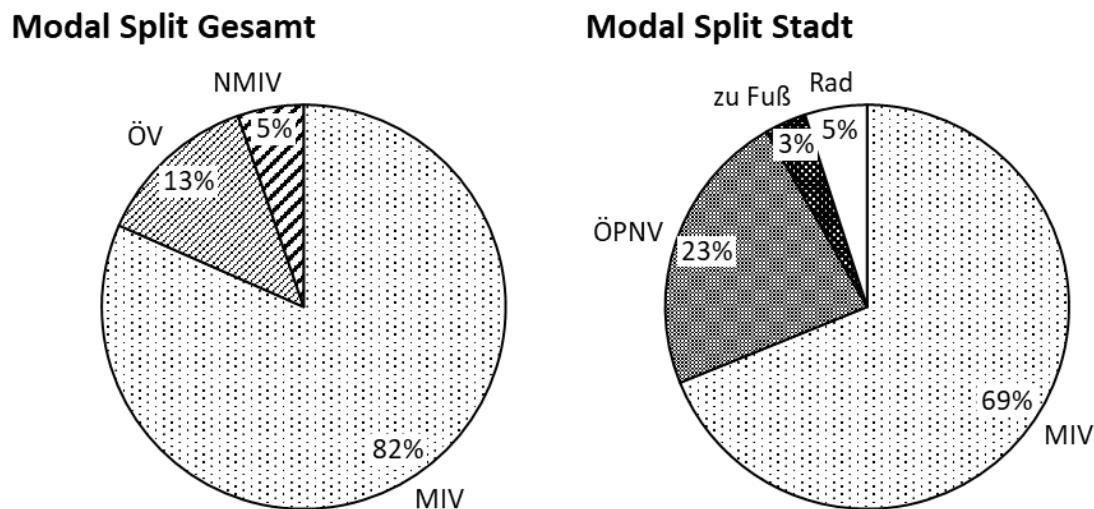


Abbildung 6-10 - Modal Split des Personenverkehrs im Trendszenario<sup>334</sup>

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 aus<sup>335</sup>. 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 2017<sup>336</sup>. Auffällig ist außerdem, dass im Trendszenario der Anteil des MIV an der gesamten Verkehrsleistung, im Gegensatz zu 2017, weiter ansteigt.

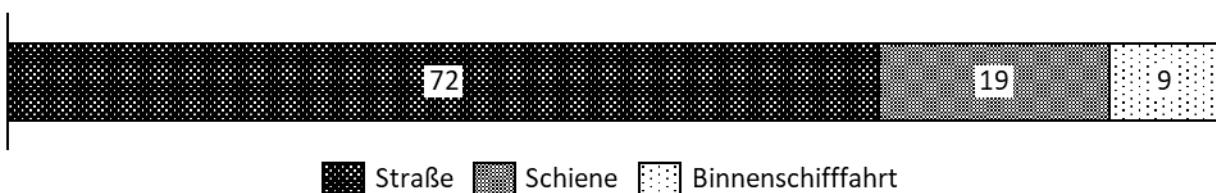


Abbildung 6-11 - Modal Split des Güterverkehrs im Trendszenario<sup>337</sup>

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

<sup>334</sup> Vgl. Zimmer et al. (2016) Renewbility III Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors, 132, 136.

<sup>335</sup> Vgl. Zimmer et al. (2016) Renewbility III Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors, S. 170.

<sup>336</sup> Vgl. Zimmer et al. (2016) Renewbility III Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors, S. 169.

<sup>337</sup> Vgl. Zimmer et al. (2016) Renewbility III Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors, S. 153.

RENEWBILITY 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 Zeitraum<sup>338</sup>.

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.<sup>339</sup> Eine Übersicht über die genaue Zusammensetzung der Antriebstechnologien findet sich in Abbildung 6-12.

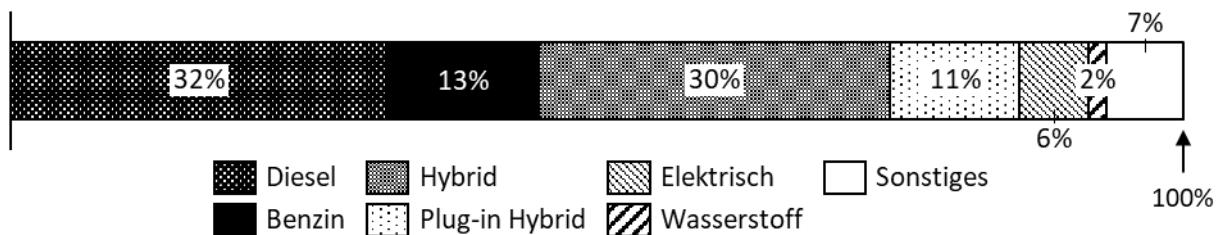


Abbildung 6-12 - Zusammensetzung der Fahrzeuge im Personenverkehr<sup>340</sup>

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 Jahren<sup>341</sup>. Geht man von einer analogen Entwicklung, wie im motorisierten Individualverkehr aus, sinkt die durchschnittliche Lebensdauer nur leicht<sup>342</sup>. Dem folgend wird für die Zusammensetzung der Nutzfahrzeuge im Bestand 2050, die Zusammensetzung der Nutzfahrzeuge (Neuzulassungen) 2040 angenommen.

<sup>338</sup> Vgl. Adolf. Jörg et al. (2014) Shell PKW-Szenarien bis 2040, S. 63.

<sup>339</sup> Vgl. Adolf. Jörg et al. (2014) Shell PKW-Szenarien bis 2040, S. 62.

<sup>340</sup> Vgl. Adolf. Jörg et al. (2014) Shell PKW-Szenarien bis 2040, S. 62–63.

<sup>341</sup> Vgl. Kraftfahrt-Bundesamt (2017) Fahrzeugzulassungen (FZ 15), S. 20–37.

<sup>342</sup> Vgl. Kraftfahrt-Bundesamt (2017) Fahrzeugzulassungen (FZ 15), S. 7.

Im Bereich der Nutzfahrzeuge fallen die Veränderungen in den Antriebstechnologien geringer aus. In allen Kategorien<sup>343</sup> bleiben Diesel die dominierende Antriebsquelle<sup>344</sup>. Bei den leichten Nutzfahrzeugen (N1) diversifiziert sich die Zusammensetzung der Antriebstechnologien am signifikantesten, wobei elektrische und hybride Fahrzeuge auf einen Anteil von ca. 21 % kommen<sup>345</sup>. Bei den schweren Lkw (N3) erhöht sich der Anteil an Diesel betriebenen Fahrzeugen auf 99,5 %<sup>346</sup>.

AIRBUS geht in seinem „Global Market Forecast“ davon aus, dass bis 2037 ca. die Hälfte aller Flugzeuge aus dem Jahr 2018 ersetzt werden<sup>347</sup>. Schreibt man diesen Trend fort, werden 2050 nahezu alle Flugzeuge aus dem Bestand ausgetauscht worden sein. Die meisten Flugzeuge (75 %)<sup>348</sup> werden in der Kategorie S (bis zu 230 Sitze und Reichweiten bis 3.000nm)<sup>349</sup> 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)<sup>350</sup> (Teil 1)**

| Verkehrsmittel           | THG          | Feinstaub    | Stickoxide   | Energieverbrauch |
|--------------------------|--------------|--------------|--------------|------------------|
| <b>Bus<sup>351</sup></b> | 54,86        | 0,001        | 0,204        | 0,73             |
| <b>Zug - Fernverkehr</b> | 9,77         | 0,000        | 0,002        | 0,38             |
| <b>Zug - Nahverkehr</b>  | 16,60        | 0,000        | 0,004        | 0,65             |
| <b>U-Bahn</b>            | 17,58        | 0,000        | 0,004        | 0,68             |
| <b>Tram</b>              | 17,58        | 0,000        | 0,004        | 0,68             |
| <b>Einheit</b>           | <b>g/Pkm</b> | <b>g/Pkm</b> | <b>g/Pkm</b> | <b>MJ/Pkm</b>    |

<sup>343</sup> 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.

<sup>344</sup> Vgl. Adolf et al. (2016) SHELL Nutzfahrzeug-Studie: Diesel, alternative Antriebe, S. 63.

<sup>345</sup> Vgl. Adolf et al. (2016) SHELL Nutzfahrzeug-Studie: Diesel, alternative Antriebe, S. 63.

<sup>346</sup> Vgl. Adolf et al. (2016) SHELL Nutzfahrzeug-Studie: Diesel, alternative Antriebe, S. 63.

<sup>347</sup> Vgl. Airbus (2018) Global Market Forecast, S. 6.

<sup>348</sup> Vgl. Airbus (2018) Global Market Forecast, S. 7.

<sup>349</sup> Vgl. Airbus (2018) Global Market Forecast, S. 45.

<sup>350</sup> Vgl. Zimmer et al. (2016) Renewbility III Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors.

<sup>351</sup> 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 |
|-------------------------------|-----------------------|--------------|--------------|------------------|
| <b>MIV<sup>352</sup></b>      | 83,00                 | 0,255        | 0,22         | 1,14             |
| <b>Flugzeug<sup>353</sup></b> | 122,07 <sup>354</sup> | 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)<sup>355</sup>

| Verkehrsmittel           | THG          | Feinstaub    | Stickoxide   | Energieverbrauch |
|--------------------------|--------------|--------------|--------------|------------------|
| <b>Lkw</b>               | 56,65        | 0,002        | 0,119        | 0,77             |
| <b>Güterbahn</b>         | 5,86         | 0,000        | 0,001        | 0,23             |
| <b>Binnenschiffe</b>     | 22,40        | 0,289        | 0,007        | 0,28             |
| <b>LNF<sup>356</sup></b> | 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, Binnenschiffahrt – 0,04 Euro/Tkm<sup>357</sup>. Für die leichten Nutzfahrzeuge entwickeln sich die Transportkosten angelehnt an den Güterverkehr ( $\Delta$ Güterverkehr: 125 %,  $\Delta$ 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 haben<sup>358</sup>.

<sup>352</sup> Vgl. Adolf. Jörg et al. (2014) Shell PKW-Szenarien bis 2040, S. 72–73.

<sup>353</sup> Vgl. Zimmer et al. (2016) Renewbility III Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors, S. 164.

<sup>354</sup> Der EWF = Emission Weighting Factor (2) wurde für den Luftverkehr berücksichtigt.

<sup>355</sup> Vgl. Adolf et al. (2016) SHELL Nutzfahrzeug-Studie: Diesel, alternative Antriebe, S. 68–69.

<sup>356</sup> Für den LNF wurden die selben Verbesserungsfaktoren, wie für den Lkw angenommen.

<sup>357</sup> Vgl. Zimmer et al. (2016) Renewbility III Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors, S. 157.

<sup>358</sup> 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 übernommen<sup>359</sup>. 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 RENEWBILITY steigenden Benzin-, Diesel- und Stromkosten<sup>360</sup>. 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 Lkws<sup>361</sup>.

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.

---

<sup>359</sup> Vgl. Kreyenberg (2016) Fahrzeugantriebe Elektromobilität, S. 103.

<sup>360</sup> Vgl. Zimmer et al. (2016) Renewbility III Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors, S. 37–39.

<sup>361</sup> Vgl. Adolf et al. (2016) SHELL Nutzfahrzeug-Studie: Diesel, alternative Antriebe, S. 63.

**Tabelle 6-9 - Unfallrisiko und Verfügbarkeit im Trendszenario**

| <b>Verkehrsmittel</b> | <b>Unfallrisiko</b>                      |
|-----------------------|--|
| 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                                    |
| <b>Einheit</b>        | <b>Unfälle pro <math>10^9</math> Pkm</b> |

Die Daten für den Güterverkehr können der Tabelle 6-10 entnommen werden.

**Tabelle 6-10 - Unfallrisiko (Güterverkehr) im Trendszenario**

| <b>Verkehrsmittel</b>                     | <b>Unfallrisiko</b>                     |
|---|---|
| Lkw; leichte Nutzfahrzeuge <sup>362</sup> | 0,132                                   |
| Güterbahn                                 | 0,64                                    |
| <b>Einheit</b>                            | <b>Unfall pro <math>10^9</math> Tkm</b> |

### 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

<sup>362</sup> 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.<sup>363</sup>

### 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)<sup>364</sup>. 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 werden<sup>365</sup>.

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 nutzen<sup>366</sup>. 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 Personenverkehrs<sup>367</sup>. Durch sekundäre Effekte, wie die Steigerung der Distanz zwischen Wohn- und Arbeitsort, wird die Verkehrsleistung weiter erhöht<sup>368</sup>.

Im Szenario der unregulierten autonomen Mobilität wächst die Anzahl an Fahrten im eigenen Wagen. Dementsprechend wächst der Anteil am Modal Split<sup>369</sup>. Analog zu KRAIL et al. wird sich der öffentliche Verkehr auf die Hauptachsen zurückziehen. Im ländlichen Raum wird durch

---

<sup>363</sup> Vgl. Cookson (2018) Inrix Global Traffic Scorecard, 2-3.

<sup>364</sup> Vgl. Kral et al. (2019) Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr, S. 71–76.

<sup>365</sup> 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

<sup>366</sup> Vgl. International Transport Forum at the OECD (2015) Urban Mobility System, S. 30.

<sup>367</sup> 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.

<sup>368</sup> Vgl. Kral et al. (2019) Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr, S. 71.

<sup>369</sup> Vgl. Kral 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 an<sup>370</sup>.

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 Straßenrand<sup>371</sup>.

