

TEXTE

14/2023

Abschlussbericht

Flüssiger Verkehr für Klimaschutz und Luftreinhaltung

von:

Matthias Schmaus, Jürgen Bawidamann, Markus Friedrich
Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik –
Institut für Straßen- und Verkehrswesen (ISV) –
Universität Stuttgart

Michael Haberl, Lukas Trenkwalder, Martin Fellendorf
Institut für Straßen- und Verkehrswesen (ISV) –
Universität Graz

Jörg Uhlig, Ralf Lohse, Eric Pestel
PTV Transport Consult GmbH

Herausgeber:

Umweltbundesamt

TEXTE 14/2023

Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz

Forschungskennzahl 3719 58 102 0

FB001037

Abschlussbericht

Flüssiger Verkehr für Klimaschutz und Luftreinhaltung

von

Matthias Schmaus, Jürgen Bawidamann, Markus Friedrich
Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik –
Institut für Straßen- und Verkehrswesen (ISV) -
Universität Stuttgart

Michael Haberl, Lukas Trenkwalder, Martin Fellendorf
Institut für Straßen- und Verkehrswesen (ISV) –
Universität Graz

Jörg Uhlig, Ralf Lohse, Eric Pestel
PTV Transport Consult GmbH

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

[f/umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)

[t/umweltbundesamt](https://twitter.com/umweltbundesamt)

Durchführung der Studie:

Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik der Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 7
70569 Stuttgart

Abschlussdatum:

April 2022

Redaktion:

Fachgebiet I 2.1 – Umwelt und Verkehr
Manuel Hendzlik

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Januar 2023

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Flüssiger Verkehr für Klimaschutz und Luftreinhaltung

In diesem Forschungsvorhaben wurden zwei Ziele verfolgt: Die Aktualisierung und Überprüfung der im Handbuch für Emissionsfaktoren (HBEFA) für Deutschland hinterlegten Fahrleistungsanteile nach Verkehrssituationen und die Beschreibung und Quantifizierung der verstetigenden Wirkung verkehrlicher Maßnahmen.

Um das HBEFA zur Berechnung mittlerer Emissionsfaktoren nutzen zu können, sind neben den verkehrssituationsspezifischen Emissionsfaktoren zusätzlich Fahrleistungsanteile für eine Gewichtung hinterlegt. Differenziert nach Fahrzeugkategorie geben diese Werte an, welche Anteile der Gesamtfahrleistung auf welchen Straßenkategorien in welchem Verkehrszustand zurückgelegt werden. Diese Werte wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens unter Verwendung von Floating Car Data (FCD) aktualisiert. Die Aktualisierung wurde in der Version 4.2 des HBEFA übernommen. Darüber hinaus wurden für Autobahnen, insbesondere für Strecken ohne Geschwindigkeitsbegrenzung, die realisierten Fahrgeschwindigkeiten genauer untersucht. Auch wurden unterschiedliche Szenarien ausgewählter Verkehrssituationen mikroskopisch simuliert, um die angesetzten spezifischen Emissionsfaktoren zu überprüfen.

Eine Vielzahl wissenschaftlicher Untersuchungen und gutachterlicher Arbeiten befassen sich mit den Wirkungen verkehrsplanerischer und -politischer Maßnahmen auf den Klimaschutz bzw. im Bereich der Luftreinhaltung. Die verstetigenden Effekte und/oder deren Wechselwirkungen mit der Verkehrsnachfrage einschließlich der Rebound-Effekte stehen dabei nicht immer im Vordergrund bzw. werden nicht explizit ausgewiesen. Das zweite zentrale Ziel des Forschungsvorhabens bezieht sich deshalb auf solche Maßnahmen. Zunächst wurden verkehrliche Maßnahmen mit Blick auf ihre Wirkung auf den Verkehrsfluss gesammelt und klassifiziert. Daraufhin wurden ausgewählte Maßnahmen hinsichtlich der beschriebenen Effekte quantifiziert. Abhängig vom Maßnahmentyp wurde der Einsatz von mikroskopischer Verkehrsflusssimulation, Verkehrsnachfragemodellen, FCD und Emissionsmodellen kombiniert.

Abstract: Smooth traffic flow for climate protection and air pollution control

Two objectives were pursued in this research project: Determining of the shares of kilometers traveled per traffic situation in Germany for updating the Handbook for Emission Factors (HBEFA) and the description and quantification of effects of transport-related measures on traffic flow.

In order to enable the calculation of average emission factors using the HBEFA, the HBEFA provides shares of kilometers traveled in addition to the traffic situation-specific emission factors. Differentiated by vehicle category, these values indicate which shares of the total kilometers traveled assign to which road categories and which traffic condition. These values were updated as part of the research project using Floating Car Data (FCD). The results were adopted in version 4.2 of the HBEFA. In addition, for highways, especially for sections without speed limits, the realized travel speeds were investigated in detail. Also, different scenarios of selected traffic situations were microscopically simulated in order to verify the emission factors of the HBEFA.

A large number of studies and expert reports address the effects of transport planning and policy measures on climate protection and air pollution control. The effects on traffic flow and/or their interactions with travel demand, including rebound effects, are often neglected or not explicitly reported. Therefore, the second objective of the research project relates to such measures. First, traffic-related measures were collected and classified with regard to their effect on traffic flow. Subsequently, selected measures were quantified with regard to these effects. Depending on the type of measure, methods of microscopic traffic flow simulation, travel demand modelling, FCD and emission modelling were combined.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildungsverzeichnis..... | 11 |
| Tabellenverzeichnis..... | 17 |
| Abkürzungsverzeichnis..... | 23 |
| Zusammenfassung..... | 25 |
| Summary..... | 33 |
| 1 Hintergrund und Aufbau der Studie..... | 40 |
| 1.1 Einordnung und Begrifflichkeiten..... | 40 |
| 1.2 Berechnung und Beschreibung verkehrsbedingter Emissionen..... | 42 |
| 1.3 Verstetigende Wirkung verkehrlicher Maßnahmen..... | 43 |
| 1.4 Ziel der Studie und Aufbau des Berichts..... | 44 |
| 2 Teil 1: Aktualisierung der Fahrleistungsanteile je Verkehrssituation für Deutschland im Handbuch für Emissionsfaktoren..... | 45 |
| 2.1 Handbuch für Emissionsfaktoren (HBEFA)..... | 45 |
| 2.1.1 Aufbau des HBEFA..... | 45 |
| 2.1.2 Fahrleistungsanteile in den aggregierten Verkehrssituationen nach HBEFA..... | 49 |
| 2.1.3 Definition der Verkehrssituationen und zugeordnetes Fahrverhalten..... | 50 |
| 2.2 Methodik zur Aktualisierung der Fahrleistungsanteile der HBEFA-Verkehrssituationen..... | 52 |
| 2.2.1 Datengrundlagen..... | 52 |
| 2.2.1.1 Straßennetzmodell und Floating Car Data..... | 52 |
| 2.2.1.2 Verkehrsnachfragemodelle: PTV Validate und regionale Modelle..... | 56 |
| 2.2.1.3 Weitere Datenquellen..... | 56 |
| 2.2.2 Zuweisung der HBEFA-Straßenkategorien und Steigungsklassen im Straßennetz..... | 60 |
| 2.2.2.1 Gebietstyp..... | 60 |
| 2.2.2.2 Straßentyp..... | 61 |
| 2.2.2.3 FRC und OSM-Streckenklasse..... | 62 |
| 2.2.2.4 Kurvigkeit von Strecken..... | 63 |
| 2.2.2.5 Zulässige Höchstgeschwindigkeit..... | 65 |
| 2.2.2.6 Streckenabschnitte in Knotenpunkten..... | 67 |
| 2.2.2.7 Steigungsklassen..... | 68 |
| 2.2.2.8 Straßenklassen nach Baulastträger..... | 68 |
| 2.2.3 Berechnung der Fahrleistungen je Straßenkategorie..... | 69 |
| 2.2.3.1 Fahrzeugkategorie „Pkw“: Strecken der FRC 0 bis 3..... | 69 |
| 2.2.3.2 Fahrzeugkategorie „Pkw“: Strecken der FRC 4..... | 69 |

| | | |
|----------|--|-----|
| 2.2.3.3 | Fahrzeugkategorie „Pkw“: Strecken der FRC 5 bis 7 | 70 |
| 2.2.3.4 | Fahrzeugkategorie „SNF“: Strecken der FRC 0 bis 3 | 71 |
| 2.2.3.5 | Fahrzeugkategorie „SNF“: Strecken der FRC 4 | 72 |
| 2.2.3.6 | Fahrzeugkategorie „SNF“: Strecken der FRC 5 bis 7 | 72 |
| 2.2.3.7 | Weitere Fahrzeugkategorien: Strecken der FRC 0 bis 4 | 72 |
| 2.2.3.8 | Weitere Fahrzeugkategorien: Strecken der FRC 5 bis 7 | 73 |
| 2.2.3.9 | Hochrechnung anhand der Randsummen nach Straßenklassen | 73 |
| 2.2.3.10 | Aufbereitung der Fahrleistungsanteile | 76 |
| 2.2.4 | Einteilung der Verkehrszustände | 77 |
| 2.2.4.1 | Zuordnung der HBEFA-Verkehrszustände anhand mittlerer Geschwindigkeiten | 77 |
| 2.2.4.2 | Aufteilung der langsamsten und schnellsten 5 % der Fahrzeuge | 78 |
| 2.2.4.3 | Umgang mit fehlenden Informationen für die Zuweisung der Verkehrszustände | 82 |
| 2.3 | Ergebnisse der Aktualisierung der Fahrleistungsanteile der HBEFA-Verkehrssituationen... | 85 |
| 2.3.1 | Streckenlängen | 85 |
| 2.3.2 | Fahrleistungen für die Fahrzeugkategorie „Pkw“ | 85 |
| 2.3.3 | Verkehrszustände für die Fahrzeugkategorie „Pkw“ | 87 |
| 2.3.4 | Ergebnisse für weitere Fahrzeugkategorien | 91 |
| 2.3.5 | Zusätzliche Fahrtzeit durch Verkehrszustand: Plausibilisierung der Ergebnisse | 94 |
| 2.3.6 | Emissionen: Bewertung und Einordnung der Ergebnisse | 96 |
| 2.4 | Fahrleistung nach gefahrenen Geschwindigkeiten | 98 |
| 2.4.1 | Autobahnen ohne Tempolimit | 98 |
| 2.4.2 | Gesamtes Autobahnnetz | 103 |
| 2.5 | Validierung ausgewählter Emissionswerte aus HBEFA | 105 |
| 2.5.1 | Validierungsergebnisse des fiktiven signalisierten Straßenzugs | 107 |
| 2.5.1.1 | Simulationsaufbau | 110 |
| 2.5.1.2 | Berücksichtigung von Korrekturfaktoren für Laufleistung, Umgebungstemperatur, Vorkonditionierungszyklus | 111 |
| 2.5.1.3 | Emissionsergebnisse des fiktiven signalisierten Straßenzugs | 115 |
| 2.5.1.4 | Zusammenfassung | 124 |
| 2.5.2 | Validierungsergebnisse des BAB-Straßenzugs | 125 |
| 2.6 | Fazit | 131 |
| 3 | Teil 2: Strukturierung und Quantifizierung von Maßnahmen zur Verstetigung des Verkehrs ... | 133 |
| 3.1 | Identifizierung und Strukturierung von Maßnahmen | 133 |
| 3.1.1 | Definition und Abgrenzung von Maßnahmen zur Verstetigung des Verkehrs | 133 |

| | | |
|---------|--|-----|
| 3.1.2 | Identifikation von Maßnahmen | 135 |
| 3.1.3 | Strukturierung in Maßnahmentypen und -kategorien | 137 |
| 3.1.4 | Beschreibung und Wirkungsabschätzung | 140 |
| 3.2 | Maßnahmensammlung | 143 |
| 3.2.1 | Maßnahmen zur Reduzierung von Störungen auf der freien Strecke | 143 |
| 3.2.2 | Maßnahmen zur Erhöhung der Kapazität auf einzelnen Strecken | 148 |
| 3.2.3 | Maßnahmen zur lokalen Beeinflussung des Fahrverhaltens und des Geschwindigkeitsniveaus | 150 |
| 3.2.4 | Maßnahmen zur Priorisierung des Umweltverbundes an Strecken | 153 |
| 3.2.5 | Maßnahmen zur Optimierung des MIV-Verkehrsflusses an Knotenpunkten..... | 157 |
| 3.2.6 | Maßnahmen zur Bevorrechtigung von ÖV, Rad- und Fußverkehr an Knotenpunkten .. | 162 |
| 3.2.7 | Maßnahmen zur Reduzierung der MIV-Fahrleistung in einem definierten Gebiet..... | 165 |
| 3.2.8 | Maßnahmen zur Reduzierung des Parksuchverkehrs | 173 |
| 3.2.9 | Maßnahmen zur Minderung der MIV-Fahrleistung im Personenverkehr ohne Bezug zur Straßeninfrastruktur | 177 |
| 3.2.10 | Maßnahmen zur Minderung der MIV-Fahrleistung im Güterverkehr ohne Bezug zur Straßeninfrastruktur | 184 |
| 3.2.11 | Maßnahmen zur generellen Beeinflussung des Fahrverhaltens und des Geschwindigkeitsniveaus | 187 |
| 3.3 | Quantifizierung der Umwelteffekte ausgewählter Maßnahmen | 195 |
| 3.3.1 | Methodische Umsetzung | 196 |
| 3.3.1.1 | Schrittweise Bilanzierungsmethodik | 196 |
| 3.3.1.2 | Grundlegende Funktionsweise eines Verkehrsnachfragemodells | 197 |
| 3.3.1.3 | Verwendete Verkehrsnachfragemodelle und Untersuchungsräume..... | 199 |
| 3.3.1.4 | Wirkungen auf die Verkehrszustände und Emissionsberechnung | 204 |
| 3.3.2 | Allgemeines Tempolimit auf Autobahnen von 120 km/h..... | 206 |
| 3.3.2.1 | Maßnahmengestaltung | 206 |
| 3.3.2.2 | Modelltechnische Umsetzung | 206 |
| 3.3.2.3 | Verkehrliche Wirkungen und Schadstoffbilanzierung | 208 |
| 3.3.3 | Allgemeines Tempolimit auf Autobahnen von 120 km/h und im Außerortsbereich von 80 km/h | 211 |
| 3.3.3.1 | Maßnahmengestaltung | 211 |
| 3.3.3.2 | Modelltechnische Umsetzung | 211 |
| 3.3.3.3 | Verkehrliche Wirkungen und Schadstoffbilanzierung | 212 |
| 3.3.4 | Regelgeschwindigkeit im Innerortsbereich von 30 km/h | 215 |

| | | |
|---------|--|-----|
| 3.3.4.1 | Maßnahmenausgestaltung | 215 |
| 3.3.4.2 | Modelltechnische Umsetzung | 217 |
| 3.3.4.3 | Verkehrliche Wirkungen und Schadstoffbilanzierung | 218 |
| 3.3.5 | Erhöhung des durchschnittlichen Besetzungsgrads | 225 |
| 3.3.5.1 | Maßnahmenausgestaltung | 225 |
| 3.3.5.2 | Modelltechnische Umsetzung | 225 |
| 3.3.5.3 | Verkehrliche Wirkungen und Schadstoffbilanzierung | 226 |
| 3.3.6 | Reduzierung des Parksuchverkehrs | 229 |
| 3.3.6.1 | Maßnahmenausgestaltung | 229 |
| 3.3.6.2 | Modelltechnische Umsetzung | 229 |
| 3.3.6.3 | Verkehrliche Wirkungen und Schadstoffbilanzierung | 230 |
| 3.3.7 | Fahrleistungsabhängige Pkw-Maut von 6 ct/km | 234 |
| 3.3.7.1 | Maßnahmenausgestaltung | 234 |
| 3.3.7.2 | Modelltechnische Umsetzung | 235 |
| 3.3.7.3 | Verkehrliche Wirkungen und Schadstoffbilanzierung | 235 |
| 3.3.8 | Optimierung des MIV-Verkehrsflusses an LSA-Knotenpunkten im Innerortsbereich | 239 |
| 3.3.8.1 | Maßnahmenausgestaltung | 239 |
| 3.3.8.2 | Modelltechnische Umsetzung | 239 |
| 3.3.8.3 | Verkehrliche Wirkungen und Schadstoffbilanzierung | 242 |
| 3.4 | Handlungsempfehlungen zu Verstetigungsmaßnahmen | 246 |
| 3.4.1 | Verkehrliche Maßnahmen und deren Wirkung auf den Verkehrsfluss | 246 |
| 3.4.2 | Wirkungen und Aspekte der Umsetzung ausgewählter Maßnahmen | 251 |
| 4 | Quellenverzeichnis | 258 |
| A | Anhang | 267 |
| A.1 | DTV-Werte und Korrekturfaktoren für die Hochrechnung der Fahrleistungen der Fahrzeugkategorien „LNF“, „RBus“, „LBus“ und „KR/MR“ | 267 |
| A.2 | Graphen der Aufteilung der langsamsten und schnellsten 5 % der Fahrleistung | 269 |
| A.2.1 | Langsamste 5 % auf Autobahnen und Bundesstraßen | 269 |
| A.2.2 | Langsamste 5 % auf sonstigen Straßen..... | 270 |
| A.2.3 | Schnellste 5 % auf Autobahnen und Bundesstraßen..... | 271 |
| A.2.4 | Schnellste 5 % auf sonstigen Straßen | 272 |
| A.3 | Fahrleistungsanteile je Verkehrssituation | 273 |
| A.4 | Emissionsergebnisse der Validierung des fiktiven signalisierten Straßenzugs | 310 |
| A.5 | Tabellarische Maßnahmenammlung..... | 331 |

| | | |
|-------|--|-----|
| A.6 | Weitere Diagramme zu Wirkungen und Schadstoffbilanzierung der Maßnahmen | 335 |
| A.6.1 | Allgemeines Tempolimit auf Autobahnen von 120 km/h..... | 335 |
| A.6.2 | Allgemeines Tempolimit auf Autobahnen von 120 km/h und im Außerortsbereich von 80 km/h..... | 337 |
| A.6.3 | Regelgeschwindigkeit im Innerortsbereich von 30 km/h | 339 |
| A.6.4 | Erhöhung des durchschnittlichen Besetzungsgrads | 344 |
| A.6.5 | Reduzierung des Parksuchverkehrs | 346 |
| A.6.6 | Fahrleistungsabhängige Pkw-Maut von 6 ct/km | 349 |
| A.6.7 | Optimierung des MIV-Verkehrsflusses an LSA-Knotenpunkten im Innerortsbereich | 351 |
| A.7 | Vergleich der Forschungsvorhaben „Umweltwirkungen einer innerörtlichen Regelgeschwindigkeit von 30 km/h“ und „Flüssiger Verkehr für Klimaschutz und Luftreinhaltung“ | 353 |
| A.7.1 | Einleitung | 353 |
| A.7.2 | Allgemeine Unterschiede zwischen den Projekten | 353 |
| A.7.3 | Bezugsgebiet | 355 |
| A.7.4 | Verkehrsmittelwahl | 356 |
| A.7.5 | Fahrleistungen | 356 |
| A.7.6 | Level of Service (LoS) / Verkehrszustände | 357 |
| A.7.7 | CO ₂ -Emissionen..... | 359 |
| A.7.8 | NO _x -Emissionen | 360 |
| A.7.9 | PM-Emissionen | 360 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|---------------|---|-----|
| Abbildung 1: | Struktur des Forschungsvorhabens | 26 |
| Figure 2: | Structure of the research project | 34 |
| Abbildung 3: | Verkehrszustände in einem Weg-Zeit-Diagramm aus aggregierter Floating-Car-Data | 41 |
| Abbildung 4: | In HBEFA 4.1 enthaltene Verkehrssituationen | 48 |
| Abbildung 5: | Aufteilung der Innerorts-Fahrleistung für Pkw nach HBEFA 4.1 | 50 |
| Abbildung 6: | TomTom-Streckennetz mit Floating Car Data (FCD) | 55 |
| Abbildung 7: | Ganglinien für die Fahrzeugkategorie SNF | 58 |
| Abbildung 8: | Ganglinien für die Fahrzeugkategorien LNF und KR/MR..... | 59 |
| Abbildung 9: | Ganglinien für die Fahrzeugkategorien RBus und LBus..... | 59 |
| Abbildung 10: | Einteilung des Gebietstyps nach Landnutzungsdaten..... | 61 |
| Abbildung 11: | Heuristik für die Berechnung der Kurvigkeit von Strecken | 64 |
| Abbildung 12: | Streckenabschnitte in Knotenpunkten | 67 |
| Abbildung 13: | Geschwindigkeitsgrenzen zwischen Verkehrszuständen | 78 |
| Abbildung 14: | Aufteilungen der Geschwindigkeiten unter den langsamsten 5 % | 80 |
| Abbildung 15: | Aufteilungen der Geschwindigkeiten unter den langsamsten 5 % der Pkw aus Zählstellen der Stadt Düsseldorf | 80 |
| Abbildung 16: | Schnitt durch Fahrleistungsaufteilung bei 5 %/80 %-Bezugswert 0,3 für langsamste 5 % der Fahrzeuge, sonstige Straßen..... | 82 |
| Abbildung 17: | Zuordnung von Straßenkategorien ohne HBEFA-Geschwindigkeitsdaten oder bei fehlenden FCD-Grundlagen | 83 |
| Abbildung 18: | Anteile der Verkehrszustände je HBEFA-Straßentyp..... | 90 |
| Abbildung 19: | Anteile der beiden Stop&Go Verkehrszustände je HBEFA-Straßentyp | 90 |
| Abbildung 20: | Fahrleistung auf Autobahnen ohne Tempolimit nach gefahrenen Geschwindigkeiten..... | 98 |
| Abbildung 21: | Vergleich der Fahrleistung auf Autobahnen ohne Tempolimit nach gefahrenen Geschwindigkeiten | 99 |
| Abbildung 22: | Streckenabschnitte differenziert nach Abstand zwischen den Anschlussstellen | 100 |
| Abbildung 23: | Fahrleistung auf Autobahnen ohne Tempolimit nach gefahrenen Geschwindigkeiten differenziert nach Abständen zwischen Anschlussstellen..... | 101 |
| Abbildung 24: | Bedeutung der Abstände zwischen den Anschlussstellen auf die gefahrenen Geschwindigkeiten..... | 102 |
| Abbildung 25: | Bedeutung der Abstände zwischen den Anschlussstellen auf die gefahrenen Geschwindigkeiten für Geschwindigkeitsklassen >130 km/h | 102 |
| Abbildung 26: | Fahrleistung auf Autobahnen nach gefahrenen Geschwindigkeiten | 103 |

| | | |
|---------------|---|-----|
| Abbildung 27: | Vergleich der Fahrleistung auf Autobahnen mit Tempolimit 120 nach gefahrenen Geschwindigkeiten | 104 |
| Abbildung 28: | Aufbau und Eingangsdaten von HBEFA 4.1 sowie ergänzende Validierung durch die VISSIM-PHEM-Simulationskopplung ... | 105 |
| Abbildung 29: | Modellstruktur PHEM..... | 107 |
| Abbildung 30: | Korrelationsanalyse der mittleren Reisegeschwindigkeit | 109 |
| Abbildung 31: | Methodik der Validierung ausgewählter Emissionswerte aus HBEFA | 109 |
| Abbildung 32: | Fiktiver signalisierter Streckenzug in der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation | 110 |
| Abbildung 33: | Fahrzyklus für Verkehrssituation flüssig, Deutschland, Pkw, 2020, Urban, 50 km/h, HVS und 0 % Steigung | 112 |
| Abbildung 34: | Fahrzyklus für Verkehrssituation dicht, Deutschland, Pkw, 2020, Urban, 50 km/h, HVS und 0 % Steigung | 112 |
| Abbildung 35: | Fahrzyklus für Verkehrssituation gesättigt, Deutschland, Pkw, 2020, Urban, 50 km/h, HVS und 0 % Steigung | 113 |
| Abbildung 36: | Fahrzyklus für Verkehrssituation Stop&Go, Deutschland, Pkw, 2020, Urban, 50 km/h, HVS und 0 % Steigung | 113 |
| Abbildung 37: | Fahrzyklus für Verkehrssituation Stop&Go II, Deutschland, Pkw, 2020, Urban, 50 km/h, HVS und 0 % Steigung | 114 |
| Abbildung 38: | Übersicht der Korrekturfaktoren für Laufleistung, Umgebungstemperatur und Vorkonditionierungszyklen..... | 115 |
| Abbildung 39: | CO ₂ -Emissionen für 5 % Schwerverkehr; 0 % Steigung | 119 |
| Abbildung 40: | NO _x -Emissionen für 5 % Schwerverkehr; 0 % Steigung..... | 119 |
| Abbildung 41: | PM-Emissionen für 5 % Schwerverkehr; 0 % Steigung..... | 120 |
| Abbildung 42: | CO ₂ -Emissionen für 5 % Schwerverkehr und variiertes Steigung | 121 |
| Abbildung 43: | NO _x -Emissionen für 5 % Schwerverkehr und variiertes Steigung | 122 |
| Abbildung 44: | PM- Emissionen für 5 % Schwerverkehr und variiertes Steigung | 123 |
| Abbildung 45: | Funktionsweise eines Verkehrsnachfragemodells | 198 |
| Abbildung 46: | Ermittlung verkehrlicher Maßnahmenwirkungen..... | 199 |
| Abbildung 47: | Räumliche Abgrenzung des Verkehrsnachfragemodells PTV-Validate..... | 200 |
| Abbildung 48: | Räumliche Abgrenzung des Verkehrsnachfragemodells der Region Dresden | 201 |
| Abbildung 49: | Räumliche Abgrenzung des Verkehrsnachfragemodells der Region Magdeburg | 202 |
| Abbildung 50: | Räumliche Abgrenzung des Verkehrsnachfragemodells der Region Stuttgart..... | 203 |
| Abbildung 51: | Methodik zur Änderung der Verkehrszustände auf Grundlage von FCD..... | 205 |

| | | |
|---------------|---|-----|
| Abbildung 52: | Wirkung der Maßnahme „Allgemeines Tempolimit auf Autobahnen von 120 km/h“ auf die Fahrleistung | 208 |
| Abbildung 53: | Wirkung der Maßnahme „Allgemeines Tempolimit auf Autobahnen von 120 km/h“ auf den Treibhausgasausstoß... | 209 |
| Abbildung 54: | Wirkung der Maßnahme „Allgemeines Tempolimit auf Autobahnen von 120 km/h und im Außerortsbereich von 80 km/h“ auf die Fahrleistung | 212 |
| Abbildung 55: | Wirkung der Maßnahme „Allgemeines Tempolimit auf Autobahnen von 120 km/h und im Außerortsbereich von 80 km/h“ auf den Treibhausgasausstoß..... | 213 |
| Abbildung 56: | Von Maßnahme „Regelgeschwindigkeit im Innerortsbereich von 30 km/h“ betroffene Netzlängen- und Fahrleistungsanteile | 216 |
| Abbildung 57: | Wirkung der Maßnahme „Regelgeschwindigkeit im Innerortsbereich von 30 km/h“ auf die Fahrleistung für die Stadtregion Dresden..... | 218 |
| Abbildung 58: | Wirkung der Maßnahme „Regelgeschwindigkeit im Innerortsbereich von 30 km/h“ auf die Fahrleistung für die Stadtregion Magdeburg..... | 219 |
| Abbildung 59: | Wirkung der Maßnahme „Regelgeschwindigkeit im Innerortsbereich von 30 km/h“ auf die Fahrleistung für die Stadtregion Stuttgart..... | 219 |
| Abbildung 60: | Wirkung der Maßnahme „Regelgeschwindigkeit im Innerortsbereich von 30 km/h“ auf den Treibhausgasausstoß für die Stadtregion Dresden | 220 |
| Abbildung 61: | Wirkung der Maßnahme „Regelgeschwindigkeit im Innerortsbereich von 30 km/h“ auf den Treibhausgasausstoß für die Stadtregion Magdeburg | 220 |
| Abbildung 62: | Wirkung der Maßnahme „Regelgeschwindigkeit im Innerortsbereich von 30 km/h“ auf den Treibhausgasausstoß für die Stadtregion Stuttgart | 221 |
| Abbildung 63: | CO ₂ -Emissionsfaktoren auf Hauptverkehrsstraßen (Agglomeration) bei Tempo 30 und Tempo 50 (Flotte für Deutschland, Jahr 2020) | 222 |
| Abbildung 64: | Wirkung der Maßnahme „Erhöhung des durchschnittlichen Besetzungsgrads“ auf die Fahrleistung | 226 |
| Abbildung 65: | Wirkung der Maßnahme „Erhöhung des durchschnittlichen Besetzungsgrads“ auf den Treibhausgasausstoß | 227 |
| Abbildung 66: | Fahrleistung je Verkehrszustand der Maßnahme „Erhöhung des durchschnittlichen Besetzungsgrads“ | 228 |
| Abbildung 67: | Parkdruck und Parksuchzeit im Bezugsfall (links) und im Maßnahmenfall (rechts)..... | 230 |

| | | |
|---------------|---|-----|
| Abbildung 68: | Wirkung der Maßnahme „Reduzierung des Parksuchverkehrs – konservative Annahme“ auf die Fahrleistung | 231 |
| Abbildung 69: | Wirkung der Maßnahme „Reduzierung des Parksuchverkehrs – optimistische Annahme“ auf die Fahrleistung | 231 |
| Abbildung 70: | Wirkung der Maßnahme „Reduzierung des Parksuchverkehrs – konservative Annahme“ auf den Treibhausgasausstoß | 232 |
| Abbildung 71: | Wirkung der Maßnahme „Reduzierung des Parksuchverkehrs – optimistische Annahme“ auf den Treibhausgasausstoß | 232 |
| Abbildung 72: | Wirkung der Maßnahme „Fahrleistungsabhängige Pkw-Maut von 6 ct/km“ auf die Fahrleistung | 236 |
| Abbildung 73: | Wirkung der Maßnahme „Fahrleistungsabhängige Pkw-Maut von 6 ct/km“ auf den Treibhausgasausstoß | 236 |
| Abbildung 74: | Fahrleistung je Verkehrszustand der Maßnahme „Fahrleistungsabhängige Pkw-Maut von 6 ct/km“ | 238 |
| Abbildung 75: | Wirkung der Maßnahme „Optimierung des MIV-Verkehrsflusses an LSA-Knotenpunkten im Innerortsbereich“ auf die Fahrleistung | 243 |
| Abbildung 76: | Wirkung der Maßnahme „Optimierung des MIV-Verkehrsflusses an LSA-Knotenpunkten im Innerortsbereich“ auf den Treibhausgasausstoß | 243 |
| Abbildung 77: | Zählraten der langsamsten 5 % der Fahrzeuge auf Autobahnen und Bundesstraßen | 269 |
| Abbildung 78: | Funktionsverlauf für die langsamsten 5 % der Fahrzeuge auf Autobahnen und Bundesstraßen | 269 |
| Abbildung 79: | Zählraten der langsamsten 5 % der Fahrzeuge auf sonstigen Straßen | 270 |
| Abbildung 80: | Funktionsverlauf für die langsamsten 5 % der Fahrzeuge auf sonstigen Straßen | 270 |
| Abbildung 81: | Zählraten der schnellsten 5 % der Fahrzeuge auf Autobahnen und Bundesstraßen | 271 |
| Abbildung 82: | Funktionsverlauf für die schnellsten 5 % der Fahrzeuge auf Autobahnen und Bundesstraßen | 271 |
| Abbildung 83: | Zählraten der schnellsten 5 % der Fahrzeuge auf sonstigen Straßen | 272 |
| Abbildung 84: | Funktionsverlauf für die schnellsten 5 % der Fahrzeuge auf sonstigen Straßen | 272 |
| Abbildung 85: | Wirkung der Maßnahme „Allgemeines Tempolimit auf Autobahnen von 120 km/h“ auf die durchschnittliche Geschwindigkeit | 335 |
| Abbildung 86: | Wirkung der Maßnahme „Allgemeines Tempolimit auf Autobahnen von 120 km/h“ auf den abgasbedingten Feinstaub | 336 |

| | | |
|----------------|---|-----|
| Abbildung 87: | Wirkung der Maßnahme „Allgemeines Tempolimit auf Autobahnen von 120 km/h“ auf den Stickstoffoxidausstoß .. | 336 |
| Abbildung 88: | Wirkung der Maßnahme „Allgemeines Tempolimit auf Autobahnen von 120 km/h und im Außerortsbereich von 80 km/h“ auf die durchschnittliche Geschwindigkeit | 337 |
| Abbildung 89: | Wirkung der Maßnahme „Allgemeines Tempolimit auf Autobahnen von 120 km/h und im Außerortsbereich von 80 km/h“ auf den abgasbedingten Feinstaub | 338 |
| Abbildung 90: | Wirkung der Maßnahme „Allgemeines Tempolimit auf Autobahnen von 120 km/h und im Außerortsbereich von 80 km/h“ auf den Stickstoffoxidausstoß | 338 |
| Abbildung 91: | Wirkung der Maßnahme „Regelgeschwindigkeit im Innerortsbereich von 30 km/h“ auf die durchschnittliche Geschwindigkeit für die Stadtregion Dresden..... | 339 |
| Abbildung 92: | Wirkung der Maßnahme „Regelgeschwindigkeit im Innerortsbereich von 30 km/h“ auf den abgasbedingten Feinstaub für die Stadtregion Dresden | 339 |
| Abbildung 93: | Wirkung der Maßnahme „Regelgeschwindigkeit im Innerortsbereich von 30 km/h“ auf den Stickstoffoxidausstoß für die Stadtregion Dresden | 340 |
| Abbildung 94: | Wirkung der Maßnahme „Regelgeschwindigkeit im Innerortsbereich von 30 km/h“ auf die durchschnittliche Geschwindigkeit für die Stadtregion Stuttgart..... | 340 |
| Abbildung 95: | Wirkung der Maßnahme „Regelgeschwindigkeit im Innerortsbereich von 30 km/h“ auf den abgasbedingten Feinstaub für die Stadtregion Stuttgart..... | 341 |
| Abbildung 96: | Wirkung der Maßnahme „Regelgeschwindigkeit im Innerortsbereich von 30 km/h“ auf den Stickstoffoxidausstoß für die Stadtregion Stuttgart | 341 |
| Abbildung 97: | Wirkung der Maßnahme „Regelgeschwindigkeit im Innerortsbereich von 30 km/h“ auf die durchschnittliche Geschwindigkeit für die Stadtregion Magdeburg | 342 |
| Abbildung 98: | Wirkung der Maßnahme „Regelgeschwindigkeit im Innerortsbereich von 30 km/h“ auf den abgasbedingten Feinstaub für die Stadtregion Magdeburg | 342 |
| Abbildung 99: | Wirkung der Maßnahme „Regelgeschwindigkeit im Innerortsbereich von 30 km/h“ auf den Stickstoffoxidausstoß für die Stadtregion Magdeburg | 343 |
| Abbildung 100: | Wirkung der Maßnahme „Erhöhung des durchschnittlichen Besetzungsgrads“ auf die durchschnittliche Geschwindigkeit | 344 |
| Abbildung 101: | Wirkung der Maßnahme „Erhöhung des durchschnittlichen Besetzungsgrads“ auf den abgasbedingten Feinstaub..... | 344 |

| | | |
|----------------|--|-----|
| Abbildung 102: | Wirkung der Maßnahme „Erhöhung des durchschnittlichen Besetzungsgrads“ auf den Stickstoffoxidausstoß..... | 345 |
| Abbildung 103: | Wirkung der Maßnahme „Reduzierung des Parksuchverkehrs – konservative Annahme“ auf die durchschnittliche Geschwindigkeit | 346 |
| Abbildung 104: | Wirkung der Maßnahme „Reduzierung des Parksuchverkehrs – konservative Annahme“ auf den abgasbedingten Feinstaub | 346 |
| Abbildung 105: | Wirkung der Maßnahme „Reduzierung des Parksuchverkehrs – konservative Annahme“ auf den Stickstoffoxidausstoß | 347 |
| Abbildung 106: | Wirkung der Maßnahme „Reduzierung des Parksuchverkehrs – optimistische Annahme“ auf die durchschnittliche Geschwindigkeit | 347 |
| Abbildung 107: | Wirkung der Maßnahme „Reduzierung des Parksuchverkehrs – optimistische Annahme“ auf den abgasbedingten Feinstaub | 348 |
| Abbildung 108: | Wirkung der Maßnahme „Reduzierung des Parksuchverkehrs – optimistische Annahme“ auf den Stickstoffoxidausstoß | 348 |
| Abbildung 109: | Wirkung der Maßnahme „Fahrleistungsabhängige Pkw-Maut von 6 ct/km“ auf die durchschnittliche Geschwindigkeit..... | 349 |
| Abbildung 110: | Wirkung der Maßnahme „Fahrleistungsabhängige Pkw-Maut von 6 ct/km“ auf den abgasbedingten Feinstaub | 349 |
| Abbildung 111: | Wirkung der Maßnahme „Fahrleistungsabhängige Pkw-Maut von 6 ct/km“ auf den Stickstoffoxidausstoß | 350 |
| Abbildung 112: | Wirkung der Maßnahme „Optimierung des MIV-Verkehrsflusses an LSA-Knotenpunkten im Innerortsbereich“ auf die durchschnittliche Geschwindigkeit..... | 351 |
| Abbildung 113: | Wirkung der Maßnahme „Optimierung des MIV-Verkehrsflusses an LSA-Knotenpunkten im Innerortsbereich“ auf den abgasbedingten Feinstaub | 351 |
| Abbildung 114: | Wirkung der Maßnahme „Optimierung des MIV-Verkehrsflusses an LSA-Knotenpunkten im Innerortsbereich“ auf den Stickstoffoxidausstoß | 352 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-------------|--|----|
| Tabelle 1: | Pkw-Fahrleistung differenziert nach HBEFA-Straßenkategorien in % | 27 |
| Tabelle 2: | Zusammenfassung der Modellierungsergebnisse | 30 |
| Table 3: | Car vehicle kilometers traveled differentiated by HBEFA road categories in %..... | 35 |
| Table 4: | Summary of modeling results..... | 37 |
| Tabelle 5: | HBEFA-Fahrzeugkategorien | 45 |
| Tabelle 6: | Definition der Gebietstypen in HBEFA | 46 |
| Tabelle 7: | Definition der Straßentypen in HBEFA | 46 |
| Tabelle 8: | Definition der zulässigen Höchstgeschwindigkeit in HBEFA..... | 47 |
| Tabelle 9: | Definition der Verkehrszustände in HBEFA | 47 |
| Tabelle 10: | HBEFA-Kenngrößen des Fahrverhaltens für ausgewählte Verkehrssituationen | 51 |
| Tabelle 11: | Beschreibung und Netzlängen der Functional Road Class (FRC) | 52 |
| Tabelle 12: | Übersicht über die Datengrundlagen der Verkehrsnachfragemodelle | 56 |
| Tabelle 13: | Übersicht über die verwendeten Ganglinien | 58 |
| Tabelle 14: | Zuordnung der Straßentypen anhand der Streckenabschnitt- Attributierung..... | 62 |
| Tabelle 15: | Berechnete Streckenlängenanteile nach Kurvigkeit | 65 |
| Tabelle 16: | Geschwindigkeitszuweisung der TomTom Strecken | 65 |
| Tabelle 17: | Längenanteile differenziert nach Datengrundlage für Strecken der FRC 0-7 | 66 |
| Tabelle 18: | Steigungsklassen und Anteile an Streckenlänge | 68 |
| Tabelle 19: | Streckenlängen im deutschen Straßennetz nach Baulastträger in 1.000 km | 69 |
| Tabelle 20: | Datenquellen für die Ganglinien der weiteren Fahrzeugkategorien..... | 73 |
| Tabelle 21: | Randsummen der Fahrleistungen je Fahrzeugkategorie nach Straßenklasse in Mrd. Fahrzeugkilometer pro Jahr..... | 74 |
| Tabelle 22: | DTV-Werte und Korrekturfaktoren zur Hochrechnung der Fahrleistungen der Fahrzeugkategorie „Pkw“ | 75 |
| Tabelle 23: | DTV-Werte und Korrekturfaktoren zur Hochrechnung der Fahrleistungen der Fahrzeugkategorie „SNF“ | 76 |
| Tabelle 24: | Parameter der Funktionen zur Aufteilung der Geschwindigkeiten der langsamsten bzw. schnellsten Fahrzeuge | 81 |
| Tabelle 25: | Streckenlängen differenziert nach HBEFA-Straßenkategorien in 1.000 km | 85 |
| Tabelle 26: | Pkw-Fahrleistung differenziert nach HBEFA-Straßenkategorien in % | 86 |