Für den öffentlichen Schienenverkehr werden die Auswirkungen der Autonomisierung (spezifische Kennwerte) als geringer angenommen<sup>372</sup>. Die oben beschriebenen Entwicklungstendenzen führen laut KRAIL et al. zu den folgenden Entwicklungen:

**Tabelle 6-11 - Entwicklungen im Personenverkehr („Unregulierte autonome Mobilität“)<sup>373</sup>**

| Kategorien                 | Entwicklungstendenz                                  |
|----------------------------|--|
| <b>MIV</b>                 |  |
| <b>Verkehrsaufkommen</b>   | Steigt deutlich                                      |
| <b>Fahrleistung</b>        | Nimmt zu   |
| <b>Anzahl an Wegen</b>     | Steigt wenig   |
| <b>Verkehrsfluss</b>       | Bleibt konstant                                      |
| <b>ÖPNV</b>                |  |
| <b>Verkehrsaufkommen</b>   | Sinkt  |
| <b>Fahrleistung</b>        | Steigt aufgrund von mehr Punkt-zu-Punkt Verbindungen |
| <b>Relevanz Kleinbusse</b> | Steigt   |
| <b>Relevanz Stadtbusse</b> | Sinkt  |
| <b>Verkehrsfluss</b>       | Konstant   |

Im Güterverkehr verändert sich das Verkehrsbild aufgrund der Verringerung der Transportkosten essenziell. Im Bereich der City-Logistik werden kleine autonome Fahrzeuge, welche für

<sup>370</sup> Vgl. Krail et al. (2019) Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr, S. 72.

<sup>371</sup> Vgl. International Transport Forum at the OECD (2015) Urban Mobility System, S. 5.

<sup>372</sup> Vgl. SYSTRA (2016) automated and autonomous public transport, S. 12–17.

<sup>373</sup> 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 verwendet<sup>374</sup>. Über regionale Logistikzentren werden die Waren im Privatkundensegment zu den einzelnen Senken (Empfänger) transportiert<sup>375</sup>.

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 Straßenverkehr<sup>376</sup>.

Tabelle 6-12 - Entwicklungen im Güterverkehr ("Unregulierte autonome Mobilität"<sup>377</sup>)

| Kategorien                             | Entwicklungstendenz                   |
|--|---------------------------------------|
| <b>City-Logistik</b>                   |                                       |
| <b>Verkehrsaufkommen</b>               | Steigt                                |
| <b>Fahrleistung</b>                    | Nimmt leicht zu                       |
| <b>Relevanz kleiner Nutzfahrzeuge</b>  | Steigt an                             |
| <b>Relevanz schwerer Nutzfahrzeuge</b> | Geht zurück                           |
| <b>Fernverkehr</b>                     |                                       |
| <b>Verkehrsaufkommen</b>               | ansteigend                            |
| <b>Fahrleistung</b>                    | Gleichbleibend                        |
| <b>Relevanz kleiner Nutzfahrzeuge</b>  | Stark wachsend (zwischen 12t und 18t) |
| <b>Relevanz schwerer Nutzfahrzeuge</b> | Gleichbleibend                        |
| <b>Verkehrsfluss</b>                   | Konstant                              |

<sup>374</sup> Vgl. Krail et al. (2019) Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr, S. 73.

<sup>375</sup> Vgl. Krail et al. (2019) Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr, S. 74.

<sup>376</sup> Vgl. Krail et al. (2019) Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr, S. 76.

<sup>377</sup> 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 vorherzusagen<sup>378</sup>. Die limitierenden Faktoren sind dabei der Bremsweg und die Signalanlagen<sup>379</sup>.

### **Das Verkehrsaufkommen**

Die Experten/-innen von MCKINSEY gehe davon aus, dass durch die höhere Verfügbarkeit und die geringeren Kosten bereits 2030 das Verkehrsaufkommen im Vergleich zum Referenzszenario um ca. 9 % ansteigt<sup>380</sup>. 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.<sup>381</sup>

Gemäß KRAIL et. al. wird das Verkehrsaufkommen im Bereich der City-Logistik und des Fernverkehrs weiter ansteigen<sup>382</sup>.

### **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.<sup>383</sup> 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 gleichbleibt<sup>384</sup>.

<sup>378</sup> Vgl. SYSTRA (2016) automated and autonomous public transport, S. 12–17.

<sup>379</sup> Vgl. SYSTRA (2016) automated and autonomous public transport, S. 15–17.

<sup>380</sup> Vgl. Hannon et al. (2019) An integrated perspective on the future of mobility, part 3, S. 7–9.

<sup>381</sup> Vgl. Krail et al. (2019) Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr, S. 75–76.

<sup>382</sup> Vgl. Hannon et al. (2019) An integrated perspective on the future of mobility, part 3, S. 73–76.

<sup>383</sup> 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.

<sup>384</sup> 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.<sup>385</sup> Im Bereich der City-Logistik nimmt die Studie an, dass die Zustellfahrzeuge kleiner und vollautomatisiert werden<sup>386</sup>. Die Zustellfahrzeuge starten von regionalen Logistikzentren, zu welchen der Fernverkehr geleitet wird. Unter den Transportdienstleistern bestehen keine gemeinsamen Nutzungen.<sup>387</sup>

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 % festgeschrieben<sup>388</sup>. Dem entgegen, geht die HANNON et al. davon aus, dass die Fahrzeiterhöhung 2030 15 % betragen wird<sup>389</sup>. 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 werden<sup>390</sup>. 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

<sup>385</sup> Vgl. Krail et al. (2019) Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr, S. 73–75.

<sup>386</sup> Vgl. Krail et al. (2019) Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr, S. 73.

<sup>387</sup> Vgl. Krail et al. (2019) Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr, S. 74–75.

<sup>388</sup> Vgl. Krail et al. (2019) Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr, S. 143.

<sup>389</sup> Vgl. Hannon et al. (2019) An integrated perspective on the future of mobility, part 3, S. 15.

<sup>390</sup> 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.<sup>391</sup>

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.<sup>392</sup>

### 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.<sup>393</sup> 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.<sup>394</sup> Für die Nutzfahrzeuge sinkt der VOT aufgrund der Steigerung an fahrerlosen Strecken.<sup>395</sup> 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:<sup>396</sup>

- SNF – 17,5 %
- LNF, Busse – 17 %
- Binnenschifffahrt und Schienenverkehr – 14 %

---

<sup>391</sup> Vgl. Krail et al. (2019) Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr, S. 102–104.

<sup>392</sup> Vgl. Krail et al. (2019) Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr, S. 105–107.

<sup>393</sup> Vgl. Krail et al. (2019) Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr, S. 134.

<sup>394</sup> Vgl. Krail et al. (2019) Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr, S. 142.

<sup>395</sup> Vgl. Krail et al. (2019) Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr, S. 105–106.

<sup>396</sup> 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:<sup>397</sup>

- 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, Binnenschiffahrt 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 Betriebskosten<sup>398</sup>. 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.<sup>399</sup> 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 können<sup>400</sup>. KRAIL et al. bestimmten im Gegensatz dazu über die Marktpenetrationen, welche Einsparungen für alle Autos (autonom und nicht autonom) für eine Kategorie möglich sind<sup>401</sup>. 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 Reduktionspotentiale<sup>402</sup>. Die Mehrheit der Experten geht von einer Reduktion um 90 % aus<sup>403</sup>. Diese

<sup>397</sup> Vgl. Bösch et al. (2018) Cost-based analysis of autonomous mobility services, S. 83.

<sup>398</sup> Vgl. Holzhey et al. (2014) Revision der Regionalisierungsmittel.

<sup>399</sup> Vgl. Holzhey et al. (2014) Revision der Regionalisierungsmittel, S. 16.

<sup>400</sup> Vgl. Bösch et al. (2018) Cost-based analysis of autonomous mobility services, S. 76.

<sup>401</sup> Vgl. Krail et al. (2019) Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr, S. 140–141.

<sup>402</sup> Vgl. Litman (2019) Autonomous Vehicle Implementation Predictions, S. 9–10.

<sup>403</sup> 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 %<sup>404</sup>.

### 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“<sup>405</sup>. Annahmen zum Modal Split wurden aus der Studie „An integrated Perspective on the future of mobility: Part 3“ übernommen<sup>406</sup>. 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.

---

<sup>404</sup> Vgl. Litman (2019) Autonomous Vehicle Implementation Predictions, S. 9–10.

<sup>405</sup> Vgl. Kral et al. (2019) Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr, 76ff.

<sup>406</sup> 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 ")<sup>407</sup>

| Kategorien                 | Entwicklungstendenz                                  |
|----------------------------|--|
| <b>PKW</b>                 |  |
| <b>Verkehrsaufkommen</b>   | Geht zurück  |
| <b>Fahrleistung</b>        | Nimmt zu   |
| <b>Anzahl an Wegen</b>     | Steigt wenig   |
| <b>Verkehrsfluss</b>       | Reduktion durch Sharing und autonomes Parken         |
| <b>ÖPNV</b>                |  |
| <b>Verkehrsaufkommen</b>   | steigt   |
| <b>Fahrleistung</b>        | Steigt aufgrund von mehr Punkt-zu-Punkt Verbindungen |
| <b>Relevanz Kleinbusse</b> | Steigt   |
| <b>Relevanz Stadtbusse</b> | Konstant   |
| <b>Verkehrsfluss</b>       | 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.

<sup>407</sup> 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")<sup>408</sup>

| Kategorien                             | Entwicklungstendenz                                    |
|--|--|
| <b>City-Logistik</b>                   |  |
| <b>Verkehrsaufkommen</b>               | Steigt   |
| <b>Fahrleistung</b>                    | Nimmt leicht ab  |
| <b>Relevanz kleiner Nutzfahrzeuge</b>  | Steigt an  |
| <b>Relevanz schwerer Nutzfahrzeuge</b> | Geht zurück  |
| <b>Fernverkehr</b>                     |  |
| <b>Verkehrsaufkommen</b>               | Rückläufig (durch gemeinschaftliche Lade- raumnutzung) |
| <b>Fahrleistung</b>                    | ansteigend   |
| <b>Relevanz kleiner Nutzfahrzeuge</b>  | rückläufig   |
| <b>Relevanz schwerer Nutzfahrzeuge</b> | Leicht ansteigend                                      |

### Das Verkehrsaufkommen

HANNON et al. folgend wächst die Verkehrsleistung im Personenverkehr bis 2030 um 30 % im Vergleich zur Ausgangssituation 2017.<sup>409</sup> Zum Vergleich wird in RENEWBILITY davon ausgegangen, dass sich die Verkehrsleistung bis 2030 um 12 % erhöht.<sup>410</sup> 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

<sup>408</sup> in Anlehnung an Kral et al. (2019) Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr, S. 81.

<sup>409</sup> Vgl. Hannon et al. (2019) An integrated perspective on the future of mobility, part 3, S. 8.

<sup>410</sup> Vgl. Zimmer et al. (2016) Renewbility 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.<sup>411</sup>

Im Güterverkehr steigt bei gleichbleibender Fahrleistung die Verkehrsleistung durch höhere Auslastungen der Fahrzeuge an. Die Auslastungsgrade werden durch geteilte Fahrzeugkonzepte erhöht.<sup>412</sup> 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.<sup>413</sup>

### 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 Einstiegsvorgänge zurück<sup>414</sup>. Durch die zunehmende Digitalisierung und mobiles Bezahlsystem können diese Wartezeiten eingespart werden. Weitere Reduktionspotentiale bestehen durch die Analyse der Fahrgastströme und einer einhergehenden Reduktion der Wartezeiten zwischen den Verkehrsmitteln auf intermodalen Reisen<sup>415</sup>. 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.<sup>416</sup>

### 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

---

<sup>411</sup> Vgl. Krail et al. (2019) Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr, S. 430.

<sup>412</sup> Vgl. Krail et al. (2019) Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr, S. 142.

<sup>413</sup> Vgl. Krail et al. (2019) Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr, S. 144.

<sup>414</sup> Vgl. Hasse et al. (2017) Digital mobil in Deutschlands Städten, S. 19.

<sup>415</sup> Vgl. Hasse et al. (2017) Digital mobil in Deutschlands Städten, S. 34.

<sup>416</sup> 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:<sup>417</sup>

- 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 zurückgeht<sup>418</sup>.

### **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:<sup>419</sup>

- 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 Schnittstell zur Verbindung zwischen Pod und Carrier muss an beiden Gefäßern 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 anderseits 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

<sup>417</sup> Vgl. Krail et al. (2019) Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr, S. 142.

<sup>418</sup> Vgl. Krail et al. (2019) Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr, S. 142.

<sup>419</sup> 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.

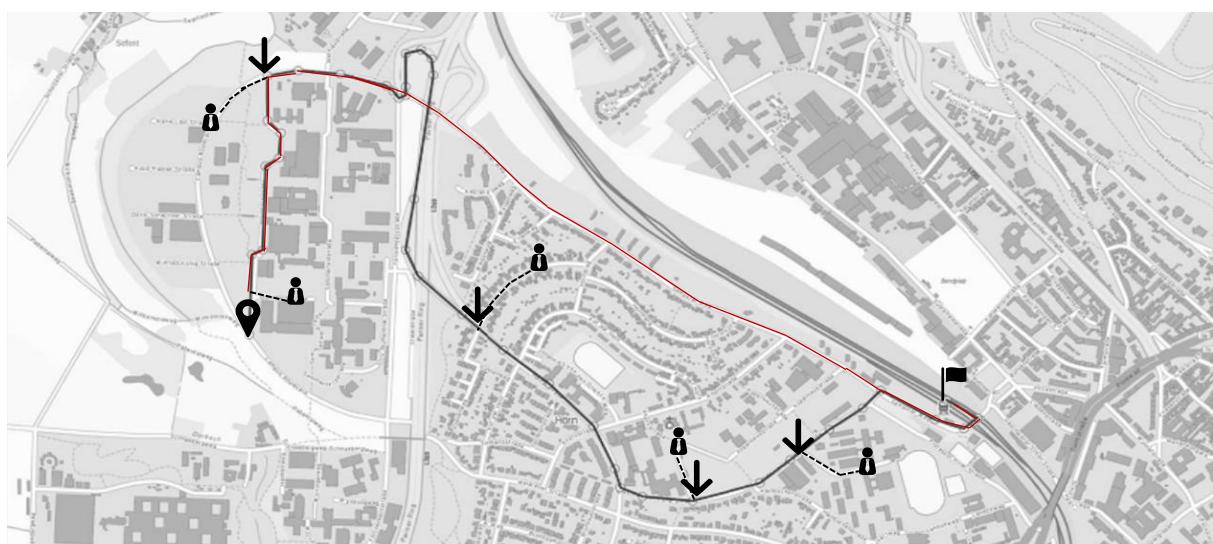


Abbildung 6-13 - Dynamische Haltestellen<sup>420</sup>

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.

<sup>420</sup> 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 Fahrzeugs an<sup>421</sup>. 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.<sup>422</sup> 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 m<sup>423</sup> 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

---

<sup>421</sup> Vgl. Uber UberPool.

<sup>422</sup> Durch die Zunahme an Stopps und den längeren Ein- und Ausstiegszeiten wird für die straßen gebundenen Big Pods eine längere Fahrzeit von 15 % angenommen und die Wartezeit um 10 % im Vergleich zum Pod Small erhöht.

<sup>423</sup> 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 Schienenskateboard (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. Frachtraum<sup>424</sup>. 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 ( $\cong$  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).

---

<sup>424</sup> 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 <sup>425</sup> | Kosten pro Pkm |
|-------------------------------|-------------------------------------|----------------|
| <b>Straße</b>                 |                                     |                |
| <b>Small Pod</b>              | 18 % <sup>426</sup>                 | 0,25           |
| <b>Big Pod</b>                | 14 % <sup>427</sup>                 | 0,07           |
| <b>Schiene<sup>428</sup></b>  |                                     |                |
| <b>Nahverkehr: Small Pod</b>  | 11 %                                | 0,40           |
| <b>Nahverkehr: Big Pod</b>    | 11 %                                | 0,10           |
| <b>Fernverkehr: Small Pod</b> | 11 %                                | 0,20           |
| <b>Fernverkehr: Big Pod</b>   | 11 %                                | 0,05           |
| <b>Einheit</b>                | %                                   | 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 <sup>429</sup> | Kosten pro Tkm |
|------------------------|-------------------------------------|----------------|
| <b>Straße</b>          |                                     |                |
| <b>Cargo Small Pod</b> | 14 % <sup>430</sup>                 | 0,68           |
| <b>Cargo Big Pod</b>   | 10 % <sup>431</sup>                 | 0,10           |
| <b>Einheit</b>         | %                                   | Euro/Tkm       |

<sup>425</sup> Gibt den Anteil der Anschaffungskosten an den Vollkosten wieder.

<sup>426</sup> Annahme des Autors basierend auf den anderen Anteilen.

<sup>427</sup> Annahme des Autors aufgrund der Vergleichbarkeit mit der Kostenstruktur beim Bus.

<sup>428</sup> Für den Schienenverkehr wird angenommen, dass der Anteil der Anschaffungskosten an den Vollkosten für den Nah- und Fernverkehr gleich ist.

<sup>429</sup> Gibt den Anteil der Anschaffungskosten an den Vollkosten wieder.

<sup>430</sup> Annahme des Autors basierend auf den anderen Anteilen.

<sup>431</sup> 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 <sup>432</sup> | Kosten pro Tkm |
|-------------------------------------|-------------------------------------|----------------|
| <b>Schiene<sup>433</sup></b>        |                                     |                |
| <b>Nahverkehr: Cargo Small Pod</b>  | 11 %                                | 0,90           |
| <b>Nahverkehr: Cargo Big Pod</b>    | 11                                  | 0,21           |
| <b>Fernverkehr: Cargo Small Pod</b> | 11 %                                | 0,50           |
| <b>Fernverkehr: Cargo Big Pod</b>   | 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 Tonnen<sup>434</sup>) 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 werden<sup>435</sup>, 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.<sup>436</sup> Die ökologischen Daten (Personenverkehr) für den Pod ergeben sich somit zu den in Tabelle 6-18 dargestellten Werten:

<sup>432</sup> Gibt den Anteil der Anschaffungskosten an den Vollkosten wieder.

<sup>433</sup> Für den Schienenverkehr wird angenommen, dass der Anteil der Anschaffungskosten an den Vollkosten für den Nah- und Fernverkehr gleich ist.

<sup>434</sup> Vgl. Umweltbundesamt Österreich (2018) Emissionskennzahlen Datenbasis 2017, S. 1.

<sup>435</sup> Vgl. Deutsche Bahn (2019) Integrierter Bericht 2018, S. 138.

<sup>436</sup> Vgl. Deutsche Bahn (2019) Integrierter Bericht 2018, 117, 123.

Tabelle 6-18 - Kennzahlen des Personenverkehr Pods

| Kategorien                    | THG                        | NOx                   | PM                  | Energieverbrauch |
|-------------------------------|----------------------------|-----------------------|---------------------|------------------|
| <b>Straße</b>                 |                            |                       |                     |                  |
| <b>Small Pod</b>              | 47,29                      | 0,12                  | 0,14                | 0,61             |
| <b>Big Pod</b>                | 34,30                      | 0,13                  | 0,01                | 0,46             |
| <b>Schiene</b>                |                            |                       |                     |                  |
| <b>Nahverkehr: Small Pod</b>  | 51,88                      | 0,01                  | 0,00                | 2,01             |
| <b>Nahverkehr: Big Pod</b>    | 12,45                      | 0,00                  | 0,00                | 0,48             |
| <b>Fernverkehr: Small Pod</b> | 36,38                      | 0,01                  | 0,00                | 1,42             |
| <b>Fernverkehr: Big Pod</b>   | 8,73                       | 0,00                  | 0,00                | 0,33             |
| <b>Einheit</b>                | $\frac{g\ CO_{2-eq}}{Pkm}$ | $\frac{g\ NO_x}{Pkm}$ | $\frac{g\ PM}{Pkm}$ | $\frac{MJ}{Pkm}$ |

Die Kennzahlen für den Cargo Pod sind in Tabelle 6-19 dargestellt.

Tabelle 6-19 - Kennzahlen des Güterverkehr Pods

| Kategorien                          | THG                        | NOx                   | PM                  | Energieverbrauch |
|-------------------------------------|----------------------------|-----------------------|---------------------|------------------|
| <b>Straße</b>                       |                            |                       |                     |                  |
| <b>Cargo Small Pod</b>              | 86,06                      | 0,18                  | 0,00                | 1,14             |
| <b>Cargo Big Pod</b>                | 21,17                      | 0,4                   | 0,00                | 0,29             |
| <b>Schiene</b>                      |                            |                       |                     |                  |
| <b>Nahverkehr: Cargo Small Pod</b>  | 103,76                     | 0,02                  | 0,00                | 4,04             |
| <b>Nahverkehr: Cargo Big Pod</b>    | 23,95                      | 0,00                  | 0,00                | 0,47             |
| <b>Fernverkehr: Cargo Small Pod</b> | 72,76                      | 0,02                  | 0,00                | 2,83             |
| <b>Fernverkehr: Cargo Big Pod</b>   | 16,79                      | 0,00                  | 0,00                | 0,65             |
| <b>Einheit</b>                      | $\frac{g\ CO_{2-eq}}{Tkm}$ | $\frac{g\ NO_x}{Tkm}$ | $\frac{g\ PM}{Tkm}$ | $\frac{MJ}{Tkm}$ |

### **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. Vergleicht 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 Tagesbevölkerung<sup>437</sup> in Aachen die Anzahl an Fahrten je Stunde und mithilfe dieser die notwendige Anzahl an Pods bestimmt. Es wird angenommen, dass durch die

---

<sup>437</sup> 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 Spurze 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.<sup>438</sup> In Kombination mit der Tagesbevölkerung in Aachen (270.000 Personen)<sup>439</sup> und der durchschnittlichen Anzahl von Fahrten pro Tag (3,1 Wege pro Person und Tag)<sup>440</sup> 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)<sup>441</sup> 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.

---

<sup>438</sup> Vgl. Bösch et al. (2018) Cost-based analysis of autonomous mobility services, S. 88–89.

<sup>439</sup> Vgl. Landesbetrieb Information und Technik Nordrhein-Westfalen (IT.NRW) (2017) Pendleratlas NRW.

<sup>440</sup> Vgl. Nobis et al. (2018) Mobilität in Deutschland - 2018, S. 3.

<sup>441</sup> 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 Schwerpunktfragestellungen

#### 7.1.1 Reduziert sich die Transferzeit durch Pod-basierte Mobilität?

Die Transferzeit besteht aus zwei Teilespekten. 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.

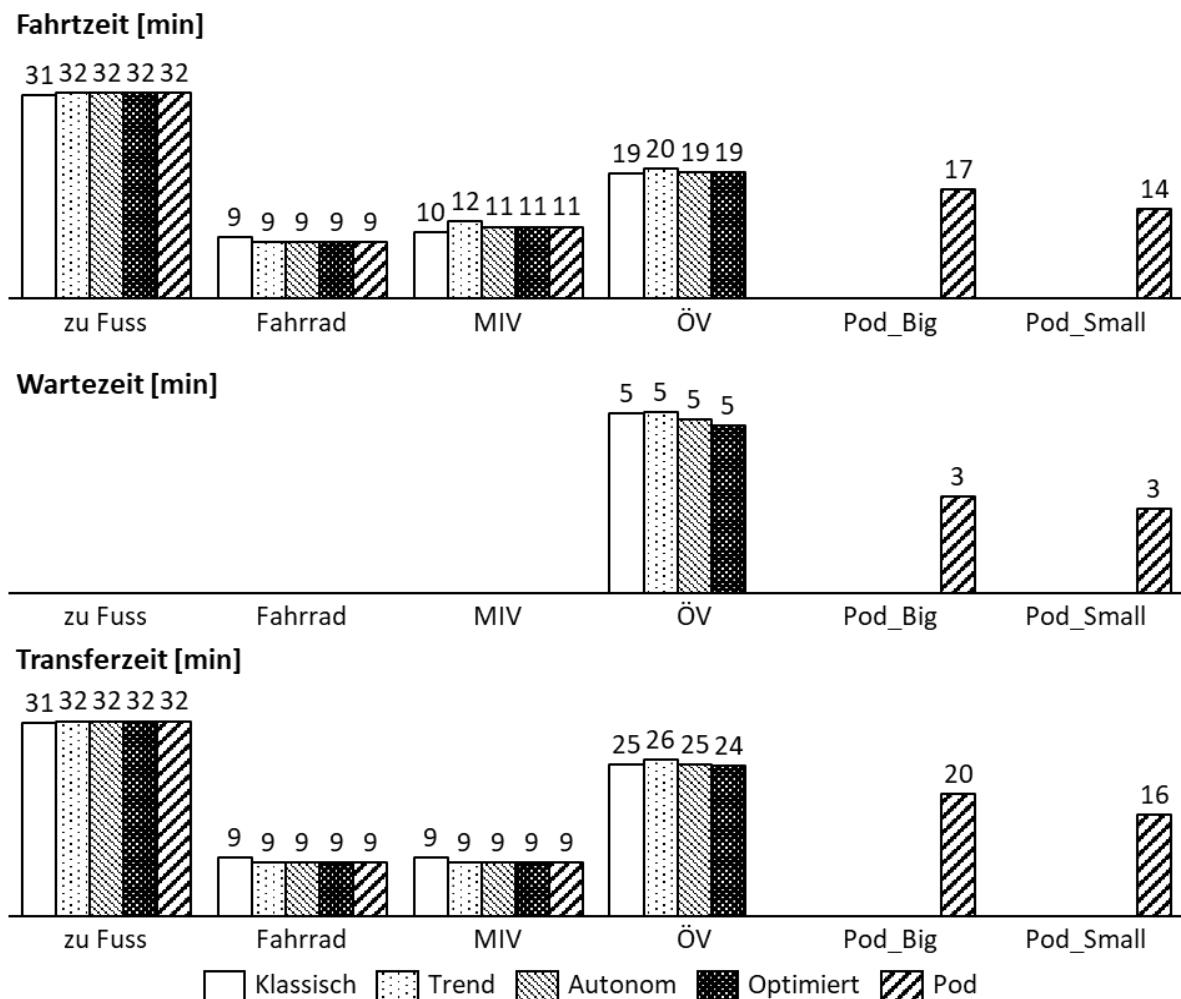


Abbildung 7-1 - Entwicklung der Fahrt-, Warte- und Transferzeit (UK)

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.<sup>442</sup> Im Vergleich zum MIV ergeben sich zeitliche Einsparungen i.H.v. 25 min (bezogen auf die Transferzeit).

<sup>442</sup> Vergleich zwischen dem PMM und OMM Szenario.

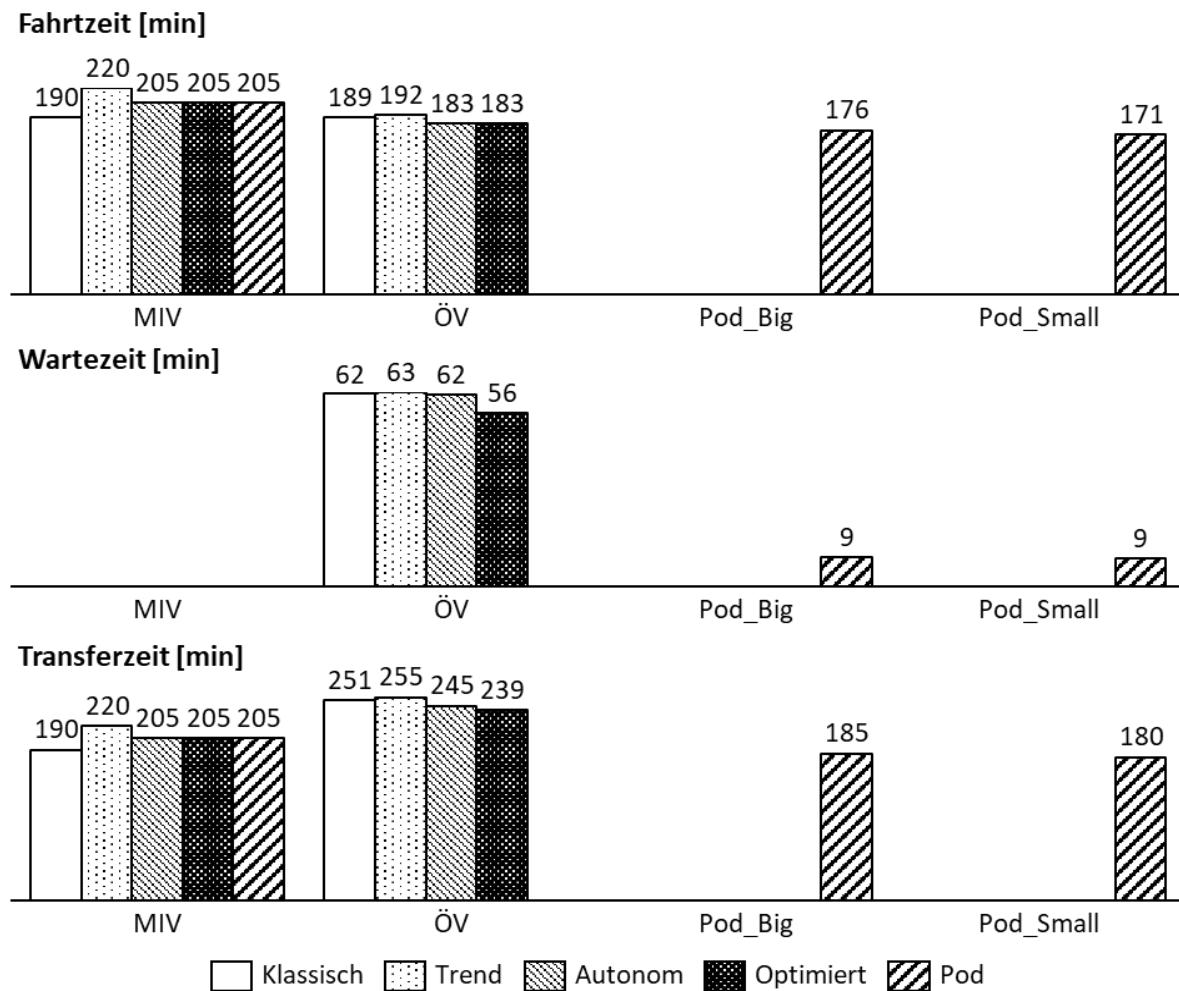


Abbildung 7-2 - Entwicklung der Fahrt-, Warte- und Transferzeit (I)

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 Verkehr<sup>443</sup> 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.