| | | |
|-------------|---|-----|
| Tabelle 27: | Pkw-Fahrleistung je Verkehrssituation in Mrd. Fzgkm/a ($v^2 = <30, 30, 40, 50$) | 88 |
| Tabelle 28: | Pkw-Fahrleistung je Verkehrssituation in Mrd. Fzgkm/a ($v^2 = 60, 70, 80, 90$) | 88 |
| Tabelle 29: | Pkw-Fahrleistung je Verkehrssituation in Mrd. Fzgkm/a ($h = 100, 120, 130, >130$) | 89 |
| Tabelle 30: | SNF-Fahrleistung differenziert nach HBEFA-Straßenkategorien in % | 92 |
| Tabelle 31: | LNF-Fahrleistung differenziert nach HBEFA-Straßenkategorien in % | 92 |
| Tabelle 32: | KR/MR-Fahrleistung differenziert nach HBEFA-Straßenkategorien in % | 93 |
| Tabelle 33: | LBus-Fahrleistung differenziert nach HBEFA-Straßenkategorien in % | 93 |
| Tabelle 34: | RBus-Fahrleistung differenziert nach HBEFA-Straßenkategorien in % | 94 |
| Tabelle 35: | Zusätzliche Fahrtzeit (rel. zu $v_{\text{flüssig}}$) durch Verkehrszustände je Straßenkategorie | 95 |
| Tabelle 36: | Spezifische Emissionswerte für die ermittelte Fahrleistungsaufteilung im Vergleich zu HBEFA 4.1 für Pkw | 96 |
| Tabelle 37: | Spezifische Emissionswerte für die ermittelte Fahrleistungsaufteilung im Vergleich zu HBEFA 4.1 für SNF | 97 |
| Tabelle 38: | Spezifische Emissionswerte für die ermittelte Fahrleistungsaufteilung im Vergleich zu HBEFA 4.1 für LNF, KR/MR, LBus und RBus | 97 |
| Tabelle 39: | Klassenzuweisung nach Abständen zwischen Anschlussstellen | 101 |
| Tabelle 40: | Emissionen für 5 % Schwerverkehr und 0 % Steigung für Hauptverkehrsstraßen | 116 |
| Tabelle 41: | Emissionen für 5 % Schwerverkehr und 0 % Steigung für Sammelstraßen | 117 |
| Tabelle 42: | Emissionen für 5 % Schwerverkehr und 0 % Steigung für Fernstraße City | 118 |
| Tabelle 43: | Vergleich PHEM-Berechnung vs. HBEFA-Werte, >130 km/h und 0 % Steigung | 125 |
| Tabelle 44: | Vergleich PHEM-Berechnung vs. HBEFA-Werte, 120 km/h und 0 % Steigung | 126 |
| Tabelle 45: | Vergleich PHEM-Berechnung vs. HBEFA-Werte, 100 km/h und 0 % Steigung | 126 |
| Tabelle 46: | Vergleich PHEM-Berechnung vs. HBEFA-Werte, >130 km/h und +4 % Steigung | 127 |
| Tabelle 47: | Vergleich PHEM-Berechnung vs. HBEFA-Werte, 120 km/h und +4 % Steigung | 128 |

| | | |
|-------------|---|-----|
| Tabelle 48: | Vergleich PHEM-Berechnung vs. HBEFA-Werte, 100 km/h und +4 % Steigung | 128 |
| Tabelle 49: | Vergleich PHEM-Berechnung vs. HBEFA-Werte, >130 km/h und -4 % Steigung | 129 |
| Tabelle 50: | Vergleich PHEM-Berechnung vs. HBEFA-Werte, 120 km/h und -4 % Steigung | 130 |
| Tabelle 51: | Vergleich PHEM-Berechnung vs. HBEFA-Werte, 100 km/h und -4 % Steigung | 130 |
| Tabelle 52: | Strukturierung der Maßnahmen und Maßnahmenzahl je Kategorie | 138 |
| Tabelle 53: | Darstellung der verkehrlichen Maßnahmenwirkungen | 142 |
| Tabelle 54: | Darstellung Maßnahmenwirkung mit Blick auf Luftreinhaltung und Klimaschutz | 142 |
| Tabelle 55: | Maßnahmen zur Reduzierung von Störungen auf der freien Strecke | 143 |
| Tabelle 56: | Maßnahmen zur Erhöhung der Kapazität auf einzelnen Strecken | 148 |
| Tabelle 57: | Maßnahmen zur lokalen Beeinflussung des Fahrverhaltens und des Geschwindigkeitsniveaus | 151 |
| Tabelle 58: | Maßnahmen zur Priorisierung des Umweltverbundes an Strecken | 153 |
| Tabelle 59: | Maßnahmen zur Optimierung des MIV-Verkehrsflusses an Knotenpunkten | 157 |
| Tabelle 60: | Maßnahmen zur Bevorrechtigung von ÖV, Rad- und Fußverkehr an Knotenpunkten | 162 |
| Tabelle 61: | Maßnahmen zur Reduzierung der MIV-Fahrleistung in einem definierten Gebiet | 166 |
| Tabelle 62: | Maßnahmen mit Bezug zum ruhenden Verkehr | 173 |
| Tabelle 63: | Maßnahmen zur Minderung der MIV-Fahrleistung im Personenverkehr ohne Bezug zur Straßeninfrastruktur | 177 |
| Tabelle 64: | Maßnahmen zur Minderung der MIV-Fahrleistung im Güterverkehr ohne Bezug zur Straßeninfrastruktur | 185 |
| Tabelle 65: | Maßnahmen zur generellen Beeinflussung des Fahrverhaltens und des Geschwindigkeitsniveaus | 187 |
| Tabelle 66: | Untersuchte verkehrliche Maßnahmen | 195 |
| Tabelle 67: | Ablauf der schrittweisen Bilanzierungsmethodik | 196 |
| Tabelle 68: | Daten zum Planungsraum des Verkehrsnachfragemodells PTV-Validate | 200 |
| Tabelle 69: | Daten zum erweiterten Planungsraum des Verkehrsnachfragemodells der Region Dresden | 201 |
| Tabelle 70: | Daten zum erweiterten Planungsraum des Verkehrsnachfragemodells der Region Magdeburg | 202 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| Tabelle 71: | Daten zum erweiterten Planungsraum des Verkehrsnachfragemodells der Region Magdeburg..... | 203 |
| Tabelle 72: | Zusammenfassung Wirkungen der Maßnahme „Allgemeines Tempolimit auf Autobahnen von 120 km/h“ | 210 |
| Tabelle 73: | Zusammenfassung Wirkungen der Maßnahme „Allgemeines Tempolimit auf Autobahnen von 120 km/h und im Außerortsbereich von 80 km/h“..... | 215 |
| Tabelle 74: | Zusammenfassung der Wirkungen der Maßnahme „Regelgeschwindigkeit im Innerortsbereich von 30 km/h“ für die Stadtregion Dresden..... | 223 |
| Tabelle 75: | Zusammenfassung der Wirkungen der Maßnahme „Regelgeschwindigkeit im Innerortsbereich von 30 km/h“ für die Stadtregion Magdeburg..... | 224 |
| Tabelle 76: | Zusammenfassung der Wirkungen der Maßnahme „Regelgeschwindigkeit im Innerortsbereich von 30 km/h“ für die Stadtregion Stuttgart..... | 224 |
| Tabelle 77: | Zusammenfassung der Wirkungen der Maßnahme „Erhöhung des durchschnittlichen Besetzungsgrads“ | 229 |
| Tabelle 78: | Zusammenfassung der Wirkungen der Maßnahme „Reduzierung des Parksuchverkehrs – konservative Annahme“ | 233 |
| Tabelle 79: | Zusammenfassung der Wirkungen der Maßnahme „Reduzierung des Parksuchverkehrs – optimistische Annahme“ | 234 |
| Tabelle 80: | Zusammenfassung der Wirkungen der Maßnahme „Fahrleistungsabhängige Pkw-Maut von 6 ct/km“ | 239 |
| Tabelle 81: | Emissionstechnische PHEM-Berechnungsergebnisse der Karcherallee..... | 240 |
| Tabelle 82: | Emissionstechnische PHEM-Berechnungsergebnisse der Coventrystraße | 241 |
| Tabelle 83: | Emissionstechnische PHEM-Berechnungsergebnisse der Meißner Landstraße | 241 |
| Tabelle 84: | Einsparpotenziale für eine Überfahrt eines durchschnittlichen LSA-Knotens..... | 241 |
| Tabelle 85: | Zusammenfassung der Wirkungen der Maßnahme „Optimierung des MIV-Verkehrsflusses an LSA-Knotenpunkten im Innerortsbereich“ | 245 |
| Tabelle 86: | Zusammenfassung der Modellierungsergebnisse..... | 252 |
| Tabelle 87: | DTV-Werte und Korrekturfaktoren zur Hochrechnung der Fahrleistungen der Fahrzeugkategorie „LNF“ | 267 |
| Tabelle 88: | DTV-Werte und Korrekturfaktoren zur Hochrechnung der Fahrleistungen der Fahrzeugkategorie „RBus“ | 267 |

| | | |
|--------------|---|-----|
| Tabelle 89: | DTV-Werte und Korrekturfaktoren zur Hochrechnung der Fahrleistungen der Fahrzeugkategorie „LBus“ | 268 |
| Tabelle 90: | DTV-Werte und Korrekturfaktoren zur Hochrechnung der Fahrleistungen der Fahrzeugkategorie „KR/MR“ | 268 |
| Tabelle 91: | Emissionen für 5 % Schwerverkehr und -6 % Steigung für Hauptverkehrsstraßen..... | 310 |
| Tabelle 92: | Emissionen für 5 % Schwerverkehr und -6 % Steigung für Sammelstraßen..... | 311 |
| Tabelle 93: | Emissionen für 5 % Schwerverkehr und -6 % Steigung für Fernstraße City | 312 |
| Tabelle 94: | Emissionen für 5 % Schwerverkehr und -4 % Steigung für Hauptverkehrsstraßen..... | 313 |
| Tabelle 95: | Emissionen für 5 % Schwerverkehr und -4 % Steigung für Sammelstraßen..... | 314 |
| Tabelle 96: | Emissionen für 5 % Schwerverkehr und -4 % Steigung für Fernstraße City | 315 |
| Tabelle 97: | Emissionen für 5 % Schwerverkehr und -2 % Steigung für Hauptverkehrsstraßen..... | 316 |
| Tabelle 98: | Emissionen für 5 % Schwerverkehr und -2 % Steigung für Sammelstraßen..... | 317 |
| Tabelle 99: | Emissionen für 5 % Schwerverkehr und -2 % Steigung für Fernstraße City | 318 |
| Tabelle 100: | Emissionen für 5 % Schwerverkehr und 0 % Steigung für Hauptverkehrsstraßen..... | 319 |
| Tabelle 101: | Emissionen für 5 % Schwerverkehr und 0 % Steigung für Sammelstraßen..... | 320 |
| Tabelle 102: | Emissionen für 5 % Schwerverkehr und 0 % Steigung für Fernstraße City | 321 |
| Tabelle 103: | Emissionen für 5 % Schwerverkehr und 2 % Steigung für Hauptverkehrsstraßen..... | 322 |
| Tabelle 104: | Emissionen für 5 % Schwerverkehr und 2 % Steigung für Sammelstraßen..... | 323 |
| Tabelle 105: | Emissionen für 5 % Schwerverkehr und 2 % Steigung für Fernstraße City | 324 |
| Tabelle 106: | Emissionen für 5 % Schwerverkehr und 4 % Steigung für Hauptverkehrsstraßen..... | 325 |
| Tabelle 107: | Emissionen für 5 % Schwerverkehr und 4 % Steigung für Sammelstraßen..... | 326 |
| Tabelle 108: | Emissionen für 5 % Schwerverkehr und 4 % Steigung für Fernstraße City | 327 |
| Tabelle 109: | Emissionen für 5 % Schwerverkehr und 6 % Steigung für Hauptverkehrsstraßen..... | 328 |

| | | |
|--------------|---|-----|
| Tabelle 110: | Emissionen für 5 % Schwerverkehr und 6 % Steigung für Sammelstraßen..... | 329 |
| Tabelle 111: | Emissionen für 5 % Schwerverkehr und 6 % Steigung für Fernstraße City | 330 |
| Tabelle 112: | Strukturgrößen der Untersuchungsgebiete | 354 |
| Tabelle 113: | Von Tempo 30 _{neu} betroffene Strecken- und Fahrleistungsanteile in den Untersuchungsgebieten..... | 355 |
| Tabelle 114: | Änderung der Modal-Split Werte durch Tempo 30 (Aufkommensbezogener Modal-Split, Quell-, Ziel- und Binnenverkehre) | 356 |
| Tabelle 115: | Änderung der Fahrleistung durch Tempo 30 (alle modellierten Fahrzeugkategorien: Pkw, SNF, LNF) | 357 |
| Tabelle 116: | Anteile der Pkw-Fahrleistung nach Verkehrszuständen im Analysefall Tempo 50 | 359 |
| Tabelle 117: | Änderung der Fahrleistungsanteile an den Verkehrszuständen durch Tempo 30 in Prozentpunkten..... | 359 |
| Tabelle 118: | Änderung der CO ₂ -Emissionen (Pkw, SNF, LNF) durch Tempo 30 | 360 |
| Tabelle 119: | Änderung der NO _x -Emissionen (Pkw, SNF, LNF) durch Tempo 30 | 360 |
| Tabelle 120: | Mittlere spezifische PM-Emissionen je Fzg.-km (Pkw, SNF, LNF) im Analysefall und Änderung durch Tempo 30 | 361 |
| Tabelle 121: | Änderung der PM-Emissionen (Pkw, SNF, LNF) durch Tempo 30 | 361 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|-----------------------------|---|
| %Stop | Prozentuale Haltedauer |
| BAB | Bundesautobahn |
| BAST | Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen |
| BVWP | Bundesverkehrswegeplan |
| CO₂ | Kohlenstoffdioxid |
| CO₂äq | CO ₂ -Äquivalente |
| C2X | Car To X, Schnittstelle für die digitale Kommunikation eines Fahrzeugs mit einem beliebigen anderen Objekt „X“, z.B. einem anderen Fahrzeug oder einem infrastrukturseitigen Objekt |
| DGM | Digitales Geländemodell |
| DTV | Durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke |
| DTV_{w5} | Durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke an den Wochentagen Montag bis Freitag |
| FzgLKat | Fahrzeugkategorien (hier: Fahrzeugkategorien des HBEFA) |
| FCD | Floating Car Data |
| FRC | Functional Road Class (hier: nach der Definition von TomTom) |
| GNSS | Global Navigation Satellite System (Globales Navigationssatellitensystem) |
| HBEFA | Handbuch für Emissionsfaktoren |
| HVO-Lane | Heavy Occupied Vehicle Lane (Fahrstreifen, der nur von Fahrzeugen ab einer bestimmten Personenzahl befahren werden darf) |
| KEP | Kurier-, Express- und Paketdienste |
| LSA | Lichtsignalanlage |
| LV | Leichtverkehr |
| MIV | Motorisierter Individualverkehr |
| NO_x | Stickstoffoxide |
| ÖPNV | Öffentlicher Personennahverkehr |
| ÖSPV | Öffentlicher Straßenpersonenverkehr (entspricht den Landverkehrsmitteln des öffentlichen Verkehrs, die nicht dem Eisenbahnverkehr zugeordnet sind) |
| ÖV | Öffentlicher Verkehr |
| OSM | OpenStreetMap |
| PHEM | Passenger car and Heavy-duty Emission Model (mikroskopisches Fahrzeugemissionsmodell) |
| PM, PM_{2,5} | Feinstaub (Particulate Matter), Feinstaub 2,5 µm |
| RPA | Relative positive acceleration (Relative positive Beschleunigung) |
| SampleSize | Anzahl der von TomTom erfassten Fahrzeuge in einem bestimmten Zeitintervall |
| StVO | Straßenverkehrsordnung |
| SV | Schwerverkehr |

| | |
|----------------------|--|
| TREMODO | Transport Emission Model (Modell zur Berechnung der verkehrsbedingten Emissionen in Deutschland) |
| VISSIM | Mikroskopische Verkehrsfluss-Simulationssoftware des Herstellers PTV AG |
| VVS | Verkehrs- und Tarifverbund Stuttgart |
| VwV-StVO | Verwaltungsvorschrift StVO |
| v² | Zulässige Höchstgeschwindigkeit (Tempolimit) |

HBEFA-Fahrzeugkategorien

| | |
|--------------|---|
| Pkw | Personenkraftwagen, Personenwagen |
| LNF | Leichtes Nutzfahrzeug (<3,5 t), Lieferwagen |
| SNF | Schweres Nutzfahrzeug (Lkw, Lz, Sz) |
| RBus | Reisebus, Reisedar |
| LBus | Linienbus (= ÖV-Bus) |
| KR/MR | Kraftrad, Motorrad |

HBEFA-Gebietstypen $g \in G$

| | |
|-----------|-----------------------------|
| La | Ländlicher Raum |
| Ag | Agglomeration, Ballungsraum |

HBEFA-Straßentypen $s \in S$

| | |
|--------------|------------------------------|
| AB | Autobahn |
| St-AB | Stadt-Autobahn |
| Se-AB | Semi-Autobahn |
| FStr | Fern-, Bundesstraße |
| RiStr | Städt. Magistrale / Ringstr. |
| HVS | Hauptverkehrsstraße |
| HVS-k | Hauptverkehrsstraße, kurvig |
| SaS | Sammelstraße |
| SaS-k | Sammelstraße, kurvig |
| ErS | Erschließungsstraße |

HBEFA-Verkehrszustände $z \in Z$

| | |
|------------|---------------------|
| FV | Flüssiger Verkehr |
| DV | Dichter Verkehr |
| GV | Gesättigter Verkehr |
| SG | Stop&Go |
| SG2 | Stop&Go II |

Zusammenfassung

Hintergrund und Aufbau der Studie

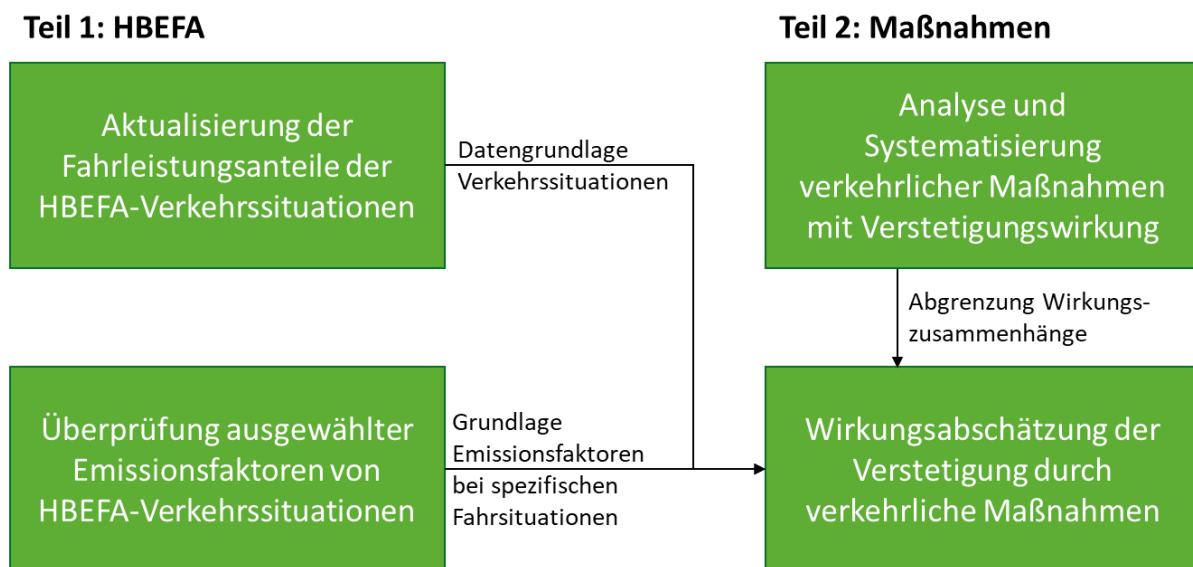
Ein Schwerpunkt einer nachhaltigen Verkehrsplanung und -politik besteht in der Umsetzung von Maßnahmen zur Reduktion verkehrsbedingter stofflicher Emissionen. Dabei wird zwischen Zielen des Klimaschutzes und der Luftreinhaltung unterschieden. Um die Klimaschutzziele zu erreichen, sind im Verkehr die Emissionen des Treibhausgases CO₂ zu reduzieren. Bei der Luftreinhaltung müssen aus Gründen des Gesundheitsschutzes Luftschadstoffe (u.a. NO_x und Feinstaub) begrenzt werden. Die Wirkung dieser Stoffe tritt lokal auf; innerstädtische Gebiete und bestimmte Hotspots sind besonders betroffen.

Ein Weg die verkehrsbedingten Emissionen von CO₂ und Luftschadstoffen zu reduzieren, besteht in einer Verstetigung des Verkehrsflusses. Hintergrund ist, dass ein gleichmäßiger Verkehrsfluss zu Kraftstoffeinsparungen bzw. sinkenden Energieverbräuchen führt und damit unmittelbar zur Reduzierung von Treibhausgas- und Schadstoffemissionen. Einige verkehrliche Maßnahmen zielen direkt auf eine Verstetigung des Verkehrs ab. Zu verkehrsflussbeeinflussenden Maßnahmen zählen beispielsweise eine optimierte Koordinierung der Grünzeiten an Lichtsignalanlagen oder eine Anpassung der zulässigen Höchstgeschwindigkeiten. Aber auch die Auslastung von Strecken und Knotenpunkte im Straßennetz wirkt auf den Verkehrsfluss, weshalb auch Maßnahmen mit dem primären Ziel einer Fahrleistungsminderung indirekt zu einer Verstetigung des Verkehrs führen können. Die Wechselwirkung zwischen Verkehrsnachfrage und Verkehrsfluss kann bei primär verstetigenden Maßnahmen aber umgekehrt auch negativ auf den Maßnahmeneffekt wirken, nämlich dann, wenn ein verbesserter Verkehrsfluss für den motorisierten Verkehr zu kürzeren Reisezeiten für denselben führt oder wenn andere Verkehrsteilnehmende (z.B. Fußverkehr oder Radverkehr) dadurch eine Benachteiligung erfahren. Durch die Attraktivitätssteigerung des motorisierten Verkehrs im Vergleich zu den anderen Verkehrsteilnehmenden steigt die Nachfrage und damit auch die Emissionen (Rebound-Effekt).

Die Emissionen des Straßenverkehrs werden in Deutschland in aller Regel mit dem Handbuch für Emissionsfaktoren (HBEFA) berechnet. Darin sind Emissionsfaktoren für unterschiedliche Straßenkategorien und unterschiedliche Verkehrszustände hinterlegt. Die Kombination aus Straßenkategorie und Verkehrszustand wird als Verkehrssituation bezeichnet. Um die Berechnung mittlerer Emissionsfaktoren zu ermöglichen, verfügt das HBEFA zusätzlich über Informationen zu den Fahrleistungsanteilen in den einzelnen Verkehrssituationen. Diese Fahrleistungsanteile basierten in der zu Beginn des Forschungsvorhabens vorliegenden Version des HBEFA (Version 4.1) auf Erhebungen aus den 1990er Jahren.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden zwei Ziele verfolgt. Erstens sollten die Fahrleistungsanteile der Verkehrssituationen des HBEFA neu bestimmt und die Emissionsfaktoren ausgewählter Verkehrssituationen überprüft werden. Zweitens sollten ausgewählte Maßnahmen zur Verstetigung des Verkehrs analysiert und die Effekte einer Verstetigung auf die Emissionen berechnet werden. Die Untersuchung war so aufgebaut, dass die Ergebnisse aus dem ersten Teil der Arbeit als Datengrundlage für die Ermittlung der Maßnahmenwirkungen genutzt wurden (siehe Abbildung 1).

Abbildung 1: Struktur des Forschungsvorhabens



Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart

Aktualisierung der Fahrleistungsanteile der HBEFA-Verkehrssituation

Zur Aktualisierung der Fahrleistungsanteile wurden die unterschiedliche Datenquellen verschnitten. Als zentrale Datenquelle für Netzeigenschaften und Verkehrssituationen wurden Daten des Dienstleisters TomTom verwendet. Die Berechnung der Verteilung des Verkehrs basierte im großräumigen Netz größtenteils auf den Daten des Verkehrsnachfragemodells PTV-Validate, wobei die Gesamtfahrleistung nach Straßenklassen (Autobahn, Bundesstraßen, Landesstraßen, ...) an TREMOD kalibriert wurden.

In einem ersten Schritt wurde jedem Netzabschnitt des TomTom-Streckennetzes eine HBEFA-Straßenkategorie zugewiesen. Diese sind durch unterschiedliche Gebietstypen (Ländlich, Agglomeration), Straßentypen (z.B. Autobahn, Hauptverkehrsstraße, Erschließungsstraße) und zulässige Höchstgeschwindigkeiten definiert. Zu diesem Zweck wurden mit den Informationen des TomTom-Netzes (Functional Road Class, Speedlimit, ...) weitere Informationen aus OpenStreetMap (OSM) sowie CORINE-Land-Cover-Daten für die Bestimmung des Gebietstyps verschnitten. Dieser Arbeitsschritt war vergleichsweise aufwendig, da einerseits keine einheitlichen Datengrundlagen bestanden und eine Vielzahl von Sonderfällen durch die Kombinationen mehrerer Datenquellen abgedeckt werden mussten, andererseits die Definitionen der HBEFA-Straßenkategorien nicht in jedem Fall eine logische und eindeutige Zuordnung zulassen. Hervorzuheben ist die Verwendung von Landnutzungsdaten für die Zuordnung des Gebietstyps, die zwar der Definition des HBEFA entspricht, jedoch im Detail als unzureichendes Zuordnungskriterium erscheint. Es kann als ein Ergebnis dieses Arbeitsschrittes angesehen werden, dass derzeit in Deutschland keine Grundlage für eine einheitliche, systematische Zuordnung von HBEFA-Straßenkategorien für das real existierende Streckennetz besteht. Damit ist davon auszugehen, dass in Untersuchungen, die durch unterschiedliche Einrichtungen bearbeitet werden, jeweils unterschiedliche Annahmen getroffen werden. Insofern wäre eine deutschlandweite Straßennetzgrundlage, die eine eindeutige Zuordnung der HBEFA-Straßenkategorien ermöglicht, wünschenswert. Zusätzlich wurden in diesem Schritt den Streckenabschnitten jeweils eine HBEFA-Steigungsklasse zugeordnet. Dafür wurde das DGM des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie mit einer Gitterweite von 5 m verwendet.

Im zweiten Schritt wurde die räumliche Verteilung der Fahrleistungen auf die Streckenabschnitte des Netzes vorgenommen. Dafür wurden differenziert nach Functional Road

Class (FRC) des TomTom-Streckenabschnitts unterschiedliche Vorgehensweisen gewählt. Die Nachfrage auf Strecken der FRC 0 bis 3 (entspricht etwa Autobahnen bis Landesstraßen) wurden direkt aus dem Verkehrsnachfragemodell PTV-Validate übernommen. Für die FRC 4 wurde eine Hochrechnung aus regionalen Verkehrsnachfragemodellen (Region Dresden, Region Magdeburg und Region Stuttgart) vorgenommen. Für das untergeordnete Netz (FRC 5 bis 7) sind auch diese Modelle für eine Aufteilung der Fahrleistungen nicht mehr kleinräumig genug. Deshalb wurde eine Methode entwickelt, bei der Fahrten von jedem Wohnort aus den ZENSUS-2011-Daten (deutschlandweite Einwohnerzahlen in 100x100 m-Rastern) in das übergeordnete Streckennetz generiert wurden. Daraus ergaben sich streckenfeine Belastungen im untergeordneten Netz. Die so auf unterschiedlichen Ansätzen basierenden berechneten Netzbelastungen wurden anhand der Fahrleistungsckwerte für Deutschland nach Straßenklassen kalibriert. Für hochrangige Straßenklassen (Autobahnen, Bundesstraßen, ...) waren nur klein Korrekturfaktoren nötig. Die berechneten Fahrleistungen im untergeordneten Netz wurden nach oben korrigiert. Tabelle 1 zeigt das Ergebnis dieses Arbeitsschrittes für die Fahrzeugkategorie Pkw, nämlich die Fahrleistungsanteile je HBEFA-Straßenkategorie. Mit Blick auf dieses Ergebnis sind die grünen Felder für die weitere Entwicklung des HBEFA von Bedeutung, da für diese zum Zeitpunkt der Projektbearbeitung noch keine Emissionsfaktoren vorlagen.

Tabelle 1: Pkw-Fahrleistung differenziert nach HBEFA-Straßenkategorien in %

| g | s | v ² | | | | | | | | | | | | | Σ |
|----|-------|----------------|------|------|-------|------|------|------|----|-------|-----|------|------|--------|-------|
| | | <30 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 110 | 120 | 130 | >130 | |
| La | AB | | | | | 0,07 | | 0,38 | | 1,74 | | 3,15 | 2,79 | 18,57 | 26,71 |
| | FStr | | | | 0,03 | 0,08 | 0,16 | 0,27 | | 1,56 | | 0,72 | 0,06 | 0,30 | 3,17 |
| | HVS | | 0,11 | 0,03 | 2,61 | 0,71 | 5,30 | 1,60 | | 17,65 | | | | | 28,01 |
| | HVS-k | | 0,12 | 0,05 | 1,68 | 0,44 | 1,55 | 0,25 | | 4,17 | | | | | 8,26 |
| | SaS | | 0,05 | | 0,19 | 0,04 | 0,08 | 0,03 | | 0,54 | | | | | 0,94 |
| | SaS-k | | 0,04 | | 0,07 | | | | | 0,34 | | | | | 0,45 |
| | ErS | | 0,25 | | 0,78 | | | | | 1,67 | | | | | 2,70 |
| | Σ | | 0,58 | 0,08 | 5,37 | 1,33 | 7,09 | 2,54 | | 27,67 | | 3,87 | 2,84 | 18,87 | 70,24 |
| Ab | AB | | | | | 0,04 | | 0,61 | | 0,95 | | 0,86 | 0,52 | 2,20 | 5,18 |
| | St-AB | | | | 0,06 | 0,12 | 0,15 | 0,29 | | 0,42 | | 0,10 | | | 1,14 |
| | FStr | | 0,13 | | 3,54 | 0,31 | 0,75 | 0,12 | | 0,46 | | | | | 5,30 |
| | RiStr | | 0,10 | | 2,34 | 0,20 | 0,30 | 0,11 | | | | | | | 3,05 |
| | HVS | | 0,71 | 0,06 | 8,03 | 0,26 | 0,54 | 0,11 | | | | | | | 9,71 |
| | SaS | | 0,86 | | 1,13 | | | | | | | | | | 1,99 |
| | ErS | 0,06 | 1,83 | | 1,50 | | | | | | | | | | 3,38 |
| | Σ | 0,06 | 3,62 | 0,06 | 16,60 | 0,93 | 1,73 | 1,24 | | 1,83 | | 0,95 | 0,52 | 2,20 | 29,76 |
| Σ | | | | | | | | | | | | | | 100,00 | |

Für die hellgrün schraffierten Felder sind im HBEFA keine Emissionsfaktoren hinterlegt.

In einem dritten Schritt wurde dann die Fahrleistung auf die fünf Verkehrszustände nach HBEFA (flüssig, dicht, gesättigt, Stop&Go, Stop&Go II) aufgeteilt. Als primäre Datengrundlage wurde dafür Floating Car Data (FCD) von TomTom genutzt. Es lagen Geschwindigkeitsperzentile (20 Perzentilwerte, also die Geschwindigkeiten in 5 % Schritten), räumlich nach TomTom-Streckenabschnitten, zeitlich nach Wochentagtyp (Mo-Fr, Sa, So) und Stunde des Tages (24 Stunden) differenziert vor. Die räumliche Abdeckung umfasste das gesamte Streckennetz der FRC 0 bis 3 in Deutschland sowie zusätzlich der FRC 4 bis 6 für die Regionen Magdeburg,

Dresden und Stuttgart. Zunächst wurden die Netzbelastungen auf Grundlage der Verkehrsnachfragemodell- bzw. aufbereiteter Zählstellendaten entsprechend der Wochentagstypen und Stunden des Tages zeitlich aufgelöst. Daraufhin wurden für jedes Zeitintervall die Perzentilwerte einem HBEFA-Verkehrszustand zugeordnet, indem die Perzentilgeschwindigkeit mit den mittleren Geschwindigkeiten der HBEFA-Verkehrszustände verglichen wurde. Dementsprechend wurden die Anteile der Gesamtfahrleistung je Zeitintervall und Streckenabschnitt den Verkehrszuständen zugeordnet. Für Streckenabschnitte, für die entweder keine Geschwindigkeiten der Verkehrszustände oder keine TomTom-Geschwindigkeitsdaten bekannt waren, wurden die Werte von bekannten Streckenabschnitten mit möglichst vergleichbarer Charakteristik übertragen bzw. hochgerechnet.

Die Ergebnisse dieses Teils des Forschungsvorhabens wurden in der Version 4.2 des HBEFA implementiert. In diese neue Aufteilung der Fahrleistung auf die HBEFA-Verkehrssituationen sind deutlich mehr Verkehrssituationen besetzt, als dies bisher der Fall war. Insofern ist eine kleinteilige Gegenüberstellung der Ergebnisse nur bedingt möglich. Der globale Vergleich der wichtigsten Ergebnisgrößen des HBEFA zeigt folgende Veränderungen (Änderung der neuen Werte gegenüber HBEFA 4.1 für die Pkw-Flotte des Jahres 2020): +7,6 % Zeitverluste durch schlechtere Verkehrszustände gegenüber flüssigem Verkehr, -0,2 % CO₂-Emissionen, +0,5 % NO_x-Emissionen und +0,9 % PM-Emissionen.

Überprüfung ausgewählter Emissionsfaktoren von HBEFA-Verkehrssituationen

Für jede Verkehrssituation in HBEFA existiert genau ein spezifischer Emissionsfaktor, der basierend auf nur einem einzigen, für die entsprechende Verkehrssituation repräsentativen, Fahrzyklus berechnet wurde. Diese Fahrzyklen werden auch durch deren verkehrliche Kennwerte, wie der mittleren Geschwindigkeit, der relativen positiven Beschleunigung (RPA) und der Anzahl an Haltevorgängen charakterisiert. Da jedoch innerhalb einer Verkehrssituation die Fahrzyklen einzelner Fahrzeuge starken Schwankungen hinsichtlich deren verkehrlichen Kennwerten unterliegen, wurden ausgewählte Emissionsfaktoren von HBEFA-Verkehrssituationen innerhalb des Forschungsvorhabens simulationstechnisch überprüft. Die Überprüfung erfolgte durch einen Vergleich der HBEFA-Emissionswerte und der Emissionswerte aus Berechnungen mit dem mikroskopischen Fahrzeugemissionsmodell PHEM. Die für die PHEM-Berechnung zugrundeliegenden Fahrzeugtrajektorien (Weg-Zeit- bzw. Geschwindigkeit-Zeit-Verläufe) wurden hierbei mit einer mikroskopischen Verkehrsflusssimulation VISSIM der PTV AG für ausgewählte signalisierte Streckenzüge innerorts und für hochrangige BAB-Streckensegmente generiert. Um die Vergleichbarkeit bei der Überprüfung der Emissionsfaktoren zu gewährleisten mussten auch Korrekturfaktoren für die Laufleistung, die Umgebungstemperatur und für Vorkonditionierungszyklen bei den Emissionsberechnungen durch PHEM berücksichtigt werden. Beim Vergleich und der Gegenüberstellung der berechneten Emissionsergebnisse von PHEM und den Tabellenwerte aus HBEFA 4.1 wurde festgestellt, dass die resultierenden Emissionen im urbanen Bereich einer signalisierten Hauptverkehrsstraße und auch für einen BAB-Streckenzug basierend auf der Kopplung der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation VISSIM und des mikroskopischen Fahrzeugemissionsmodell PHEM in den meisten Fällen höher sind, als die Emissionstabellenwerte aus HBEFA 4.1. Je nach Verkehrszustand liegen die mittleren Abweichungen einzelner Emissionsfaktoren im Bereich von 10 % bis 30 % und hängen stark von der Fahrdynamik der zugrundeliegenden HBEFA-Fahrzyklen und der in VISSIM simulierten Fahrzyklen ab. Die Verkehrszustände dicht und flüssig weisen hierbei die geringsten Abweichungen bei der Überprüfung der ausgewählten Emissionsfaktoren auf.

Analyse und Systematisierung verkehrlicher Maßnahmen mit Verstetigungswirkung

Für die Untersuchung der Wirkung von Verstetigungseffekten und gleichermaßen für die verkehrspolitische Diskussion dieser Maßnahmen ist zunächst eine genauere Abgrenzung des Verstetigungsbegriffs für den motorisierten Straßenverkehr notwendig. In diesem Abschnitt der Arbeit wird herausgearbeitet, dass der Begriff der Verstetigung des Verkehrsflusses auf das Erreichen eines gleichmäßigeren Verkehrsflusses, also eine Minderung der Beschleunigungs- und Abbremsvorgänge beschränkt werden sollte. Dieser Effekt hat immer die Wirkung, dass die spezifischen Emissionsfaktoren abnehmen, sofern die mittlere Geschwindigkeit unverändert bleibt. Da die Fahrdynamik aber in den allermeisten Fällen auch mit der mittleren Geschwindigkeit in Bezug steht, bedeutet eine Verstetigung nicht unbedingt einen Rückgang der spezifischen Emissionsfaktoren: Beispielsweise kann die Minderung der Fahrleistung auf einer stark befahrenen Autobahn verstetigend wirken, da die Durchschnittsgeschwindigkeit aber stark zunimmt, werden in Summe mehr Emissionen verursacht (da ein Fahrzeug bei 140 km/h deutlich mehr verbraucht und emittiert als bei 80 km/h, hierzu ist der Einfluss der Gleichmäßigkeit des Verkehrsflusses vergleichsweise gering). Maßnahmen aus dem Bereich der Ordnungspolitik, die bei der zulässigen Höchstgeschwindigkeit ansetzen, haben demnach nicht immer in erster Linie ein Verstetigungsziel, können eine Verstetigung aber unterstützen.

Nach der eben beschriebenen Differenzierung der Wirkungsweisen wurden Maßnahmen aus verkehrsplanerischen und -politischen Planwerken in Deutschland analysiert. Insgesamt wurden 46 Maßnahmentypen gefunden, die sich nach ihrer Wirkung auf den Verkehrsfluss unterscheiden und derzeit in den verkehrsbezogenen Planwerken in Deutschland von Relevanz sind. Diese wurden in 11 Maßnahmenkategorien eingeteilt. Die strukturierte Analyse mit einer Unterscheidung zwischen der Zielerreichung im Bereich des Klimaschutzes (unabhängig vom Emissionsort) bzw. im Bereich der Luftreinhaltung (Emissionsort relevant) zeigt, dass nicht alle Maßnahmen zwangsläufig für die Erreichung beider Ziele oder gar des angestrebten Ziels geeignet sein müssen.

Wirkungsabschätzung der Verstetigung durch verkehrliche Maßnahme

Es wurden sieben Maßnahmen ausgewählt, deren Wirkungen auf die Emissionen quantifiziert wurden. Teilweise fanden die Berechnungen für unterschiedliche Untersuchungsräume bzw. in unterschiedlichen Ausprägungen statt, weshalb insgesamt zehn Modellfälle untersucht wurden (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2: Zusammenfassung der Modellierungsergebnisse

| Maßnahme | Fahrleistung | Geschwindigkeit | CO ₂ | | NO _x | | PM | |
|--------------------|--------------|-----------------|-----------------|---------|-----------------|---------|-----------------|---------|
| | | | Emissionsfaktor | Gesamt | Emissionsfaktor | Gesamt | Emissionsfaktor | Gesamt |
| T120 BAB | -1,8 % | -2,8 % | -3,8 % | -4,2 % | -10,3 % | -9,6 % | -9,3 % | -6,6 % |
| T120 BAB, T80 AO | -2,5 % | -6,0 % | -4,3 % | -5,1 % | -11,9 % | -11,1 % | -10,2 % | -7,3 % |
| T30 – Dresden | -8,3 % | -15,0 % | +2,6 % | -5,5 % | +1,9 % | -5,0 % | +6,2 % | -1,3 % |
| T30 – Magdeburg | -2,8 % | -11,7 % | +1,7 % | -0,5 % | +1,6 % | +0,1 % | +4,1 % | +2,4 % |
| T30 – Stuttgart | -3,0 % | -6,0 % | +0,3 % | -2,4 % | -0,3 % | -2,5 % | +1,7 % | -0,5 % |
| Besetzungsgrad | -18,8 % | +7,0 % | -0,7 % | -14,8 % | +0,6 % | -14,1 % | +0,7 % | -11,6 % |
| PSV – konservativ | -0,7 % | +1,1 % | -0,2 % | -0,7 % | -0,1 % | -0,7 % | -0,2 % | -0,6 % |
| PSV – optimistisch | -2,1 % | +2,5 % | -0,5 % | -1,9 % | -0,1 % | -1,7 % | -0,2 % | -1,5 % |
| Pkw-Maut | -11,6 % | +3,1 % | -0,7 % | -9,1 % | -0,8 % | -9,9 % | -0,6 % | -8,4 % |
| LSA-Steuerung | +2,7 % | +4,8 % | -1,2 % | +0,6 % | -1,3 % | +0,3 % | -1,1 % | +0,6 % |

Anmerkungen:

- Alle Wirkungen beziehen sich auf den Gesamtverkehr im jeweiligen Untersuchungsraum. Bei den Maßnahmen T120 BAB und T120 BAB, T80 AO umfasst dieser ganz Deutschland und alle HBEFA-Fahrzeugkategorien, bei den weiteren Maßnahmen jeweils ausgewählte Stadtregionen und die Fahrzeugkategorien Pkw, SNF, LNF.
- Die Wirkungen auf Geschwindigkeit und Emissionsfaktoren sind auf das Einzelfahrzeug bezogen. Da diese Wirkungen sowie die Wirkung auf die Fahrleistung für die einzelnen Fahrzeugkategorien unterschiedlich groß ausfallen, kann die Wirkung auf die Gesamtemissionen nicht direkt aus den angegebenen Werten berechnet werden.
- Die spezifischen Emissionsfaktoren basieren auf dem HBEFA 4.1. Für PM sind ausschließlich die Abgas-Emissionen berücksichtigt.
- Die Fahrleistung und die Emissionsfaktoren sind grün eingefärbt, wenn sie die gewünschte Wirkrichtung haben, also abnehmen.

Wie in Tabelle 2 verdeutlicht, lassen sich die Modellfälle in vier Gruppen zusammenfassen:

► **Herabsetzen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit außerorts**

Als Vertreter dieser Gruppe wurden zwei Maßnahmen untersucht, nämlich ein deutschlandweites Tempolimit von maximal 120 km/h auf Autobahnen (T120 BAB) und ein deutschlandweites Tempolimit von maximal 120 km/h auf Autobahnen kombiniert mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit im Außerortsbereich von maximal 80 km/h (T120 BAB, T80 AO).

► **Herabsetzen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit innerorts**

Unter dieser Gruppe wurde nur eine Maßnahme betrachtet, diese wurde für die drei Stadtregionen Dresden (T30 – Dresden), Magdeburg (T30 – Magdeburg) und Stuttgart (T30 – Stuttgart) jeweils getrennt untersucht. Es wurde eine deutschlandweit ungesetzte Regelgeschwindigkeit von 30 km/h im Innerortsbereich angenommen, wobei ausgewählte überregionale Verbindungsstraßen (meist Bundesstraßen mit mehreren Fahrstreifen) ausgenommen wurden.

► **Minderung der Pkw-Fahrleistung**

In diesem Bereich wurden unterschiedliche Annahmen modelliert, die zu einer Minderung der Pkw-Fahrleistung führen und damit auslastungsbedingt auch auf den Verkehrsfluss wirken. Den getroffenen Annahmen können unterschiedlich konkret verkehrsplanerische Maßnahmen zugeordnet werden. In einem Fall wurde in der Region Dresden ein erhöhter Besetzungsgrad von im Mittel 2,0 angenommen (Besetzungsgrad). Verkehrsplanerische bzw. -politische Maßnahmen, um dieses Ziel zu erreichen, wurden dabei nicht betrachtet. Ebenfalls für die Region Dresden wurden zwei Szenarien eines reduzierten Parksuchverkehrs (PSV – konservativ, PSV – optimistisch) untersucht. Auch hier ist keine konkrete Maßnahme zugeordnet, es wurde jedoch in den Annahmen darauf geachtet, in einem planerisch oder technologisch plausiblen Bereich zu liegen. Am konkretesten ist die Maßnahme einer fahrweitenbezogenen Pkw-Maut von 6 Cent/km, die für die Region Stuttgart untersucht wurde.

► **Verkehrstechnische Verstetigungsmaßnahmen**

Sinnbildlich für Maßnahmen, die darauf abzielen eine Verstetigung des Verkehrs durch eine verbesserte Steuerung herbeizuführen, ohne dabei eine Verschlechterung der MIV-Erreichbarkeit zu bewirken, wurde die Maßnahme einer flächendeckenden Lichtsignalanlagen-Optimierung im Innerortsbereich (LSA-Steuerung) untersucht.

Die Quantifizierung der Wirkungen der Maßnahmen wurde in mehrere Schritte unterteilt, wodurch es möglich war, die einzelnen Einflussfaktoren auf die Emissionen möglichst genau zu differenzieren. Im Folgenden ist die Abfolge dieser Schritte wiedergegeben:

- a) Bei Maßnahmen, durch die die Streckeneigenschaften verändert werden (hier: Tempolimits) wurde zunächst ein Zustand abgebildet, in dem die direkte Wirkung durch die Änderung der HBEFA-Straßenkategorie abgebildet wurde, jedoch noch keine Nachfrage- und Auslastungseffekte berücksichtigt wurden.
- b) Bei der Maßnahme der Optimierung der LSA-Steuerung wurden zunächst Zu- bzw. Abschläge für die Emissionen, die durch die Haltevorgänge an den betroffenen Knotenpunkten entstehen, eingefügt. Auch hier wurde der Einfluss auf die Verkehrsnachfrage und die Verkehrszustände noch nicht berücksichtigt.
- c) Daraufhin wurde die Wirkung der Maßnahme auf die Verkehrsnachfrage berechnet. Dafür wurde das Verkehrsnachfragemodell PTV-Validate für die deutschlandweit modellierten Maßnahmen und regionale Verkehrsnachfragemodelle für die verbleibenden Maßnahmen genutzt. Zunächst wurde ausschließlich die Veränderung der Routenwahl berechnet, um mögliche Verlagerungseffekte identifizieren zu können.
- d) Im Anschluss wurde auch die Ziel- und Moduswahl neu berechnet, um die Veränderung der Fahrleistung (also in bestimmten Fällen die Wirkung des Rebound-Effekts) ausmachen zu können. Es wurde die übliche Rückkopplung zur Berücksichtigung der auslastungsabhängigen Fahrzeiten im MIV durchgeführt. Bei der Emissionsberechnung wurden die Verkehrszustände jedoch noch nicht angepasst.
- e) Dies erfolgte in einem letzten Rechenschritt, durch den die Wirkungen der Auslastungen auf den Verkehrsfluss und damit auf die verursachten Emissionen offengelegt wurde. Zu diesem Zweck wurden als Ausgangspunkt wiederum die aufbereitete FCD von TomTom herangezogen, wobei die Geschwindigkeitsperzentile für die Emissionsberechnung im Maßnahmenfall auf Grundlage der in den Verkehrsmodellen ermittelten Veränderungen der Streckenbelastungen angepasst wurden.

Die in Tabelle 2 dargestellten Ergebnisse zeigen ein Muster, das die unterschiedlichen Wirkungsweisen der Maßnahmengruppen erkennen lässt.

Das Herabsetzen der zulässigen Geschwindigkeit auf Autobahnen und im Außerortsbereich wirkt sowohl im Bereich des Verkehrsflusses als auch der Verkehrsnachfrage im Sinne der Zielerreichung einer Emissionsminderung. Die geringeren Geschwindigkeiten führen zu geringeren spezifischen Emissionsfaktoren und gleichzeitig zu einem Rückgang der Verkehrsnachfrage. Die berechneten Emissionsminderungen sind tendenziell höher als in bisherigen vergleichbaren Studien, was vor allem daran liegt, dass die Nachfrageeffekte mitberücksichtigt wurden.

Das Herabsetzen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit im Innerortsbereich wirkt dagegen zwar fahrleistungsmindernd, die Emissionsfaktoren nehmen dagegen nahezu in allen untersuchten Fällen zu. Dies resultiert daraus, dass das HBEFA für Hauptverkehrsstraßen bei einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 30 km/h höhere Emissionsfaktoren für den Pkw angibt als bei 50 km/h (bei unveränderten Verkehrszuständen). Da die Nachfragewirkung meist überwiegt, ist das Gesamtergebnis mit Blick auf die Emissionen in der Regel aber dennoch positiv.

Unter der Maßnahmengruppe mit dem primären Ziel der Minderung der Fahrleistung wurden sehr unterschiedliche Maßnahmen modelliert. Im Vordergrund der Ergebnisse steht hier nicht die Fahrleistungseinsparung, sondern deren Wirkung auf den Verkehrsfluss und das Emissionsgeschehen. Während die veränderte Auslastung des Straßennetzes eine relative starke Wirkung auf die mittlere Fahrgeschwindigkeit hat, sind die Wirkungen auf die Emissionen gering. Der Beitrag der auslastungsbedingten Verbesserung der Verkehrszustände an den gesamten Emissionseinsparungen ist von der Größenordnung her um den Faktor 10 bis 20 geringer als die Wirkung der Fahrleistungsminderung an sich.

Die Untersuchung einer optimierten LSA-Steuerung als Repräsentant von verkehrstechnischen Maßnahmen zur Verstetigung des Verkehrs wurde auf Basis einer fiktiven Ausgangssituation von unkoordinierten Straßenzügen untersucht und anhand des Verkehrsnachfragemodells der Region Dresden hochgerechnet. Hier zeigt sich klar ein Rebound-Effekt, da die deutliche Beschleunigung des motorisierten Verkehrs zu einer Nachfragesteigerung führt. Da diese höher ist als der Rückgang der spezifischen Emissionsfaktoren, führt die Maßnahme in Summe zu einem Mehrverbrauch. Zwar ist dieses Ergebnis nicht allgemein übertragbar, es zeigt jedoch, dass die bei der Bewertung verkehrstechnischer Maßnahmen die häufig vernachlässigten Nachfrageeffekte dringend zu berücksichtigen sind.

Summary

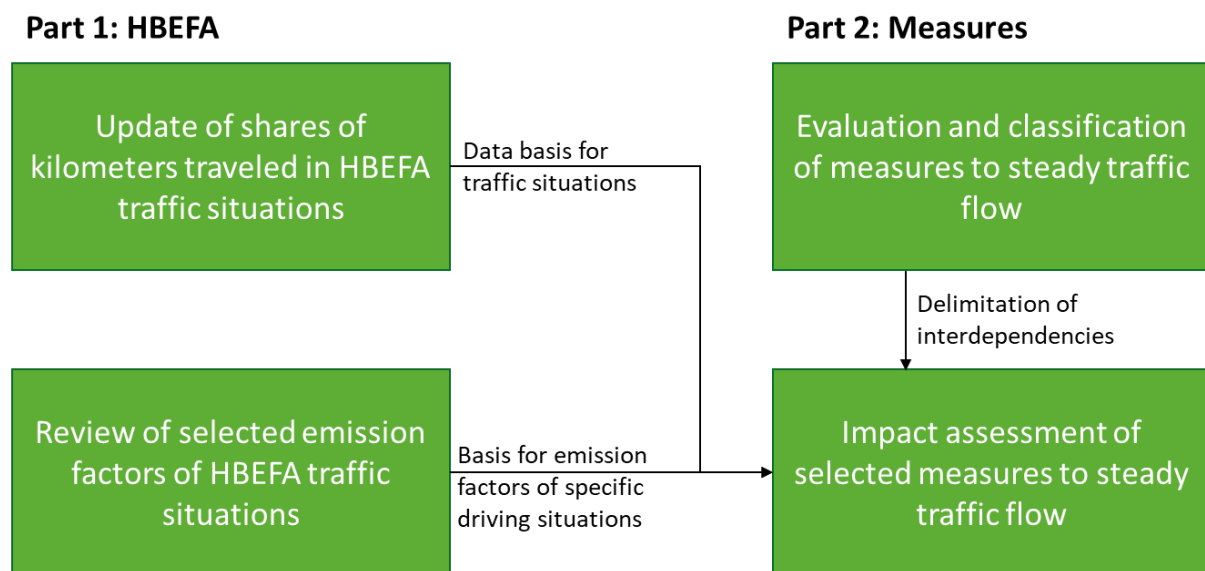
One focus of sustainable transport planning and policy is the implementation of measures to reduce traffic-related emissions. For that matter a distinction between targets of climate protection and targets of air pollution reduction is important. In order to achieve climate protection goals, emissions of the greenhouse gas CO₂ must be reduced. In the case of air pollution reduction, air pollutants (including NO_x and particulate matter) must be limited for reasons of health protection. These substances effect people and environment locally; inner-city areas and certain hotspots are particularly affected.

One way to reduce traffic-related emissions of CO₂ and air pollutants is to enable smooth traffic flow. The background is that a smooth traffic flow leads to fuel savings and decreasing energy consumption and thus directly to a reduction of greenhouse gas and air pollutant emissions. Some traffic measures directly aim at harmonizing traffic flow. Measures that influence traffic flow include, for example, optimized coordination of green times at traffic signals or adjustment of speed limits. However, the capacity utilization of roads and intersections in the road network also affects traffic flow, that is why measures with the primary goal of reducing travel demand indirectly lead to steadier traffic flow. However, the interaction between traffic demand and traffic flow can also have a negative effect on the measure's effectiveness. This is the case, if an improved traffic flow for motorized traffic leads to shorter travel times or if other road users (e.g. pedestrians or cyclists) experience a disadvantage as a result. Increasing the attractiveness of motorized transport compared to other transport users increases demand and thus also emissions (rebound effect).

In Germany, emissions from road traffic are mostly calculated using the Handbook of Emission Factors (HBEFA). The HBEFA contains emission factors for different road categories and different traffic conditions. The combination of road category and traffic condition is called traffic situation. To enable the calculation of average emission factors, the HBEFA also contains information on the shares of kilometers traveled in each traffic situation. In the version of the HBEFA available at the beginning of the research project (version 4.1), these shares of kilometers traveled were based on data from the 1990s.

Two objectives were pursued within the framework of the research project. First, the shares of kilometers traveled in each traffic situation of the HBEFA were to be re-determined and the emission factors of selected traffic situations were to be reviewed. Second, selected measures for smoothing traffic flow were to be analyzed and the effects of these measures on emissions were to be calculated. The study was structured in such way that the results from the first part of the work (HBEFA) were used as data basis for determining the effects of the measures (see Figure 2).

Figure 2: Structure of the research project



Source: compiled by the author, ISV Universität Stuttgart

Update of shares of kilometers traveled in HBEFA traffic situations

To update the shares of kilometers traveled in each HBEFA traffic situation, different data sources were merged. Data from the provider TomTom were used as the central data source for network characteristics and traffic situations. The distribution of vehicle kilometers traveled in the road network was based in a large extend on the data of the travel demand model PTV-Validate and calibrated on the total kilometers traveled by road class (freeway, federal roads, state roads, ...) according to TREMOD.

In a first step, each road segment of the TomTom road network was assigned a HBEFA road category. These are defined by different area types (rural, agglomeration), road types (e.g. highway, main road, access road) and speed limit. For this purpose, information from the TomTom network (Functional Road Class, Speedlimit, ...) was blended with information from OpenStreetMap (OSM) as well as CORINE land cover data for the determination of the area type. This work step was time-consuming for two reasons. Firstly, no uniform data basis existed and a multitude of special cases had to be covered by combining several data sources. Secondly, the definitions of the HBEFA road categories do not allow a clear assignment in every case. It has to be emphasized, that the usage of land use data for the assignment of the area type corresponds to the definition of the HBEFA, though it seems to be an insufficient assignment criterion in detail. One conclusion of this work step is that there is currently no basis in Germany for a uniform, systematic assignment of HBEFA road categories to the real existing road network. Thus, it can be assumed that studies processed by different institutions use different assumptions for the assignment nowadays. In this respect, it would be desirable to have a Germany-wide road network as a basis that would allow a systematic assignment of the HBEFA road categories. . Moreover, the road segments were additionally assigned an HBEFA gradient class. For this purpose, the digital terrain model of the Federal Agency for Cartography and Geodesy with a grid size of 5 m was used.

In a second step, the spatial distribution of the kilometers traveled to the road network was carried out. For this purpose, several approaches were applied, differentiated according to the Functional Road Class (FRC) of each TomTom road segment. The traffic volume on roads of FRC 0 to 3 (roughly corresponding to highways and state roads) was taken directly from the travel

demand model PTV-Validate. For FRC 4, an extrapolation from regional travel demand models (Dresden Region, Magdeburg Region and Stuttgart Region) was carried out. Even these models are not small-scale enough for assigning the travel demand to the subordinate network (FRC 5 to 7). Therefore, a method was developed to estimate car trips from each place of residence. The number of trips was calculated using ZENSUS 2011 data (nationwide population data in 100x100 m grids). Assigning the trips to the network resulted in route-specific traffic volume in the subordinate road classes. The calculated network volume, based on the mentioned approaches, were calibrated according to values for total kilometers traveled per road class and vehicle category according to TREMOD. For high-ranking road classes (highways and federal roads, ...) only small adjustment factors were necessary. The calculated kilometers traveled in the lower-ranking network were estimated too low and therefore adjusted upwards. Table 3 shows the result of this step for the vehicle category passenger cars, namely the shares of kilometers traveled per HBEFA road category. The green cells in Table 3 are of importance for the further development of the HBEFA, since HBEFA emission factors are not yet available for these road categories.

Table 3: Car vehicle kilometers traveled differentiated by HBEFA road categories in %

| area and road type | | Speedlimit | | | | | | | | | | | | Σ | |
|--------------------|-------|------------|------|------|-------|------|------|------|----|-------|-----|------|------|---------------|-------|
| | | <30 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 110 | 120 | 130 | | >130 |
| Rural | AB | | | | | 0.07 | | 0.38 | | 1.74 | | 3.15 | 2.79 | 18.57 | 26.71 |
| | FStr | | | | 0.03 | 0.08 | 0.16 | 0.27 | | 1.56 | | 0.72 | 0.06 | 0.30 | 3.17 |
| | HVS | | 0.11 | 0.03 | 2.61 | 0.71 | 5.30 | 1.60 | | 17.65 | | | | | 28.01 |
| | HVS-k | | 0.12 | 0.05 | 1.68 | 0.44 | 1.55 | 0.25 | | 4.17 | | | | | 8.26 |
| | SaS | | 0.05 | | 0.19 | 0.04 | 0.08 | 0.03 | | 0.54 | | | | | 0.94 |
| | SaS-k | | 0.04 | | 0.07 | | | | | 0.34 | | | | | 0.45 |
| | ErS | | 0.25 | | 0.78 | | | | | 1.67 | | | | | 2.70 |
| | Σ | | 0.58 | 0.08 | 5.37 | 1.33 | 7.09 | 2.54 | | 27.67 | | 3.87 | 2.84 | 18.87 | 70.24 |
| Urban | AB | | | | | 0.04 | | 0.61 | | 0.95 | | 0.86 | 0.52 | 2.20 | 5.18 |
| | St-AB | | | | 0.06 | 0.12 | 0.15 | 0.29 | | 0.42 | | 0.10 | | | 1.14 |
| | FStr | | 0.13 | | 3.54 | 0.31 | 0.75 | 0.12 | | 0.46 | | | | | 5.30 |
| | RiStr | | 0.10 | | 2.34 | 0.20 | 0.30 | 0.11 | | | | | | | 3.05 |
| | HVS | | 0.71 | 0.06 | 8.03 | 0.26 | 0.54 | 0.11 | | | | | | | 9.71 |
| | SaS | | 0.86 | | 1.13 | | | | | | | | | | 1.99 |
| | ErS | 0.06 | 1.83 | | 1.50 | | | | | | | | | | 3.38 |
| | Σ | 0.06 | 3.62 | 0.06 | 16.60 | 0.93 | 1.73 | 1.24 | | 1.83 | | 0.95 | 0.52 | 2.20 | 29.76 |
| Σ | | | | | | | | | | | | | | 100.00 | |

- Meaning of abbreviations for road types (according to Ericsson et al. 2019): AB = Motorway/Highway, St-AB = Motorway within build up area/city / high-speed/high capacity road, FStr = Motor road/Express road, RiStr = Major city arterial, HVS = Rural: Secondary road/Medium capacity road/Minor artery, Urban: Medium capacity main road, HVS-k = HVS with curves, SaS = Local collectors/Medium or minor roads, SaS-k = SaS with curves, ErS = Local access roads/Minor Road
- Green cells indicate missing HBEFA emission factors

In a third step, the mileage was divided into the five traffic conditions according to HBEFA (free flow, heavy traffic, saturated traffic, stop & go, stop & go II). Floating Car Data (FCD) from TomTom was used as primary data basis. Speed percentiles (20 percentile values, i.e., the speeds in 5 % increments), spatially differentiated by TomTom road segments, temporally differentiated by weekday type (Mon-Fri, Sat, Sun), and hour of the day (24 hours) were

available. The spatial coverage included the entire road network of FRC 0 to 3 in Germany and additionally FRC 4 to 6 for the regions Magdeburg, Dresden and Stuttgart. First, the network traffic volumes were distributed according weekday types and hours of the day based on travel demand model results or count data. For each time interval, the number of vehicles of each percentile were assigned to a HBEFA traffic condition by comparing the percentile speed values with the mean speeds of the HBEFA traffic conditions. For road segments with missing information on traffic condition speeds according to HBEFA or TomTom speed data the distributions of traffic conditions of road segments with comparable characteristics were transferred or extrapolated.

The result of this part of the research project was implemented in HBEFA Version 4.2. The new allocation assigns shares of vehicle kilometers traveled to more different HBEFA traffic situations than the earlier allocation. The global comparison of the most important result indicators of HBEFA shows the following changes (change of the new values compared to HBEFA 4.1 for the passenger car fleet of the year 2020): +7.6% time loss due to worse traffic conditions compared to free flow, -0.2 % CO₂ emissions, +0.5 % NO_x emissions, and +0.9 % PM emissions.

Review of selected emission factors of HBEFA traffic situations

An emission factor in HBEFA for a certain traffic situation is based on only one representative driving cycle each. Average speed, relative positive acceleration (RPA) and number of stops are traffic characteristics to describe these driving cycles. However, since the driving cycles of individual vehicles are subject to strong fluctuations with regard to their traffic characteristics within a traffic situation, selected emission factors of HBEFA traffic situations were verified by simulation within the research project. The verification was carried out by comparing the emissions calculated according to HBEFA and emission values from calculations with the microscopic vehicle emission model PHEM. Vehicle trajectories generated with the microscopic traffic flow simulation software VISSIM of PTV AG built the basis of the PHEM calculations for street segments in urban areas and high-ranking motorway segments.

To ensure comparability when comparing the emission factors, correction factors for kilometers traveled, ambient temperature and preconditioning cycles were established in the PHEM calculations. When comparing the results from PHEM and from HBEFA 4.1, it was found that the PHEM emissions are higher in most cases for both the urban area of a signalized main road and the highway segment. The deviations are in the range of 10 % to 30 % depending on the traffic condition, the driving dynamics of the underlying HBEFA driving cycles and the driving cycles simulated in VISSIM. The traffic conditions “heavy traffic” and “free flow” show the smallest deviations in the verification of the selected emission factors.

Evaluation and classification of measures for smoothing traffic flow

For the investigation of the effectiveness of a smoother traffic flow due to transport-related measures and thus for the political discussion of these measures, a precise definition of the concept of smoothing traffic flow is necessary. In this section of the research project, it is elaborated that smoothing traffic flow should be limited a reduction of acceleration and deceleration processes. This effect always has the effect of decreasing the specific emission factors, provided that the mean speed remains unchanged. However, since driving dynamics affect the mean speed in the vast majority of cases, smoothing traffic flow does not necessarily mean a decrease in emission factors. For example, reducing the traffic volume on a saturated highway can have a positive effect in terms of smoothing traffic flow, but since the average speed increases sharply, the emission factors increase in total (since the effect of a higher fuel consumption at 140 km/h than at 80 km/h is significantly stronger than the effect of smoothing the traffic flow). Regulatory policy measures aiming at lower speed limits do not always have

smoothing traffic flow as main objective, but they can support reaching this objective additionally.

After the differentiation of the modes of action just described, measures from traffic planning and policy plans in Germany were analyzed. A total of 46 types of measures were found that differ in terms of their effect on traffic flow and are currently relevant in transport-related plans in Germany. These were divided into 11 categories of measures. The structured analysis with a distinction between the achievement of objectives in the field of climate protection (independent of emission location) or in the field of air pollution control (emission location relevant) shows that not all measures must necessarily be suitable for the achievement of both objectives or even the intended objective.

Impact assessment of selected measures on traffic flow

The effectiveness in terms of emission reduction of seven selected measures were quantified. Some measures were applied to different study areas or with different characteristics, which is why a total of ten model cases were examined (see Table 4).

Table 4: Summary of modeling results

| Measure | Kilometer traveled | Speed | CO ₂ | | NO _x | | PM | |
|-----------------------|--------------------|---------|-----------------|---------|-----------------|---------|-----------------|---------|
| | | | Emission factor | Total | Emission factor | Total | Emission factor | Total |
| MaxSpeed120 | -1.8 % | -2.8 % | -3.8 % | -4.2 % | -10.3 % | -9.6 % | -9.3 % | -6.6 % |
| MaxSpeed120/80 | -2.5 % | -6.0 % | -4.3 % | -5.1 % | -11.9 % | -11.1 % | -10.2 % | -7.3 % |
| MaxSpeed30-Dresden | -8.3 % | -15.0 % | +2.6 % | -5.5 % | +1.9 % | -5.0 % | +6.2 % | -1.3 % |
| MaxSpeed30-Magdeburg | -2.8 % | -11.7 % | +1.7 % | -0.5 % | +1.6 % | +0.1 % | +4.1 % | +2.4 % |
| MaxSpeed30-Stuttgart | -3.0 % | -6.0 % | +0.3 % | -2.4 % | -0.3 % | -2.5 % | +1.7 % | -0.5 % |
| CarOccupancyRate | -18.8 % | +7.0 % | -0.7 % | -14.8 % | +0.6 % | -14.1 % | +0.7 % | -11.6 % |
| Cruising-Conservative | -0.7 % | +1.1 % | -0.2 % | -0.7 % | -0.1 % | -0.7 % | -0.2 % | -0.6 % |
| Cruising-Optimistic | -2.1 % | +2.5 % | -0.5 % | -1.9 % | -0.1 % | -1.7 % | -0.2 % | -1.5 % |
| Passenger car toll | -11.6 % | +3.1 % | -0.7 % | -9.1 % | -0.8 % | -9.9 % | -0.6 % | -8.4 % |
| TrafficSignalControl | +2.7 % | +4.8 % | -1.2 % | +0.6 % | -1.3 % | +0.3 % | -1.1 % | +0.6 % |

Notes:

- All effects refer to the total traffic in the respective study area. For the measures MaxSpeed120 and MaxSpeed120/80 this includes the whole of Germany and all HBEFA vehicle categories. For the other measures, this includes selected urban regions and the vehicle categories Passenger Car, Light Commercial Vehicles and Heavy Goods Vehicles.
- Effects on speed and emission factors: The values displayed refer to the individual vehicles within each vehicle category. Due to changes in the composition of vehicle categories, it is not possible to derive the effects on total emissions directly from the effects on the kilometers traveled and emission factors given in the table.
- The emission factors are based on HBEFA 4.1. For PM, only exhaust emissions are considered.
- The kilometers traveled and emission factors are colored green if they have the desired effect (decrease).

As illustrated in Table 4, the model cases can be aggregated into four groups:

► **Reducing the speed limit outside urban areas**

Two measures represent this group, namely a nationwide speed limit with a maximum of 120 km/h on highways (MaxSpeed120) and a nationwide speed limit with a maximum of 120 km/h on highways combined with a maximum of 80 km/h outside urban areas (MaxSpeed120/80).

► **Reducing the speed limit in urban areas**

Only one type of measure was considered under this group, but it was separately examined for the three urban regions Dresden (MaxSpeed30-Dresden), Magdeburg (MaxSpeed30-Magdeburg), and Stuttgart (MaxSpeed30-Stuttgart). A nationwide speed limit of 30 km/h in urban areas was assumed, with the exception of selected interregional connecting roads (mostly federal roads with several lanes).

► **Reduction of vehicle kilometers traveled**

Under this group of measures, different assumptions were modeled that lead to a reduction in kilometers traveled by passenger car and thus have an effect on traffic flow. The assumptions differ in terms of the concreteness of traffic planning measures assigned. In one case, an increased occupancy rate of 2.0 on average was assumed for the Dresden region (Occupancy rate of cars). Transport planning or policy measures to achieve this goal were not considered. For the Dresden region as well, two scenarios of reduced cruising for parking (Cruising-Conservative, Cruising-Optimistic) were examined. Again, no specific measure was assigned, but the assumptions were chosen in a way, that the range is plausible considering possibilities due to planning or technology. The most concrete measure is a passenger car toll of 6 cents/km, which was examined for the Stuttgart region (Toll).

► **Traffic engineering measures for smoothing traffic flow**

As an example for measures aiming at smoothing traffic flow by optimizing traffic control, a large-scale traffic signal control optimization in inner-city areas (TrafficSignalControl) was examined.

The quantification of the effectiveness of the measures was divided into several steps, which made it possible to differentiate the single effects influencing emissions as precisely as possible. The sequence of these steps is shown below:

- a) For measures effecting traffic flow by changing the roadway characteristics (here: speed limits), such direct effect where captured by changing the HBEFA road category. At this step demand and utilization effects were not yet considered.
- b) For the measure of optimizing traffic light control, changes in the emissions caused by stops at the affected intersections were modelled isolated in this step. Again, the effect on traffic demand and changes in traffic conditions were not yet considered.
- c) Calculating the effect of the measure on traffic demand was the next step. To do so, for measures modeled nationwide the travel demand model PTV-Validate was used, while the calculations for the remaining measures were based on regional travel demand models. Before calculating all steps of travel demand modelling the changes in route choice were considered isolated in order to identify spatial relocation of traffic.
- d) The subsequent calculation of destination and mode choice showed the effects on kilometers traveled in total (in certain cases, the rebound effect). The common feedback loop was performed to consider volume dependency of travel times in motorized private

transport. In the emissions calculation, however, the traffic conditions were not yet adjusted.

- e) This was done in a final calculation step, which revealed the effects of traffic volume on traffic flow and thus on the emissions caused. For this purpose, the processed FCD from TomTom was used as a starting point. The speed percentiles for the emission calculation were adjusted in the measure case based on the changes in the traffic volumes of the road segments determined in the travel demand models.

The results presented in Table 4 show a pattern that reflects the differences between the groups of measures in terms of effects acting on the changes in total emissions caused.

Reducing the speed limit outside urban areas has an effect on both traffic flow and travel demand in terms of achieving the goal of reducing emissions. The lower speeds lead to lower emission factors and at the same time to a decrease in travel demand. The calculated emission reductions tend to be higher than in previous comparable studies, mainly due to the fact that demand effects were taken into account.

In contrast, reducing the speed limit in urban areas has the effect of reducing kilometers traveled, but emission factors increase in almost all cases investigated. This results from the fact that the HBEFA indicates higher emission factors for passenger cars on main roads at a speed limit of 30 km/h than at a speed limit of 50 km/h (assuming unchanged traffic conditions). However, since the demand effect predominates, the overall result with regard to emissions is still positive.

In the group of measures aiming primarily at reducing kilometers traveled, very different measures were modeled. Interpreting the results of these measures, the focus is not on the total reduction of kilometers traveled, but on their effect on traffic flow and emissions. While the change in road network utilization has a quite strong effect on average travel speed, the effects on emissions are small. The contribution of the improvement in traffic conditions due to the utilization of the roads to the total emission savings is smaller in magnitude by a factor of 10 to 20 than the effect of the reduction of vehicle kilometers traveled per se.

The examination of an optimized traffic signal control as representative measure of traffic engineering measures to smooth traffic flow was executed on the basis of a fictitious initial situation of uncoordinated traffic signal controls and extrapolated using the travel demand model of the Dresden region. Here, a rebound effect is clearly evident, since the increase in speed of motorized traffic leads to an increase in demand. Since this predominates the decrease in emission factors due to better traffic flow, the measure causes an overall increase in fuel consumption and emissions. Although this result is not generally transferable, it shows that effects on travel demand, which are often neglected, urgently need to be taken into account when evaluating traffic engineering measures.

1 Hintergrund und Aufbau der Studie

1.1 Einordnung und Begrifflichkeiten

Ein bedeutendes Ziel einer nachhaltigen Verkehrsplanung und -politik ist die Reduzierung schädlicher stofflicher Emissionen. Dabei wird zwischen Zielen des Klimaschutzes und der Luftreinhaltung unterschieden.

Im Sinne des Klimaschutzes sind im Verkehr die Emissionen des Treibhausgases CO₂ zu reduzieren. Da es sich bei der Anreicherung der Atmosphäre mit klimawirksamen Gasen um ein globales Phänomen handelt, spielt der Emissionsort im Klimaschutz keine relevante Rolle. Gleichzeitig ist es bei Betrachtungen im Rahmen des Klimaschutzes wichtig, die Vorketten der Energiebereitstellung in der Bilanzierung zu berücksichtigen. Damit kann der Energieverbrauch als weitere, für den Klimaschutz relevante Kenngröße gewertet werden.

Die Luftreinhaltung hat zum Ziel, negative Wirkungen von Luftschadstoffen, insbesondere gesundheitsschädigende Effekte für den Menschen, zu minimieren. Es gibt eine Vielzahl verkehrlich bedingter Luftschadstoffe, von denen NO_x und Feinstaub am häufigsten diskutiert werden. Entsprechend vielfältig sind die Wirkungszusammenhänge. Gemeinhin treten die Wirkungen lokal und bei hohen Konzentrationen in besonderem Maße auf, weshalb innerstädtische Gebiete und bestimmte Hotspots besonders betroffen sind.