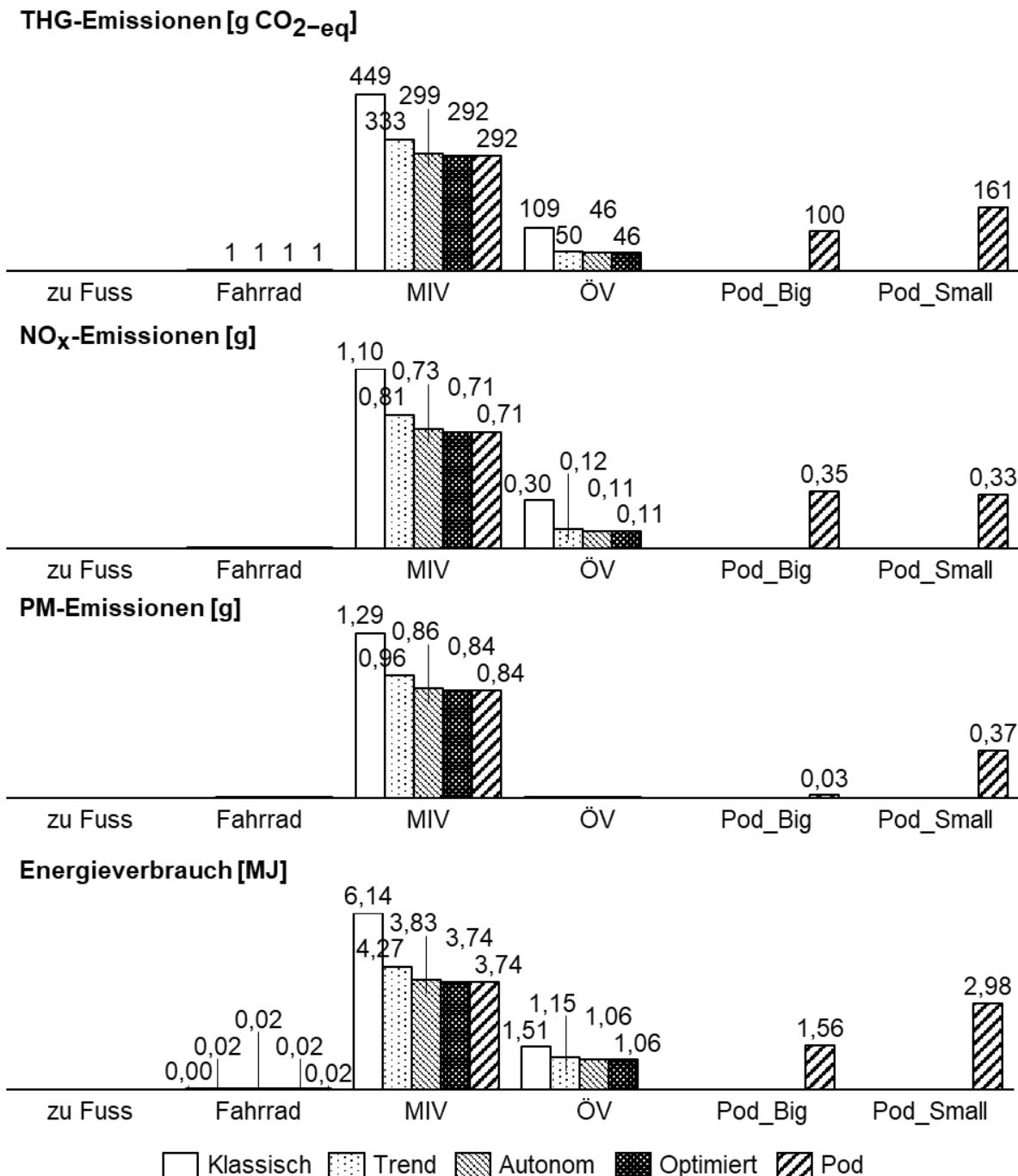
Mit Blick auf die Ausgangsfragestellung ist festzustellen, dass der Pod auf allen Strecken zu den übrigen Verkehrsmitteln zumindest konkurrenzfähig ist. Mit zunehmender Streckenlänge verringert sich der zeitliche Nachteil zunächst (UK, UL) und wandelt sich ab einer Streckenlänge von ungefähr 200 km zu 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 Pods<sup>444</sup>.

<sup>443</sup> Der Luftverkehr wird nicht direkt durch den Pod angebunden. Zum Wechsel müssen die Passagiere aussteigen und über den Zwischenstopp eines Flughafens ins Flugzeug wechseln.

<sup>444</sup> 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<sub>x</sub>-Emissionen weist der große Pod höhere Emissionen auf, da Busse (als für die Berechnung des großen Pods zugrunde liegendes Verkehrsmittel) höhere spezifische NO<sub>x</sub>-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.

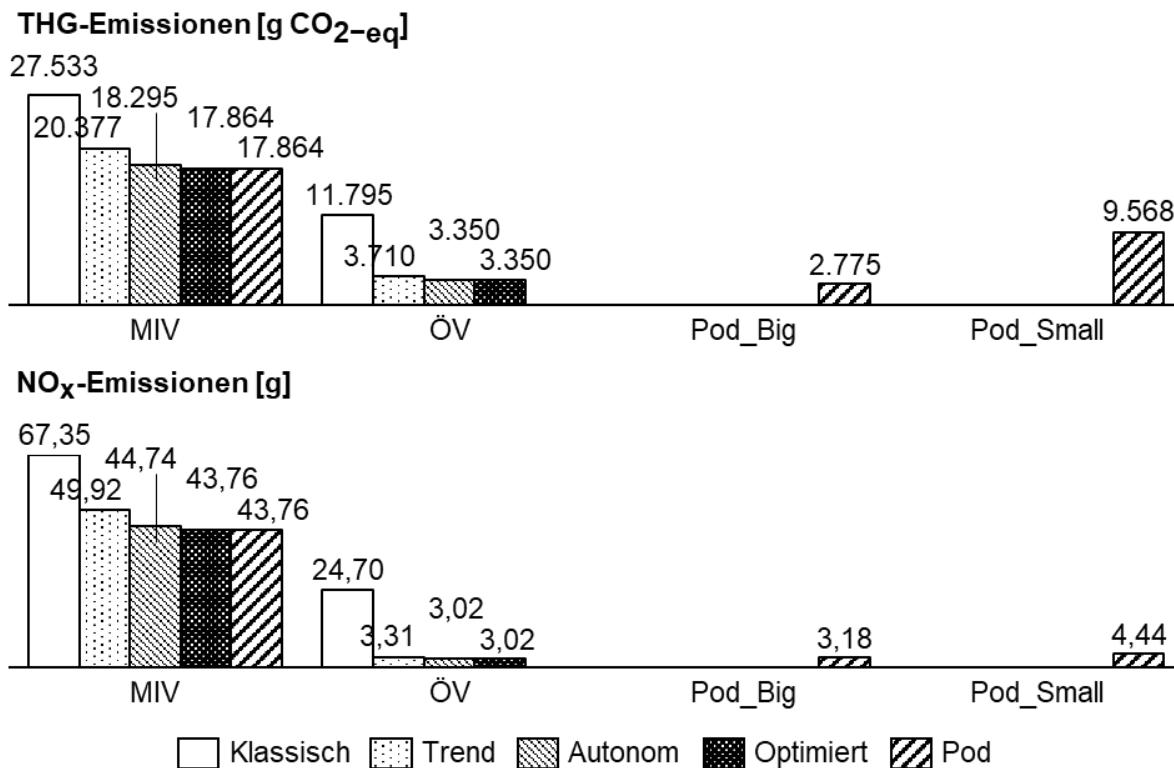


Abbildung 7-4 - Entwicklung der ökologischen Dimension - Teil 1 (I)

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<sub>x</sub>-Emissionen auf. Bei dem Energieverbrauch sind die Werte, analog zum Streckentyp „Urban-Kurzstrecke“, durch die geringen Personendichte zu erklären<sup>445</sup>.

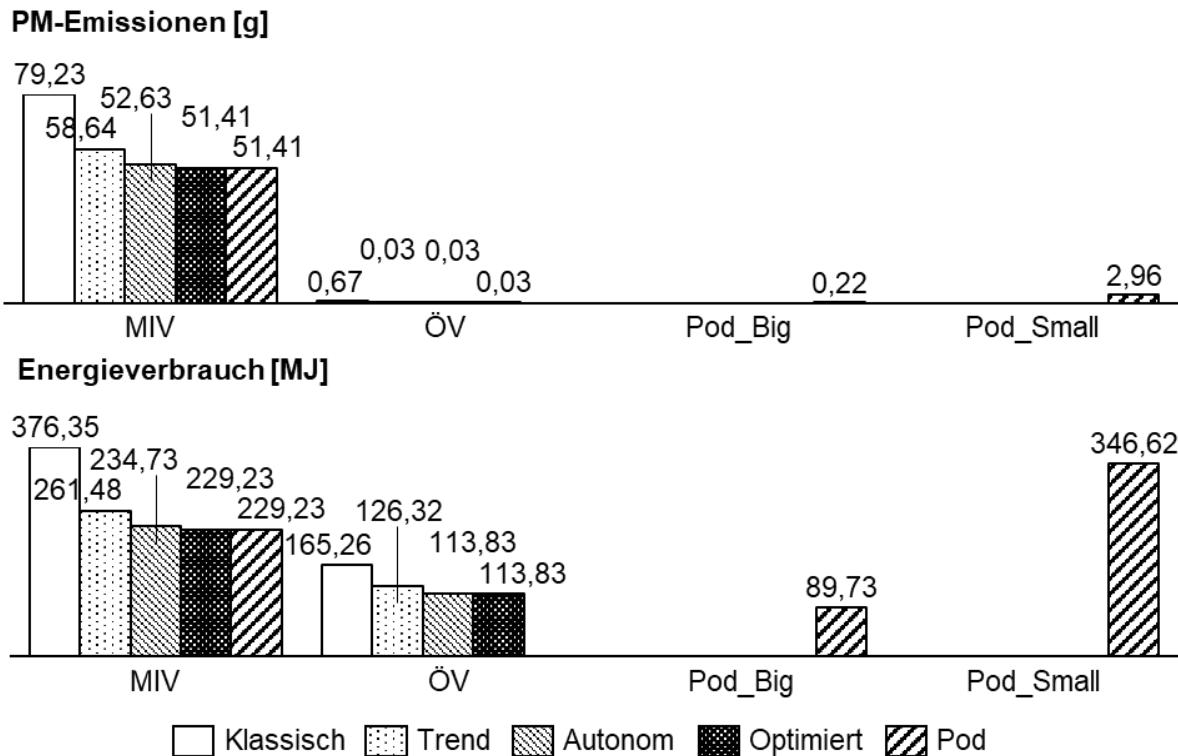


Abbildung 7-5 - Entwicklung der ökologischen Dimension - Teil 2 (I)

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.

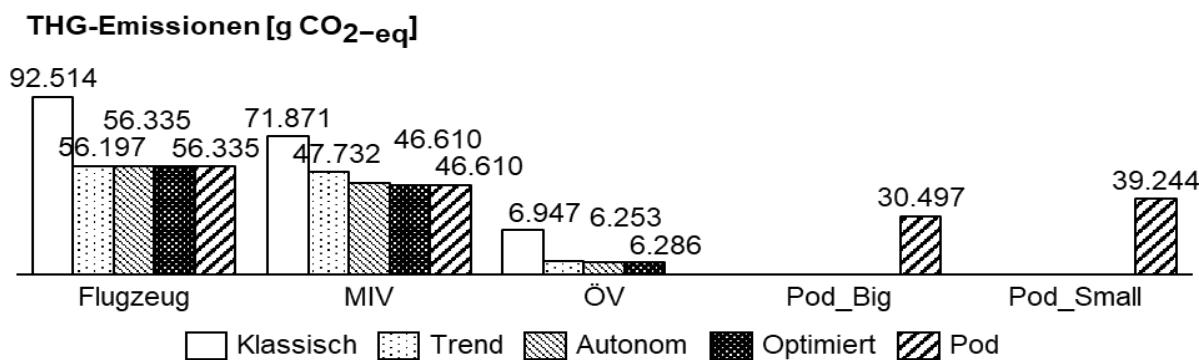


Abbildung 7-6 - Entwicklung der THG-Emissionen (L)

<sup>445</sup> 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 umweltfreundlicher<sup>446</sup> 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.