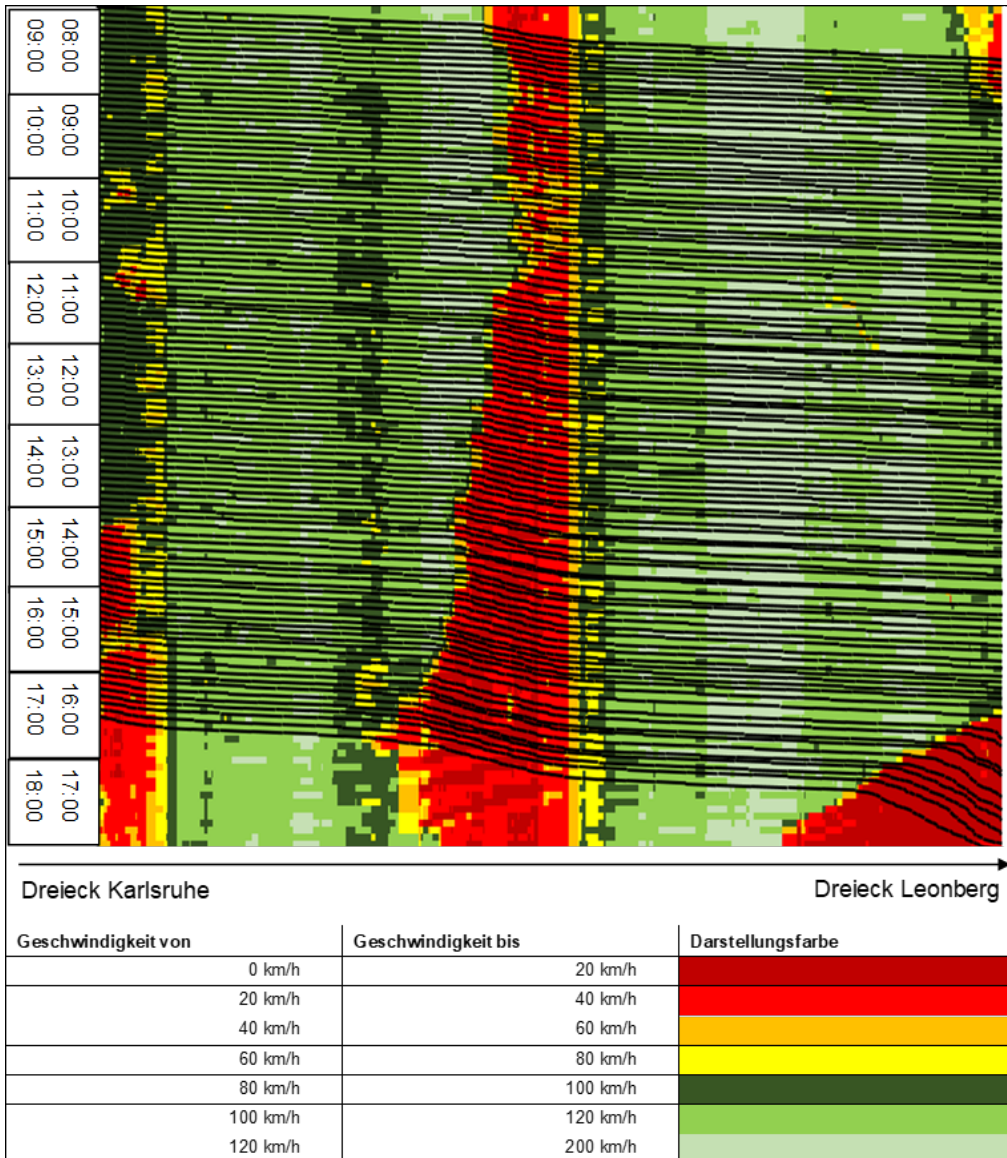
Die Menge der emittierten Treibhausgase und Luftschadstoffe im Verkehrsbereich hängt von mehreren Faktoren ab, wobei die Fahrleistung (zurückgelegte Strecke aller Fahrzeuge), die technischen Eigenschaften der Fahrzeuge und die Fahrweise die größte Bedeutung haben. Im Rahmen des vorliegenden Berichts steht die Wirkung der Fahrweise im Zentrum. Die wichtigsten Entscheidungen, die die Fahrweise umfassen und die Emissionen maßgeblich beeinflussen, sind das Beschleunigungs- und Bremsverhalten, woraus sich die Längsdynamik des Fahrzeuges ergibt, sowie die Gangwahl. Diese Entscheidungen hängen wiederum von mehreren Einflussgrößen ab, wobei folgende aufgrund ihrer Relevanz explizit zu benennen sind:

- ▶ Einstellung der Fahrer*in
- ▶ Fahrzeugeigenschaften
- ▶ Eigenschaften des Verkehrswegs (einschließlich der Längsneigung sowie Regelungen wie zulässiger Höchstgeschwindigkeit und der Steuerung von Knotenpunkten)
- ▶ andere Verkehrsteilnehmende
- ▶ weitere externe Effekte (Sichtverhältnisse, Nässe, Straßenumfeld etc.)

Die Längsdynamik eines einzelnen Fahrzeugs lässt sich in ihrem zeitlichen Verlauf durch eine Trajektorie (Weg-Zeit-Diagramm) beschreiben. Aus verkehrlicher Perspektive sind in der Regel die Längsdynamiken mehrerer Fahrzeuge in einem bestimmten Zeitraum und in einem bestimmten Netzausschnitt von Interesse, was in dieser Studie unter dem Begriff „Verkehrsfluss“ zusammengefasst wird. Davon abzugrenzen ist der teilweise synonym verwendete „Verkehrszustand“. Der Verkehrszustand wird hier im Sinne der HBEFA-Verkehrszustände definiert, also die Einteilung in die unterschiedlichen Qualitäten des Verkehrszustandes von flüssigem Verkehr bis Stop&Go-Verkehr. Abbildung 3 zeigt solche Verkehrszustände in farbiger Codierung für einen Autobahnabschnitt in einem Weg-Zeit-Diagramm. Die Abgrenzung der Begriffe wird an einem Beispiel deutlich: Auf einer innerörtlichen Hauptverkehrsstraße und einer Autobahn fahren um 2 Uhr nachts so wenige

Fahrzeuge, dass sich diese gegenseitig kaum beeinflussen. Der Verkehrszustand ist in beiden Fällen gleich, es herrscht flüssiger Verkehr. Da die Fahrzeuge aber unterschiedlich schnell fahren, ein straßentypspezifisch unterschiedliches Brems- und Beschleunigungsverhalten haben, unterscheidet sich der Verkehrsfluss dennoch.

Abbildung 3: Verkehrszustände in einem Weg-Zeit-Diagramm aus aggregierter Floating-Car-Data



Quelle: Peter et al. (2021)

Der Energieverbrauch und die Menge der emittierten Luftschadstoffe sind bei einer Fahrweise, die eine hohe Zahl und Intensität von Beschleunigungs- und Bremsvorgängen aufweist, besonders hoch. Dies gilt nicht nur für Verbrennungsabgase, sondern auch für auf mechanische Beanspruchung zurückzuführenden Feinstaub aus Bremsen-, Reifen- und Straßenabrieb. Aus diesem Grund sind Klimaschutz und Luftreinhaltung häufig zentrale Argumente für Maßnahmen, die auf eine gleichmäßigere Fahrweise abzielen. Dies wird in dieser Untersuchung als „Verstetigung des Verkehrs“ bezeichnet.

1.2 Berechnung und Beschreibung verkehrsbedingter Emissionen

Wie bereits gezeigt, kann entweder der Zustand eines einzelnen Fahrzeuges (mikroskopisch) oder aber der Zustand eines Aggregats von Fahrzeugen (makroskopisch) betrachtet werden. So gibt es auch für die Berechnung der verkehrsbedingten Emissionen mikroskopische oder makroskopische Methoden. Da die Zusammenhänge zwischen Energieverbrauch bzw. Emissionen und Fahrzeugzustand komplex sind, gehen in eine makroskopische Betrachtung der verkehrsbedingten Emissionen zusätzliche Vereinfachungen ein, die es zum Teil schwer bis unmöglich machen, bestimmte Effekte zu erfassen. Aus diesem Grund war die Kombination von makroskopischer und mikroskopischer Emissionsberechnung für die Bearbeitung dieses Forschungsvorhabens von zentraler Bedeutung.

Das wichtigste in Deutschland eingesetzte makroskopische Werkzeug zur Quantifizierung der Luftschadstoffemissionen und des Energieverbrauchs des Straßenverkehrs ist das Handbuch für Emissionsfaktoren (HBEFA), das im Jahr 2019 in der aktualisierten Fassung HBEFA 4.1 (Notter et al. 2019) erschienen ist. Im HBEFA sind spezifische Emissionsfaktoren für unterschiedliche Fahrzeugkategorien und -schichten hinterlegt, die zusätzlich nach Straßenkategorien, Steigungsklasse und Verkehrszuständen (flüssiger Verkehr, dichter Verkehr, gesättigter Verkehr, Stop&Go, Stop&Go II) differenziert sind. Die Kombination aus Straßenkategorie und Verkehrszustand wird als Verkehrssituation bezeichnet. Jede Verkehrssituation ist durch einen Fahrzyklus beschrieben, für den die hinterlegten Emissionswerte durch Messungen und mikroskopische Simulationsverfahren ermittelt wurden. Diese kurze Darstellung macht einerseits den großen Aufwand für die Ermittlung der HBEFA-Daten und damit deren Bedeutung für die Verkehrsplanung deutlich. Andererseits zeigt sie auch, dass selbst bei einer differenzierten makroskopischen Betrachtung eine starke Pauschalisierung der realen Fahrweise vorgenommen werden muss, hier in Form einheitlicher Emissionsfaktoren für einzelne Verkehrssituationen. Betrachtet man eine mögliche Ausprägung einer Verkehrssituation, beispielhaft eine innerortsliegende Hauptverkehrsstraße mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h und dichtem Verkehr, so wird klar, dass die realen Fahrweisen von vielen Rahmenbedingungen (Knotenpunktsteuerung, Parkstände am Straßenrand, Radverkehrsführung u.v.m.) abhängen, nach denen weiter zu differenzieren unmöglich wäre.

Zur Untersuchung solcher spezifischen Rahmenbedingungen und deren Einfluss auf die verkehrsbedingten Emissionen kann eine mikroskopische Betrachtung eingesetzt werden, in der die Zustände der Einzelfahrzeuge im Zeitverlauf erfasst werden. Der Verkehrsraum und die Fahrzeuge werden dafür in einer mikroskopischen Verkehrsflusssimulation abgebildet, welche mit einem Fahrzeugmodell gekoppelt wird, das die Emissionswerte berechnet. Im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens wurden hierzu die Simulationsmodelle PTV Vissim und PHEM kombiniert.

1.3 Verstetigende Wirkung verkehrlicher Maßnahmen

Maßnahmen zum Ziel des Klimaschutzes oder der Luftreinhaltung können primär an einem oder mehreren der drei bereits genannten Hebel ansetzen: Fahrleistung, technische Fahrzeugeigenschaften und Fahrweise. Maßnahmen, die in erster Linie direkt auf eine Verstetigung des Verkehrs abzielen, sind vor allem verkehrstechnischer Natur. Dazu zählen:

- ▶ Koordinierung (Grüne Welle) oder verkehrsabhängige Steuerung von Lichtsignalanlagen
- ▶ Geschwindigkeitsempfehlungssysteme für Lichtsignalanlagen (Green Light Optimal Speed Advisory) als Fahrassistenzsystem oder als straßenseitiges Informationssystem
- ▶ Lichtsignalanlagen zur Begrenzung des Zuflusses in Innenstädte, sodass Überlastungen mit Stop&Go-Zuständen reduziert werden (Pfortneranlagen)
- ▶ Streckenbeeinflussungssysteme mit verkehrsabhängigen Geschwindigkeitsbeschränkungen und Überholverböten

Auch ordnungspolitische Maßnahmen, insbesondere die Begrenzung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit, tragen direkt zu einer Verstetigung des Verkehrs bei, da einerseits die Geschwindigkeitsdifferenzen einzelner Fahrzeuge im Fahrtverlauf weniger hoch sind und andererseits die Wahrscheinlichkeit eines Verkehrszusammenbruchs auf Autobahnen reduziert werden. Gleichzeitig hat die geringere maximale Geschwindigkeit an sich einen emissionsmindernden Effekt, da u.a. der Kraftstoffverbrauch und die abgasbedingten Schadstoffemissionen im Bereich hoher Geschwindigkeiten auf Autobahnen und Landstraßen überproportional hoch sind.

Der verstetigende Effekt einer Maßnahme kann jedoch nur selten isoliert betrachtet werden. Häufig wirken die beschriebenen Verstetigungsmaßnahmen auch auf die Fahrtzeit auf den betroffenen Netzelementen und damit auf die Attraktivität der entsprechenden Routen bzw. des MIV generell im Vergleich zu möglichen Alternativen. Auch die direkten Wirkungen einer Maßnahme auf die Nutzer anderer Verkehrsmittel kann auf die Verkehrsnachfrage wirken. So können Geschwindigkeitsbeschränkungen in der Stadt durch den nichtmotorisierten Verkehr positiv wahrgenommen werden, eine auf die Verstetigung des MIV ausgerichtete Lichtsignalanlagensteuerung kann sich dagegen negativ für Fuß- und Radverkehr sowie den öffentlichen Verkehr auswirken. Dadurch können sogenannte Rebound-Effekte auftreten (siehe Info-Box). Auch umgekehrt haben Maßnahmen, deren primäres Ziel eine Verringerung des Verkehrsaufkommens ist (z.B. ÖV-Ausbau, Pkw-Maut), ebenfalls einen Auslastungseffekt und können durch Fahrtzeitverkürzungen Rebound-Effekte hervorrufen.

Rebound-Effekte bei verkehrlichen Entscheidungen

Im Allgemeinen wird davon ausgegangen, dass es einen Zusammenhang zwischen Verkehrsnachfrage und Reisezeit gibt. Eine Veränderung der Reisezeit beeinflusst die Wahlentscheidungen der Verkehrsteilnehmenden, die bestrebt sind, ihren Zeitaufwand zu minimieren. Maßnahmen, die indirekt eine Reisezeitverkürzung für den motorisierten Individualverkehr verursachen (z.B. durch Verkehrsflussverstetigung), können also gleichzeitig zu einer Attraktivitätssteigerung und damit zu einer Verkehrs- und Emissionszunahme führen. In der Literatur wird für die Größenordnung des Rebound-Effekts eine große Bandbreite benannt (vgl. u.a. Nadel 2012, Chen et al. 2017). Im Verkehr lässt sie sich nur schwer messen, da es keine geeigneten regelmäßigen Verkehrserhebungen gibt und meist mehrere Veränderungen des Verkehrsangebots die beobachteten Nachfrageänderungen erklären, auftretende Rebound-Effekte also überlagert werden.

1.4 Ziel der Studie und Aufbau des Berichts

Im Forschungsvorhaben „Flüssiger Verkehr für Klimaschutz und Luftreinhaltung“ wurden zwei übergreifende Ziele verfolgt: Die Aktualisierung und Überprüfung der im HBEFA für Deutschland hinterlegten Verkehrssituationsdaten und die Beschreibung und Quantifizierung der verstetigenden Wirkung verkehrlicher Maßnahmen.

Um das HBEFA zur Berechnung mittlerer Emissionsfaktoren für unterschiedliche Netzbereiche (innerorts, außerorts, Autobahn, gesamtes Streckennetz) nutzen zu können, sind neben den verkehrssituationsspezifischen Emissionsfaktoren zusätzlich Fahrleistungsanteile für eine Gewichtung hinterlegt. Differenziert nach Fahrzeugkategorie (Pkw, LNF, SNF, LBus, RBus, KR/MR) geben diese Werte an, welche Anteile der Gesamtfahrleistung auf welchen Straßenkategorien in welchem Verkehrszustand zurückgelegt werden. Die derzeit hinterlegten Aufteilungen für Deutschland basieren zu Teilen auf Untersuchungen von Anfang bzw. Mitte der 1990er Jahre. Diese Werte wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens unter Verwendung von Floating Car Data (FCD) aktualisiert. Dabei wurden für Autobahnen, insbesondere für Strecken ohne Geschwindigkeitsbegrenzung, die realisierten Fahrgeschwindigkeiten genauer untersucht. Darüber hinaus wurden unterschiedliche Szenarien ausgewählter Verkehrssituationen mikroskopisch simuliert, um die angesetzten spezifischen Emissionsfaktoren zu überprüfen. Diese Arbeiten sind in Kapitel 2 beschrieben.

Eine Vielzahl wissenschaftlicher Untersuchungen und gutachterlicher Arbeiten befassen sich mit den Wirkungen verkehrsplanerischer und -politischer Maßnahmen auf den Klimaschutz bzw. im Bereich der Luftreinhaltung. Die verstetigenden Effekte und/oder deren Wechselwirkungen mit der Verkehrsnachfrage einschließlich der Rebound-Effekte stehen dabei nicht immer im Vordergrund bzw. werden nicht explizit ausgewiesen. Das zweite zentrale Ziel des Forschungsvorhabens bezieht sich deshalb auf solche Maßnahmen. Zunächst wurden verkehrliche Maßnahmen mit Blick auf ihre Wirkung auf den Verkehrsfluss gesammelt und klassifiziert. Daraufhin wurden ausgewählte Maßnahmen hinsichtlich der beschriebenen Effekte quantifiziert, wobei unterschiedliche Methoden zum Einsatz kamen. Abhängig vom Maßnahmentyp wurden Hochrechnungen mit HBEFA oder mikroskopische Verkehrsflusssimulationen durchgeführt und/oder Verkehrsnachfragemodellrechnungen angestellt. Diese Arbeiten sind in Kapitel 3 dargestellt.

2 Teil 1: Aktualisierung der Fahrleistungsanteile je Verkehrssituation für Deutschland im Handbuch für Emissionsfaktoren

2.1 Handbuch für Emissionsfaktoren (HBEFA)

2.1.1 Aufbau des HBEFA

Zum Zeitpunkt der Projektbearbeitung lag das Handbuch für Emissionsfaktoren (HBEFA) in der Fassung HBEFA 4.1 (Notter et al. 2019) vor. Das HBEFA enthält Daten zu Luftschadstoffemissionen und zum Energieverbrauch des Straßenverkehrs (im Folgenden als Komponenten bezeichnet) und wird derzeit in diesen Ländern eingesetzt: Deutschland, Frankreich, Norwegen, Österreich, Schweden, Schweiz. In der Version 4.1 des Handbuchs sind Emissionsfaktoren für 23 Komponenten (darunter NO_x, PM, PM_{2,5}, CO_{2äq}, Kraftstoffverbrauch) differenziert nach Verkehrssituationen, Straßenlängsneigungen sowie Fahrzeugkategorien und -schichten hinterlegt.

Das Handbuch kennt die in Tabelle 5 aufgeführten Fahrzeugkategorien. Jede der Kategorien besteht aus mehreren Fahrzeugschichten, die sich nach Antriebstechnologie bzw. Kraftstoffart (Diesel-Motor, Otto-Motor, Elektromotor etc.) sowie Emissionskonzept (EURO-5, EURO-6d-temp etc.) unterscheiden. Beispielsweise sind für die Fahrzeugkategorie Pkw für Deutschland insgesamt 63 solcher Fahrzeugschichten abgebildet. In der Version 4.1 des HBEFA sind für jedes der Jahre 1994 bis 2050 unterschiedliche Fahrzeugzusammensetzungen aus diesen Fahrzeugschichten als Flotten hinterlegt.

Tabelle 5: HBEFA-Fahrzeugkategorien

| Kurzbezeichnung | Fahrzeugkategorien |
|-----------------|---|
| Pkw | Personenkraftwagen, Personenwagen |
| LNf | Leichtes Nutzfahrzeug (<3,5 t), Lieferwagen |
| SNF | Schweres Nutzfahrzeug (Lkw, Lz, Sz) |
| RBus | Reisebus, Reiseкар |
| LBus | Linienbus (= ÖV-Bus) |
| KR/MR | Kraftrad, Motorrad |

Quelle: INFRAS AG (2019)

Weiterhin unterschieden sich die hinterlegten Emissionsfaktoren nach Verkehrssituationen. Eine Verkehrssituation ist definiert durch den Gebietstyp *G*, den Straßentyp *S*, die zulässige Höchstgeschwindigkeit *V_Z* und den Verkehrszustand *Z*. Die möglichen Ausprägungen der vier Dimensionen und deren in der Dokumentation des HBEFA gegebene Beschreibung sind in Tabelle 6, Tabelle 7, Tabelle 8 und Tabelle 9 aufgeführt. Nicht alle Straßentypen können in beiden Gebietstypen auftreten. Die jeweilig möglichen Gebietstypen sind in Tabelle 7 vermerkt. Die Kombination aus Gebietstyp, Straßentyp und zulässiger Höchstgeschwindigkeit wird im Folgenden als Straßenkategorie *K* bezeichnet.

Tabelle 6: Definition der Gebietstypen in HBEFA

| $g \in G$ | Gebietstyp | Beschreibung HBEFA |
|-----------|------------|-----------------------------|
| La | Land | Ländlicher Raum |
| Ag | Agglo | Agglomeration, Ballungsraum |

Quelle: INFRAS AG (2019)

Tabelle 7: Definition der Straßentypen in HBEFA

| $s \in S$ | Straßentyp | Beschreibung HBEFA | Gebietstyp |
|-----------|------------------------------|---|------------|
| AB | Autobahn | >= 2x2 Fahrstreifen, kreuzungsfrei | La, Ag |
| St-AB | Stadt-Autobahn | >= 2x2 Fahrstreifen; kreuzungsfrei; Magistrale / Ringstraße mit hoher Kapazität | Ag |
| Se-AB | Semi-Autobahn | variable Anzahl Fahrstreifen (gebräuchlich z.B. in Schweden, ländlicher Raum) | La |
| FStr | Fern-, Bundesstraße | (meist) kreuzungsfrei, >= 2x1 Fahrstreifen, Tempolimit 80-100 km/h | La |
| RiStr | Städt. Magistrale / Ringstr. | >= 2x1 Fahrstreifen; kann kreuzungsfrei sein, aber keine Autobahn | Ag |
| HVS | Hauptverkehrsstraße | >= 2x1 oder >= 1x2 Fahrstreifen, mittlere Kapazität; Landesstraße, mit überregionalem Verkehr | La, Ag |
| HVS-k | Hauptverkehrsstraße, kurvig | >= 2x1 oder >= 1x2 Fahrstreifen, mittlere Kapazität; Landesstraße, mit überregionalem Verkehr; mit Kurven | La |
| SaS | Sammelstraße | Verbindungsstraße zwischen Ortschaften, <= 2x1 Fahrstreifen | La, Ag |
| SaS-k | Sammelstraße, kurvig | Verbindungsstraße zwischen Ortschaften, <= 2x1 Fahrstreifen; mit Kurven | La |
| ErS | Erschließungsstraße | städtische resp. dörfliche Erschließungsstraßen, <= 2x1 Fahrstreifen | La, Ag |

Quelle: INFRAS AG (2019)

Tabelle 8: Definition der zulässigen Höchstgeschwindigkeit in HBEFA

| $v^Z \in V^Z$ | Beschreibung Tempolimit (zulässige Höchstgeschwindigkeit) |
|---------------|---|
| 10 | Zulässige Höchstgeschwindigkeit: 10 km/h |
| 20 | Zulässige Höchstgeschwindigkeit: 20 km/h |
| 30 | Zulässige Höchstgeschwindigkeit: 30 km/h |
| 40 | Zulässige Höchstgeschwindigkeit: 40 km/h |
| 50 | Zulässige Höchstgeschwindigkeit: 50 km/h |
| 60 | Zulässige Höchstgeschwindigkeit: 60 km/h |
| 70 | Zulässige Höchstgeschwindigkeit: 70 km/h |
| 80 | Zulässige Höchstgeschwindigkeit: 80 km/h |
| 90 | Zulässige Höchstgeschwindigkeit: 90 km/h |
| 100 | Zulässige Höchstgeschwindigkeit: 100 km/h |
| 110 | Zulässige Höchstgeschwindigkeit: 110 km/h |
| 120 | Zulässige Höchstgeschwindigkeit: 120 km/h |
| 130 | Zulässige Höchstgeschwindigkeit: 130 km/h |
| >130 | Zulässige Höchstgeschwindigkeit über 130 km/h oder keine Geschwindigkeitsbeschränkung |

Quelle: INFRAS AG (2019)

Tabelle 9: Definition der Verkehrszustände in HBEFA

| $z \in Z$ | Verkehrszustand | Beschreibung HBEFA |
|-----------|---------------------|---|
| FV | Flüssiger Verkehr | Frei und stetig fließender Verkehr, Konstante, eher hohe Geschwindigkeit, Geschwindigkeitsbandbreiten: 90 bis >130 km/h auf Autobahnen, 45-60 km/h auf Straßen mit Tempolimit von 50 km/h. Verkehrsqualitätsstufen A-B gemäß HCM (Highway Capacity Manual). |
| DV | Dichter Verkehr | Flüssiger Verkehrsfluss bei starkem Verkehrsvolumen, vergleichsweise konstante Geschwindigkeit, Geschwindigkeitsbandbreiten: 70-90 km/h auf Autobahnen, 30-45 km/h auf Straßen mit Tempolimit 50 km/h. Verkehrsqualitätsstufen C-D gemäß HCM (Highway Capacity Manual). |
| GV | Gesättigter Verkehr | Unstetiger Verkehrsfluss mit starken Geschwindigkeitsschwankungen bei gesättigtem / gebundenem Verkehrsfluss, erzwungene Zwischenstopps möglich, Geschwindigkeitsbandbreiten: 30-70 km/h auf Autobahnen, 15-30 km/h auf Straßen mit Tempolimit 50 km/h. Verkehrsqualitätsstufe E gemäß HCM (Highway Capacity Manual). |
| SG | Stop&Go | Stop+Go, starke Stauscheinungen bis Verkehrszusammenbruch, Geschwindigkeitsschwankungen bei allgemeiner tiefer Geschwindigkeit. Geschwindigkeitsbandbreiten: 5-30 km/h auf Autobahnen, 5-15 km/h auf Straßen mit Tempolimit 50 km/h. |
| SG2 | Stop&Go II | Stauscheinungen bis Verkehrszusammenbruch, Geschwindigkeiten <10 km/h. |

Quelle: INFRAS AG (2019)

Als Kombination aus Gebietstyp und Straßentyp ergeben sich die in Abbildung 4 aufgelisteten 15 möglichen Ausprägungen. Zusammen mit den zulässigen Höchstgeschwindigkeiten (12 Ausprägungen) und den Verkehrszuständen (5 Ausprägungen) ergeben sich theoretisch 900 mögliche Verkehrssituationen, von denen jedoch nicht für alle Emissionswerte hinterlegt sind. In Abbildung 4 sind die Straßenkategorien dargestellt, für die Emissionswerte hinterlegt sind. Da für jede der 73 Straßenkategorien jeweils für jeden Verkehrszustand Emissionsfaktoren vorliegen, ergeben sich so 365 besetzte Verkehrssituationen.

Aufbauend auf den Emissionsfaktoren der einzelnen Verkehrssituationen stellt das HBEFA gemittelte Emissionsfaktoren für sogenannte aggregierte Verkehrssituationen zur Verfügung. Dafür sind Fahrleistungsanteile je Verkehrssituation hinterlegt, deren Emissionsfaktoren dann fahrleistungsgewichtet gemittelt werden. Im Handbuch können vier aggregierte Verkehrssituationen ausgewählt werden, nämlich „innerorts“, „außerorts“, „Autobahn“ bzw. „alle Straßen“. Die aggregierten Verkehrssituationen setzen sich aus den Fahrleistungsanteilen unterschiedlicher Straßenkategorien zusammen, wie in Abbildung 4 deutlich wird. Die Fahrleistungsanteile werden in HBEFA über die Zeit konstant angenommen, ändern sich also nicht in Abhängigkeit des Jahres der gewählten Fahrzeugflotte.

Abbildung 4: In HBEFA 4.1 enthaltene Verkehrssituationen

| Gebietstyp <i>g</i> und Straßentyp <i>s</i> | | Zulässige Höchstgeschwindigkeit v^z | | | | | | | | | | | |
|---|--------------------------------|---------------------------------------|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|------|
| | | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 110 | 120 | 130 | >130 |
| Ländlich | Autobahn | | | | | | 3 | | 5 | | 3 | 3 | 3 |
| | Semi-Autobahn | | | | | | | | | | | | |
| | Fern-, Bundesstraße | | | | | | 1 | | 2 | 1 | | | |
| | Hauptverkehrsstraße | | | | | | 2 | | | | | | |
| | Hauptverkehrsstraße, kurvig | | | | | | 1 | | | | | | |
| | Sammelstraße | | | | | | 2 | | | | | | |
| | Sammelstraße, kurvig | | | | | | 1 | | | | | | |
| | Erschließungsstraße | | | | | | | | | | | | |
| Agglomeration | Autobahn | | | | | | | | | | | | |
| | Stadt-Autobahn | | | | | | | | | | | | |
| | Fern-, Bundesstraße | | | | | | | | | | | | |
| | Städt. Magistrale / Ringstraße | | | | | | | | | | | | |
| | Hauptverkehrsstraße | | | 5 | | 3 | | | | | | | |
| | Sammelstraße | | | 2 | | | | | | | | | |
| | Erschließungsstraße | 2 | | | | | | | | | | | |

Erläuterungen:

- Aggregierte Verkehrssituationen: gelb = Autobahn, blau = außerorts, rot = innerorts (siehe Kapitel 2.1.2).
- Helle Felder: Straßenkategorien, für die in HBEFA 4.1 Emissionswerte hinterlegt sind.
- Dunkle Felder mit Zahlen: Straßenkategorien, die in den aggregierten Verkehrssituationen vorkommen, wobei die Zahlen für die Anzahl der Verkehrszustände mit Fahrleistungsanteilen stehen (siehe Kapitel 2.1.2).

Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart, Datengrundlage INFRAS AG (2019)

Zusätzlich zu den vier Dimensionen (Verkehrszustand, Gebietstyp, Straßentyp und zulässige Höchstgeschwindigkeit), die die Verkehrssituation festlegen, unterscheiden sich die Emissionsfaktoren nach Längsneigungsklassen. Die Längsneigungsklassen sind in die Kategorien -6 %, -4 %, -2 %, 0 %, +2 %, +4 %, +6 % unterteilt.

2.1.2 Fahrleistungsanteile in den aggregierten Verkehrssituationen nach HBEFA

Wie beschrieben, sind im HBEFA für vier aggregierte Verkehrssituationen Fahrleistungsanteile differenziert nach Verkehrssituation und Längsneigungsklasse hinterlegt. Den drei spezifischen aggregierten Verkehrssituationen „innerorts“, „außerorts“ und „Autobahn“ sind jeweils Straßenkategorien zugeordnet. Diese können aus der farblichen Codierung in Abbildung 4 abgelesen werden. Die drei spezifischen aggregierten Verkehrssituationen ergeben zusammengesetzt die aggregierte Verkehrssituation „alle Straßen“. Diese aggregierte Verkehrssituation stellt den Verkehr auf allen Straßen in Deutschland dar, gibt also die mittleren Emissionsfaktoren des Gesamtverkehrs wieder. Da die relativen Anteile innerhalb einer spezifischen aggregierten Verkehrssituation sich eindeutig aus der Zusammensetzung in der aggregierten Verkehrssituation „alle Straßen“ ableiten lässt, wurde in dieser Studie nur die Aufteilung über alle Straßen betrachtet.

Für die aggregierten Verkehrssituationen wird grundsätzlich angenommen, dass die Fahrleistungsanteile auf Steigungs- und Gefällestrecken in Summe gleich sind, weshalb mit vier betragsmäßig aggregierten Längsneigungsklassen gearbeitet werden kann. Diese sollen im Weiteren durch den Index $l \in L$ notiert werden, mit $L = \{+6\%; +4\%; +2\%; 0\%\}$.

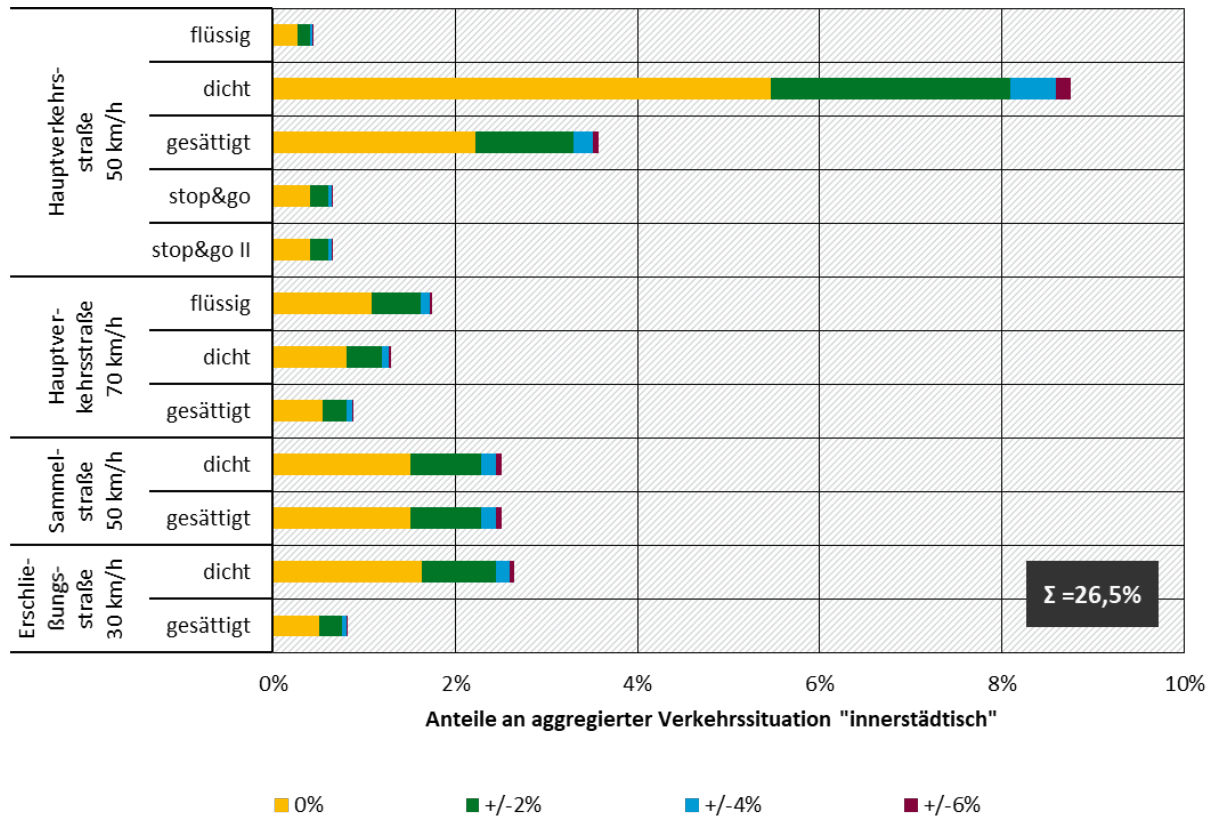
Die Fahrleistung in Deutschland verteilt sich nach den aktuell in HBEFA hinterlegten aggregierten Verkehrssituationen nur auf einen kleinen Teil der Straßenkategorien. Diese sind in Abbildung 4 durch die dunklere Einfärbung der Felder hervorgehoben. Innerhalb der einzelnen Straßenkategorien sind unterschiedliche Verkehrszustände mit Fahrleistungsanteilen belegt, deren Anzahlen ebenfalls in Abbildung 4 aufgeführt sind. Die aggregierte Verkehrssituation „alle Straßen“ setzt sich somit aus 39 einzelnen Verkehrssituationen (Summe der Zahlen in der Abbildung) zusammen.

Die Aufteilung soll am Beispiel der Straßenkategorien, die der aggregierten Verkehrssituation „innerorts“ zugeordnet sind, erläutert werden (rote Einfärbung in Abbildung 4). Von den genannten 39 Verkehrssituationen für „alle Straßen“ entfallen 12 Verkehrssituationen auf die aggregierte Verkehrssituation „innerorts“. Deren Anteile machen in Summe einen Anteil von 26,5 % der Fahrleistung der aggregierten Verkehrssituation „alle Straßen“ aus. Die Aufteilung dieser 26,5 % ist für die Fahrzeugkategorie „Pkw“ in Abbildung 5 dargestellt. Würde die aggregierte Verkehrssituation „innerorts“ betrachtet, bliebe diese Verteilung gleich – sie würde lediglich auf die Summe von 100 % skaliert.

Man erkennt, dass der überwiegende Anteil der Fahrleistung in dichtem Verkehr stattfindet (15,2 %-Punkte der 26,5 %-Punkte). Innerhalb der Straßentypen „Sammelstraße“ und „Erschließungsstraße“ wird ausschließlich dichter und gesättigter Verkehr angesetzt, von flüssigem Verkehr wird hier überhaupt nicht ausgegangen. Die Anteile der Steigungsklassen in den Verkehrssituationen ist bei den Straßentypen „Erschließungsstraße“ und „Sammelstraße“ identisch. Bei den Hauptverkehrsstraßen ändern sich die Anteile geringfügig.

Abbildung 5: Aufteilung der Innerorts-Fahrleistung für Pkw nach HBEFA 4.1

Fahrleistungsanteile der Innerorts-Verkehrssituationen an der aggregierten Verkehrssituation „alle Straßen“, zusätzlich differenziert nach Steigungsklasse



Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart, Datengrundlage INFRAS AG (2019)

2.1.3 Definition der Verkehrssituationen und zugeordnetes Fahrverhalten

Für jede Verkehrssituation enthält das HBEFA drei Kenngrößen, durch die das zugeordnete Fahrverhalten beschrieben wird: Durchschnittsgeschwindigkeit, Anteil Stopzeit und RPA (Relative positive acceleration). Anhand dieser Kenngrößen sind die für die Emissionsberechnung zugrunde gelegten Fahrzyklen ausgerichtet. Die zugeordneten Fahrzyklen und Kenngrößen des Fahrverhaltens beruhen jedoch nicht auf einer eindeutigen Charakterisierung der Straßenkategorien. Sie sind vielmehr historisch gewachsen und basieren auf einer Vielzahl von Untersuchungen zu typischen Straßenkategorien und Verkehrssituationen. Als wichtigste übergreifende Arbeiten, sind das ARTEMIS Projekt (Boulter, McCrea 2007) und die grundlegende Überarbeitung des HBEFA im Zuge der jüngsten Aktualisierung (Ericsson et al. 2019) zu erwähnen.

In Tabelle 10 sind für ausgewählte Straßenkategorien für die Verkehrszustände „flüssiger Verkehr“ und „Stop&Go“ die im HBEFA hinterlegten Kenngrößen des Fahrverhaltens aufgeführt. Die mittleren Geschwindigkeiten der Verkehrssituationen im flüssigen Verkehr entsprechen nicht zwangsläufig der zulässigen Höchstgeschwindigkeit v^z in der zugeordneten Straßenkategorie. So wird angenommen, dass auf Autobahnen in ländlichen Gebieten im mittel grundsätzlich schneller gefahren wird, als es die zulässige Höchstgeschwindigkeit erlaubt. Auf den allermeisten anderen Straßenkategorien wird dagegen bei freiem Verkehrsfluss eine langsamere Fahrgeschwindigkeit als die zulässige Geschwindigkeit angesetzt. Ebenfalls zu erkennen ist, dass für den Verkehrszustand „Stop&Go“ für mehrere Straßenkategorien gleiche

Fahreigenschaften angenommen werden. In Tabelle 10 gleichen sich hier die Werte für $k = La/AB/>130$, $La/AB/120$, $La/HVS/100$. Diese Ausprägung der Kenngrößen tritt für die Fahrzeugkategorie Pkw unter dem Verkehrszustand „Stop&Go“ insgesamt 21mal auf.