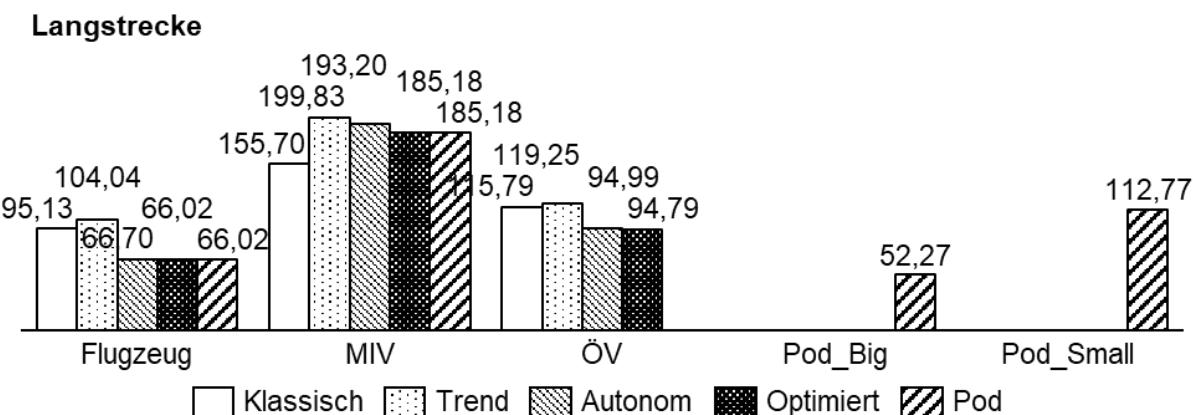


Abbildung 7-7 - Die Entwicklung der Kosten für alle Streckentypen (Teil 1)<sup>447</sup>

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

<sup>446</sup> Mit Hinsicht auf die betrachteten Indikatoren.

<sup>447</sup> 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.

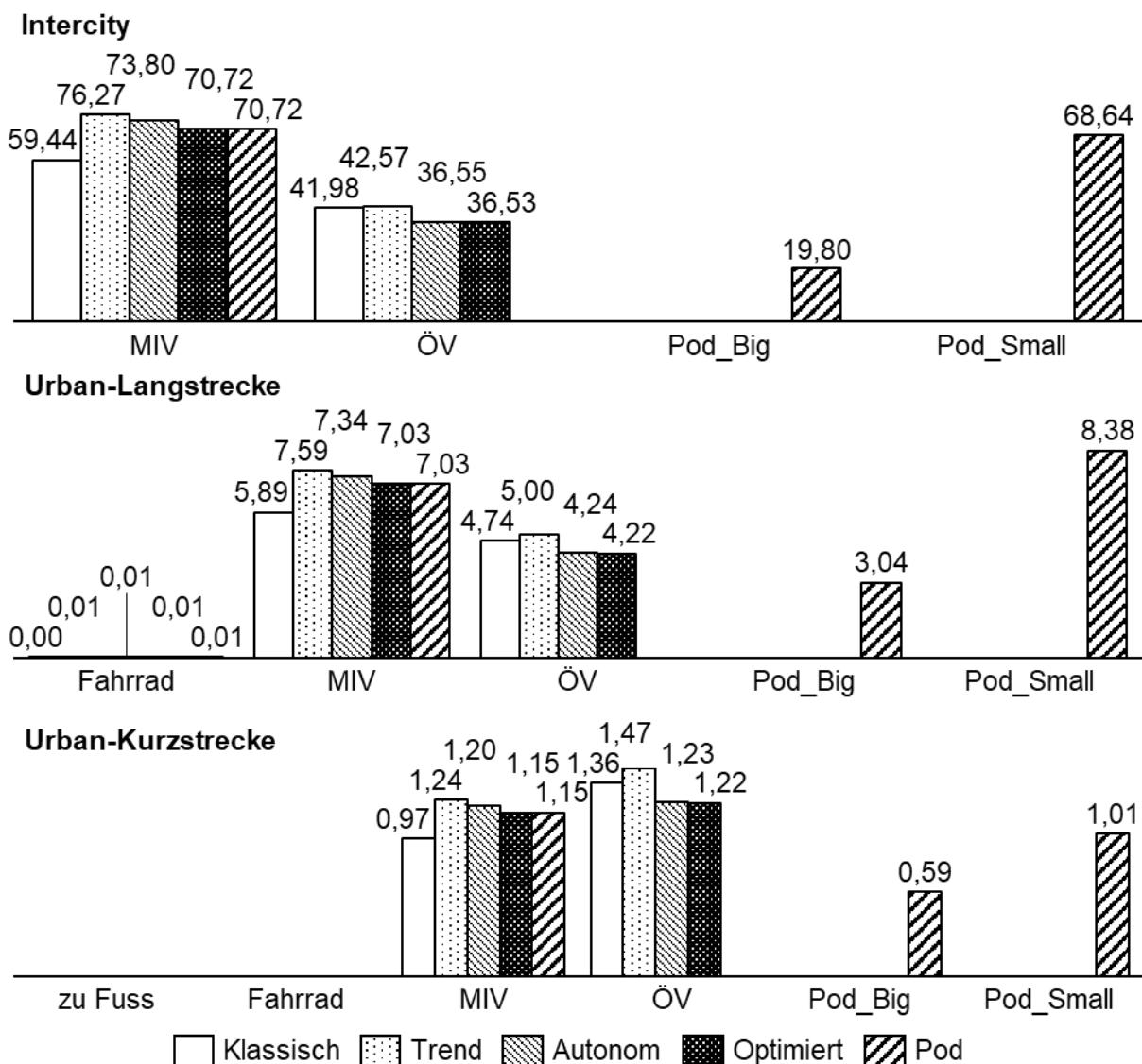


Abbildung 7-8 - Die Entwicklung der Kosten für alle Streckentypen (Teil 2)

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 MIV<sup>448</sup>.

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-Verekehr (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, verbrunden mit den längeren Distanzen auf der Schiene, nur geringfügig höher ist. Ein analoges Bild ergibt sich für den Güterfernverkehr.

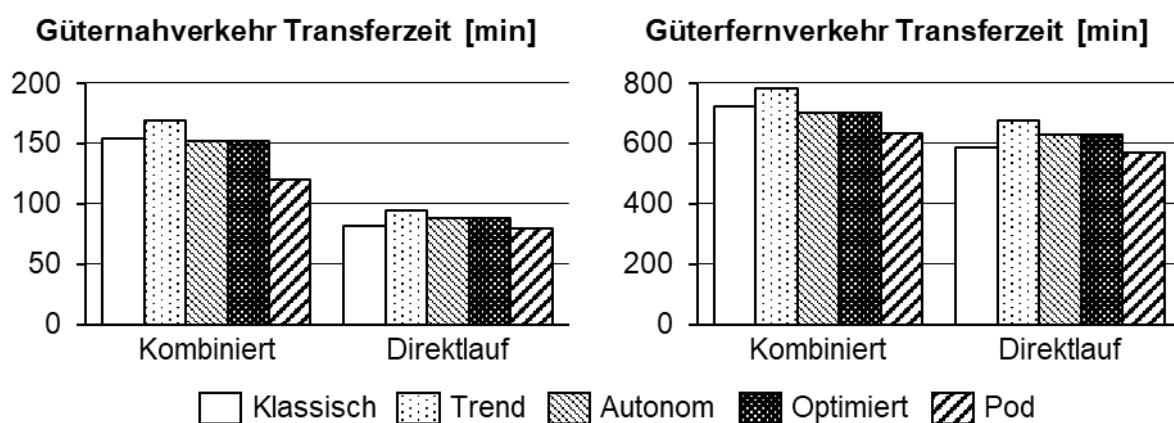


Abbildung 7-9 - Entwicklung der Transferzeiten im Güterverkehr

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-Emissionen werden um mehr als die Hälfte reduziert. Lediglich

<sup>448</sup> 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).

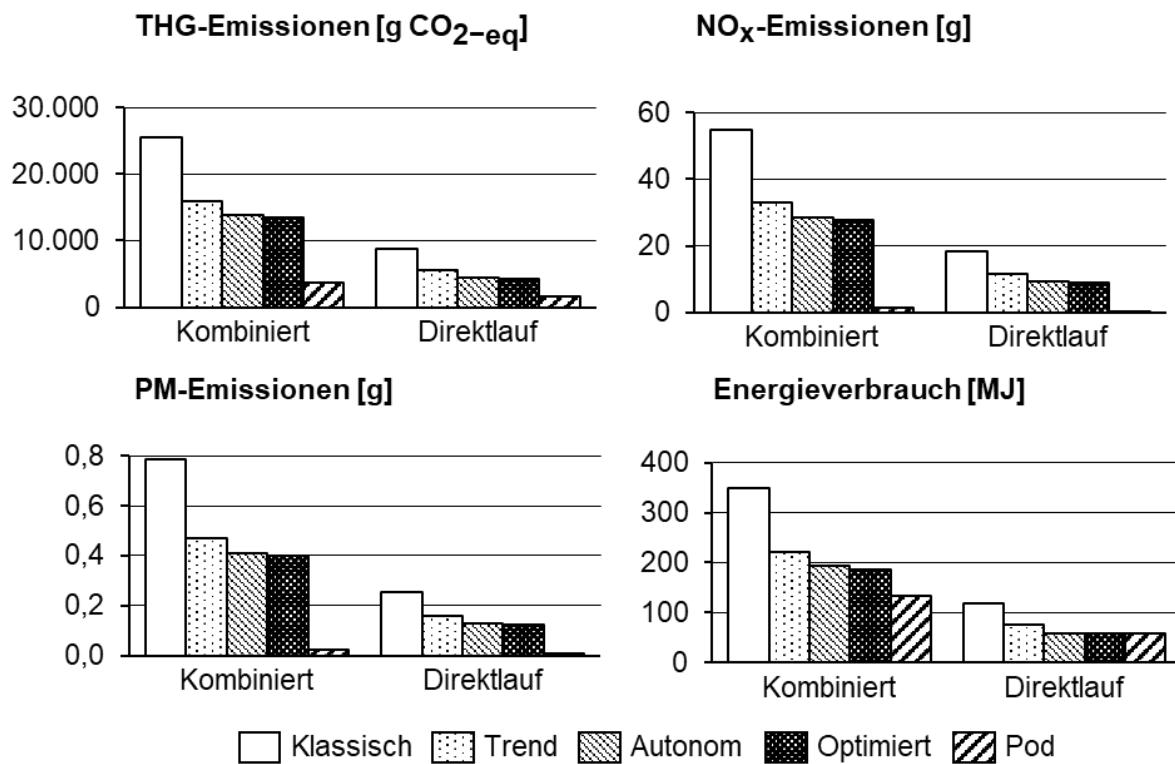


Abbildung 7-10 - Entwicklung der ökologischen Dimension im Güternahverkehr

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.

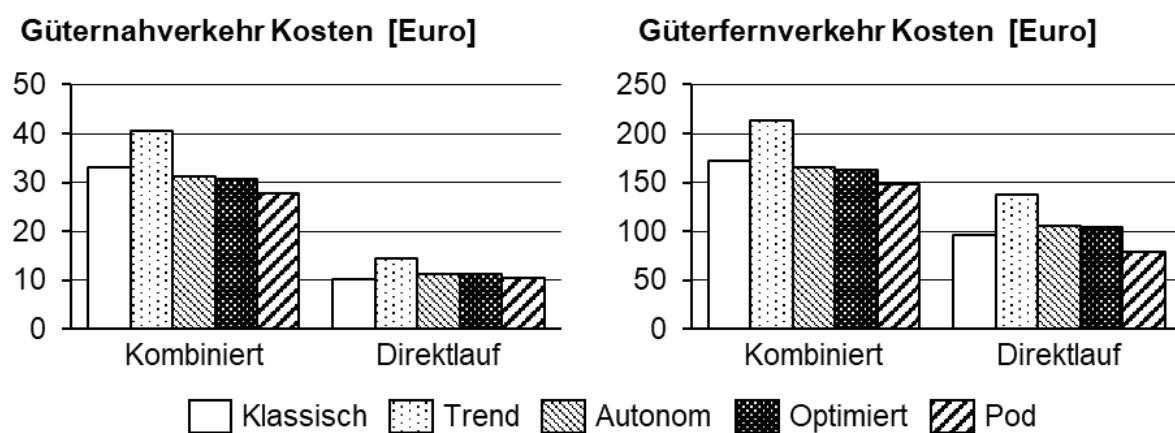


Abbildung 7-11 - Entwicklung der Kosten im Güterverkehr

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 schienengebundenen 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.

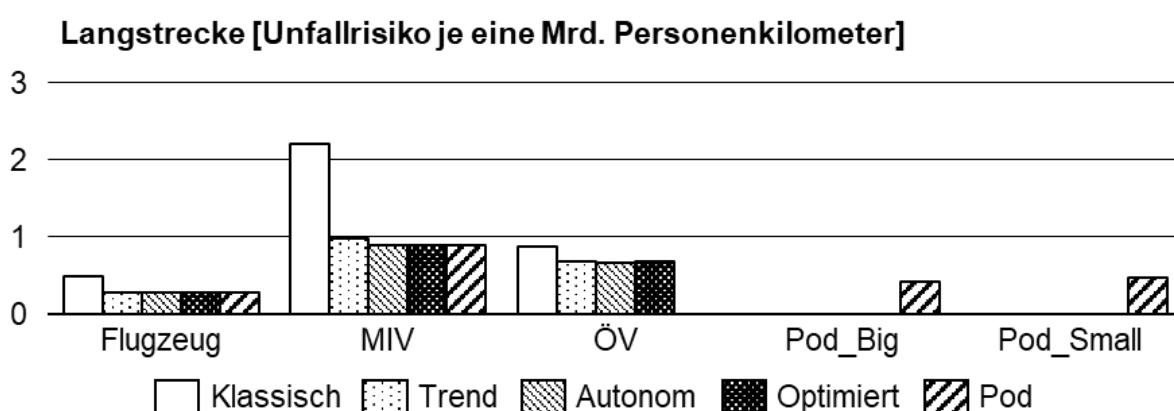


Abbildung 7-12 - Entwicklung des Unfallrisikos (Teil 1)

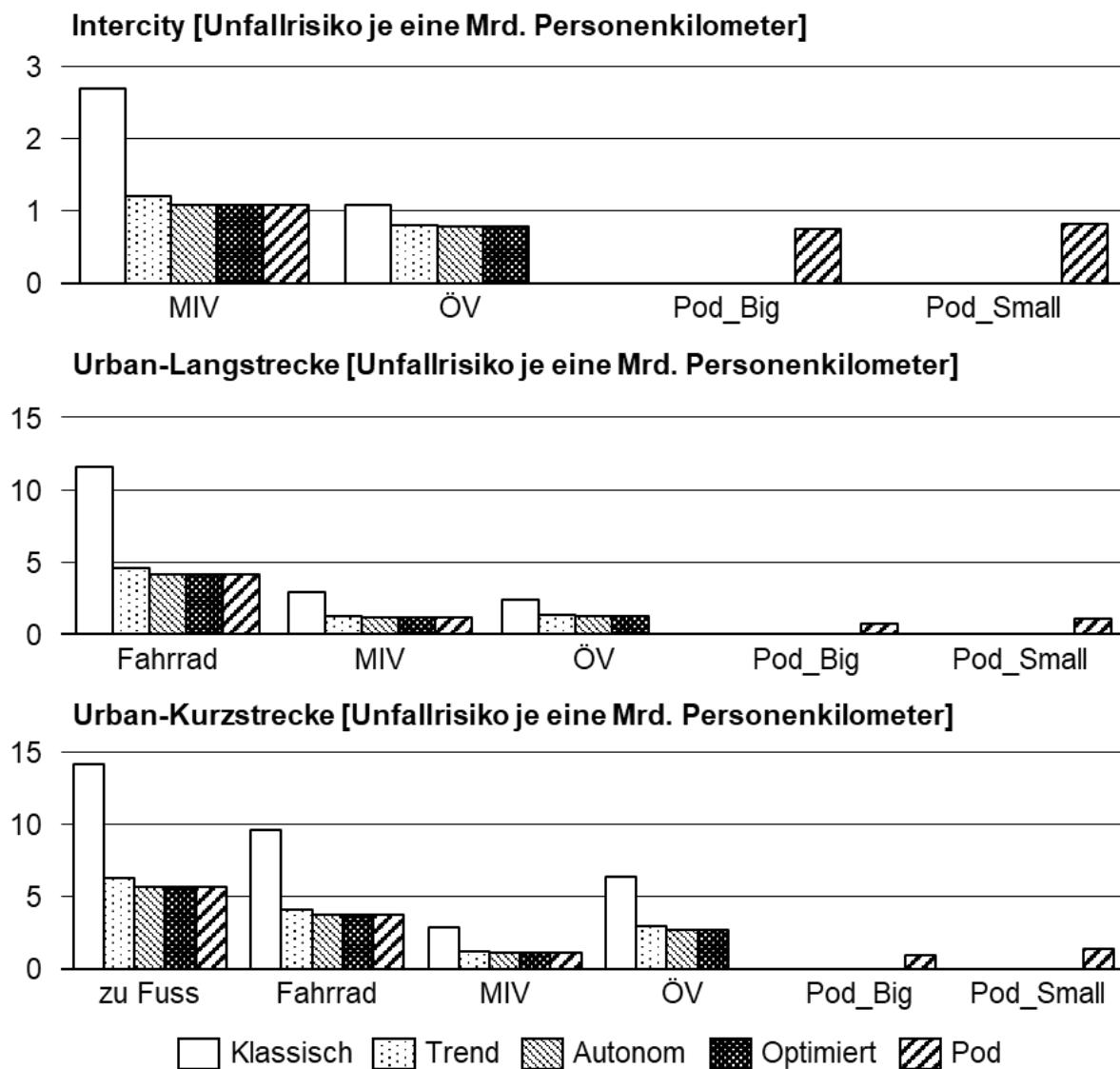


Abbildung 7-13 - Entwicklung des Unfallrisikos (Teil 2)

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 Zugangspunkten 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-Modell<sup>449</sup> mit den Pods aufgestellt werden<sup>450</sup>. 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.

---

<sup>449</sup> MatSim ist ein Tool um Agenten basiert die Mobilität innerhalb von Städten abzubilden.

<sup>450</sup> 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-fahrzeug/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 (Trasnport, Health and Enviorment) 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.; Bickle, 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.; Mausa, 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.; Nauckler, 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.; Mittleman, 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.; Fellhofer, 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 Bevölkerungs-Umfrage , 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 Unternehmungsplanung . 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; Motschall, 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.; Knupfer, 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. Aufl. München: Pantheon, 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 Aufl. 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 Wübbenhörst, 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 "(TREMOD, 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 Kraftfahrzeughängern 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/Statis-tik/Fahrzeuge/Bestand/b\\_jahresbilanz.html?nn=644526](https://www.kba.de/DE/Statis-tik/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.; Mönnig, 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 wolrd):**

Urban wolrd: 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, Northhampton, 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 Zukunftsinstut, 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). Copenhagen, 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 (Sudien zur Transport- und Logistikbranche):**

Sudien 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/Verkehrsunfall/\\_inhalt.html](https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Verkehrsunfall/_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 upwads. It is not a question of it, but when . London, 2018

**Timo StukenbergLeihfahrräder 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 Deparment 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-Zukunftsstudie 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 Online-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. (Renewbility 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. (Renewbility II Szenario für einen anspruchsvollen Klimaschutzbeitrag des Verkehrs):**

Weiterentwicklung des Analyseinstruments Renewbility. Renewbility 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 <sup>451</sup> | MiD 2008 <sup>452</sup> | MiD 2017 <sup>453</sup> |
|---------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Zu Fuß        | 22                      | 23                      | 22                      |
| Fahrrad       | 9                       | 10                      | 11                      |
| MIV-Fahrer    | 48                      | 47                      | 43                      |
| MIV-Mitfahrer | 13                      | 12                      | 14                      |
| ÖV            | 9                       | 9                       | 10                      |

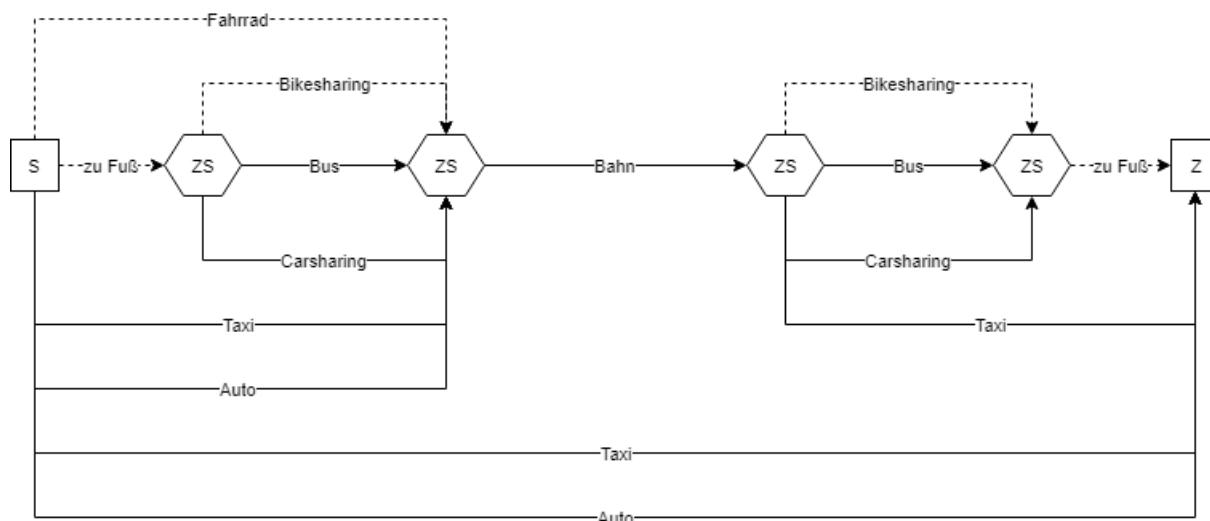
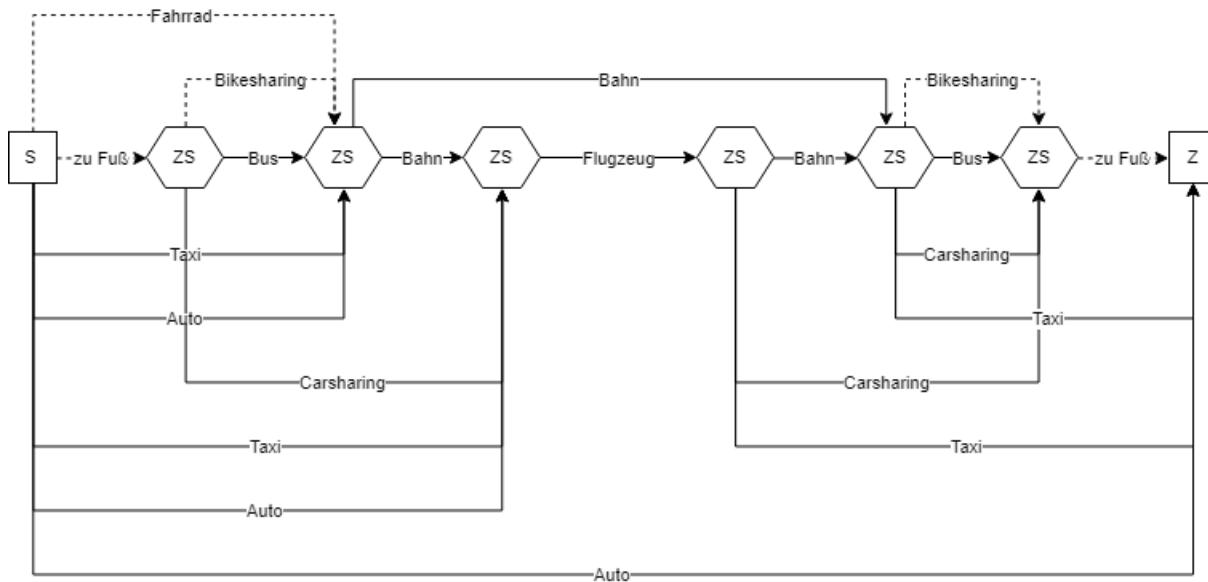


Abbildung A-1 - Referenzstrecke Personenverkehr Intercity

<sup>451</sup> Vgl. infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH et al. (2010) Mobilität in Deutschland, S. 22.

<sup>452</sup> Vgl. infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH et al. (2010) Mobilität in Deutschland, S. 22.

<sup>453</sup> 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             |
|-----------------|---------|----------------------------|------------------|--------------------|
| <b>Rad</b>      | 382     | DeSta-tista <sup>454</sup> | 40,9 Mrd.        | MID <sup>455</sup> |
| <b>MIV</b>      | 2073    | DeStatista                 | 950,4 Mrd.       | VIZ <sup>456</sup> |
| <b>Bus</b>      | 22      | DeStatista                 | 28,49 Mrd.       | VDV                |
| <b>Lkw</b>      | 167     | DeStatista                 | 491 Mrd.         | VIZ                |
| <b>Zu Fuß</b>   | 483     | DeStatista                 | 33,9 Mrd.        | MID                |
| <b>Tram</b>     | 30      | DeStatista                 | 17,71 Mrd.       | VDV <sup>457</sup> |
| <b>Zug</b>      | 179     | DeStatista                 | 225,7 Mrd.       | VIZ                |
| <b>Flugzeug</b> | 20      | Statista <sup>458</sup>    | 69,12 Mrd.       | VIZ                |

<sup>454</sup> Vgl. Statistisches Bundesamt (2018) Verkehrsunfälle Zeitreihen 2018, S. 15.

<sup>455</sup> Vgl. Nobis et al. (2018) Mobilität in Deutschland - 2018, S. 45–46.

<sup>456</sup> Vgl. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2019) Verkehr in Zahlen 18/19, S. 153.

<sup>457</sup> Vgl. Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V. (VDV) (2017) VDV-Statistik 2017, S. 29.

<sup>458</sup> Vgl. Statistisches Bundesamt (2018) Verkehrsunfälle Zeitreihen 2018, S. 350.

## Verbesserungsfaktoren

Die Herleitung der Verbesserungsfaktoren beruht für das Trendszenario aus drei Studien: Renewbility<sup>459</sup>, Shell Nutzfahrzeugstudie<sup>460</sup> und Shell Pkw Studie<sup>461</sup>. 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.<sup>462</sup> und SYSTRA<sup>463</sup> übernommen.

Die Verbesserungsfaktoren ergeben sich dabei aus den in den Studien angenommen 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, solang 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.

---

<sup>459</sup> Vgl. Zimmer et al. (2016) Renewbility III Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors.

<sup>460</sup> Vgl. Adolf et al. (2016) SHELL Nutzfahrzeug-Studie: Diesel, alternative Antriebe.

<sup>461</sup> Vgl. Adolf, Jörg et al. (2014) Shell PKW-Szenarien bis 2040.

<sup>462</sup> Vgl. Kral et al. (2019) Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr.

<sup>463</sup> Vgl. SYSTRA (2016) automated and autonomous public transport.

Tabelle A-3 - Verbesserungsfaktoren des spezifischen Energieverbrauchs

| Verkehrsmittel               | Trendszenario | Unregulierte<br>Autonome<br>Mobilität <sup>464</sup> | Optimierte<br>multimodale<br>Mobilität <sup>465</sup> | Pod-basierte<br>Mobilität <sup>466</sup> |
|------------------------------|---------------|--|---|--|
| <b>Bus</b>                   | 0,73          | 0,92   | 0,92  | 0,92                                     |
| <b>Tram</b>                  | 0,76          | 1,00   | 1,00  | 1,00                                     |
| <b>U-Bahn</b>                | 0,76          | 0,85   | 0,85  | 0,85                                     |
| <b>Zug-Nahverkehr</b>        | 0,76          | 0,90   | 0,90  | 0,90                                     |
| <b>MIV</b>                   | 0,60          | 0,97   | 0,90  | 0,97                                     |
| <b>Zug-Fernverkehr</b>       | 0,76          | 0,90   | 0,90  | 0,90                                     |
| <b>Flugzeug</b>              | 0,61          | 1,00   | 1,00  | 1,00                                     |
| <b>Leichte Nutzfahrzeuge</b> | 0,55          | 0,95   | 0,93  | 0,90                                     |
| <b>Lkw</b>                   | 0,55          | 0,85   | 0,83  | 0,85                                     |
| <b>Güterzug</b>              | 0,76          | 0,95   | 1,00  | 0,95                                     |
| <b>Binnenschiffe</b>         | 0,7           | 1,00   | 1,00  | 1,00                                     |

<sup>464</sup> Bezogen sind die Faktoren auf das Trendszenario.<sup>465</sup> Bezogen sind die Faktoren auf das Trendszenario.<sup>466</sup> Bezogen sind die Faktoren auf das Trendszenario.