Tabelle 10: HBEFA-Kenngrößen des Fahrverhaltens für ausgewählte Verkehrssituationen

Kenngrößen des Fahrverhaltens aus HBEFA 4.1 für ausgewählte Verkehrssituationen, Fahrzeugkategorie „Pkw“

| Straßenkategorie k | Verkehrszustand v | | | | | |
|-------------------------|-----------------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------------|--------------------|-----------------------|
| | Flüssiger Verkehr | | | Stop&Go | | |
| | Mittlere Geschwindigkeit | Anteil Stopzeit | RPA | Mittlere Geschwindigkeit | Anteil Stopzeit | RPA |
| La/AB/>130 | 142,74 km/h | 0 % | 0,05 m/s ² | 17,92 km/h | 35 % | 0,25 m/s ² |
| La/AB/120 | 122,03 km/h | 0 % | 0,03 m/s ² | 17,92 km/h | 35 % | 0,25 m/s ² |
| La/HVS/100 | 94,02 km/h | 0 % | 0,11 m/s ² | 17,92 km/h | 35 % | 0,25 m/s ² |
| La/HVS-k/100 | 84,96 km/h | 0 % | 0,11 m/s ² | 14,91 km/h | 34 % | 0,22 m/s ² |
| Ag/HVS/50 | 42,85 km/h | 3 % | 0,14 m/s ² | 12,48 km/h | 37 % | 0,23 m/s ² |
| Ag/ErS/30 | 28,84 km/h | 6 % | 0,09 m/s ² | 9,61 km/h | 35 % | 0,17 m/s ² |

Quelle: INFRAS AG (2019)

2.2 Methodik zur Aktualisierung der Fahrleistungsanteile der HBEFA-Verkehrssituationen

Ein zentrales Ziel der Studie bestand darin, die Fahrleistungsanteile der Verkehrssituationen und Steigungsklassen auf dem gesamten Straßennetz in Deutschland, also die Aufteilung der aggregierten Verkehrssituation „alle Straßen“ (siehe Kapitel 2.1.2), neu zu ermitteln.

Zu diesem Zweck wurden die Informationen mehrerer Datenquellen miteinander verschnitten. Die Grundlage der Analyse stellte das digitale Straßennetzmodell des Flottendaten- und Kartenanbieters TomTom dar, für das zu Teilen auch Geschwindigkeitsdaten aus FCD vorlagen. Diese Daten werden in Kapitel 2.2.1 beschrieben. Auf die weiteren Datenquellen wird in den jeweiligen Teilkapiteln eingegangen.

Die Berechnung der Anteile folgte einem mehrstufigen Vorgehen. Zunächst wurden den Netzelementen Straßenkategorien und Steigungsklassen zugeordnet (Kapitel 2.2.2), daraufhin wurden die Fahrleistungsanteile je Netzelement bzw. Straßenkategorie festgelegt (Kapitel 2.2.3). Zuletzt wurden die Fahrleistungen nach Verkehrszuständen differenziert (Kapitel 2.2.4).

2.2.1 Datengrundlagen

2.2.1.1 Straßennetzmodell und Floating Car Data

Die Ermittlung der Fahrleistungsanteile je Verkehrssituation erfolgte auf Grundlage eines digitalen Straßennetzes von TomTom. Das Straßennetz umfasste alle Strecken, die mit dem Pkw befahrbar sind und bildete den Netzstand 2016 ab. TomTom klassifiziert Straßen nach der sogenannten Functional Road Class (FRC). Die Klassifizierung umfasst die Zahlen 0 bis 8. Der FRC 8 sind Strecken zugeordnet, die nicht mit dem Pkw befahren werden können bzw. dürfen, weshalb sie aus der Betrachtung ausgeschlossen wurden. Die weiteren FRC und deren Beschreibungen sind in Tabelle 11 aufgeführt.

Tabelle 11: Beschreibung und Netzlängen der Functional Road Class (FRC)

| FRC | Beschreibung kurz | Beschreibung lang | Netzlänge in 1.000 km (richtungsgetrennt) |
|-----|---|--|---|
| 0 | Motorways; Freeways; Major Roads | All roads that are officially assigned as motorways. | 27,3 (1,7 %) |
| 1 | Major Roads less important than Motorways | All roads of high importance, but not officially assigned as motorways, that are part of a connection used for international and national traffic and transport. | 81,5 (5,1 %) |
| 2 | Other Major Roads | All roads used to travel between different neighboring regions of a country. | 42,4 (2,1 %) |
| 3 | Secondary roads | All roads used to travel between different parts of the same region. | 129,5 (8,1 %) |
| 4 | Local connecting roads | All roads making all settlements accessible or making parts (north, south, east, west and central) of a settlement accessible. | 346,2 (21,6 %) |

| FRC | Beschreibung kurz | Beschreibung lang | Netzlänge in 1.000 km (richtungsgetrennt) |
|-----|---------------------------------|--|---|
| 5 | Local roads of high importance | All local roads that are the main connections in a settlement. These are the roads where important through traffic is possible e.g.: <ul style="list-style-type: none"> arterial roads within suburban areas, industrial areas or residential areas; a rural road, which has the sole function of connecting to a national park or important tourist attraction. | 9,8 (0,6 %) |
| 6 | Local roads | All roads used to travel within a part of a settlement or roads of minor connecting importance in a rural area. | 116,7 (7,3 %) |
| 7 | Local roads of minor importance | All roads that only have a destination function, e.g. dead-end roads, roads inside living area, alleys: narrow roads between buildings, in a park or garden. | 847,4 (52,9 %) |

Quelle: TomTom International BV (2020)

Insgesamt umfasst das Netz richtungsbezogen eine Länge von rund 1,6 Mio. km (zum Vergleich 1,78 Mio. km auf Grundlage von HERE-Daten für das Jahr 2017 nach Radke (2019)). Unterschiede in den Netzlängen zwischen verschiedenen Datenquellen ergeben sich in erster Linie aus der Verfügbarkeit von Strecken im untergeordneten Netz (Beispiele zur Veranschaulichung: unbefestigte Feldwege, Garagenzufahrten) und aus der Auflösung des Netzes in einzelne Netzelemente (Beispiel zur Veranschaulichung: Abbildung eines Beschleunigungsstreifens als parallel zur Hauptfahrbahn geführte Strecke). Für die geringere Netzlänge des TomTom-Streckennetzes erscheint insbesondere der erstgenannte Punkt ausschlaggebend, da sich vor allem die Netzlänge im nicht klassifizierten Streckennetz, also unterhalb der Kreisstraßen, unterscheidet. Bei Bundesstraßen liegt die Netzlänge nach TomTom leicht höher, was durch die zweitgenannte Erklärung begründbar ist.

Das Streckennetz ist in kurze Abschnitte unterteilt, deren Länge variabel ist. Im Mittel ist ein Streckenabschnitt 100 m lang, 92 % der Abschnitte sind kürzer als 250 m, etwa 0,5 % länger als 1.000 m. Neben der FRC wurden im Rahmen der Studie folgende weitere Attribute der Streckenabschnitte verwendet:

► **Speedlimit**

Für Streckenabschnitte, bei denen die zulässige Höchstgeschwindigkeit durch TomTom erfasst wurde. In TomTom wird bezüglich des Attributs Speedlimit zwischen Explizit und Implizit differenziert. „Explizit“ bedeutet, dass die zulässige Höchstgeschwindigkeit direkt erfasst wurde (z.B. durch Detektion eines Verkehrsschildes). „Implizit“ bedeutet, dass sich das Tempolimit durch Gegebenheiten, wie den Gebietstypen, ergibt. Die Information, ob es sich um eine Strecke handelt, die keine Geschwindigkeitsbeschränkung hat, liegt nur implizit vor.

Ein Speedlimit war in den TomTom-Daten bei rund 14 % der Netzlänge gegeben, wobei niedrigere FRC deutlich besser abgedeckt waren.

► **Mapurban**

Das Attribut gibt an, ob sich der Netzabschnitt innerhalb oder außerhalb einer geschlossenen Ortschaft befindet. Für den Fall, dass das Attribut „Speedlimit“ nicht belegt

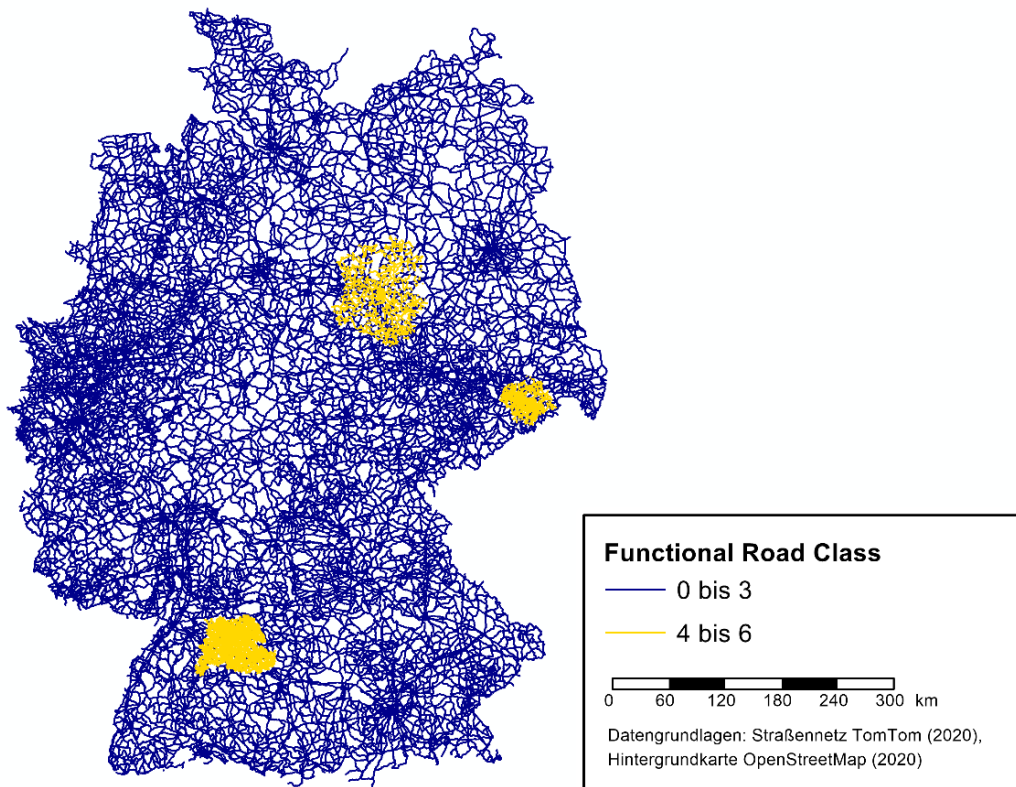
war, wurde daraus abgeleitet, ob die zulässige Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h oder 100 km/h betrug.

- ▶ **Roadnumber**
Offizielle Straßenbezeichnung, aus der sich eine Kategorisierung nach Baulastträger ableiten lässt (Bundesautobahn, Bundesstraße, Landesstraße, Kreisstraße). Die Information lag für rund 29 % der Netzlänge vor.
- ▶ **Ramp**
Angabe, ob es sich bei der Strecke um einen Knotenpunktarm handelt.

Neben den beschriebenen Straßeneigenschaften wurde Floating Car Data (FCD) verwendet. FCD sind Informationen, die von Fahrzeugen im Straßenverkehr direkt erfasst werden können. Das Fahrzeug sendet in konkreten Zeitabständen seine aktuelle Position an ein globales Navigationssatellitensystem (GNSS). Hierfür wird im Fahrzeug entweder ein eingebautes GNSS-Gerät oder eine aktive Sim-Karte benötigt. Über eine Vielzahl von Positionsdaten kann direkt die aktuelle Geschwindigkeit eines Fahrzeugs ermittelt werden. Peter et al. (2021) weisen für TomTom-FCD für die Autobahn eine durchschnittliche Abdeckungsquote (Anteil der von TomTom erfassten Fahrzeuge an der Gesamtverkehrsstärke) von ca. 15 % aus.

Die hier verwendete FCD deckte alle Straßen der FRC 0 bis 3 in Deutschland, sowie in drei ausgewählten Regionen Straßen der FRC 4 bis 6 ab. Die Regionen wurden auf Grundlage ihrer Repräsentativität und der Verfügbarkeit von regionalen Verkehrsnachfragemodellen ausgewählt. Gewählt wurden die Regionen Dresden, Magdeburg und Stuttgart. Abbildung 6 stellt das Streckennetz dar, für das FCD zur Verfügung standen. Die Ausdehnung der ausgewählten Regionen ist darin anhand der hervorgehobenen Strecken der FRC 4 bis 6 zu erkennen. Durch die drei Regionen ist in den FRC 4 bis 6 rund 4,7 % der gesamten Netzlänge in Deutschland abgedeckt.

Abbildung 6: TomTom-Streckennetz mit Floating Car Data (FCD)



Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart, Datengrundlagen siehe Abbildung

Die FCD wurden in aggregierter Form auf Ebene der Streckenabschnitte zur Verfügung gestellt. Die Daten beruhen auf den erfassten Verkehren aus dem Jahr 2018. Die FCD waren nach der Stunde des Tages (24 Werte) und nach drei Wochentagstypen, nämlich Montag bis Freitag (Mo-Fr), Samstag (Sa) oder Sonn- und Feiertage (So) unterteilt. Folgende Werte lagen damit für 72 Zeitintervalle vor:

- ▶ **SampleSize**
Anzahl der Fahrzeuge auf denen die Geschwindigkeitsdaten beruhen.
- ▶ **Mittlere Reisezeit**
Durchschnittliche Fahrtzeit auf dem Streckenabschnitt, woraus die mittlere Geschwindigkeit berechnet werden kann.
- ▶ **Geschwindigkeitsperzentile in 5 %-Schritten**
Geschwindigkeiten, die von x % der Fahrzeuge nicht überschritten wurden. Insgesamt lagen damit für jeden Streckenabschnitt und jedes Zeitintervall 19 Perzentilwerte (5 %-Perzentil bis 95 %-Perzentil) vor.

TomTom bietet Geschwindigkeitsdaten für Pkw und Lkw getrennt an, wobei die Methodik der Differenzierung nicht veröffentlicht ist. In dieser Studie wurde ausschließlich Pkw-FCD verwendet. Die Auswertung der Anteile der gefahrenen Geschwindigkeiten auf Autobahnen legt aber nahe, dass in den Pkw-Fahrgeschwindigkeitsdaten ein nicht unerheblicher Anteil von Lkw-Geschwindigkeitsdaten enthalten ist (siehe Kapitel 2.4). Die bereits aggregierte Form der erhaltenen Rohdaten sowie die fehlende Dokumentation bezüglich der Unterscheidung zwischen Pkw und Lkw durch den Datenanbieter ließen jedoch keine Bereinigung der Daten zu.

2.2.1.2 Verkehrsnachfragemodelle: PTV Validate und regionale Modelle

Im Projekt standen das deutschlandweite Verkehrsnachfragemodell PTV-Validate und die regionalen Verkehrsnachfragemodelle der Stadtregionen Stuttgart, Dresden und Magdeburg zur Verfügung. Die Verkehrsnachfragemodelle wurden primär für die Quantifizierung der Maßnahmenwirkungen verwendet, weshalb sie an späterer Stelle detailliert beschrieben werden (siehe Kapitel 3.3.1.2). Für die Bestimmung der Fahrleistungsanteile wurden ausschließlich die Modellergebnisse in Form der Verkehrsstärken verwendet, die im Folgenden beschrieben sind.

Aus dem Verkehrsnachfragemodell PTV-Validate wurden für den Ist-Zustand stündliche Verkehrsstärken abgeleitet. Folgende Verkehrssysteme wurden dabei unterschieden: Pkw, Lkw_S (Lkw bis 3,5 t), Lkw_M (Lkw von 3,5 bis 7,5 t), Lkw_L (Lkw von 7,5 bis 12 t) und Lkw_XL (Lkw über 12 t). Die Verkehrsstärken liegen für den Pkw differenziert nach fünf Wochentagstypen (Mo, Di-Do, Fr, Sa, So) und für alle weiteren Fahrzeugkategorien lediglich für den Wochentagstyp Di-Do vor. Für jede Strecke aus PTV-Validate lagen damit 216 Werte für Verkehrsstärken vor. Bei den drei regionalen Verkehrsnachfragemodellen handelt es sich um Werktagsmodelle, das bedeutet, dass diese jeweils tägliche Verkehrsstärken für einen durchschnittlichen Werktag (Mo-Fr) liefern. In Tabelle 12 ist eine Übersicht über die Datengrundlagen der Verkehrsnachfragemodelle gegeben. Die in den Modellen verwendeten Fahrzeugkategorien Lkw <3,5 t wurden den LNF zugewiesen, alle Klassen von Lkw über 3,5 t den SNF.

Tabelle 12: Übersicht über die Datengrundlagen der Verkehrsnachfragemodelle

| Modell | Wochentagstypen | Fahrzeugkategorien | Verkehrsstärken |
|--------------|-----------------------|---|-----------------|
| PTV-Validate | Mo, Di-Do, Fr, Sa, So | Pkw | Stündlich |
| PTV-Validate | Di-Do | Lkw <3,5t; Lkw 3,5-7,5t; Lkw 7,5-12t; Lkw >12t | Stündlich |
| Stuttgart | Mo-Fr | Pkw, Lkw <3,5t, Lkw >=3,5t | Tageswert |
| Dresden | Mo-Fr | Pkw; Lkw <3,5t; Lkw 3,5-12t; Lkw >12t | Tageswert |
| Magdeburg | Mo-Fr | Pkw; Lkw <3,5t; Lkw >=3,5t | Tageswert |

2.2.1.3 Weitere Datenquellen

Um eine bessere Datenbasis zu erhalten, wurde ein Map-Matching zwischen dem Straßennetzmodell von TomTom und dem Straßennetz von OpenStreetMap (OSM 2020) durchgeführt. Dabei wurden folgende Attribute von dem OpenStreetMap-Netz auf das TomTom-Netz übertragen:

- ▶ Streckenklasse (In OpenStreetMap: Principal tags for the road network)
Die Differenzierung der Streckentypen in OpenStreetMap (OSM) unterscheidet sich von der FRC-Klassifizierung von TomTom. Für die Untersuchung wurden die drei höchsten OSM-Streckenklassen berücksichtigt: „Motorway“, „Trunk“ und „Primary“. Nach der Definition von OSM handelt es sich in Deutschland bei als „Motorway“ klassifizierten Strecken um Autobahnen, bei Strecken der Klasse „Trunk“ um autobahnähnliche Straßen mit Richtungstrennung und mit planfreien Knoten. „Primary“-Strecken haben in OSM keine explizite Definition in der deutschen Straßenhierarchie, umfassen aber die meisten Bundesstraßen, die nicht den Ausbauzustand einer „Trunk“-Strecke haben.

► MaxSpeed

Das Attribut gibt die zulässige Höchstgeschwindigkeit an. Sofern keine Geschwindigkeitsbeschränkung gilt, wird dies durch die Attribuierung „None“ ausgedrückt. Entsprechende Strecken lassen sich mithilfe des OSM-Netzes also eindeutig identifizieren.

Bei Strecken der FRC 0 bis 6 wurden für rund 92 % der Netzlänge des TomTom-Streckennetzes eine Strecke im OSM-Netz gefunden, deren Attribute übernommen wurden. Bei Strecken der FRC 7 wurde für rund 77 % der Netzlänge des TomTom-Streckennetzes eine Strecke im OSM-Netz zugewiesen.

Ergänzend wurden Daten von 125 Dauerzählstellen in Nordrhein-Westfalen an Autobahnen und Bundesstraßen sowie Daten von 48 Messquerschnitten der Stadt Düsseldorf genutzt. Die Daten aus Nordrhein-Westfalen waren Geschwindigkeitsdaten auf Ebene der Einzelfahrzeuge, die Daten aus Düsseldorf Geschwindigkeitsmittelwerte für 1min-Zeitintervalle. Die Daten wurden analog zu den vorliegenden TomTom-FCD nach der Stunde des Tages zusammengefasst. Damit lagen 3.000 Datensätze (Stunde x Zählstelle) aus den NRW-Daten und 1.152 Datensätze aus den Düsseldorf-Daten vor. Die Daten der Stadt Düsseldorf wurden dafür genutzt, eine stundenfeine Wochenganglinie für SNF für Streckentypen in Ballungsräumen zu entwickeln (siehe Kapitel 2.2.3.4).

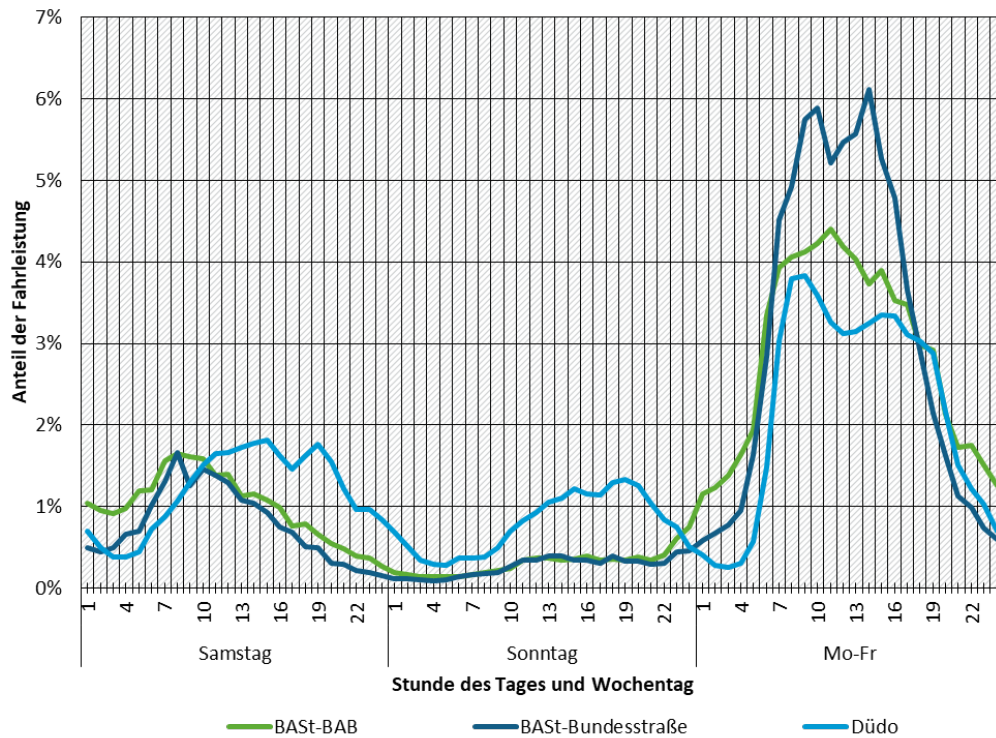
Des Weiteren wurden die Daten der automatisierten Zählstellen auf Autobahnen und Bundesstraßen der BAST verwendet (BAST 2022). Die automatischen Zählstellen unterscheiden je nach Gerätetyp bis zu neun verschiedene Fahrzeugkategorien. In die Auswertung flossen die Daten von 1.159 Zählstellen an Bundesautobahnen und 880 an Bundesstraßen ein. Aus den BAST-Zählstellen wurde für die Fahrzeugtypen SNF, LNF, RBus und KR/MR stundenfeine Wochenganglinien differenziert nach der Straßenkategorie BAB und autobahnähnliche Strecken erstellt (siehe Kapitel 2.2.3.4 und Kapitel 2.2.3.7).

Für die Fahrzeugkategorie Linienbus wurden Fahrplanfahrten des VVS (Verkehrs- und Tarifverbund Stuttgart) verwendet. Die Daten sind Teil des DELFI-Datensatzes und werden unter einer Open-Data-Plattform zur Verfügung gestellt (VRR 2022). Genutzt wurden hierbei explizit die Fahrplandaten für den Juni für das Jahr 2020. Aus diesen Daten wurden ebenfalls Ganglinien für drei Wochentagstypen (Mo-Fr, Sa, So) mit stündlicher Auflösung für den Linienbus abgeleitet. Hierbei wurden alle Fahrplanfahrten im Gebiet des VVS ausgewertet. Für jede Fahrplanfahrt wurde berechnet, an welchen Wochentagen und zu welchen Uhrzeiten diese Fahrt auftrat und anschließend aufsummiert. Um den Wochentagtyp Mo-Fr zu erhalten, wurde hierfür der Mittelwert der Absolutwerte zwischen Montag und Freitag genommen. Anschließend wurde hieraus eine stundenfeine Wochenganglinie für den LBus erstellt. In Tabelle 13 ist eine Übersicht über alle im Projekt verwendeten Ganglinien mit der Datenquelle, aus der sie erstellt wurden. In der Abbildung 7, der Abbildung 8 und der Abbildung 9 sind die berechneten Ganglinien dargestellt.

Tabelle 13: Übersicht über die verwendeten Ganglinien

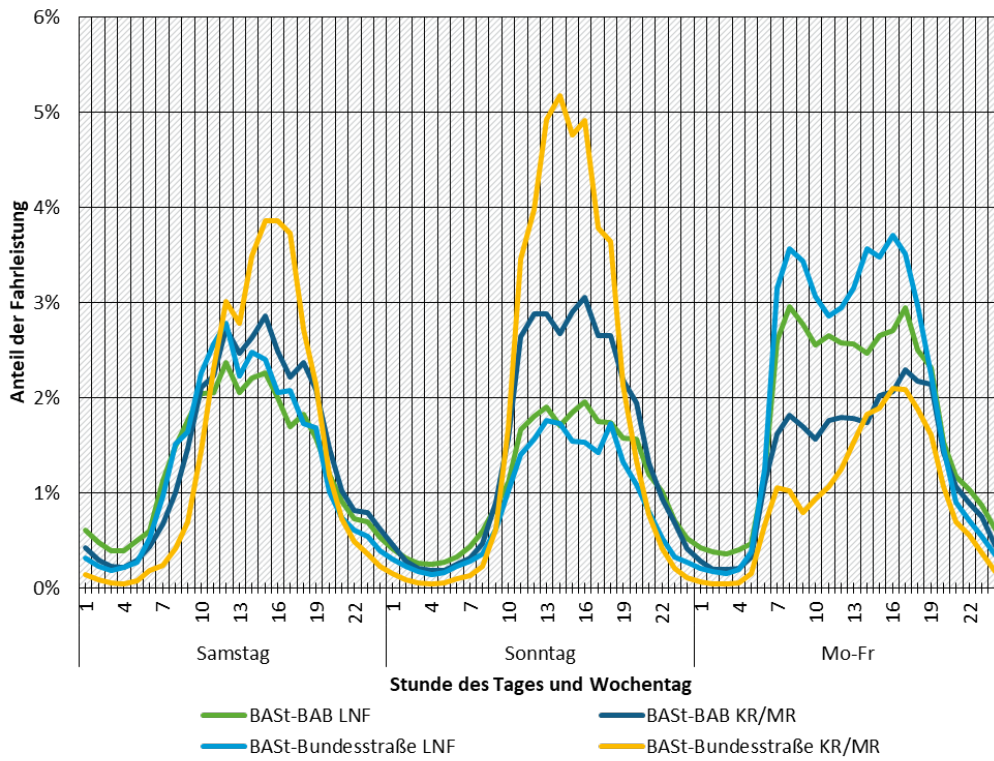
| Datenquelle | Fahrzeugkategorie | Straßenkategorie |
|-----------------------|-----------------------|------------------|
| Düsseldorf 2018, 2019 | SNF | alle |
| BASt-Zählstellen 2018 | SNF; LNF; RBus; KR/MR | BAB |
| BASt-Zählstellen 2018 | SNF; LNF; RBus; KR/MR | Bundesstraße |
| VVS Juni 2020 | LBus | alle |

Abbildung 7: Ganglinien für die Fahrzeugkategorie SNF



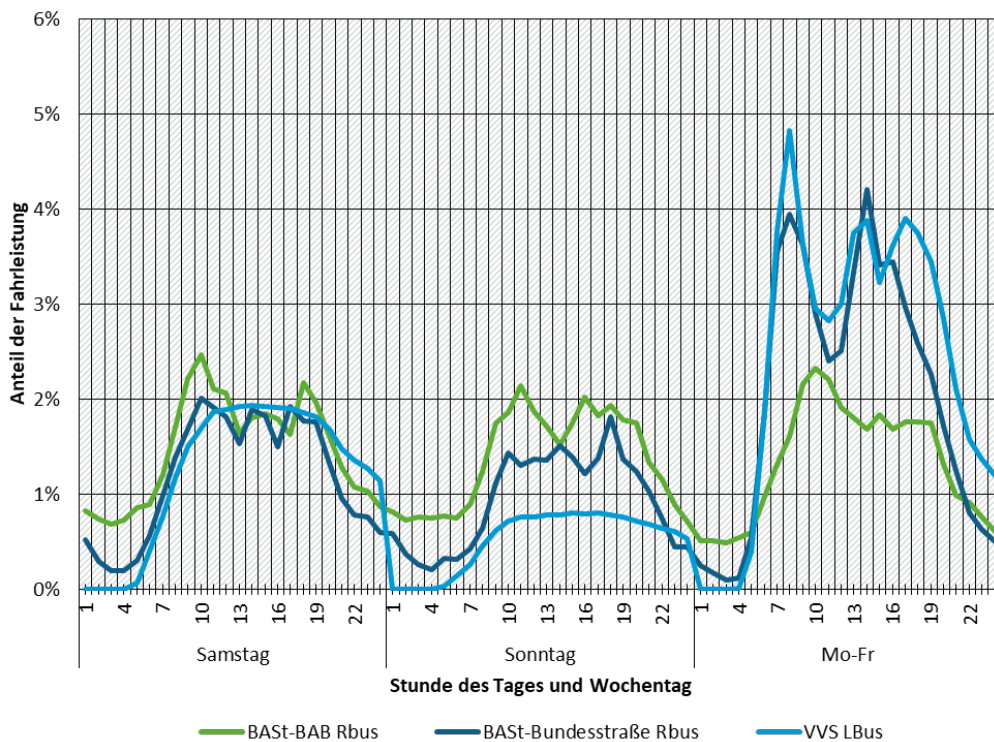
Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart, auf Grundlage von BASt-Zählstellendaten und Zählstellendaten aus Düsseldorf (DüDo)

Abbildung 8: Ganglinien für die Fahrzeugkategorien LNF und KR/MR



Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart, auf Grundlage von BAST-Zählstellendaten

Abbildung 9: Ganglinien für die Fahrzeugkategorien RBus und LBus



Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart, auf Grundlage von BAST-Zählstellendaten und Daten des VVS

Für die Kalibrierung der auf unterschiedlichen Berechnungsmethoden beruhenden Ergebnisse wurden Eckwerte für Deutschland aus zwei Datenquellen verwendet: Die Fahrleistungsdaten aus TREMOD (Dokumentation siehe Allekotte et al. 2020) für das Jahr 2018 und für eine Verfeinerung der Daten im Innerortsbereich die von Bäumer et al. (2017) errechneten Werte der Inlandsfahrleistungen, die auf der Fahrleistungserhebung 2014 basieren.

2.2.2 Zuweisung der HBEFA-Straßenkategorien und Steigungsklassen im Straßennetz

Im ersten Schritt zur Bestimmung der Fahrleistung je Verkehrssituation wurde jedem Streckenabschnitt des TomTom-Netzes eine Straßenkategorie und eine Steigungsklasse zugeordnet. Die Straßenkategorie beschreibenden Dimensionen wurden in aufeinanderfolgenden Schritten zugewiesen.

2.2.2.1 Gebietstyp

Wie in Tabelle 6 aufgeführt, unterscheidet die Kategorisierung des HBEFA zwischen den Gebietstypen „Ländlicher Raum“ und „Agglomeration“. Eine genauere Beschreibung der beiden Gebietstypen ist nicht angegeben. Ericsson et al. (2019) gehen auf die Bedeutung der Unterscheidung ein und stellen fest, dass im Besonderen die Übersetzung der ursprünglichen Terminologie (rural und urban) missverständlich sein kann. Hinsichtlich des Fahrverhaltens und der daraus resultierenden Emissionswerte sei die Abgrenzung vielmehr zwischen bebautem und unbebautem Gebiet zu ziehen.

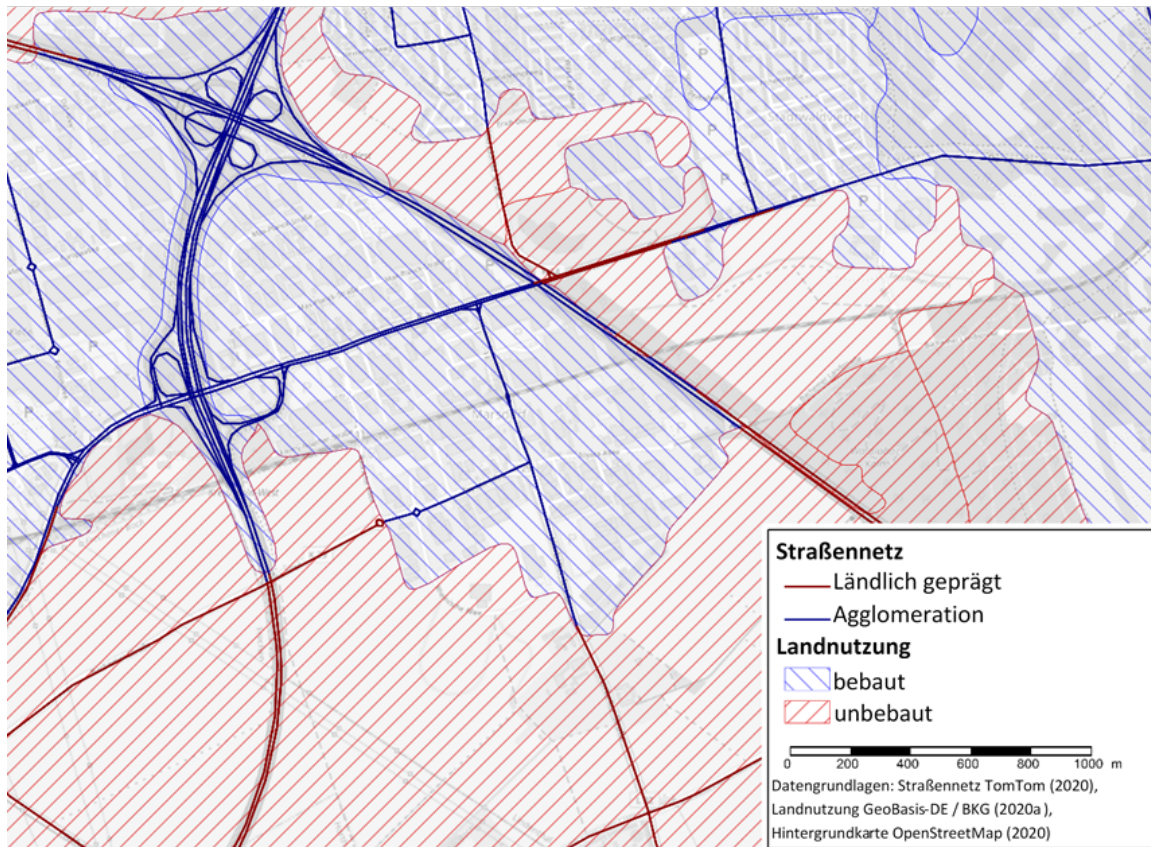
Die Zuordnung der Streckenabschnitte zu jeweils einem der beiden Gebietstypen erfolgte deshalb auf Grundlage von Landnutzungsdaten. Verwendet wurden die CORINE-Land-Cover-Daten mit dem Stand 2018 (GeoBasis-DE / BKG 2020a). Diese unterteilen die Landnutzung in 44 Kategorien, die in Kosztra et al. (2019) im Detail beschrieben sind. Gebiete der Nutzungsklasse 1 „Artificial areas“ wurden als bebautes Gebiet und damit als Gebietstyp „Agglomeration“ angesehen. Darunter fallen auch angelegte Grünflächen wie Parks und Sportanlagen sowie großräumige Flächen industrieller Nutzung (z.B. Tagebau). Streckenabschnitte, die in einem Gebiet der verbleibenden Klassen (2 „Agricultural areas“, 3 „Forest and seminatural areas“, 4 „Wetlands“ und 5 „Waterbodies“) lagen, wurden dem Gebietstyp „Ländlicher Raum“ zugeordnet“. Nach dieser Zuordnung lagen 43,2 % des Straßennetzes im Gebietstyp „Agglomeration“.

Abbildung 10 zeigt beispielhaft die Einteilung der Landnutzungsdaten und die Zuordnung der Streckenabschnitte für das Autobahnkreuz Köln-West. Anhand der Hintergrundkarte ist deutlich zu erkennen, dass der Übergang zwischen bebautem und unbebautem Gebiet gut abgebildet wird. Die Darstellung zeigt aber auch, dass eine Zuweisung des Gebietstyps einzig auf Grundlage der Landnutzungsdaten in einzelnen Fällen problematisch sein kann. Beispielhaft lässt sich erkennen, dass die von Nord-West nach Süd-Ost verlaufende Autobahn die räumliche Grenze zwischen den zu unterscheidenden Landnutzungen darstellt. Die Fahrtrichtung Nord-West wird dabei auf einem kleinen Streckenabschnitt dem ländlichen Raum zugewiesen, wohingegen die Richtung Süd-Ost an dieser Stelle durchgängig dem Gebietstyp „Agglomeration“ zugeordnet ist. Dass Straßen auf der Grenze zwischen unterschiedlichen Bereichen der Landnutzung verlaufen, ist keine Seltenheit. Welchem Typ diese Strecken zugeordnet werden sollen ist aber nicht eindeutig definiert. Für die Zuordnung von Autobahnen und autobahnähnlichen Strecken ist die Nutzung des Kriteriums der Landnutzung bzw. Bebauung generell zu hinterfragen. Der Einfluss der umgebenden Bebauungssituation auf das Fahrverhalten sollte bei diesen Straßenkategorien gering sein. Im Rahmen der Studie wurde für diese Straßenkategorien der Abstand zwischen den Anschlussstellen als Kriterium in Betracht gezogen, da diese in Ballungsräumen in der Regel

kürzer sind. Da jedoch auch in ländlichen Gebieten immer wieder kurze Abstände auftreten, konnte keine klare Abgrenzung erreicht werden.

Abbildung 10: Einteilung des Gebietstyps nach Landnutzungsdaten

Beispielhafte Darstellung des Autobahnkreuzes Köln-West (A1 und A4)



Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart, Datengrundlagen siehe Abbildung

Für die Auswertungen im Rahmen der Studie wurde an der ursprünglich gewählten Definition nach CORINE-Land-Cover-Daten festgehalten. Aufgrund der großräumigen Perspektive der Arbeit ist es weniger relevant, wenn in einzelnen Fällen kleinräumige Zuordnungen unklar sind, sofern kein systematischer Fehler entsteht, durch den ein Gebietstyp deutlich über- bzw. unterschätzt würde. Für kleinräumige Anwendungen, für die das HBEFA beispielsweise im Rahmen von Untersuchungen zur Luftreinhaltung weithin genutzt wird, wäre eine eindeutige Definition, die sich auf allgemein verfügbare Daten stützt, wünschenswert.