**Tabelle A-4 - Verbesserungsfaktoren der spezifischen THG-Emissionen<sup>467</sup>**

| <b>Verkehrsmittel</b>        | <b>Trendszenario<sup>468</sup></b> | <b>Unregulierte Autonome Mobilität<sup>469470</sup></b> | <b>Optimierte multimodale Mobilität<sup>471</sup></b> | <b>Pod-basierte Mobilität<sup>472</sup></b> |
|------------------------------|------------------------------------|---|---|---|
| <b>Bus</b>                   | 0,73                               | 0,92  | 0,92  | 0,92  |
| <b>Tram</b>                  |                                    | 1,00  | 1,00  | 1,00  |
| <b>U-Bahn</b>                |                                    | 0,85  | 0,85  | 0,885                                       |
| <b>Zug-Nahverkehr</b>        |                                    | 0,90  | 0,90  | 0,90  |
| <b>MIV</b>                   | 0,64                               | 0,97  | 0,90  | 0,94  |
| <b>Zug-Fernverkehr</b>       |                                    | 0,90  | 0,90  | 0,90  |
| <b>Flugzeug</b>              | 0,61                               | 1,00  | 1,00  | 1,00  |
| <b>Leichte Nutzfahrzeuge</b> | 0,55                               | 0,95  | 0,93  | 0,93  |
| <b>Lkw</b>                   | 0,55                               | 0,85  | 0,83  | 0,83  |
| <b>Güterzug</b>              |                                    | 0,95  | 0,95  | 0,95  |
| <b>Binnenschiffe</b>         | 0,7                                | 1,00  | 1,00  | 1,00  |

<sup>467</sup> 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.

<sup>468</sup> Die Verbesserungsfaktoren für alle rein elektrisch angetriebenen Verkehrsmittel sind der Tabelle A-3 zu entnehmen.

<sup>469</sup> Bezogen sind die Faktoren auf das Trendszenario.

<sup>470</sup> Bezogen sind die Faktoren auf das Trendszenario.

<sup>471</sup> Bezogen sind die Faktoren auf das Trendszenario.

<sup>472</sup> Bezogen sind die Faktoren auf das Trendszenario.

Tabelle A-5 - Verbesserungsfaktoren der spezifischen NOx-Emissionen<sup>473</sup>

| Verkehrsmittel               | Trendszenario | Unregulierte<br>Autonome<br>Mobilität <sup>474</sup> | Optimierte<br>multimodale<br>Mobilität <sup>475</sup> | Pod-basierte<br>Mobilität <sup>476</sup> |
|------------------------------|---------------|--|---|--|
| <b>Bus</b>                   | 0,73          | 0,92   | 0,92  | 0,92                                     |
| <b>Tram</b>                  |               | 1,00   | 1,00  | 1,00                                     |
| <b>U-Bahn</b>                |               | 0,85   | 0,85  | 0,885                                    |
| <b>Zug-Nahverkehr</b>        |               | 0,90   | 0,90  | 0,90                                     |
| <b>MIV</b>                   | 0,64          | 0,97   | 0,90  | 0,94                                     |
| <b>Zug-Fernverkehr</b>       |               | 0,90   | 0,90  | 0,90                                     |
| <b>Flugzeug</b>              | 0,61          | 1,00   | 1,00  | 1,00                                     |
| <b>Leichte Nutzfahrzeuge</b> | 0,55          | 0,95   | 0,93  | 0,93                                     |
| <b>Lkw</b>                   | 0,55          | 0,85   | 0,83  | 0,83                                     |
| <b>Güterzug</b>              |               | 0,95   | 0,95  | 0,95                                     |
| <b>Binnenschiffe</b>         | 0,7           | 1,00   | 1,00  | 1,00                                     |

<sup>473</sup> 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.

<sup>474</sup> Bezogen sind die Faktoren auf das Trendszenario.

<sup>475</sup> Bezogen sind die Faktoren auf das Trendszenario.

<sup>476</sup> Bezogen sind die Faktoren auf das Trendszenario.

Tabelle A-6 - Verbesserungsfaktoren der spezifischen Feinstaub-Emissionen<sup>477</sup>

| Verkehrsmittel               | Trendszenario | Unregulierte<br>Autonome<br>Mobilität <sup>478</sup> | Optimierte<br>multimodale<br>Mobilität <sup>479</sup> | Pod-basierte<br>Mobilität <sup>480</sup> |
|------------------------------|---------------|--|---|--|
| <b>Bus</b>                   | 0,73          | 0,92   | 0,92  | 0,92                                     |
| <b>Tram</b>                  |               | 1,00   | 1,00  | 1,00                                     |
| <b>U-Bahn</b>                |               | 0,85   | 0,85  | 0,885                                    |
| <b>Zug-Nahverkehr</b>        |               | 0,90   | 0,90  | 0,90                                     |
| <b>MIV</b>                   | 0,64          | 0,97   | 0,90  | 0,94                                     |
| <b>Zug-Fernverkehr</b>       |               | 0,90   | 0,90  | 0,90                                     |
| <b>Flugzeug</b>              | 0,61          | 1,00   | 1,00  | 1,00                                     |
| <b>Leichte Nutzfahrzeuge</b> | 0,55          | 0,95   | 0,93  | 0,93                                     |
| <b>Lkw</b>                   | 0,55          | 0,85   | 0,83  | 0,83                                     |
| <b>Güterzug</b>              |               | 0,95   | 0,95  | 0,95                                     |
| <b>Binnenschiffe</b>         | 0,7           | 1,00   | 1,00  | 1,00                                     |

<sup>477</sup> 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.

<sup>478</sup> Bezogen sind die Faktoren auf das Trendszenario.

<sup>479</sup> Bezogen sind die Faktoren auf das Trendszenario.

<sup>480</sup> Bezogen sind die Faktoren auf das Trendszenario.

Tabelle A-7 - Verbesserungsfaktoren des spezifischen Unfallrisikos

| Verkehrsmittel        | Trendszenario | Unregulierte<br>Autonome<br>Mobilität <sup>481</sup> | Optimierte<br>multimodale<br>Mobilität <sup>482</sup> | Pod-basierte<br>Mobilität <sup>483</sup> |
|-----------------------|---------------|--|---|--|
| 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                                     |

<sup>481</sup> Bezogen sind die Faktoren auf das Trendszenario.<sup>482</sup> Bezogen sind die Faktoren auf das Trendszenario.<sup>483</sup> Bezogen sind die Faktoren auf das Trendszenario.

## Marktpenetrationen Autonomes Fahren

Tabelle A-8 - Marktpenetrationen in den autonomen Szenarien

| <b>Verkehrsmittel</b> | <b>Unregulierte autonomes Fahren<sup>484</sup></b> | <b>Optimierte multimodale Mobilität<sup>485</sup></b> |
|-----------------------|--|---|
| <b>Pkw</b>            | <b>36 %</b>  | <b>50 %</b>   |
| 1                     | 2 %  | 8 %   |
| 2                     | 0 %  | 1 %   |
| 3                     | 0 %  | 0 %   |
| 4                     | 28 %   | 34 %  |
| 5                     | 6 %  | 7 %   |
| <b>Lkw</b>            | <b>58 %</b>  | <b>57 %<sup>486</sup></b>                             |
| 1                     | 16 %   | 13 %  |
| 2                     | 0 %  | 0 %   |
| 3                     | 0 %  | 0 %   |
| 4                     | 0 %  | 2 %   |
| 5                     | 42 %   | 42 %  |
| <b>Busse</b>          | <b>73 %</b>  | <b>79%</b>  |
| 1                     | 15 %   | 8 %   |
| 2                     | 0 %  | 0 %   |

<sup>484</sup> Vgl. Kral et al. (2019) Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr, S. 114.

<sup>485</sup> Vgl. Kral et al. (2019) Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr, S. 119.

<sup>486</sup> Der relativ geringe Automatisierungsgrad für Lkw lässt sich auf die Zusammenführung von Lkws und leichten Nutzfahrzeugen zurückführen. Die leichten Nutzfahrzeuge sind laut KRAIL et Al. zu knapp 50 % automatisiert. Vgl. Kral 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 angenommen<sup>487</sup>
- 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 Euro<sup>488</sup>)
- Anschaffungskosten für die Kategorie Pod Big entsprechen den Kosten für einen Bus (225.000 Euro<sup>489</sup>) für einen Cargo Big Pod entsprechen diese einem Lkw (200.000 Euro<sup>490</sup>)
- Anschaffungskosten für den Schienen-Carrier (6.500.000 Euro<sup>491</sup>)
- Die Kosten pro Zug-km belaufen sich auf 14,56 Euro/Zug-km<sup>492</sup> 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.-km<sup>493</sup>
- Die Auslastung des Cargo Small Pod wird dabei auf 1,5 Tonnen und des Cargo Big Pods auf 13 Tonnen<sup>494</sup>

<sup>487</sup> Vgl. Bösch et al. (2018) Cost-based analysis of autonomous mobility services, S. 79.

<sup>488</sup> Vgl. Bösch et al. (2018) Cost-based analysis of autonomous mobility services, S. 78.

<sup>489</sup> Vgl. Rebstock et al. (25. November) Einsatzgrenzen von Niederflurbussen im Regionalverkehr, S. 25.

<sup>490</sup> Vgl. Haase (WS 2013/14) Fahrzeugkostenkalkulation, S. 14.

<sup>491</sup> Annahme des Autors Vgl. Handelsblatt (2012) DB Kosten der ICE-Züge, S. 6.

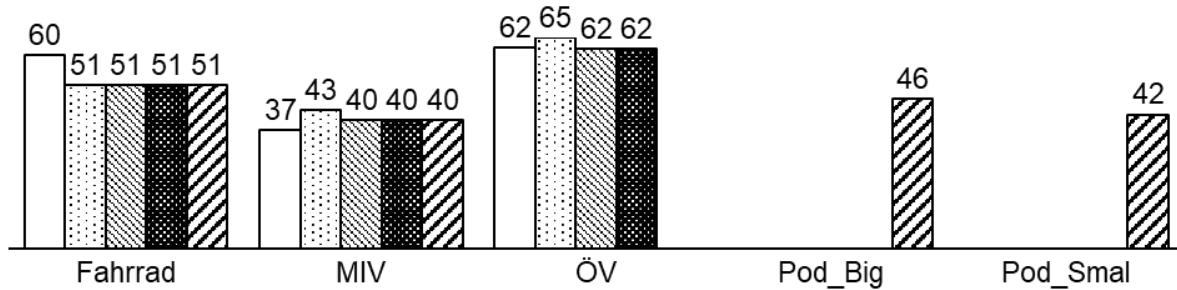
<sup>492</sup> Vgl. LNVG (2014) Kosten Im SPNV.

<sup>493</sup> Vgl. Haase (WS 2013/14) Fahrzeugkostenkalkulation, S. 17.

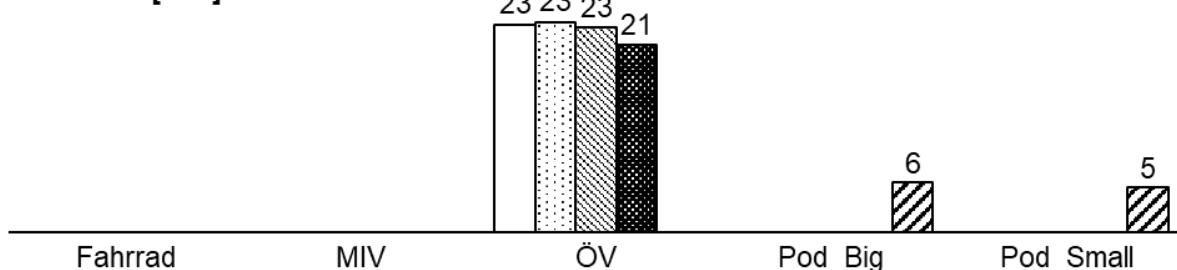
<sup>494</sup> Die Annahmen für den Cargo Pod Big begründen sich in den ISO-Containern Maßen und deren Nutzlast, sowie einer durchschnittlichen Auslastung von 50 %. Der Wert für den Cargo Small Pod wird vom Autor geschätzt.

## Auswertungen

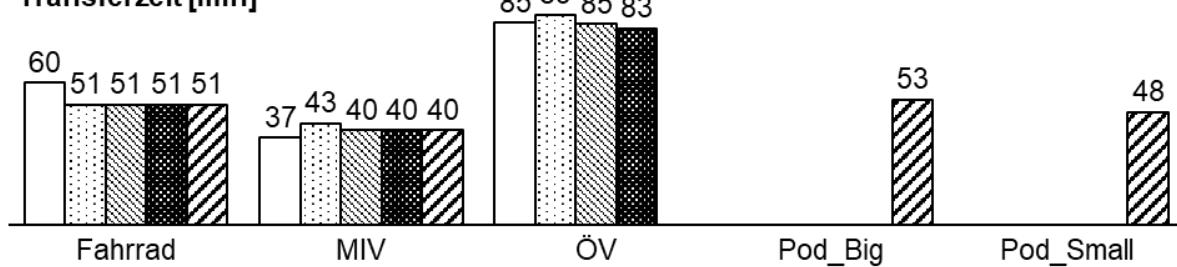
**Fahrtzeit [min]**



**Wartezeit [min]**



**Transferzeit [min]**



□ Klassisch □ Trend □ Autonom □ Optimiert □ Pod

**Abbildung A-3 - Entwicklung der Fahrt-, Warte- und Transferzeit (UL)**

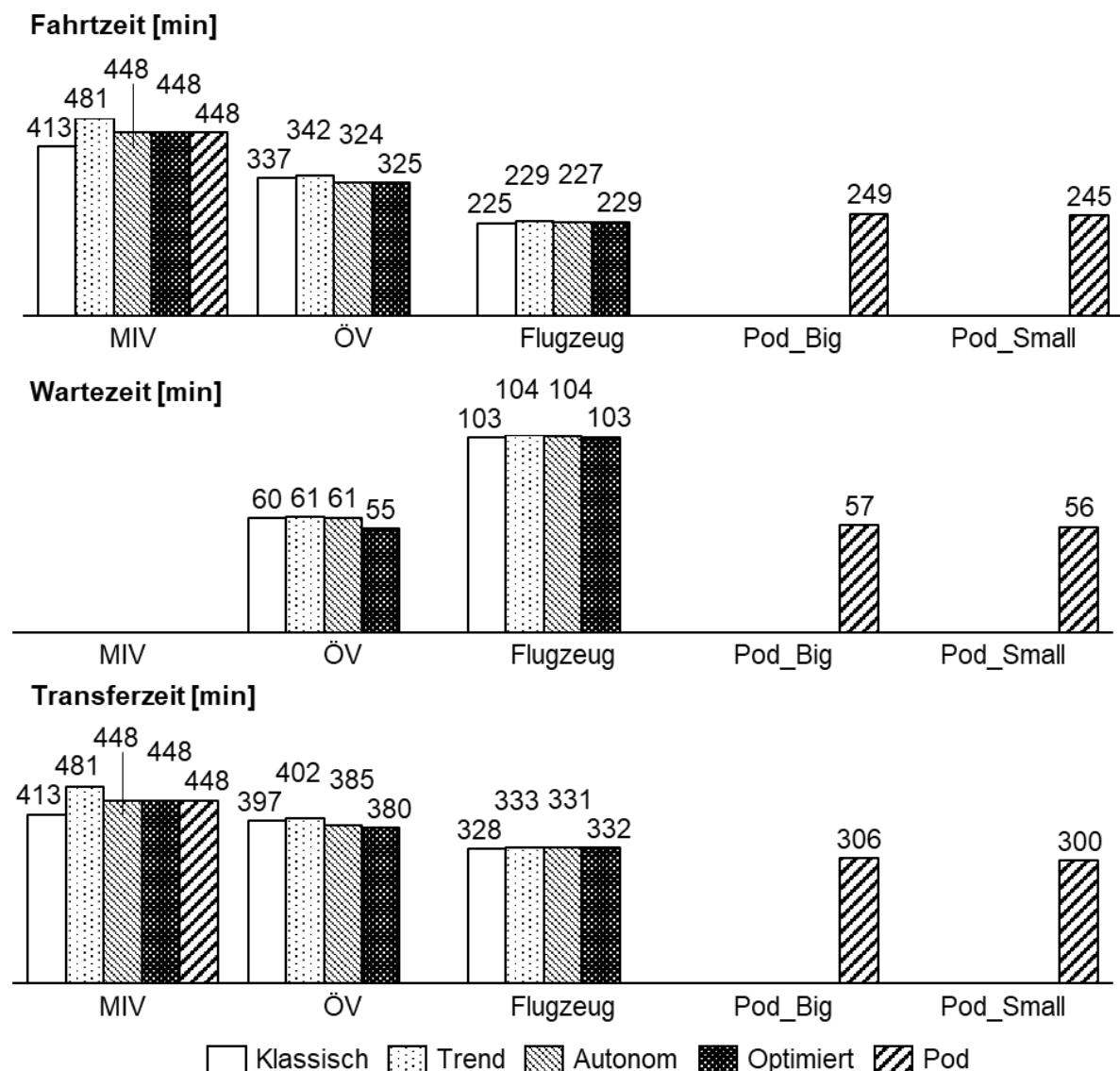


Abbildung A-4 - Entwicklung der Fahrt-, Warte- und Transferzeit (L)

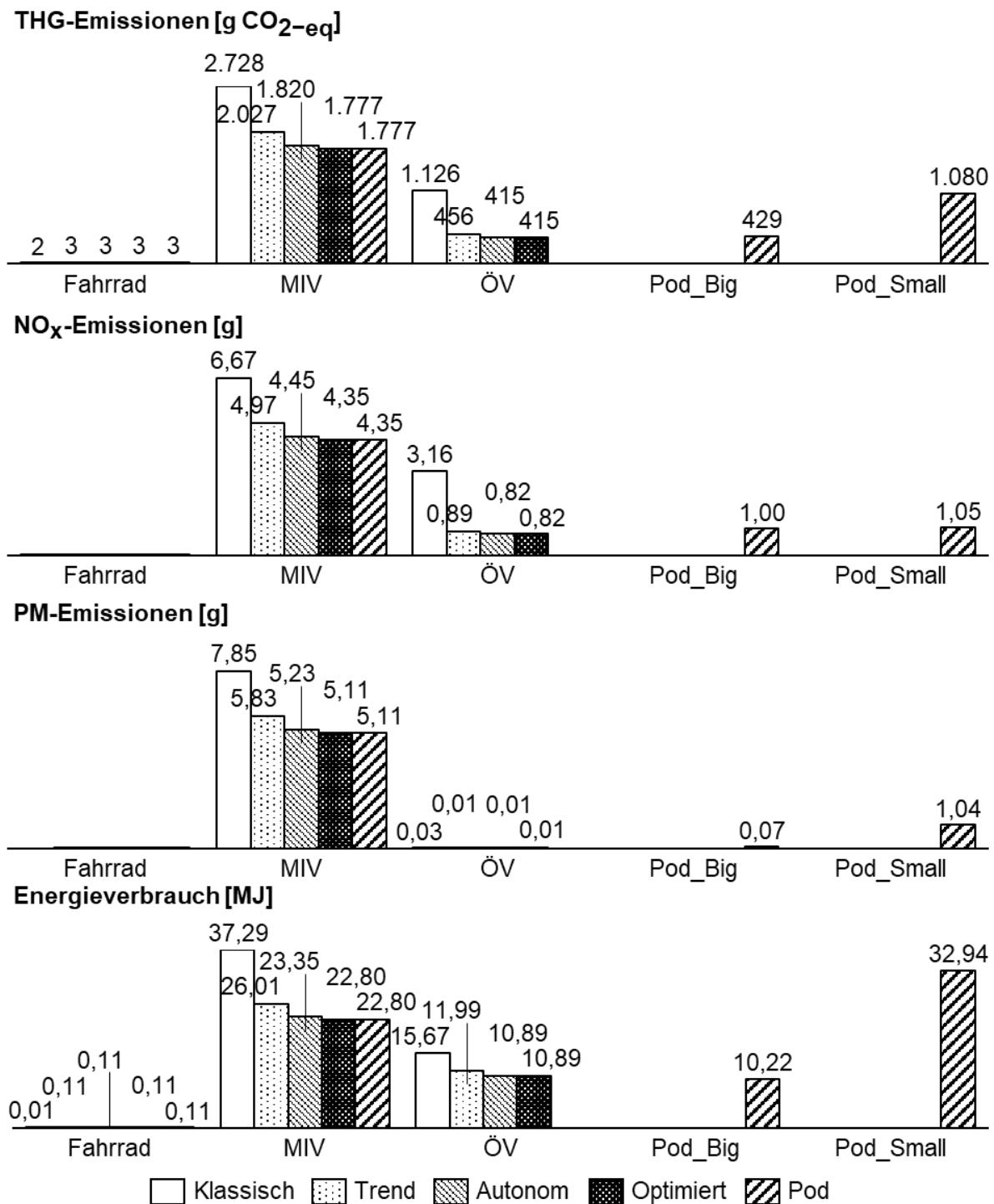


Abbildung A-5 - Entwicklung der ökologischen Dimension (UL)

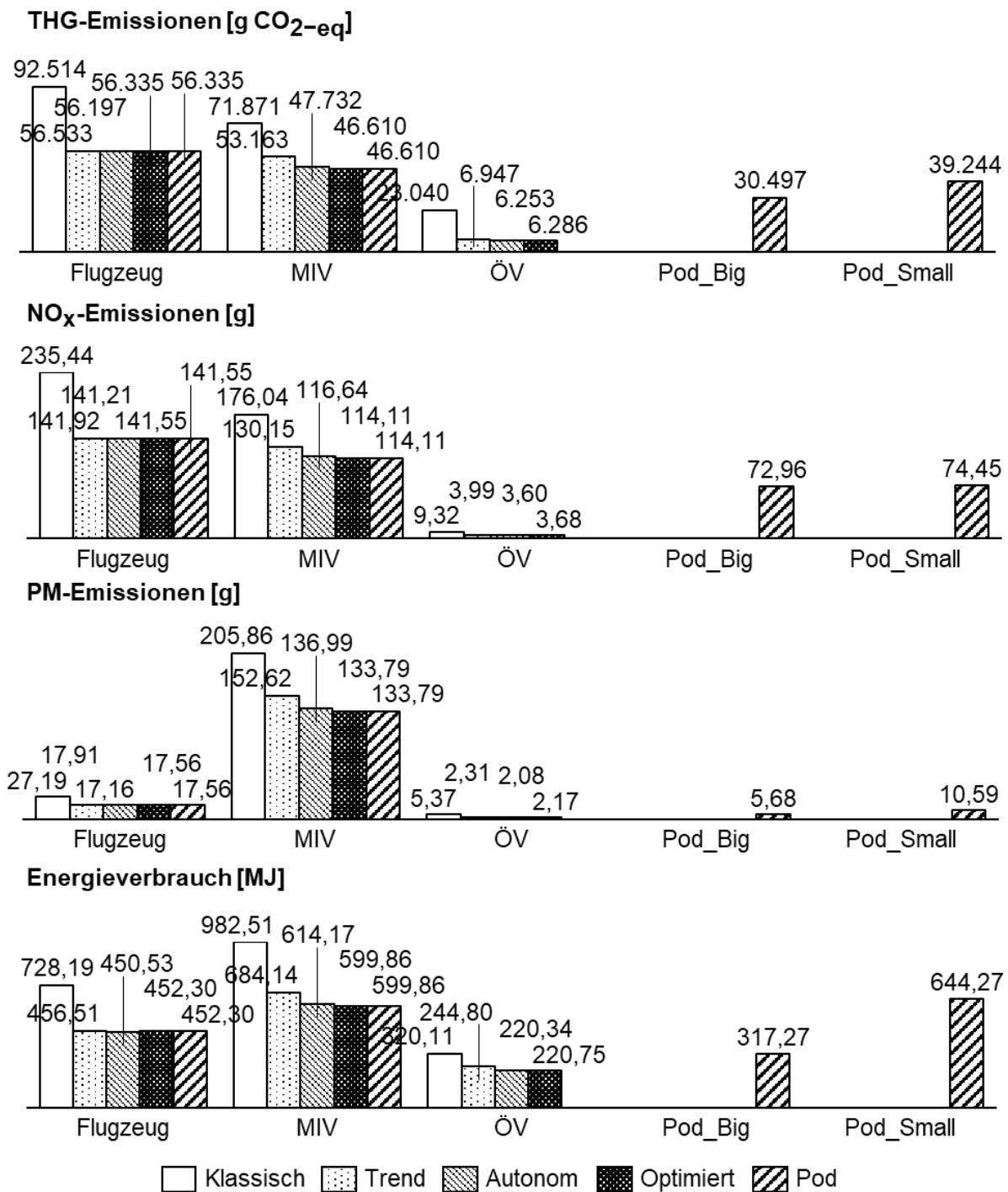


Abbildung A-6 - Entwicklung der ökologischen Dimension (L)

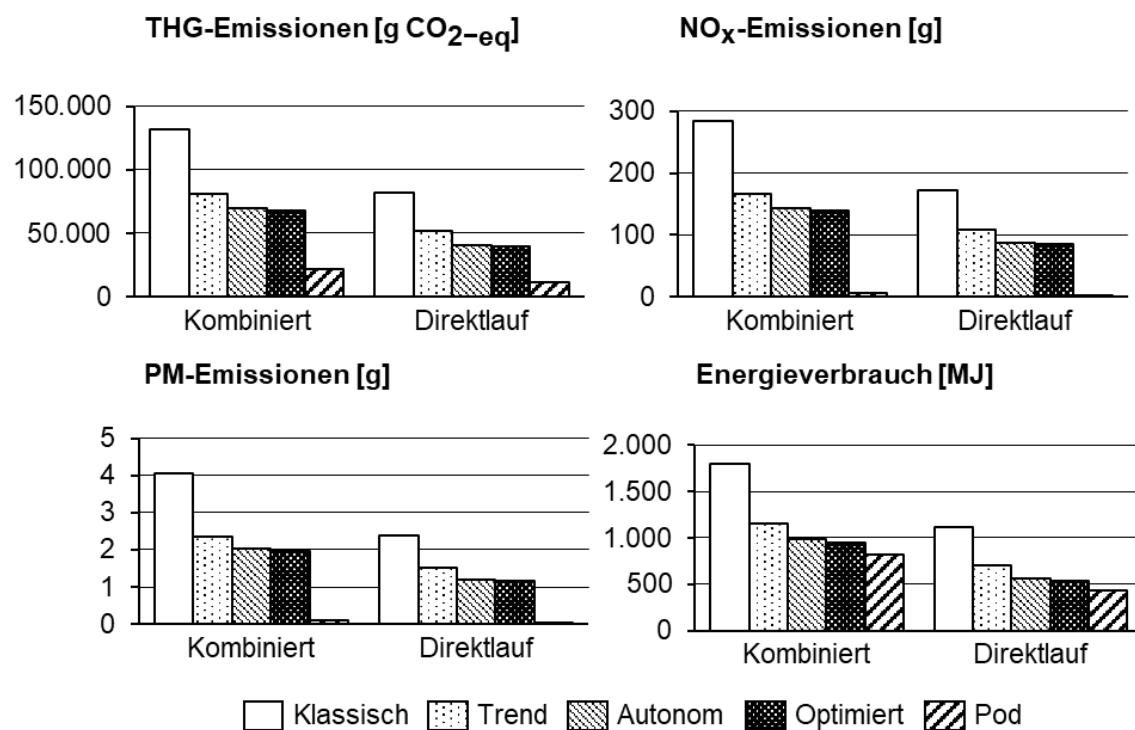


Abbildung A-7 - Entwicklung der ökologischen Dimension Güterfernverkehr

**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