2.2.2.2 Straßentyp

Die Straßentypen wurden primär über die FRC-Attributierung von TomTom zugewiesen. Zusätzlich wurde für Strecken der FRC 1 die Streckenklasse aus OSM berücksichtigt. Für den Gebietstyp „Ländlich“ wird bei Hauptverkehrsstraßen und Sammelstraßen zwischen kurvigen und nicht kurvigen Strecken unterschieden. Deshalb wurde die Kurvigkeit nach dem Handbuch zur Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS) berechnet, wodurch jeder Streckenabschnitt einer Kurvigkeitsklasse (1 – 4) zugeordnet werden konnte. Die auf Grundlage dieser drei Kriterien erfolgte Zuordnung der HBEFA-Straßentypen ist in Tabelle 14 zusammengefasst. Auf die einzelnen Kriterien wird im Folgenden genauer eingegangen.

Tabelle 14: Zuordnung der Straßentypen anhand der Streckenabschnitt-Attributierung

| Gebietstyp | Straßentyp | FRC (TomTom) | Streckenklasse (OSM) | Kurvigkeitsklasse |
|---------------|------------|--------------|---------------------------|-------------------|
| Ländlich | AB | 0 | | |
| | Se-AB | - | | |
| | FStr | 1 | Trunk | |
| | HVS | 1, 2, 3, 4 | nicht Trunk (bei FRC = 1) | 1 – 2 |
| | HVS-k | 1, 2, 3, 4 | nicht Trunk (bei FRC = 1) | 3 - 4 |
| | SaS | 5,6 | | 1 - 2 |
| | SaS-k | 5, 6 | | 3 - 4 |
| | ErS | 7 | | |
| Agglomeration | AB | 0 | | |
| | St-AB | 1 | Trunk | |
| | FStr | 1 | nicht Trunk (bei FRC = 1) | |
| | RiStr | 2 | | |
| | HVS | 3, 4 | | |
| | SaS | 5,6 | | |
| | ErS | 7 | | |

Aus der FRC des TomTom-Netzes, der Streckenklasse des OSM-Netzes und der Kurvigkeitsklasse lässt sich getrennt nach Gebietstyp eindeutig ein Straßentyp nach HBEFA zuordnen.

2.2.2.3 FRC und OSM-Streckenklasse

Ebenso wie die Definitionen der Gebietstypen wurden durch Ericsson et al. (2019) für die Aktualisierung des HBEFA auf die Version 4.1 auch die Definitionen der Straßentypen überprüft. Die neuen Definitionen unterschieden sich in einzelnen Punkten von den HBEFA-Definitionen, die in Tabelle 7 aufgeführt sind. Ericsson et al. (2019) geben für jeden Straßentyp eine Definition anhand der Straßen-Hierarchie (Primary, Secondary, Local Collector etc.) und des Straßenausbaustands (Anzahl Fahrstreifen, Knotenpunktart etc.) vor.

Für die Zuordnung der Streckenabschnitte zu einem HBEFA-Straßentyp wurden in dieser Studie primär die FRC-Werte nach TomTom genutzt, was in erster Linie einer hierarchischen Ordnung des Streckennetzes entspricht. Die Zuordnung wurde in Tabelle 14 bereits aufgeführt.

Autobahnen können immer eindeutig durch die Eigenschaft FRC = 0 identifiziert werden. Dem Straßentyp „Semi-Autobahn“ werden keine Strecken zugeordnet. Dieser Straßentyp zeichnet sich durch einen Wechsel zwischen einem und zwei Fahrstreifen je Fahrtrichtung aus. Solche Strecken sind in Deutschland weniger verbreitet als in anderen Ländern, in denen das HBEFA genutzt wird und sie eine eigene Straßenkategorie darstellen. Anhand der vorliegenden Netzeigenschaften waren die entsprechenden Streckenzüge nicht eindeutig zu identifizieren. Innerhalb der Strecken der Attributierung FRC = 1 wurde eine weitere Unterteilung vorgenommen. Die Definition des Ausbaustands des HBEFA-Straßentyps „FStr“ im ländlichen Raum lautet nach Ericsson et al. (2019): „*Main high capacity road, >= 2 lanes/direction. Grade separated or low disturbance interchanges i.e. they have entrances and exits on specific access ramps or intersections designed to lower the interference with the traffic on the road. Slow going*“

traffic/vehicles (incl. pedestrians and cyclists) not allowed.“ Aus diesem Grund wurden diesem Straßentyp nur Streckenabschnitte zugeordnet, die nach OSM über einen autobahnähnlichen Ausbauzustand verfügen und damit mit der Attributierung „Trunk“ versehen sind. Analog wurde bei Strecken des Gebietstyps „Agglomeration“ für den Straßentyp „St-AB“ verfahren. Die Abgrenzung zwischen Hauptverkehrsstraßen und Sammelstraßen wurde zwischen die FRC 4 und die FRC 5 gelegt, die Grenze zwischen Sammel- und Erschießungsstraßen zwischen die FRC 6 und die FRC 7. Insbesondere die Einordnung der Strecken der FRC 4 als Hauptverkehrsstraße oder als Sammelstraße hat aufgrund der hohen gesamtnetzbezogenen Streckenanteile (siehe Tabelle 11) eine große Bedeutung. Die Zuordnung wurde durch die Autoren der Studie auf Grundlage der Beschreibungen der FRC durch TomTom (siehe Tabelle 11) und der jeweiligen Strecken-Hierarchien nach Ericsson et al. (2019) sowie der stichprobenartigen Überprüfung von Streckenabschnitten vorgenommen. Eine klar definierte Abgrenzung der niedrigen Straßenkategorien ist nach den gegebenen Beschreibungen nicht möglich. Hinzu kommt, dass in einer FRC Streckenabschnitte unterschiedlicher Ausbauzustände versammelt sein können, die ein sich unterscheidendes Fahrverhalten erwarten lassen (z.B. Sammelstraßen in Wohngebieten versus Sammelstraßen in Gewerbegebieten).

2.2.2.4 Kurvigkeit von Strecken

Ein zusätzlicher Indikator für die Einteilung in die HBEFA-Straßentypen ist die Kurvigkeit. Dieser Indikator ermöglicht eine Unterscheidung zwischen kurvigen und nicht kurvigen Hauptverkehrsstraßen und Sammelstraßen in ländlichen Gebieten (siehe Tabelle 14). Weder die Beschreibung der Straßentypen in HBEFA (INFRAS AG 2019) noch die durch Ericsson et al. (2019) durchgeführte Überprüfung enthält eine eindeutige Definition des Kurvigkeitsbegriffs. In der vorliegenden Arbeit wurde aus diesem Grund die Definition nach HBS (FGSV 2015a) herangezogen, die die Kurvigkeit wie folgt bestimmt:

$$KU = \frac{\sum_{j=1}^n |\Upsilon_j|}{L}$$

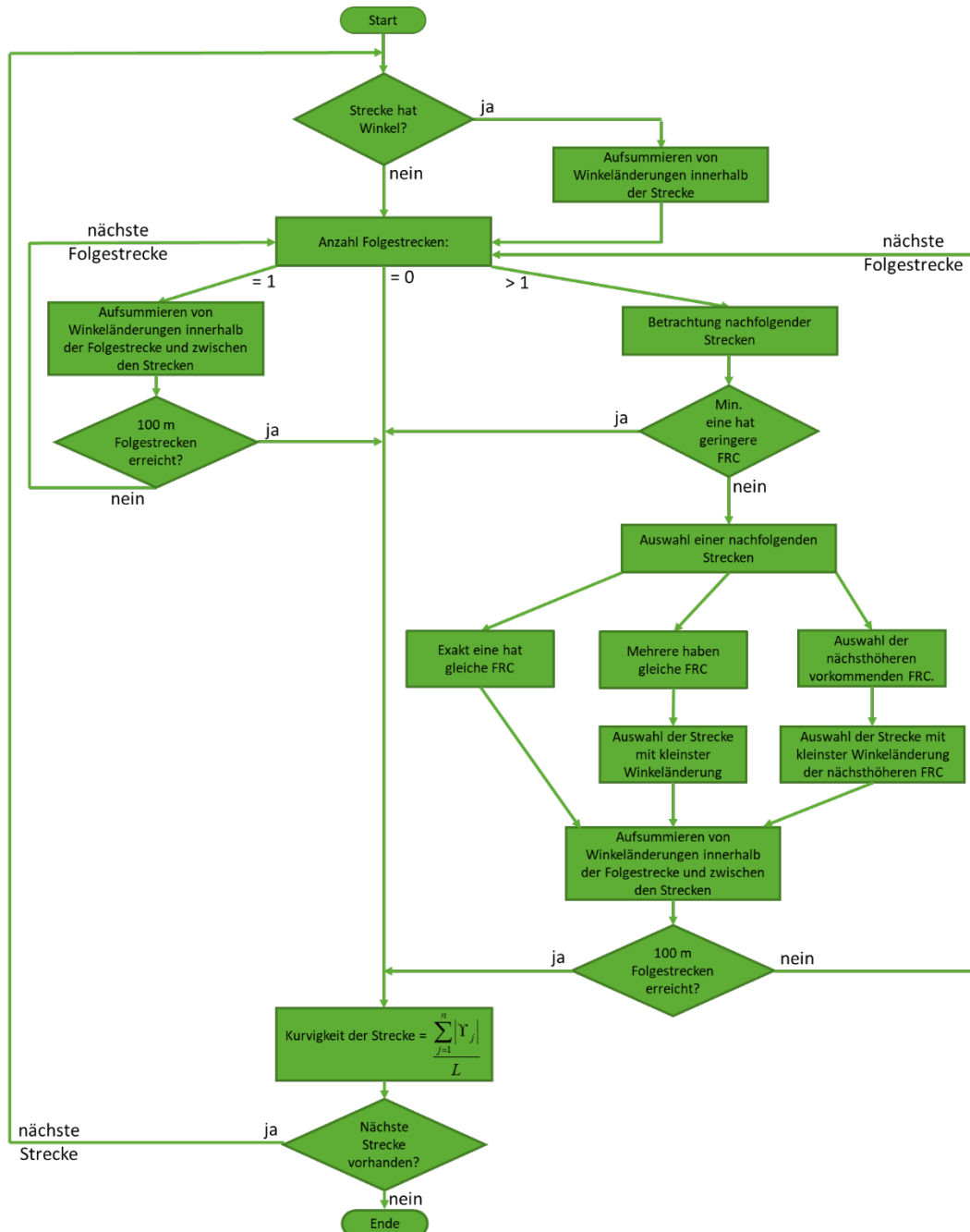
mit

| | |
|-----------------------------|--|
| <i>KU</i> | Kurvigkeit der Teilstrecke in gon/km |
| <i>n</i> | Anzahl der Kurven <i>j</i> im Lageplan innerhalb der Teilstrecke |
| <i>Υ_j</i> | Winkeländerung im Lageplan innerhalb der Teilstrecke in gon |
| <i>L</i> | Länge der Teilstrecke in km |

Die Auswertung der Kurvigkeit erfolgt für alle Streckenabschnitte des TomTom-Netzes, die im ländlichen Gebiet liegen und eine FRC zwischen 1 und 6 aufweisen. Dabei wurde jeweils eine Streckenlänge von bis zu 100 m ausgehend vom Ende des jeweiligen betrachteten Streckenabschnitts berücksichtigt, um den nachfolgenden Straßenverlauf mit zu berücksichtigen. Die Länge von 100 m wurde gewählt, da der Wert in etwa der Voraussicht eines Verkehrsteilnehmenden im motorisierten Straßenverkehr zur Anpassung der Geschwindigkeit entspricht. Sind mehrere nachfolgende Streckenverläufe möglich (z.B. bei Kreuzungen), wurde, wenn möglich, die nachfolgende Strecke des gleichen Streckentyps gewählt. Liegen mehrere nachfolgende Strecken, mit gleichem Streckentyp vor, wurde die Strecke ausgewählt, die die kleinste Winkeländerung zur momentan betrachteten Strecke aufweist. Somit wird beispielsweise bei Kreuzungen von zwei Straßen mit gleicher FRC sichergestellt, dass die

Geradausstrecke als Fortsetzung der aktuell befahrenen Straße verwendet wird. Weist eine der nachfolgenden Strecken eine geringere FRC auf, als die momentan betrachtete, dann wird ab diesem Punkt keine nachfolgende Strecke mehr betrachtet und die Kurvigkeit wird nur bis zu diesem Punkt berechnet, auch wenn noch keine Länge von 100 m auf nachfolgenden Strecken erreicht wurde. Dies ist beispielsweise bei Einmündungen ins höhere Straßennetz der Fall. Das genaue Vorgehen ist in Abbildung 11 dargestellt.

Abbildung 11: Heuristik für die Berechnung der Kurvigkeit von Strecken



Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart

Nach der Berechnung der Kurvigkeit war die Einteilung in die im HBS verwendeten vier Kurvigkeitsklassen möglich. Die Einteilung der Klassen, die darauf aufbauende Zuweisung der HBEFA-Straßentypen sowie die ermittelten Streckenlängenteile sind in Tabelle 15 dargestellt.

Von den betrachteten Streckenabschnitten wird ein Längenanteil von 69 % als nicht kurvig und 31 % als kurvig angesehen.

Tabelle 15: Berechnete Streckenlängenanteile nach Kurvigkeit

| Kurvigkeit KU in gon/km | Kurvigkeitsklasse | Streckenlänge in km | Streckenlängenanteil | Zuordnung HBEFA-Straßentyp | Streckenlängenanteil |
|-------------------------|-------------------|---------------------|----------------------|----------------------------|----------------------|
| KU ≤ 50 | 1 | 243.551 | 49 % | nicht kurvig | 69 % |
| 50 < KU ≤ 100 | 2 | 98.126 | 20 % | | |
| 100 < KU ≤ 150 | 3 | 51.751 | 10 % | kurvig | 31 % |
| KU > 150 | 4 | 104.329 | 21 % | | |
| Summe | | 497.758 | 100 % | | 100 % |

2.2.2.5 Zulässige Höchstgeschwindigkeit

Für die Festlegung der Straßenkategorie muss weiterhin eine zulässige Höchstgeschwindigkeit zugeordnet werden. HBEFA kennt nach Definition die in Tabelle 8 aufgeführten Geschwindigkeitsklassen, wobei für die Klassen $v^z = 10$ und $v^z = 20$ keine Verkehrssituationen definiert sind. Für die Darstellung werden deshalb alle Strecken mit einem Tempolimit von weniger als 30 km/h in einer Klasse $v^z = <30$ zusammengefasst.

Für die Zuordnung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit wurden neben den TomTom-Netzeigenschaften die verschnittenen OSM-Daten genutzt. Das Vorgehen ist in Tabelle 16 illustriert.

Tabelle 16: Geschwindigkeitszuweisung der TomTom Strecken

| Tom Tom Ramp | Fall | TomTom Tempolimit | OSM MaxSpeed | Tom Tom Map-urban | Zuweisungswert HBEFA v^z | Anteil Netzlänge | |
|--------------|------|--|---------------------|-------------------|----------------------------|------------------|--------|
| Nein | 1 | Bekannt | | | TomTom Tempolimit | 13,7 % | |
| | 2 | 100 km/h | Bekannt & <100 km/h | Ja | OSM MaxSpeed | 0,1 % | |
| | 3 | Vermutlich >130 km/h | “None” (>130km/h) | | >130 km/h | 0,9 % | |
| | 4 | Vermutlich >130 km/h | <= 130 km/h | | 130 km/h | 0,1 % | |
| | 5 | Vermutlich >130 km/h | Unbekannt | | >130 km/h | 0,2 % | |
| | 6 | Unbekannt | Bekannt | | OSM MaxSpeed | 69,6 % | |
| | 7 | Unbekannt | Unbekannt | | Ja | 50 km/h | 2,9 % |
| | 8 | Unbekannt | Unbekannt | | Nein | 100 km/h | 11,8 % |
| Ja | 9 | Zuordnung zu HBEFA-Straßenkategorie erfolgt gesondert, siehe unten | | | | 0,7 % | |

OSM MaxSpeed wird als „Unbekannt“ eingestuft, wenn einer TomTom-Strecke keine OSM-Strecke zugeordnet werden konnte oder der Attributswert unplausibel war.

Sofern im Straßennetz von TomTom eine Geschwindigkeitsbeschränkung hinterlegt war, die nicht 100 km/h bzw. „vermutlich >130 km/h“ betrug, wurde diese übernommen (Fall 1 in

Tabelle 16). Bei Prüfung der Ergebnisse wurde festgestellt, dass im TomTom-Netz vereinzelt auch innerhalb geschlossener Ortschaften zulässige Höchstgeschwindigkeiten von 100 km/h gesetzt waren. Dies trat zumeist an den Grenzen von Ortschaften auf. Diese Werte wurden korrigiert, indem das OSM-Tempolimit übernommen wurde (Fall 2).

Aus den TomTom-Daten konnte nur indirekt abgeleitet werden, ob auf einem (Autobahn-)Streckenabschnitt real keine Geschwindigkeitsbeschränkung vorlag oder nur keine zulässige Höchstgeschwindigkeit in den Daten hinterlegt war (siehe Kapitel 2.2.1), da in beiden Fällen ein Tempolimit von 130 km/h angegeben war. TomTom unterscheidet hier zusätzlich zwischen 130 und „vermutlich >130“. Auf einem Großteil der Strecken, die im TomTom-Netz als „vermutlich >130“ identifiziert werden konnten, gilt tatsächlich kein Tempolimit. Jedoch gibt es hier auch einen Anteil auf dem eine zulässige Höchstgeschwindigkeit von 130 km/h vorgeschrieben ist. Um diese Strecken möglichst gut erkennen zu können, wurden die Fälle 3 bis 5 eingeführt. Wenn das OSM-Attribut MaxSpeed den Wert „None“ enthält, lässt dies darauf schließen, dass am entsprechenden Streckenabschnitt tatsächlich keine Geschwindigkeitsbeschränkung gegeben war, woraufhin das HBEFA-Geschwindigkeitsattribut „>130 km/h“ gewählt wurde (Fall 3). Sofern in OSM auch 130 km/h oder eine niedrigere zulässige Höchstgeschwindigkeit angegeben war, wurden 130 km/h als Tempolimit gewählt (Fall 4). Nur wenn kein anderer plausibler Wert aus dem OSM-Attribut MaxSpeed ableitbar war oder keine OSM-Streckendaten auf den TomTom-Netzabschnitt übertragen worden waren, wurde der Wert aus den TomTom-Daten übernommen (Fall 5).

In Fällen, in denen im TomTom-Netz keine Angaben zur zulässigen Höchstgeschwindigkeit hinterlegt waren, wurden zunächst OSM-Daten verwendet (Fall 6). Waren auch diese nicht verfügbar, wurde die zulässige Höchstgeschwindigkeit auf Grundlage der Information, ob ein Streckenabschnitt innerhalb oder außerhalb einer geschlossenen Ortschaft (TomTom-Attribut „Mapurban“) liegt, genutzt (Fall 7 und Fall 8). Für Streckenabschnitte in Knotenpunktbereichen (TomTom-Attribut „Ramp“) wurde eine gesonderte Zuweisungsmethodik gewählt, auf die weiter unten in diesem Kapitel eingegangen wird (Fall 9).

Insbesondere bei zulässigen Höchstgeschwindigkeiten von 50 km/h bzw. 100 km/h sind in den TomTom-Netzdaten für einen Großteil der Streckenabschnitte keine expliziten Werte für die zulässigen Höchstgeschwindigkeiten hinterlegt. In diesen Fällen wurde zumeist auf OSM-Daten zurückgegriffen, jedoch auch in nicht unerheblichem Maß die zulässige Geschwindigkeit aus der Lage des Streckenabschnitts (TomTom-Attribut „Mapurban“) abgeleitet. In Tabelle 17 sind die Anteile der Streckenlänge differenziert nach der Zuweisungsart für alle Strecken mit den Tempolimits 50 km/h oder 100 km/h dargestellt.

Tabelle 17: Längenanteile differenziert nach Datengrundlage für Strecken der FRC 0-7

| Datengrundlage | Tempolimit in km/h | |
|---|--------------------|--------------|
| | 50 | 100 |
| TomTom | 6 % | 11 % |
| OSM | 83 % | 60 % |
| Zuweisung über Lage innerhalb bzw. außerhalb geschlossener Ortschaften (TomTom-Attribut „Mapurban“) | 11 % | 29 % |
| Summe | 100 % | 100 % |

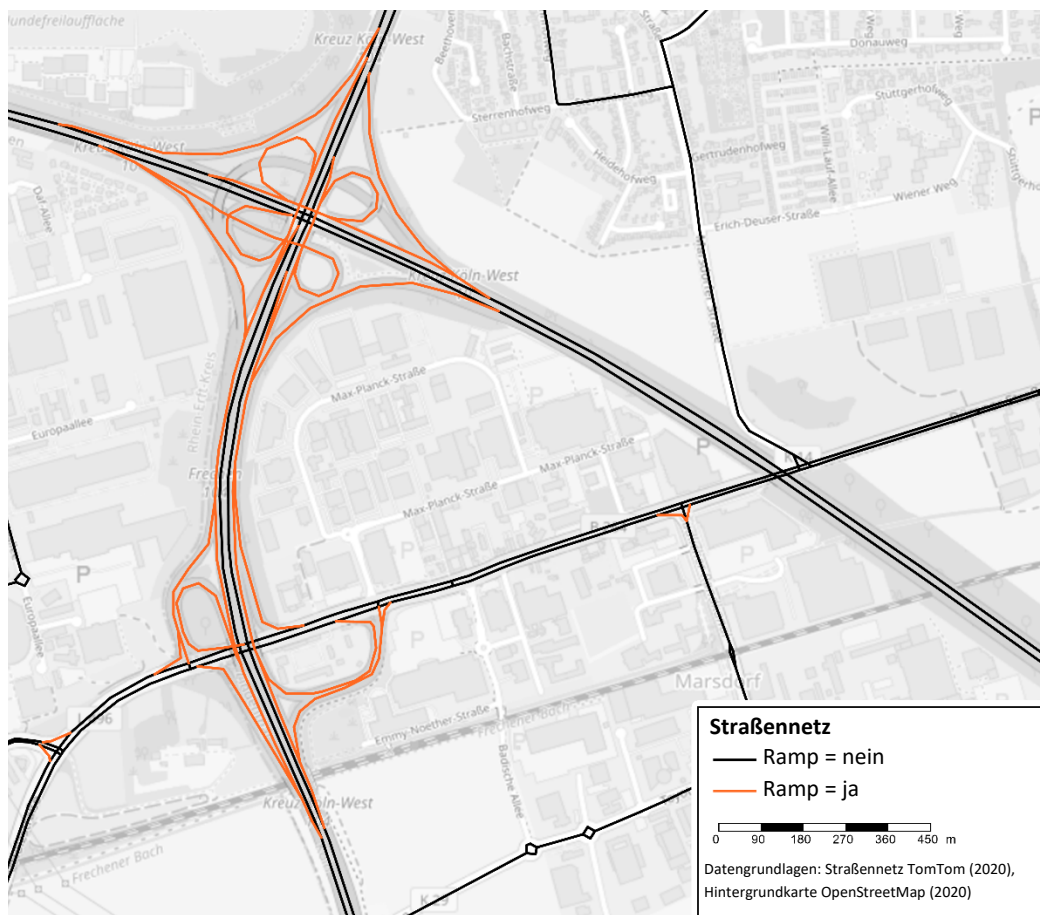
2.2.2.6 Streckenabschnitte in Knotenpunkten

Die TomTom-Daten verfügen über das Attribut „Ramp“, welches identifiziert, ob ein Streckenabschnitt einen Teil eines Knotenpunktes abbildet. In Abbildung 12 ist noch einmal der Auszug des Streckennetzes um das Autobahnkreuz Köln-West dargestellt, worin diesmal die so als Knotenpunktteile attribuierten Strecken hervorgehoben sind. Es lässt sich erkennen, dass bei großen planfreien Knoten nicht zu vernachlässigende Streckenanteile auf die Knotenpunkte entfallen. Auch die Fahrstreifen zwischen den beiden dargestellten großen Knotenpunkten, über welche die Auf- und Abfahrt auf die bzw. von der A4 erfolgt, sind durchgängig als Teil der Knotenpunkte markiert. Daneben kann der Abbildung aber auch entnommen werden, dass Abbiegestreifen an Knotenpunkten im untergeordneten Netz ebenfalls mit dem Attribut „Ramp“ versehen sind. Im untergeordneten Netz sind die Anteile jedoch sehr gering. Bei den FRC 5 bis 7 macht der Anteil nur 0,1 % aus. Mit abnehmender FRC nimmt der Anteil zu und beträgt bei FRC 0 immerhin 5,2 % der Gesamtstrecke. Hinsichtlich des Fahrverhaltens ist es offensichtlich, dass die Knotenpunktbereiche eine Sonderstellung einnehmen.

Da die den Emissionsfaktoren des HBEFA zugrundeliegenden Fahrzyklen so aufgebaut sind, dass in den Fahrten auf übergeordneten Strecken, die Zu- und Abfahrten nicht berücksichtigt sind, wurden die Netzabschnitte in Knotenpunkten den jeweils niedrigeren, angrenzenden Straßentypen zugeordnet. Sofern keine explizite Geschwindigkeitsinformation aus den TomTom-Daten für einen Streckenabschnitt vorlag, wurde ebenfalls die zulässige Höchstgeschwindigkeit des entsprechenden angrenzenden Streckenabschnitts übernommen.

Abbildung 12: Streckenabschnitte in Knotenpunkten

Beispielhafte Darstellung des Autobahnkreuzes Köln-West (A1 und A4)



Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart, Datengrundlagen siehe Abbildung

2.2.2.7 Steigungsklassen

Die Zuordnung der Steigungsklassen erfolgte streckenabschnittsfein für das gesamte Netz. Dafür wurde das Netz mit dem Digitalen Geländemodell des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie der Gitterweite 5 m (GeoBasis-DE / BKG 2021) verschnitten. Die Steigung jedes Streckenabschnittes wurde anhand der Höhen der beiden jeweiligen Endpunkte berechnet. Die Höhen wurden aus dem Digitalen Geländemodell über eine lineare Interpolation zwischen den Stützpunkten des 5-m-Rasters ermittelt.

Zusätzlich wurde die Information aus OpenStreetMap (OSM 2020) genutzt, ob eine Teilstrecke auf einer Brücke bzw. in einem Tunnel lag (siehe Kapitel 2.2.1 bezüglich des OSM-Netzes und des Verschneidens). In diesen Fällen wurde vereinfachend die Steigungsklasse „+0 %“ angenommen. Tabelle 18 zeigt die Intervallgrenzen für die Zuordnung zu den HBEFA-Steigungsklassen sowie die resultierenden Streckenlängenanteile je Steigungsklasse. Dabei ist zu berücksichtigen, dass starke Steigungen überproportional häufig im untergeordneten Netz auftreten.

Tabelle 18: Steigungsklassen und Anteile an Streckenlänge

| HBEFA-Steigungsklasse | Intervallgrenzen für Zuordnung | Anteil an Streckenlänge |
|-----------------------|--------------------------------|-------------------------|
| +0 % | [-1 %, +1 %] | 51,1 % |
| +2 % | [-3 %, -1 %];]+1 %, +3 %] | 26,1 % |
| +4 % | [-5 %, -3 %];]+3 %, +5 %] | 10,8 % |
| +6 % | <-5 %; >+5 % | 12,0 % |

2.2.2.8 Straßenklassen nach Baulastträger

Eckwerte für Fahrleistungen im deutschen Streckennetz liegen insbesondere differenziert nach der Systematik der Straßenklassen nach Baulastträger vor. Deshalb wurde die Straßenklassifizierung nach Baulastträger für die Hochrechnung der Fahrleistungswerte (siehe Kapitel 2.2.3) genutzt. Zu diesem Zweck wurde aus dem TomTom-Netzattribut „Roadnumber“ die jeweilige Straßenklasse abgeleitet. Das Netzattribut enthält die Straßennummer, die auf Grundlage der Anfangsbuchstaben eine Einteilung nach den Straßenklassen Bundesautobahn (A), Bundesstraße (B), Landesstraße oder Staatsstraße (L, S, St) oder Kreisstraße (K) erlaubt. Kreisstraßen in Bayern und Mecklenburg-Vorpommern weichen von dieser Nomenklatur ab und wurden gesondert ausgewertet. Streckenabschnitte ohne Attributswerte sowie solche, für die keine Einordnung anhand der führenden Buchstabenfolgen möglich war, wurden dem unklassifizierten Netz zugeordnet.

In Tabelle 19 sind die Ergebnisse den Werten aus Radke (2019) gegenübergestellt. Unterschiede können darauf zurückgeführt werden, dass Strecken zum Teil richtungsgetreunt abgebildet und Knotenpunkte unterschiedlich fein aufgelöst sind. Insbesondere bei Bundesstraßen unterscheidet sich die Auflösung der Verflechtungsbereiche (TomTom-Navigationsnetzdaten mit feiner Auflösung), weshalb hier im klassifizierten Netz die größten Unterschiede bestehen. Die durch Radke (2019) auf Grundlage von HERE-Kartendaten angegebene Netzlänge nicht klassifizierter Straßen ist deutlich höher als die auf Grundlage der TomTom-Daten ermittelte. Da zu den verwendeten HERE-Daten keine genaueren Informationen vorliegen, können zur Begründung nur Annahmen geäußert werden. Am naheliegendsten ist, dass im HERE-Datensatz noch weitere Straßen (oder Wege) enthalten sind, die in TomTom hinsichtlich ihrer Bedeutung

unterhalb der FRC 7 liegen und deshalb bereits aus der Betrachtung ausgeschlossen wurden (siehe Kapitel 2.2.1).

Tabelle 19: Streckenlängen im deutschen Straßennetz nach Baulastträger in 1.000 km

| Datengrundlage | Autobahn | Bundesstraße | Landesstraße | Kreisstraße | Klassifiziertes Netz | Nicht klassifiziertes Netz |
|-------------------------------------|--------------|--------------|--------------|---------------|----------------------|----------------------------|
| BMVi (Netzzustand 2016) | 13,0 | 38,1 | 87,0 | 91,9 | 230,0 | |
| HERE (Netzzustand 2017) | | | | | 232,2 | 658,7 |
| Eigene Berechnung (TomTom-Daten) | 13,0 | 39,6 | 87,8 | 90,5 | 230,9 | 569,5 |
| Abweichung gegen BMVi (2016) | 0,0 % | 4,0 % | 1,0 % | -1,6 % | | |

Datenquellen: Vergleichswerte BMVi (Netzstand 2016) und HERE (Netzstand 2017) nach Verkehr in Zahlen 2019/2020 (Radke 2019)

2.2.3 Berechnung der Fahrleistungen je Straßenkategorie

Aufbauend auf der in Kapitel 2.2.2 beschriebenen Klassifizierung der Streckenabschnitte des TomTom-Netzes nach HBEFA-Straßenkategorien und Steigungsklassen, wurde im nächsten Schritt die Gesamtfahrleistung in Deutschland auf dieses Streckennetz aufgeteilt. Dafür wurden verschiedene Daten und Methoden für die unterschiedlichen Funktionsstufen des Straßennetzes kombiniert. Zusätzlich standen auch für die jeweiligen Fahrzeugkategorien unterschiedliche Datengrundlagen zur Verfügung, weshalb auch hier die Berechnungsmethoden im Einzelnen voneinander abweichen.

Im Folgenden wird zunächst das Vorgehen für die Fahrzeugkategorie „Pkw“ beschrieben, auf die der größte Fahrleistungsanteil entfällt und für die die besten Datengrundlagen vorlagen. Die Berechnung erfolgte für die drei FRC-Gruppen FRC 0 bis 3, FRC 4 und FRC 5 bis 7 getrennt (Kapitel 2.2.3.1 bis 2.2.3.3). Im Anschluss daran werden die Berechnungsansätze für die weiteren Fahrzeugkategorien des HBEFA beschrieben, die häufig auf der Berechnungsmethodik für den Pkw aufbauen. Dabei wird auf die Fahrzeugkategorie „SNF“ gesondert eingegangen (Kapitel 2.2.3.4 und 2.2.3.7). Zuletzt werden die Hochrechnung und Kalibrierung der Ergebnisse anhand deutschlandweiter Eckwerte und die Bereinigung der hochgerechneten Daten beschrieben (Kapitel 2.2.3.9 und 2.2.3.10).

2.2.3.1 Fahrzeugkategorie „Pkw“: Strecken der FRC 0 bis 3

Für die Strecken der FRC 0 bis 3 wurden Verkehrsstärken aus dem Verkehrsnachfragemodell PTV-Validate verwendet (siehe Kapitel 2.2.1.2). Da lediglich für 96 % der Streckenlänge des TomTom-Netzes Belastungszahlen aus PTV-Validate vorlagen, wurden die verbleibenden Strecken entsprechend der in Kapitel 2.2.3.9 beschriebenen Hochrechnungsmethodik mit einem straßenklassenabhängigem DTV belegt.

2.2.3.2 Fahrzeugkategorie „Pkw“: Strecken der FRC 4

Für die Strecken der FRC 4 lagen nur für die drei ausgewählten Stadtregionen (Stuttgart, Dresden, Magdeburg) Geschwindigkeitsperzentile und die SampleSize-Werte von TomTom vor

(siehe Kapitel 2.2.1). Weiterhin standen für diese Stadtregionen die Verkehrsstärken aus den regionalen Verkehrsnachfragemodellen der Städte zur Verfügung.

Für alle Strecken der FRC 4, für die zusätzlich eine Verkehrsstärke aus den städtischen Modellen vorlag, wurden für die Wochentagstypen Sa und So die Anteile der Verkehrsstärken an der werktäglichen Verkehrsstärke (Wochentagstyp Mo-Fr) über die SampleSize aus den TomTom-FCD abgeleitet. Die SampleSize-Werte wurden dafür über alle Stunden des Tages aufsummiert. Über die Ergebnisse wurde dann wiederum für alle Strecken über die Verkehrsstärken und die Streckenlängen gewichtet der Mittelwert gebildet. Die Berechnung ist in der folgenden Formel dargestellt. Für einen durchschnittlichen Werktag $t = Mo-Fr$ ergibt sich der Faktor 1.

$$f_t^{WT} = \frac{\sum_{s \in S} \left(V_{s,t=Mo-Fr} \cdot l_s \cdot \frac{\sum_{h \in H} n_{s,t}}{\sum_{h \in H} n_{s,t=Mo-Fr}} \right)}{\sum_{s \in S} V_{s,t=Mo-Fr} \cdot l_s}$$

mit

| | |
|-----------------|---|
| f_t^{WT} | Wochentagstyp-Faktor zur Umrechnung der Verkehrsstärke |
| $t \in T$ | Wochentagstyp t aus der Menge der Wochentagstypen $T = \{Mo-Fr, Sa, So\}$ |
| $s \in S$ | Strecke s aus der Menge aller betrachteter Strecken S |
| $V_{s,t=Mo-Fr}$ | Verkehrsstärke aus den Verkehrsnachfragemodellen (DTV _{W5}) |
| l_s | Länge einer Strecke |
| $h \in H$ | Stunde h aus den 24-Stundenwerten H eines Wochentagstyps |
| $n_{s,t}$ | SampleSize der TomTom-FCD für Strecke s und Wochentagstyps t |

Im Mittel ergab sich über diese Hochrechnung für Samstag ein Faktor von 79 % und für Sonntag von 74 %. Diese Hochrechnungsfaktoren wurden pauschal auf alle Strecken angewandt. Über die SampleSize-Werte von TomTom wurde eine Verteilung der durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärken auf die Stunden des Tages ermittelt.

$$V_{s,t,h} = f_t^{VT} \cdot V_{s,t=Wo} \cdot \frac{n_{s,t,h}}{\sum_{h \in H} n_{s,t}}$$

Die so ermittelte, nach Stunde des Tages und Wochentagstyp differenzierte Verkehrsstärke $V_{s,t,h}$ wurde daraufhin auf Grundlage der betrachteten Strecken aus den städtischen Verkehrsnachfragemodellen über die Verteilung der Streckenlängen differenziert nach den HBEFA-Straßenkategorien auf das Bundesgebiet hochgerechnet.

2.2.3.3 Fahrzeugkategorie „Pkw“: Strecken der FRC 5 bis 7

Für das untergeordnete Straßennetz liegen kaum Informationen zu Verkehrsstärken vor. Auch FCD ist in diesen niedrigen Netzkategorien für die Bestimmung der Verkehrsstärken nur bedingt aussagekräftig. Deshalb wurde eine Näherungsmethode angewandt, bei der die Fahrleistung aus

der Fahrtweite, die im Netz zurückgelegt werden muss, um von den Wohnstandorten das Haupt- und Sammelstraßennetz zu erreichen, abgeleitet wird.

Dazu wurden die Zensus-Einwohnerdaten in Hektar-Rastern (Destatis 2015) genutzt. Die Daten weisen den rund 80,3 Millionen Einwohnern eine von ca. 3,2 Millionen Rasterzellen zu. Die Rasterzellen wurden mit den Gemeindeflächen verschnitten und so jeweils einem Land- oder Stadtkreis bzw. einer kreisfreien Stadt sowie einer Gemeinde zugeordnet. Aus den Ergebnissen der Erhebung Mobilität in Deutschland 2017 (Nobis und Kuhnimhof 2018) wurde ein gemeindetypspezifisches Verkehrsaufkommen für die Selbstfahrenden (Wege mit Quelle am Wohnort) im MIV ermittelt. Dieses durchschnittliche Wegezähl sowie die Kreiszugehörigkeit wurden auf die Rasterzellen übertragen.

Im nächsten Schritt wurden die Rasterzellen an das TomTom-Streckennetz angebunden, wobei jeweils der nächstliegende Knoten gewählt wurde. Weiterhin wurde für jeden Kreis der Schwerpunkt (basierend auf den Einwohnergewichten) bestimmt. Dieser wurde an den nächstliegenden Knoten des Streckennetzes mit der FRC 0 bis 1 angebunden. In Einzelfällen musste die Anbindung bzw. der automatisch ermittelte Kreisschwerpunkt manuell angepasst werden.

Von jeder Rasterzelle wurde nun eine Kurzwegsuche zum jeweiligen Kreisschwerpunkt durchgeführt. Die dabei gewählten Streckenabschnitte wurden mit einer dem spezifischen Verkehrsaufkommen entsprechenden Belastung versehen. Die so aus der Umlegung des MIV-Verkehrsaufkommens einer jeden Rasterzelle resultierenden Belastungen wurden für das Netz aufsummiert. Da die Belastungssummen so nur ein Ende eines Pkw-Weges abbilden, wurden diese mit dem Faktor 2 multipliziert. Mit der Methodik wurden die Eckwerte der Gesamtfahrleistungen im Innerortsbereich gut getroffen, im Außerortsbereich war ein höherer Korrekturfaktor nötig (siehe Kapitel 2.2.3.9).

2.2.3.4 Fahrzeugkategorie „SNF“: Strecken der FRC 0 bis 3

Für die schweren Nutzfahrzeuge (Fahrzeugkategorie „SNF“) wurde räumlich zwischen den drei Stadtregionen und dem Gebiet außerhalb der Stadtregionen unterschieden.

Außerhalb der Stadtregionen wurden die Verkehrsstärken von PTV-Validate verwendet. Da die Verkehrsstärken aus PTV-Validate bereits in stündlicher Auflösung für den Wochentagtyp Di-Do vorlagen, war hier lediglich eine Umrechnung auf die verschiedenen Wochentagtypen nötig. Für den Mo und Fr wurden die gleichen Werte, wie für den Di-Do angenommen. Für die Umrechnung auf Sa und So wurde die aus den Dauerzählstellen der BAST abgeleiteten Ganglinien verwendet (siehe Tabelle 13). Hierbei wurden zwei Ganglinien abgeleitet, eine für die Bundesautobahn und autobahnähnliche Strecken und eine für Bundesstraßen und niedrigere Straßenkategorien. Diese Ganglinien wurden auf alle Strecken der Straßenkategorie FRC 0 bis 3 von PTV-Validate angewandt.

Innerhalb der Stadtregionen wurden grundsätzlich die Werte der städtischen Verkehrsnachfragemodelle verwendet, auch wenn für höhere Straßenkategorien zum Teil auch Werte aus PTV-Validate vorlagen. Da PTV-Validate ein deutschlandweites Verkehrsnachfragemodell ist wurde den Daten der städtischen Modelle, eine höhere Genauigkeit zugeschrieben. Da die Daten der städtischen Verkehrsnachfragemodelle lediglich auf Tagesbasis vorlagen, war hier eine Umrechnung von Tageswerten auf Stundenwerte bzw. von Werktagwerten auf Wochentagwerte nötig. Hierfür sind Ganglinien für die Verkehrsstärke für die ganze Woche mit stündlicher Auflösung nötig. Es wurden die aus den Zählstellendaten der Stadt Düsseldorf abgeleiteten Ganglinien verwendet, da die Modelle größtenteils niedrigere

Straßenkategorien in städtischen Gebieten beinhalten, womit diese Daten gegenüber der BAST-Zählstellendaten als geeigneter erschienen.

2.2.3.5 Fahrzeugkategorie „SNF“: Strecken der FRC 4

Für Strecken der FR 4 lagen lediglich Daten aus den Stadtregionen zur Verfügung. Es wurde hier die gleiche Methodik angewandt, wie für Strecken der FRC 0 bis 3 innerhalb der Stadtregionen.

2.2.3.6 Fahrzeugkategorie „SNF“: Strecken der FRC 5 bis 7

Für Strecken der FRC 5 bis 7 wurden die Verkehrsstärken aus der in Kapitel 2.2.3.3 beschriebenen Methode für den Pkw-Verkehr proportional zur Gesamtfahrleistung skaliert und übernommen. Da die Fahrleistungsanteile schwerer Nutzfahrzeuge im untergeordneten Netz deutlich geringer sind als die des Pkw-Verkehrs, wurden die Verkehrsstärken zusätzlich mit dem Faktor 0,2 multipliziert. Dieser Faktor wurde iterativ im Rahmen der Hochrechnung (siehe Kapitel 2.2.3.9) hergeleitet. In Summe ergibt sich auf Erschließungs- und Sammelstraßen ein Anteil der SNF von rund 3 % an der Gesamtfahrleistung.

Nach diesen Arbeitsschritten lagen für die Fahrzeugkategorie „SNF“ ebenfalls stündliche Verkehrsstärken für alle Wochentagstypen vor. Für die verbleibenden Strecken ohne Daten wurde, wie auch für die anderen Fahrzeugkategorien, die unter Kapitel 2.2.3.9 beschriebene Hochrechnungsmethodik verwendet.

2.2.3.7 Weitere Fahrzeugkategorien: Strecken der FRC 0 bis 4

Für die verbleibenden Fahrzeugkategorien „LNF“, „KR/MR“, „RBus“ und „LBus“ lagen keine Verkehrsstärken aus den Verkehrsnachfragemodellen vor.

Über die in Kapitel 2.2.2.8 beschriebene Zuordnung der Straßenklassen nach Baulastträger wurden die Jahresfahrleistungen aus TREMOD (siehe Tabelle 21) mittels der Streckenlänge zu Verkehrsstärken umgewandelt und über den Faktor von 52,14 Wochen pro Jahr als Wochenverkehrsstärken auf das TomTom-Netz geschrieben. Alle Strecken, die dem unklassifizierten Netz zugeordnet wurden, wurden als „sonstige Straßen“ gewertet. Die Verkehrsstärken wurde hierbei lediglich auf das Netz übertragen, bei dem auch Geschwindigkeitsperzentile von TomTom vorlagen, da nur hier die SampleSize von TomTom für eine spätere Verteilung auf die Stunden des Tages und Tagestypen vorlag. Die Aufteilung auf die Strecken erfolgte hierbei proportional zur Verteilung der Pkw-Belastungen. Lagen z.B. auf einem Streckenabschnitt mit der Klasse „Bundesstraße“ 0,012 % der Pkw-Fahrleistung aller Streckenabschnitte der Klasse „Bundesstraße“, dann wurde diesem Streckenabschnitt auch 0,012 % der Fahrleistung der jeweiligen weiteren Fahrzeugkategorie zugeordnet. Somit ist die relative Verteilung der Verkehrsstärken der weiteren Fahrzeugkategorien identisch mit der Verteilung der Pkw-Verkehrsstärken auf den Strecken. Diese Art der Aufteilung (anhand der Pkw Werte) kann nur als grobe Näherung gesehen werden, Daten für eine exaktere Verteilung lagen jedoch nicht vor.

Anschließend wurden die Wochenverkehrsstärken mittels der in Kapitel 2.2.1.3 beschriebenen Ganglinien auf Tagestypen und Stundenwerte aufgeteilt. Für die in TREMOD verwendete Straßenklasse Autobahn wurde die Ganglinie „Autobahn“, für die Straßenklasse Bundesstraße die Ganglinie „Bundesstraße“ und für die Straßenklassen Landesstraße, Kreisstraße und sonstige Straßen die Ganglinie „Sonstige Straßen“ verwendet. Für die Fahrzeugkategorien „LNF“, „KR/MR“ sowie „RBus“ konnten ausschließlich die Ganglinien, die aus den BAST-Zählstellen abgeleitet wurden, verwendet werden, da die Daten der Stadt Düsseldorf lediglich zwischen Pkw und Lkw differenzieren. In 2.2.1.3 ist eine Übersicht über die zugrunde gelegten Ganglinien für die jeweiligen Fahrzeugkategorien und die jeweiligen Straßenklassen gegeben. Für Strecken, die

nicht dem Streckentyp „Autobahn“ oder dem Streckentyp „Fern- Bundesstraße“ zugeordnet sind, wurde eine Ganglinie aus den Mittelwerten der beiden vorliegenden Ganglinien erstellt. Da davon auszugehen ist, dass die Fahrzeugkategorie „Bus“ in den Zählstellendaten der BAST aufgrund der abgedeckten Straßentypen vorwiegend die Fahrzeugkategorie „RBus“ repräsentiert, wurde für die Fahrzeugkategorie „LBus“ eine abweichende Methodik angewandt. Hier wurde aus den Fahrplanfahrten des VVS eine weitere Ganglinie erstellt (siehe Kapitel 2.2.1.3), welche für alle Straßentypen einheitlich verwendet wurde.

Tabelle 20: Datenquellen für die Ganglinien der weiteren Fahrzeugkategorien

| Fahrzeugkategorie | Autobahn | Fern-, Bundesstraße | Sonstige Straßen |
|-------------------|--|--|--|
| LNF | BAST-Dauerzählstellen Straßentyp „Autobahn“ | BAST-Dauerzählstellen Straßentyp „Bundesstraße“ | Mittelwert aus Autobahn und Fern-, Bundesstraße |
| KR/MR | BAST-Dauerzählstellen Straßentyp „Autobahn“ | BAST-Dauerzählstellen Straßentyp „Bundesstraße“ | Mittelwert aus Autobahn und Fern-, Bundesstraße |
| RBus | BAST-Dauerzählstellen Straßentyp „Autobahn“ | BAST-Dauerzählstellen Straßentyp „Bundesstraße“ | Mittelwert aus Autobahn und Fern-, Bundesstraße |
| LBus | Soll-Fahrplanfahrten VVS Juni 2020 | Soll-Fahrplanfahrten VVS Juni 2020 | Soll-Fahrplanfahrten VVS Juni 2020 |

2.2.3.8 Weitere Fahrzeugkategorien: Strecken der FRC 5 bis 7

Für die Strecken der FRC 5 bis 7 wurde wieder die für den Pkw entwickelte Methode (siehe Kapitel 2.2.3.3) angewandt. Die Verkehrsstärken der Fahrzeugkategorien „LBus“ und „RBus“ wurden analog zu den schweren Nutzfahrzeugen zusätzlich mit dem Faktor 0,2 nach unten skaliert.

Nach diesen Arbeitsschritten lagen für die weiteren Fahrzeugkategorien ebenfalls stündliche Verkehrsstärken für alle Wochentagtypen vor. Für die verbleibenden Strecken ohne Daten wurde, wie bereits für Pkw und SNF, die im Folgenden beschriebene Hochrechnungsmethodik verwendet.

2.2.3.9 Hochrechnung anhand der Randsummen nach Straßenklassen

Die Ausführungen der vorhergegangenen Kapitel zeigen, dass unterschiedliche Methoden zur Berechnung der Verkehrsstärken auf den einzelnen Strecken des TomTom-Netzes zum Einsatz kamen. Weiterhin wird deutlich, dass aus unterschiedlichen Gründen nicht alle Strecken des Netzes mit Verkehrsstärken belegt werden konnten, was einerseits daran lag, dass bei dem durchgeführten Map-Matching Streckenabschnitte nicht immer eindeutig einander zugeordnet werden konnten, andererseits an fehlenden Datengrundlagen in den verwendeten Quellen (insbesondere Verkehrsstärken im FRC-4-Netz außerhalb der Stadtregionen) lag. Aus diesem Grund mussten die Verhältnisse der Fahrleistungssummen aus den unterschiedlichen Methoden aneinander angepasst und die fehlenden Daten ergänzt werden, was durch eine Kalibrierung bzw. Hochrechnung der jeweiligen Ergebnisse auf Grundlage von deutschlandweit bekannten Fahrleistungseckwerten geschah.

Zu diesem Zweck wurden unterschiedliche Datenquellen hinsichtlich ihrer Eignung geprüft. Als primäre Datenquelle wurde TREMOD (Dokumentation siehe Allekotte et al. 2020) ausgewählt, da diese Datenquelle Werte für das Jahr 2018 in einer geeigneten Differenzierung nach Straßenklassen sowie einer geeigneten Gliederung nach Fahrzeugkategorien ausweist. Da

TREMODO nur einen aggregierten Fahrleistungswert über alle Innerortsstraßen ausgibt, wurden für eine weitere Verfeinerung in diesem Bereich die aus der Fahrleistungserhebung 2014 errechneten Inlandsfahrleistungen (Bäumer et al. 2017) verwendet. Darin sind die Innerortsfahrleistungen ebenfalls nach Bundes-, Landes- und Kreisstraßen sowie sonstigen Straßen differenziert. Die Gesamtsumme der Fahrleistungen konnte somit aus TREMOD übernommen werden, die Innerortsfahrleistung wurde proportional zur Aufteilung nach Bäumer et al. 2017 vorgenommen. Für Busse musste zusätzlich eine Aufteilung zwischen den beiden Fahrzeugkategorien Reisebus und Linienbus vorgenommen werden, da Bäumer et al. 2017 an dieser Stelle nicht differenzieren. Dafür wurde die Aufteilung der in den Außerortsstraßenklassen aus den TREMOD-Daten für die Summe der Verkehrsmittel Standardreisebus und Fernlinienbus sowie dem Verkehrsmittel Linienbus berechnet. Diese Verhältnisse wurden auf die Innerortsfahrleistungen übertragen. Die so berechneten und für die Hochrechnung genutzten Eckwerte sind in Tabelle 21 wiedergegeben.

Tabelle 21: Randsummen der Fahrleistungen je Fahrzeugkategorie nach Straßenklasse in Mrd. Fahrzeugkilometer pro Jahr

| Straßenklasse | | Fahrzeugkategorie nach HBEFA | | | | | |
|---------------|-----------------|------------------------------|-------------|-------------|------------|------------|-------------|
| | | Pkw | LNf | SNf | RBus | LBus | KR/MR |
| Autobahn | | 199,5 | 14,5 | 35,0 | 0,8 | 0,2 | 1,4 |
| Außerorts | Bundesstraße | 95,8 | 4,8 | 8,4 | 0,4 | 0,1 | 1,3 |
| | Landesstraße | 82,5 | 6,9 | 3,6 | 0,2 | 0,4 | 2,7 |
| | Kreisstraße | 44,1 | 3,9 | 2,0 | 0,1 | 0,2 | 1,6 |
| | Sonstige Straße | 58,5 | 4,3 | 4,4 | 0,2 | 0,6 | 1,0 |
| Innerorts | Bundesstraße | 39,3 | 5,4 | 4,2 | 0,1 | 0,1 | 0,8 |
| | Landesstraße | 42,1 | 3,7 | 1,5 | 0,1 | 0,2 | 1,4 |
| | Kreisstraße | 20,7 | 1,9 | 1,0 | 0,0 | 0,1 | 0,7 |
| | Sonstige Straße | 59,8 | 5,8 | 2,4 | 0,1 | 0,4 | 3,9 |
| Summe | | 642,3 | 51,3 | 62,5 | 1,9 | 2,3 | 14,7 |

Datenquellen: eigene Berechnung auf Grundlage von TREMOD (Dokumentation siehe Allekotte et al. 2020) und Bäumer et al. 2017

Die folgende Beschreibung bezieht sich auf die Hochrechnung der Fahrleistung für die Fahrzeugkategorie „Pkw“, wobei methodisch bei den weiteren Fahrzeugkategorien analog vorgegangen wurde, diese sich jedoch bei den ursprünglichen Datenquellen und damit bei den Fahrleistungsanteilen und Hochrechnungsfaktoren unterscheiden. Wie beschrieben, lagen für die FRC 0 bis 3 auf Grundlage des Verkehrsnachfragemodells Validate und die FRC 5 bis 7 auf Grundlage der Wohnort-zu-Zentrum-Methode (siehe Kapitel 2.2.3.3) für nahezu alle Strecken im TomTom-Netz Verkehrsstärken vor. Für die verbleibenden Strecken (ca. 0,02 % der Netzlänge, z.B. aufgrund fehlender Zuordnung von Strecken beim Map-Matching zwischen den Netzen von TomTom und Validate) wurde der mittlere DTV für die jeweilige Straßenklasse und FRC angesetzt. Für die Strecken der FRC 4 lagen keine geeigneten netzweiten Fahrleistungsdaten vor. Aus diesem Grund wurde hier aus den Fahrleistungen, die aus den Verkehrsnachfragemodellen der drei Stadtregionen berechnet wurden, ein mittlerer DTV für alle Straßen der FRC 4 bis 7 berechnet. Die DTV-Werte sind in Tabelle 22 aufgeführt. Die Straßenklassen Autobahn oder

Bundesstraße kamen aufgrund der Beschränkung der Auswertung auf hohe FRC nicht oder kaum vor, weshalb die berechneten DTV kaum belastbar, für die Hochrechnung jedoch auch nicht von Bedeutung waren. Die berechneten DTV-Werte wurden nun für alle Streckenabschnitte, für die keine Verkehrsstärken bekannt waren, übernommen. Daraufhin wurde die Summe der Fahrleistungen für das gesamte Netz je Straßenklasse gebildet (dritte Spalte in Tabelle 22). Auf dieser Grundlage wurden Korrekturfaktoren ermittelt, durch die die Randsummen aus Tabelle 21 erreicht wurden. Diese in der vierten Spalte von Tabelle 22 wiedergegebenen Korrekturfaktoren wurden auf die Verkehrsstärken aller Streckenabschnitte, für die ursprünglich eine Verkehrsstärke vorlag, angewandt. Lediglich auf sonstigen Außerortsstraßen wurde ein Korrekturfaktor größer 2 berechnet, was zeigt, dass die berechneten Verkehrsstärken für diese Straßenklasse zu gering waren. Insgesamt, unter Berücksichtigung der Unsicherheiten, die vor allem bezüglich der Fahrleistungen auf den niedrigen Straßenklassen bestehen, wurden die Eckwerte durch die Kombination der unterschiedlichen methodischen Ansätze für den Pkw-Verkehr gut getroffen.

Tabelle 22: DTV-Werte und Korrekturfaktoren zur Hochrechnung der Fahrleistungen der Fahrzeugkategorie „Pkw“

| Straßenklasse | | DTV aus Nachfragemodellen der Stadtregionen der FRC 4 bis 7 | Fahrleistungen mit gesetzten DTV-Werten in Mrd. Fztkm/a | Korrekturfaktor für bekannte Verkehrsstärken |
|---------------|-----------------|---|---|--|
| Autobahn | | - | 186,6 | 106,9 % |
| Außerorts | Bundesstraße | 967 | 83,7 | 114,5 % |
| | Landesstraße | 1.247 | 78,3 | 105,4 % |
| | Kreisstraße | 594 | 36,2 | 122,0 % |
| | Sonstige Straße | 28 | 22,7 | 258,0 % |
| Innerorts | Bundesstraße | 1.429 | 39,6 | 99,3 % |
| | Landesstraße | 1.525 | 38,8 | 108,5 % |
| | Kreisstraße | 866 | 15,0 | 137,9 % |
| | Sonstige Straße | 87 | 53,8 | 111,1 % |

Tabelle 23 stellt die für die Fahrzeugkategorie „SNF“ entwickelten DTV-Werte sowie die entwickelten Korrekturfaktoren dar. Hier treten höhere Faktoren auf. Während die Fahrleistungen im hochrangigen Netz im Außerortsbereich erwartungsgemäß gut getroffen wurde, mussten insbesondere im Innerortsbereich für Bundesstraßen rund der Faktor 2 angewandt werden, um den hier ausgewiesenen Eckwert zu treffen. Insgesamt mussten die ermittelten Lkw-Verkehrsstärken nach oben korrigiert werden.

Tabelle 23: DTV-Werte und Korrekturfaktoren zur Hochrechnung der Fahrleistungen der Fahrzeugkategorie „SNF“

| Straßenklasse | | DTV aus Nachfragemodellen der Stadtregionen ab FRC 4 | Fahrleistungen mit gesetzten DTV-Werten in Mrd. Fztkm/a | Korrekturfaktor für bekannte Verkehrsstärken |
|---------------|-----------------|--|---|--|
| Autobahn | | - | 37,6 | 93,0 % |
| Außerorts | Bundesstraße | 31 | 7,2 | 117,1 % |
| | Landesstraße | 55 | 3,0 | 118,9 % |
| | Kreisstraße | 21 | 1,3 | 155,6 % |
| | Sonstige Straße | 1 | 1,9 | 239,4 % |
| Innerorts | Bundesstraße | 59 | 2,1 | 206,2 % |
| | Landesstraße | 55 | 1,1 | 140,1 % |
| | Kreisstraße | 27 | 0,4 | 218,5 % |
| | Sonstige Straße | 3 | 2,2 | 108,2 % |

Die Hochrechnungsfaktoren der weiteren Fahrzeugkategorien sind in Anhang A.1 aufgeführt. Wie in Kapitel 2.2.3.7 beschrieben, wurden hier die Eckwerte der Fahrleistungen je Straßenklasse bereits bei der Berechnung der Netzbelastungen zur Skalierung herangezogen. Da das Autobahn- und Bundesstraßennetz nahezu vollständig erfasst ist, treten hier somit nur sehr geringen Anpassungsfaktoren auf. Da die skalierten Netzbelastungen die zusätzliche Fahrleistung im Netz der FRC 5 bis 7 nicht berücksichtigen, müssen die berechneten Verkehrsstärken hier für alle Fahrzeugkategorien gleichermaßen nach unten korrigiert werden.

2.2.3.10 Aufbereitung der Fahrleistungsanteile

Durch das Verschneiden der unterschiedlichen Datenquellen traten auch Kombinationen aus Straßentyp und zulässiger Höchstgeschwindigkeit auf, die in Realität kaum vorkommen oder gar unzulässig sind. In diesen Fällen sind die Anteile jedoch meist sehr gering und auf eine fehlerhafte Attributierung einzelner Netzelemente zurückzuführen. Um diese Datenfehler zu bereinigen und die Ergebnisse übersichtlicher zu gestalten, wurden Straßenkategorien, bei denen der Fahrleistungsanteil bei jeder Fahrzeugkategorie unter 0,05 % lag, aus der Auswertung ausgeschlossen. Die Fahrleistungsanteile auf den verbleibenden Straßenkategorien wurden proportional hochgerechnet. Dieser Aufbereitungsschritt betraf nur einen kleinen Teil der Gesamtfahrleistung, beispielhaft bei der Fahrzeugkategorie „Pkw“ rund 0,4 % der Gesamtfahrleistung.

Auch nach diesem Schritt waren noch Straßenkategorien besetzt, bei denen die zulässige Höchstgeschwindigkeit beim jeweiligen Straßentyp nicht möglich ist. Darunter fallen einerseits Streckenabschnitte mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h im Gebietstyp „Agglomeration“, also in bebauten Gebieten, andererseits Hauptverkehrsstraßen im Gebietstyp „Ländlich“ mit zulässigen Höchstgeschwindigkeiten >100 km/h. Im ersten Fall ist dies auf die Zuordnung der Gebietstypen nach Landnutzungsdaten zurückzuführen (siehe Kapitel 2.2.2). Strecken, die nach Art der Landnutzung zwar in bebautem Gebiet liegen, können dennoch mit Blick auf die zulässige Höchstgeschwindigkeit außerhalb einer geschlossenen Ortschaft liegen,

beispielsweise wenn sie durch eine Lärmschutzwand von der Bebauung getrennt sind. Da auf entsprechenden Strecken das Fahrverhalten eher dem jeweiligen Straßentyp mit dem Gebietstyp „Ländlich“ entsprechen dürfte, wurden die Fahrleistungsanteile zu diesen Straßenkategorien verschoben. Hauptverkehrsstraßen mit Geschwindigkeitsbeschränkungen von >100 km/h resultierten größtenteils aus einer fehlerhaften Attributierung der OSM-Straßenkategorie. Da Strecken mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von >100 km/h immer über einen autobahnähnlichen Ausbauzustand verfügen müssen, wurden diese Anteile zum Straßentyp „Fern-/Bundesstraße“ verschoben. So wurden auf diese Weise in der Fahrzeugkategorie „Pkw“ insgesamt weitere 0,7 % der Fahrleistung neu zugeordnet. Die Fahrleistungsanteile nach Aufbereitung der Ergebnisse sind in Kapitel 2.3.2 in Tabelle 26 dargestellt.

2.2.4 Einteilung der Verkehrszustände

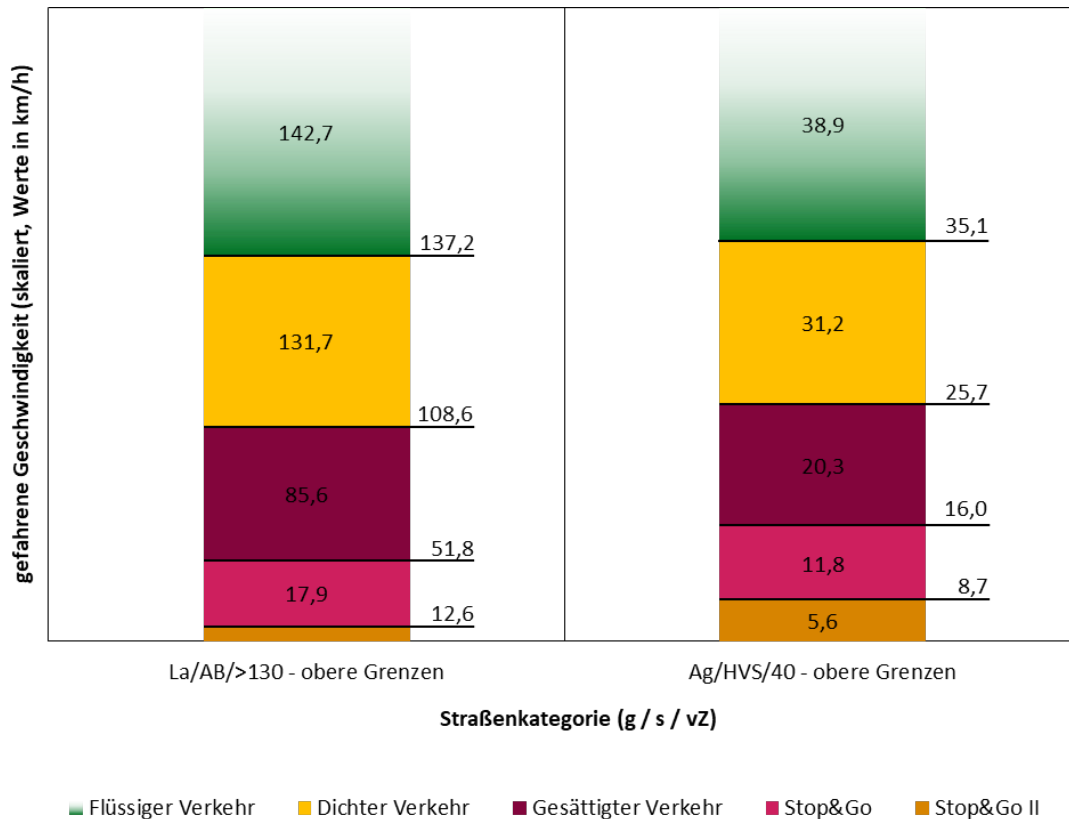
Für die Einteilung in Verkehrszustände wurden die Geschwindigkeitsperzentile der TomTom-FCD verwendet. Somit war die direkte Ermittlung der Fahrleistungsanteile je Verkehrszustand für solche Streckenabschnitte möglich, die der FRC 0 bis 3 zugeordnet waren oder mit einer FRC 4 bis 6 in einer der ausgewählten Stadtregionen lagen. Die FCD-Geschwindigkeitsperzentile lagen differenziert nach Wochentag (Mo-Fr, Sa, So) sowie nach Stunde des Tages vor (Datengrundlagen siehe Kapitel 2.2.1.1). Die im Folgenden beschriebenen Auswertungen wurden für diese 72 Zeitintervalle für jeden Streckenabschnitt des TomTom-Netzes jeweils getrennt durchgeführt. Im Anschluss daran wurden die ermittelten Anteile der Verkehrszustände über die Zeitintervalle je Streckenabschnitt mit den ermittelten stunden- und tagestypfeinen Fahrleistungen multipliziert und aufsummiert. Die Anteile der Verkehrszustände auf einem bestimmten Streckenabschnitt zu einer bestimmten Zeit sind somit offensichtlich für alle Fahrzeugkategorien gleich – die Unterschiede in der Zusammensetzung der Verkehrszustände ergeben sich aus den unterschiedlichen Fahrleistungen auf unterschiedlichen Strecken zu unterschiedlichen Zeiten.

2.2.4.1 Zuordnung der HBEFA-Verkehrszustände anhand mittlerer Geschwindigkeiten

Für die Streckenabschnitte mit FCD wurden zunächst in Abhängigkeit der zugeordneten HBEFA-Straßenkategorie die Geschwindigkeitsgrenzen zwischen den Verkehrszuständen bestimmt. Die zentrale Datengrundlage dafür waren die in HBEFA hinterlegten Eigenschaften der jeweils zugrundeliegenden Fahrzyklen. In Abbildung 13 sind beispielhaft für zwei Straßenkategorien des HBEFA die mittleren Geschwindigkeiten der Verkehrszustände angegeben (Werte in Balken). Aus den mittleren Geschwindigkeiten von jeweils zwei ineinander übergehenden Verkehrszuständen wurde der Mittelwert gebildet (Werte neben den Balken). Diese Werte bilden die Grenzen für die Einordnung der Geschwindigkeitsperzentile der TomTom-FCD. Liegt der Wert des 30 %-Geschwindigkeitsperzentils bei einer Hauptverkehrsstraße im Gebietstyp „Agglomeration“ mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 40 km/h ($k = Ag/HVS/40$) beispielsweise bei 10 km/h und das 35 %-Perzentil bei einer Geschwindigkeit von 15 km/h, fallen die dazwischenliegenden 5 % der Fahrleistung in den Verkehrszustand „Stop&Go“, wie Abbildung 13 entnommen werden kann. Liegt im Bereich zwischen zwei Perzentilen ein Übergang zwischen zwei Verkehrszuständen, wurde der Fahrleistungsanteil proportional aufgeteilt.

Abbildung 13: Geschwindigkeitsgrenzen zwischen Verkehrszuständen

Beispielhafte Darstellung für zwei Verkehrssituationen.



Die Werte in den Balken stellen die mittleren Geschwindigkeiten der Verkehrszustände nach HBEFA 4.1 (INFRAS AG 2019) dar. Die Werte zwischen den Verkehrszuständen zeigen die berechneten Grenzen für eine Unterteilung. Die Balken wurden aus Gründen der Darstellbarkeit auf unterschiedliche Maximalwerte skaliert: La/AB/>130 auf 200 km/h und Ag/HVS/40 auf 50 km/h

Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart

2.2.4.2 Aufteilung der langsamsten und schnellsten 5 % der Fahrzeuge

Bei dieser Art der Zuordnung ist die Zuweisung der obersten und untersten 5 % der Geschwindigkeitsverteilung aus den FCD problematisch. Das unterste gegebene Perzentil (5 %) liegt in vielen Fällen bereits in einem relativ hohen Geschwindigkeitsbereich. Bei einer proportionalen Aufteilung, würde hier automatisch ein verhältnismäßig hoher Anteil den Verkehrszuständen „Stop&Go“ und „Stop&Go II“ zugerechnet. Würde in dem in Abbildung 13 dargestellten Beispiel der Straßenkategorie Ag/HVS/40 das 5 %-Perzentil 20 km/h betragen, würden bei einer proportionalen Aufteilung der 5 % der langsamsten Fahrzeuge 20 % dem gesättigten Verkehr, 37 % Stop&Go und 44 % Stop&Go II zugeordnet. Ebenso verhält es sich bei den schnellsten 5 % der Fahrzeuge. Auch hier erscheint die Annahme einer gleichmäßigen Verteilung der Geschwindigkeit unwahrscheinlich, wobei erschwerend hinzukommt, dass der Maximalwert unbekannt ist, was durch die transparente Darstellung der Balken in Abbildung 13 veranschaulicht werden soll.

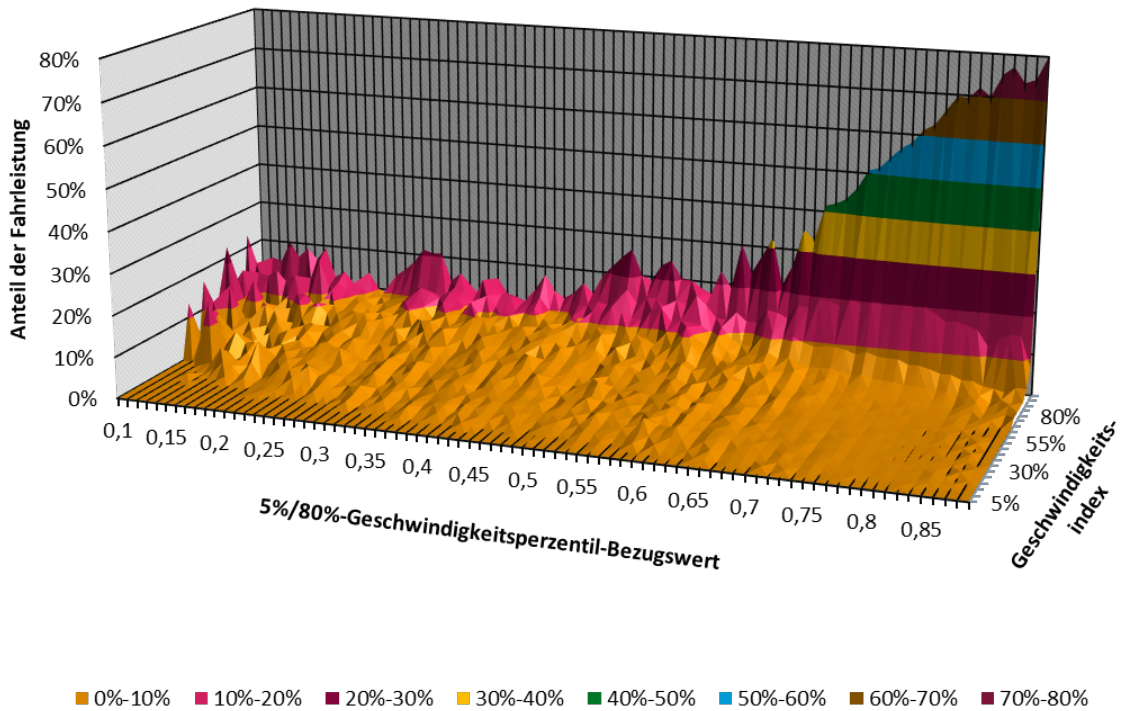
Aus diesem Grund wurden die unteren und oberen Bereiche der Geschwindigkeitsverteilungen auf Basis der Zählstellendaten von Nordrhein-Westfalen und Düsseldorf (siehe Kapitel 2.2.1.3) genauer untersucht. Da diese Daten sehr hoch aufgelöst vorlagen (Einzelfahrzeuge bzw.

Minuten-Intervalle), konnten damit in den Bereichen der langsamsten und schnellsten 5 % der Fahrzeuge Geschwindigkeitsperzentile in 0,1 %-Schritten gebildet werden.

Um eine Vergleichbarkeit zwischen den Zuständen an unterschiedlichen Tageszeiten und unterschiedlichen Zählstellen herzustellen, wurden relative Geschwindigkeitsdaten jeweils bezüglich des 5 %-Perzentils bzw. des 95 %-Perzentils berechnet (Geschwindigkeitsindex). Zusätzlich wurde ein Bezugswert gebildet, der eine Einordnung des gesamten Verkehrsgeschehens zulässt. Dazu wurde die Geschwindigkeit des 5 %-Perzentils bzw. des 95 %-Perzentils in Bezug auf das 80 %-Perzentil gesetzt. Ist beispielhaft der 5 %/80 %-Bezugswert sehr hoch, bedeutet dies, dass das 5 %-schnellste Fahrzeug nahezu so schnell wie das 80 %-schnellste Fahrzeug war, also in aller Regel bereits ein guter Verkehrszustand vorlag. Befindet sich das 5 %-Perzentil dagegen auf vergleichbar geringem Niveau, ist dagegen für alle Fahrzeuge unterhalb dieser Geschwindigkeit von einem schlechten Verkehrszustand auszugehen, weshalb starke Unterschiede in den Geschwindigkeitsverteilungen anzunehmen sind. Abbildung 14 stellt die beschriebenen Zusammenhänge für die unteren 5 % der gefahrenen Geschwindigkeiten an den NRW-Zählstellen dar. Es ist zu erkennen, dass bei hohen Werten des 5 %-Perzentils (entspricht einem hohen 5 %/80 %-Geschwindigkeitsperzentil-Bezugswert) ein sehr großer Teil der Fahrleistung einen hohen Geschwindigkeitsindex aufweist, also ein großer Teil der Fahrzeuge eine Geschwindigkeit nahe dem Wert des 5 %-Perzentils fahren. Ist der Wert des 5 %-Perzentils relativ zum 80 %-Perzentil geringer, liegt eine deutlich gleichmäßigere Verteilung mit annähernd linearem Anstieg vor. Für hohe 5 %/80 %-Bezugswerte zeichnet sich bei den Innerortszählstellen ein ähnliches Bild ab (Abbildung 15). Ist die Geschwindigkeit des 5 %-Perzentils jedoch deutlich langsamer als die des 80 %-Perzentils, also die gesamten unteren 5 % der Fahrleistung in einem schlechten Verkehrszustand, weisen erhebliche Anteile der Fahrzeuge sehr geringe Geschwindigkeiten auf. Ein Lesebeispiel für die Abbildungen wird am Ende des Kapitels anhand eines 5 %/80 %-Bezugswertes von 0,3 gegeben (siehe Abbildung 16).

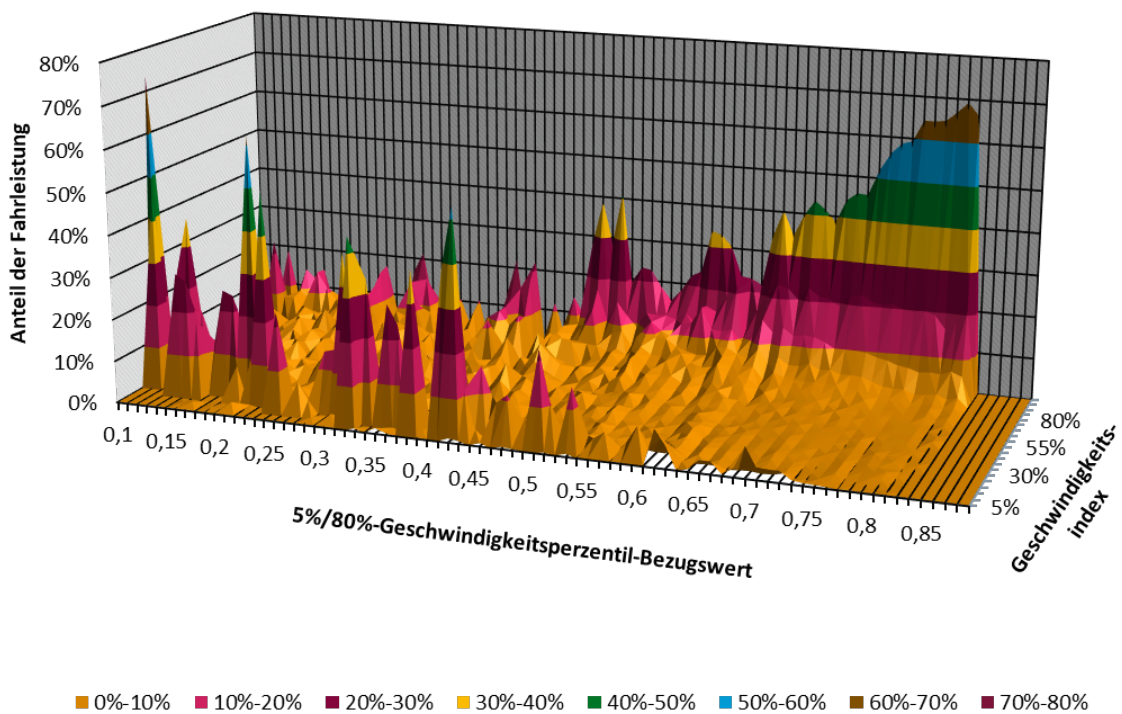
Abbildung 14: Aufteilungen der Geschwindigkeiten unter den langsamsten 5 %

Berechnung aus Zählstellendaten



Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart

Abbildung 15: Aufteilungen der Geschwindigkeiten unter den langsamsten 5 % der Pkw aus Zählstellen der Stadt Düsseldorf



Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart, auf Grundlage von Zählstellendaten aus Düsseldorf

Anhand dieser Ergebnisse wurden Funktionsparameter geschätzt, auf deren Grundlage die Anteile der Verkehrsstärken an den Geschwindigkeiten in den unteren und oberen 5 % der FCD angenommen wurden. Dabei wurden die Geschwindigkeitsindizes in diskrete Wertebereiche von je 5 % eingeteilt, wobei die Funktionsparameter jeweils für den mittleren Wert der Bereiche geschätzt wurden. Die final angewandte Funktion kann der folgenden Gleichung, die geschätzten Parameter Tabelle 24 entnommen werden.

$$V_i^{rel} = \frac{\exp(i^\alpha \cdot (\beta \cdot B^\gamma + \varepsilon) \cdot \eta) + \theta \cdot (i - \kappa)^2}{\sum_{j \in I} \exp(j^\alpha \cdot (\beta \cdot B^\gamma + \varepsilon) \cdot \eta) + \theta \cdot (j - \kappa)^2}$$

mit

- V_i^{rel} Anteil der einem Geschwindigkeitsindex i zugeordneten Fahrleistung
- $i \in I$ Geschwindigkeitsindex bezogen auf 5 %- bzw. 95 %-Perzentil
mit $I = \{2,5 \%; 7,5 \%; \dots ; 97,5 \%\}$
- B Bezugswert zu 80 %-Perzentil
- $\alpha, \beta, \gamma, \varepsilon, \eta, \theta, \kappa$ Funktionsparameter (geschätzte Werte in Tabelle 24)

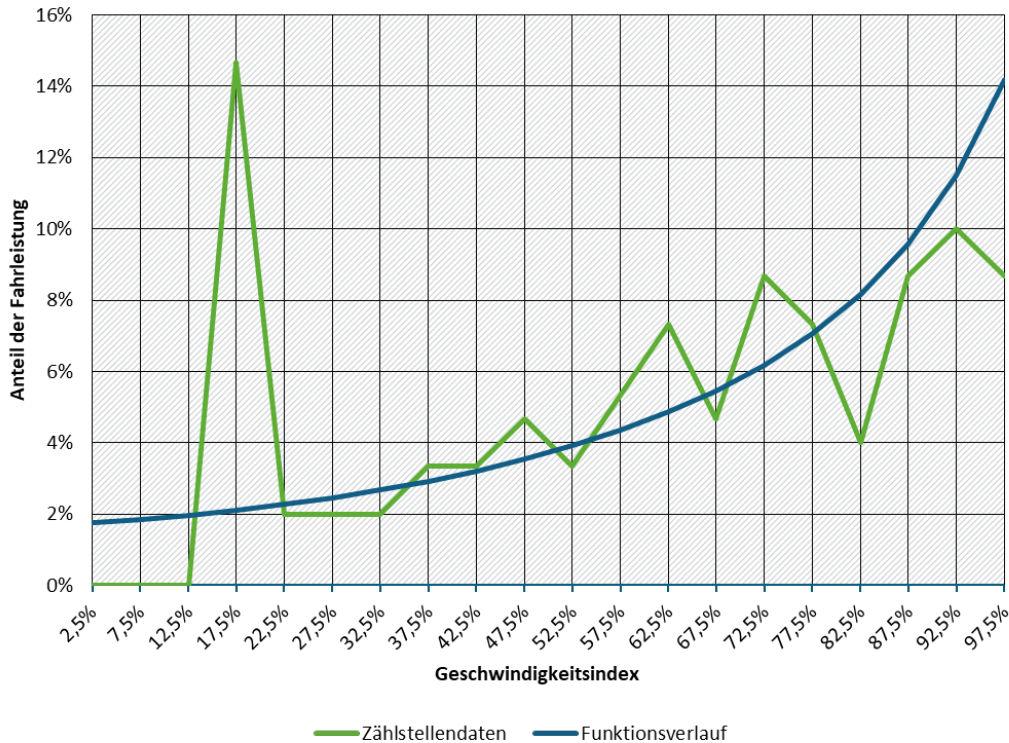
Tabelle 24: Parameter der Funktionen zur Aufteilung der Geschwindigkeiten der langsamsten bzw. schnellsten Fahrzeuge

| Straßentyp, Geschwindigkeitsbereich | α | β | γ | ε | η | θ | κ |
|-------------------------------------|----------|---------|----------|---------------|--------|----------|----------|
| BAB/Fernstraßen, untere 5 % | 2,730 | 11,68 | 3,080 | 3,212 | 1,156 | 229,36 | -0,100 |
| Sonstige Straßen, untere 5 % | 3,439 | 4,779 | 3,898 | 0,565 | 3,116 | 2,429 | -0,190 |
| BAB/Fernstraßen, obere 5 % | -0,145 | 56,74 | -32,47 | 5,852 | 16,05 | 0 | 0 |
| Sonstige Straßen, obere 5 % | -0,102 | 10,83 | -20,26 | 1,833 | 49,51 | 0 | 0 |

Die aus den NRW-Zählstellendaten abgeleiteten Geschwindigkeitsverteilungen wurden für die Streckentypen „Autobahn“, „Stadtautobahn“ sowie „Fern- und Bundesstraße“ angesetzt, die Ergebnisse der Zählendaten aus Düsseldorf für alle weiteren Straßentypen. Die Datengrundlagen und die geglätteten Funktionsverläufe sind für alle vier untersuchten Fälle (langsamste und schnellste 5 % der Fahrleistung jeweils für Autobahnen und Bundesstraßen sowie sonstige Straßen) sind in Anhang A.2 dargestellt. Die in Abbildung 15 zu erkennenden hohen Fahrleistungsanteile konnten durch die Funktion zwar in der Form nicht abgebildet werden, da diese jedoch bei niedrigen 5 %/80 %-Bezugswerten auftreten, liegen diese in einem breiteren Bereich, der dem Zustand Stop&Go II zugewiesen wird, was durch den Funktionsverlauf in Summe gut abgebildet wird. Dies soll an einem Beispiel veranschaulicht werden: In Abbildung 16 ist ein Schnitt durch die Werteschar bei einem 5 %/80 %-Bezugswert von 0,3 sowohl für die Zählendaten als auch für die geschätzte Funktion dargestellt. Angenommen es handelt sich um eine Strecke mit der zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h, das 80 %-Perzentil erreicht eine Geschwindigkeit von 45 km/h. Aus dem Bezugswert von 0,3 ergibt sich eine Geschwindigkeit von 13,5 km/h für das 5 %-Perzentil. Liegt die Grenze zwischen den Verkehrszuständen „Stop&Go“ und „Stop&Go II“ für die betrachtete Straßenkategorie etwa bei 9 km/h liegt sie damit bei einem Geschwindigkeitsindex von 66 %. Die Summe der Fahrleistung

unterhalb dieses Wertes fällt also dem Verkehrszustand „Stop&Go II“ zu. Zwar wird in diesem Beispiel der Fahrleistungsanteil in diesem schlechtesten Verkehrszustand leicht unterschätzt, wie anhand von Abbildung 16 erahnt werden kann, dennoch wird ein gewisser Teil des hohen Wertes der Zähldaten für den Geschwindigkeitsindex 17,5 % durch niedrigere Werte in angrenzenden Bereichen ausgeglichen.

Abbildung 16: Schnitt durch Fahrleistungsaufteilung bei 5 %/80 %-Bezugswert 0,3 für langsamste 5 % der Fahrzeuge, sonstige Straßen



Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart, auf Grundlage von Zählstellendaten aus Düsseldorf

Als Ergebnis dieses Arbeitsschrittes lag für alle Strecken, für deren Straßenkategorie Fahrzyklen in HBEFA definiert sind (siehe Kapitel 2.1.3) und für die FCD-Geschwindigkeitsperzentile vorlagen, die Aufteilung der Fahrleistung auf die Verkehrszustände vor.

2.2.4.3 Umgang mit fehlenden Informationen für die Zuweisung der Verkehrszustände

Wie die Ergebnisse der Verteilung der Fahrleistungen auf die Straßenkategorien zeigen (siehe Kapitel 2.3.2), spielt sich ein nicht zu vernachlässigender Teil der Fahrleistung auf Straßenkategorien ab, für die in HBEFA zum Zeitpunkt des Projektes keine Fahrzyklen definiert sind (rund 10 % der Pkw-Fahrleistung). In Abbildung 17 sind diese Straßenkategorien durch eine blassgrüne Schattierung gekennzeichnet. Um die oben beschriebene Methodik auf die betroffenen Streckenabschnitte dennoch anwenden zu können, wurden die Geschwindigkeitsgrenzen zwischen den Verkehrszuständen von möglichst vergleichbaren Straßenkategorien übernommen. Dabei wurde nach Möglichkeit eine Straßenkategorie gewählt, die dieselbe zulässige Höchstgeschwindigkeit aufweist, da die Geschwindigkeitsprofile ansonsten kaum vergleichbar wären. Abbildung 17 zeigt die Zuordnung anhand von Pfeilen. In den allermeisten Fällen konnte eindeutig der nächste niedere oder höhere Straßentyp gewählt werden. Fern- und Bundesstraßen im Gebietstyp „Agglomeration“ mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h wurden bei der Zuordnung der Verkehrszustände wie

städtische Magistralen / Ringstraßen (ebenfalls 50 km/h) behandelt, da diese beiden Streckentypen eine ähnliche Charakteristik aufweisen. Eine Ausnahme bilden Sammelstraßen im ländlichen Gebiet mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h. Dabei handelt es sich um Strecken, die tatsächlich einen schlechteren Ausbauzustand aufweisen, als der nächst-höherwertige Straßentyp, nämlich Hauptverkehrsstraßen. Der geschwindigkeitsbeschränkende Faktor liegt hier nicht bei der zulässigen Höchstgeschwindigkeit (in den allermeisten Fällen dieser Strecken ist keine zulässige Höchstgeschwindigkeit ausgewiesen, es gilt implizit die maximale zulässige Geschwindigkeit außerhalb geschlossener Ortschaften), sondern vielmehr die Eigenschaften der Strecke, die keine Fahrt mit einer Geschwindigkeit von 100 km/h zulassen. Deshalb wurde hier innerhalb desselben Straßentyps die jeweils nächste verfügbare Straßenkategorie mit einer niedrigeren zulässigen Höchstgeschwindigkeit gewählt (Sammelstraße bzw. Sammelstraße, kurvig mit 80 km/h).

Abbildung 17: Zuordnung von Straßenkategorien ohne HBEFA-Geschwindigkeitsdaten oder bei fehlenden FCD-Grundlagen

| Gebietstyp <i>g</i> und Straßentyp <i>s</i> | | Zulässige Höchstgeschwindigkeit v^z | | | | | | | | | | | | |
|---|--------------------------------|---------------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|------|
| | | <30 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 110 | 120 | 130 | >130 |
| Ländlich | Autobahn | | | | | ↓ | | | | | | | | |
| | Fern-, Bundesstraße | | | | ↓ | | | | | | | ↑ | ↑ | ↑ |
| | Hauptverkehrsstraße | | ↓ | ↓ | | | | | | | | | | |
| | Hauptverkehrsstraße, kurvig | | ↓ | ↓ | | | | | | | | | | |
| | Sammelstraße | | ↓ | | | | | | | ↑ | | | | |
| | Sammelstraße, kurvig | | ↓ | | | | | | | ↑ | | | | |
| | Erschließungsstraße | | * | | * | | | | | * | | | | |
| Agglomeration | Autobahn | | | | | ↓ | | | | | | | | ↑ |
| | Stadt-Autobahn | | | | ↓ | | | | | | | ↑ | | |
| | Fern-, Bundesstraße | | ↓ | | ↓ | ↓ | | | | | | | | |
| | Städt. Magistrale / Ringstraße | | ↓ | | | | | | | | | | | |
| | Hauptverkehrsstraße | | | | | | | | | | | | | |
| | Sammelstraße | | | | | | | | | | | | | |
| | Erschließungsstraße | * | * | | * | | | | | | | | | |

Für die grün hinterlegten Felder verfügt das HBEFA über Informationen zu Emissionen und Fahrzyklen. Für die blassgrünen Felder sind im HBEFA keine Emissionsfaktoren hinterlegt, die Straßenkategorien kommen jedoch in den Ergebnissen vor (schraffierte Felder symbolisieren jene Straßenkategorien, die in den Projektergebnissen vorkommen). Für diese wurden für die Zuweisung der Verkehrszustände die Geschwindigkeitsniveaus ähnlicher Straßenkategorien übernommen (Pfeile). Für Erschließungsstraßen lagen keine FCD vor. Für diese wurde die Aufteilung der Verkehrszustände anderer Straßenkategorien übernommen (Sterne).

Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart, Grundlage INFRAS AG (2019)

Für Strecken der FRC 7, also alle als Erschließungsstraßen klassifizierten Netzabschnitte, lagen keine FCD vor. Aus diesem Grund wurden für Erschließungsstraßen in Abhängigkeit der zulässigen Höchstgeschwindigkeit und des Gebietstyps, differenziert nach Steigungsklassen, die Aufteilungen der Verkehrszustände von anderen Straßenkategorien übernommen. Die in den Ergebnissen vorkommenden Straßenkategorien des Typs „Erschließungsstraße“ sind in

Abbildung 17 mit einem Stern markiert. Auf sie entfallen rund 6,1 % der Gesamtfahrleistung des Pkw-Verkehrs. Folgende Zuordnung wurde gewählt:

- ▶ La/ErS/30 → La/HVS-k/30
- ▶ La/ErS/50 → La/HVS-k/50
- ▶ La/ErS/100 → La/SaS/100
- ▶ Ag/ErS/<30 und Ag/ErS/30 → Ag/SaS/30
- ▶ Ag/ErS/50 → Ag/SaS/50

Auch hier wurde also versucht, Straßenkategorien mit ähnlichen Charakteristiken zu wählen. In den meisten Fällen wurden die Verteilungen aus der jeweiligen vergleichbaren Kategorie des Typs „Sammelstraße“ genutzt. Lediglich im ländlichen Gebiet bei herabgesetzten zulässigen Höchstgeschwindigkeiten wurde auf die Werte des Typs „Hauptverkehrsstraße, kurvig“ genutzt, da die Sammelstraßen hier nur sehr geringe Fahrleistungen aufwiesen und somit eine weniger geeignete Datengrundlage darstellen (Fahrleistungsanteile siehe Tabelle 26).

2.3 Ergebnisse der Aktualisierung der Fahrleistungsanteile der HBEFA-Verkehrssituationen

2.3.1 Streckenlängen

In Tabelle 25 sind die ermittelten richtungsbezogenen Streckenlängen im deutschen Straßennetz zusammengefasst. Insgesamt wurde eine richtungsbezogene Netzlänge von 1,6 Mio. km ermittelt. Davon sind rund 27.000 km Autobahnen. Rund die Hälfte der Netzlänge wird durch Erschließungsstraßen ausgemacht, wobei ein großer Teil keine explizite Geschwindigkeitsbeschränkung aufweist und somit entweder mit 50 km/h in geschlossenen Ortschaften oder mit 100 km/h außerhalb geschlossener Ortschaften befahren werden darf. Jedoch entfällt auch ein nicht unerheblicher Anteil auf Tempo-30-Strecken. Auch bei anderen Straßentypen treten diese beiden Geschwindigkeitsbeschränkungen am häufigsten auf. Mit Blick auf die Streckenlängen sind ausgenommen 30 km/h und 70 km/h andere Geschwindigkeitsbeschränkungen von vernachlässigbarer Häufigkeit.

Tabelle 25: Streckenlängen differenziert nach HBEFA-Straßenkategorien in 1.000 km

| g | s | v ² | | | | | | | | | | | | | Σ |
|----|-------|----------------|-------|-----|-------|------|------|------|----|-------|-----|-----|-----|------|---------|
| | | <30 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 110 | 120 | 130 | >130 | |
| La | AB | | | | | 0,1 | | 0,4 | | 1,4 | | 2,3 | 2,4 | 16,5 | 23,1 |
| | FStr | | | | 0,1 | 0,1 | 0,3 | 0,4 | | 3,6 | | 1,0 | 0,1 | 0,5 | 6,0 |
| | HVS | | 4,1 | 0,4 | 38,5 | 7,4 | 38,1 | 13,1 | | 210,4 | | | | | 312,1 |
| | HVS-k | | 5,0 | 0,5 | 30,0 | 3,8 | 10,5 | 1,9 | | 82,5 | | | | | 134,3 |
| | SaS | | 1,6 | | 4,8 | 0,7 | 1,6 | 0,3 | | 23,0 | | | | | 32,0 |
| | SaS-k | | 1,2 | | 4,2 | | | | | 16,0 | | | | | 21,5 |
| | ErS | | 19,4 | | 116,9 | | | | | 246,1 | | | | | 382,4 |
| | Σ | | 31,4 | 0,9 | 194,4 | 12,2 | 50,6 | 16,1 | | 583,1 | | 3,3 | 2,5 | 17,0 | 911,5 |
| Ag | AB | | | | | 0,1 | | 0,5 | | 0,7 | | 0,6 | 0,4 | 1,5 | 3,8 |
| | St-AB | | | | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | | 0,7 | | 0,1 | | | 1,8 |
| | FStr | | 0,5 | | 13,3 | 0,8 | 2,6 | 0,4 | | 1,9 | | | | | 19,4 |
| | RiStr | | 0,5 | | 9,7 | 0,5 | 1,1 | 0,2 | | | | | | | 12,0 |
| | HVS | | 17,8 | 0,6 | 91,5 | 1,5 | 4,2 | 0,5 | | | | | | | 116,3 |
| | SaS | | 36,8 | | 38,3 | | | | | | | | | | 75,1 |
| | ErS | 4,4 | 198,3 | | 258,4 | | | | | | | | | | 461,1 |
| | Σ | 4,4 | 253,9 | 0,6 | 411,3 | 3,0 | 8,2 | 2,0 | | 3,4 | | 0,7 | 0,4 | 1,5 | 689,4 |
| Σ | | | | | | | | | | | | | | | 1.600,8 |

2.3.2 Fahrleistungen für die Fahrzeugkategorie „Pkw“

Die für die Fahrzeugkategorie „Pkw“ berechneten Fahrleistungen sind in Tabelle 26 in relativen Werten zusammengefasst. Von dem auf Autobahnen stattfindenden Verkehr entfallen rund 2/3 auf Streckenabschnitte, auf denen keine Geschwindigkeitsbeschränkung vorliegt. Auf autobahnähnlichen Straßen (La/FStr oder Ag/St-AB) findet mit 4 % der Fahrleistung verhältnismäßig wenig Verkehr statt, die diesen Straßentypen zugeordnete Netzlänge ist allerdings auch entsprechend kurz. Nach der Autobahn ist die bedeutendste Straßenkategorie La/HVS/100 mit fast 18 % der Fahrleistung. Nimmt man die 4 % Fahrleistung auf kurvigen Hauptverkehrsstraßen in ländlichem Gebiet hinzu, spielt sich auf dieser Straßenkategorie knapp

ein Viertel der Fahrleistung ab. Daneben sind im ländlichen Gebiet auch Hauptverkehrsstraßen mit Geschwindigkeitsbeschränkungen von 50 km/h, 70 km/h bzw. 80 km/h von größerer Bedeutung. Innerorts entfällt der allergrößte Teil der Fahrleistung auf Strecken mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h. Hier dominieren die Hauptverkehrsstraßen, wobei auch der Straßentyp „Fern- und Bundesstraßen“ eine hohe Relevanz hat.

Tabelle 26: Pkw-Fahrleistung differenziert nach HBEFA-Straßenkategorien in %

| g | s | v ^z | | | | | | | | | | | | Σ | |
|----|-------|----------------|------|------|-------|------|------|------|----|-------|-----|------|------|--------|-------|
| | | <30 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 110 | 120 | 130 | | >130 |
| La | AB | | | | | 0,07 | | 0,38 | | 1,74 | | 3,15 | 2,79 | 18,57 | 26,71 |
| | FStr | | | | 0,03 | 0,08 | 0,16 | 0,27 | | 1,56 | | 0,72 | 0,06 | 0,30 | 3,17 |
| | HVS | | 0,11 | 0,03 | 2,61 | 0,71 | 5,30 | 1,60 | | 17,65 | | | | | 28,01 |
| | HVS-k | | 0,12 | 0,05 | 1,68 | 0,44 | 1,55 | 0,25 | | 4,17 | | | | | 8,26 |
| | SaS | | 0,05 | | 0,19 | 0,04 | 0,08 | 0,03 | | 0,54 | | | | | 0,94 |
| | SaS-k | | 0,04 | | 0,07 | | | | | 0,34 | | | | | 0,45 |
| | ErS | | 0,25 | | 0,78 | | | | | 1,67 | | | | | 2,70 |
| | Σ | | 0,58 | 0,08 | 5,37 | 1,33 | 7,09 | 2,54 | | 27,67 | | 3,87 | 2,84 | 18,87 | 70,24 |
| Ag | AB | | | | | 0,04 | | 0,61 | | 0,95 | | 0,86 | 0,52 | 2,20 | 5,18 |
| | St-AB | | | | 0,06 | 0,12 | 0,15 | 0,29 | | 0,42 | | 0,10 | | | 1,14 |
| | FStr | | 0,13 | | 3,54 | 0,31 | 0,75 | 0,12 | | 0,46 | | | | | 5,30 |
| | RiStr | | 0,10 | | 2,34 | 0,20 | 0,30 | 0,11 | | | | | | | 3,05 |
| | HVS | | 0,71 | 0,06 | 8,03 | 0,26 | 0,54 | 0,11 | | | | | | | 9,71 |
| | SaS | | 0,86 | | 1,13 | | | | | | | | | | 1,99 |
| | ErS | 0,06 | 1,83 | | 1,50 | | | | | | | | | | 3,38 |
| | Σ | 0,06 | 3,62 | 0,06 | 16,60 | 0,93 | 1,73 | 1,24 | | 1,83 | | 0,95 | 0,52 | 2,20 | 29,76 |
| Σ | | | | | | | | | | | | | | 100,00 | |

Für die hellgrün schraffierten Felder sind im HBEFA keine Emissionsfaktoren hinterlegt.

Für die Fortschreibung des HBEFA sind Straßenkategorien, für die derzeit keine Emissionsfaktoren vorliegen, von besonderer Bedeutung (hellgrün schraffierte Felder in Tabelle 26). Diese lassen sich in mehrere Blöcke einteilen. Zunächst können hochrangige Straßen mit geringen zulässigen Höchstgeschwindigkeiten zusammengefasst werden. In den meisten Fällen kommen die einzelnen Straßenkategorien selten vor, dass sie aber in Realität vorkommen können, kann als gesichert angesehen werden (z.B. La/AB/60 in Baustellenbereichen, La/HVS/30 in kurvigen oder unübersichtlichen Situationen oder Ag/FStr/30 aus Gründen des Lärmschutzes). Von großer Bedeutung ist die Straßenkategorie Ag/FStr/50 mit einem Fahrleistungsanteil von 3,54 %. Hier ist von Bedeutung, dass die Abgrenzung zwischen den Straßentypen „Fern-, Bundesstraße“ und „Städt. Magistrale / Ringstr.“ nicht eindeutig definiert ist. Eine veränderte Zuordnung zum Straßentyp „Fern-, Bundesstraße“, würde jedoch zwangsläufig die Frage der Abgrenzung mit Blick auf den übergeordneten Straßentyp „Stadt-Autobahn“ aufwerfen (siehe Kapitel 2.2.2.2 zur Zuweisung der Straßentypen). Als Sonderfall sind Strecken mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit <30 km/h zu werten, die nur bei Erschließungsstraßen in einer zu berücksichtigenden Häufigkeit vorkommen. Die Fahrleistung ist hier jedoch insgesamt sehr gering. Einen weiteren Block markieren Sammelstraßen und Erschließungsstraßen mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h in nicht bebautem Gebiet. Dass solche Strecken per Definition existieren ist unzweifelhaft. Eine andere Zuordnung der Straßentypen wäre problematisch, da die einzige Möglichkeit eine Zuordnung zum nächst höherwertigem Typ, also den Hauptverkehrsstraßen

wäre. Darin sind jedoch Straßen bis zu einer FRC 1 versammelt, die eine deutlich abweichende Straßencharakteristik aufweisen. Wie bereits bezüglich der Einteilung der Verkehrszustände erwähnt (Kapitel 2.2.4.3), ist auf diesen Strecken die zulässige Höchstgeschwindigkeit voraussichtlich nicht das Kriterium, das die Fahrgeschwindigkeit begrenzt, sondern vielmehr die Straßeneigenschaften. Somit dürften die Fahrzyklen und Emissionswerte für diese Straßenkategorien denen vergleichbarer Streckentypen mit niedrigeren zulässigen Geschwindigkeiten zwar ähneln, eine grundsätzliche Einordnung in eine andere Geschwindigkeitsklasse wäre jedoch nach der HBEFA-Definition der Straßenkategorien fehlerhaft, da sich diese an der vorgeschrieben zulässigen Höchstgeschwindigkeit orientiert. Als weitere Klasse können Fern- und Bundesstraßen in ländlich geprägten Gebieten und Stadt-Autobahnen zusammengefasst werden, bei denen die zulässige Höchstgeschwindigkeit über 100 km/h liegt. Nach der vorgegebenen Definition, dass solche Strecken über einen autobahnähnlichen Ausbauzustand verfügen, können hier entsprechend hohe Geschwindigkeiten auftreten. Abschließend soll der Sonderfall von Autobahnen im Gebietstyp „Agglomeration“, auf denen keine Geschwindigkeitsbeschränkungen gelten, hervorgehoben werden. Auf diese Straßenkategorie entfallen nach der gewählten Definition nicht unerhebliche 2,2 % der Fahrleistung. Wie bereits in Kapitel 2.2.2 beschrieben, ist das gewählte Zuordnungskriterium des Gebietstyps insbesondere bei Autobahnen mit Unzulänglichkeiten behaftet.

2.3.3 Verkehrszustände für die Fahrzeugkategorie „Pkw“

In Tabelle 27, Tabelle 28 und Tabelle 29 sind die Aufteilungen der Fahrleistung auf die Verkehrszustände für die Fahrzeugkategorie „Pkw“ graphisch dargestellt. Darin wird auch jeweils die absolute Zahl der jährlichen Fahrzeugkilometer aufgeführt, um die Bedeutung der jeweiligen Straßenkategorie zu veranschaulichen. Die Diagramme sind so aufgebaut, dass links der schlechteste Verkehrszustand (Stop&Go II) und rechts der beste Verkehrszustand (Flüssiger Verkehr) aufgetragen sind.

Tabelle 27: Pkw-Fahrleistung je Verkehrssituation in Mrd. Fzgkm/a ($v^z = <30, 30, 40, 50$)

| g | s | v^z | | | |
|----|-------|-------|------|-----|------|
| | | <30 | 30 | 40 | 50 |
| La | AB | | | | |
| | FStr | | | | 0,2 |
| | HVS | | 0,7 | | 16,8 |
| | HVS-k | | 0,8 | 0,2 | 10,8 |
| | SaS | | 0,3 | 0,3 | 1,3 |
| | SaS-k | | 0,2 | | 0,5 |
| | ErS | | 1,6 | | 5,0 |
| Ag | AB | | | | |
| | St-AB | | | | 0,4 |
| | FStr | | 0,8 | | 22,7 |
| | RiStr | | 0,6 | | 15,1 |
| | HVS | | 4,5 | 0,4 | 51,6 |
| | SaS | | 5,5 | | 7,3 |
| | ErS | 0,4 | 11,7 | | 9,6 |

Tabelle 28: Pkw-Fahrleistung je Verkehrssituation in Mrd. Fzgkm/a ($v^z = 60, 70, 80, 90$)

| g | s | v^z | | | |
|----|-------|-------|------|------|----|
| | | 60 | 70 | 80 | 90 |
| La | AB | 0,4 | | 2,5 | |
| | FStr | 0,5 | 1,0 | 1,7 | |
| | HVS | 4,5 | 34,0 | 10,3 | |
| | HVS-k | 2,8 | 10,0 | 1,6 | |
| | SaS | 0,3 | 0,5 | 0,2 | |
| | SaS-k | | | | |
| | ErS | | | | |
| Ag | AB | 0,3 | | 3,9 | |
| | St-AB | 0,8 | 0,9 | 1,9 | |
| | FStr | 2,0 | 4,8 | 0,7 | |
| | RiStr | 1,3 | 1,9 | 0,7 | |
| | HVS | 1,7 | 3,5 | 0,7 | |
| | SaS | | | | |
| | ErS | | | | |

Die Diagramme stellen für jede Straßenkategorie die Fahrleistungsanteile der Verkehrszustände dar, wobei die Verkehrsqualität nach rechts zunimmt: Stop&Go II (links), Stop&Go, Gesättigter Verkehr, Dichter Verkehr, Flüssiger Verkehr (rechts).

Tabelle 29: Pkw-Fahrleistung je Verkehrssituation in Mrd. Fzgkm/a ($h = 100, 120, 130, >130$)

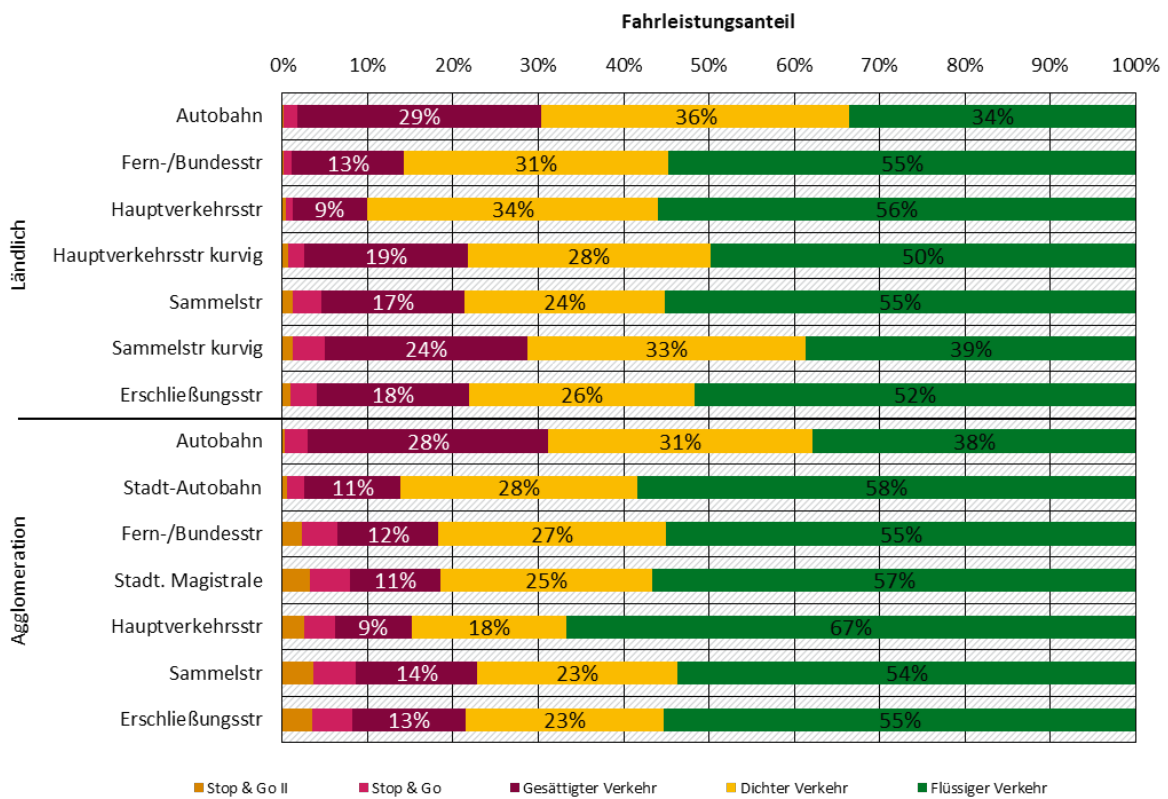
| g | s | v^z | | | |
|-------|-------|-------|------|------|-------|
| | | 100 | 120 | 130 | >130 |
| La | AB | 11,2 | 20,2 | 17,9 | 119,3 |
| | FStr | 10,0 | 4,6 | 0,4 | 1,9 |
| | HVS | 113,4 | | | |
| | HVS-k | 26,8 | | | |
| | SaS | 3,5 | | | |
| | SaS-k | 2,2 | | | |
| | ErS | 10,7 | | | |
| | Ag | AB | 6,1 | 5,5 | 3,3 |
| St-AB | | 2,7 | 0,6 | | |
| FStr | | 3,0 | | | |
| RiStr | | | | | |
| HVS | | | | | |
| SaS | | | | | |
| ErS | | | | | |

Die Diagramme stellen für jede Straßenkategorie die Fahrleistungsanteile der Verkehrszustände dar, wobei die Verkehrsqualität nach rechts zunimmt: Stop&Go II (links), Stop&Go, Gesättigter Verkehr, Dichter Verkehr, Flüssiger Verkehr (rechts).

An den Verteilungen der Verkehrszustände ist zu erkennen, dass bei niedrigen zulässigen Höchstgeschwindigkeiten bei allen Straßenkategorien die größten Fahrleistungsanteile im flüssigen Verkehr stattfinden. Bei niederrangigen Straßentypen (Sammel- und Erschließungsstraßen) wird ein Anteil von etwa 21 % dem dichten Verkehr zugeordnet. Mit zunehmender zulässiger Höchstgeschwindigkeit steigen auch die Fahranteile im dichten und gesättigten Verkehr. Insbesondere auf Autobahnen mit einer Geschwindigkeitsbeschränkung von 130 km/h oder ohne Tempolimit ist die Verteilung zwischen den Verkehrszuständen gesättigt, dicht und flüssig nahezu gleichmäßig verteilt, auf Strecken mit dem Gebietstyp „Agglomeration“ überwiegt sogar der Verkehrszustand gesättigt.

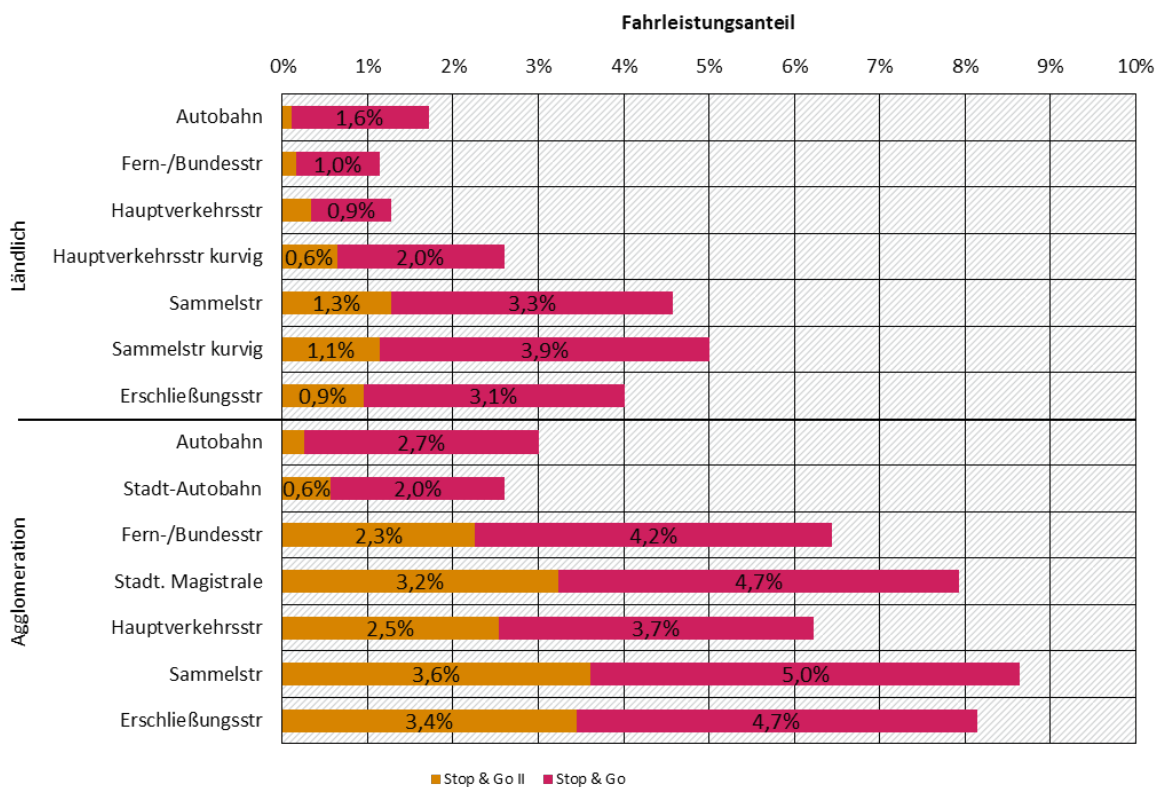
Abbildung 18 stellt die Aufteilung der Fahrleistungen nach Verkehrszuständen innerhalb eines jeden Straßentyps dar. Der Fahrleistungsanteil im flüssigen Verkehr liegt meist zwischen 50 % und 60 %, die Werte für Autobahnen liegen darunter, während der Verkehr auf Hauptverkehrsstraßen in bebauten Gebieten mit einem Anteil von 67 % am besten fließt. Wie bereits in der tabellarischen Darstellung zu den einzelnen Straßenkategorien (Tabelle 27, Tabelle 28, Tabelle 29) zu erkennen war, ist der dichte und gesättigte Verkehr auf Autobahnen von besonderer Bedeutung. Auch hier fallen Hauptverkehrsstraßen durch geringe Anteile auf. Da die beiden Stop&Go-Zustände jeweils nur einen kleinen Teil der Gesamtfahrleistung ausmachen, sind die Anteile noch einmal gesondert in Abbildung 19 aufgetragen. In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass die sich die hier dargestellten Fahrleistungsanteile deutlich von den Anteilen der Fahrzeit, die im jeweiligen Verkehrszustand verbracht werden, unterscheiden. Da im Stop&Go-Verkehr die Geschwindigkeit deutlich geringer ist, ist der Zeitanteil ungleich höher – ein Grund weshalb die dargestellten Anteile an dieser Stelle der Intuition widersprechen können.

Abbildung 18: Anteile der Verkehrszustände je HBEFA-Straßentyp



Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart

Abbildung 19: Anteile der beiden Stop&Go Verkehrszustände je HBEFA-Straßentyp



Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart

Anteilig wird auf Autobahnen am seltensten im Stop&Go-Verkehr gefahren. Jedoch werden auf Grundlage der verwendeten FCD nicht nur tatsächliche staubedingte sehr lange Stop&Go-Verkehre diesem Zustand zugeordnet, sondern auch Haltevorgänge, die durch Hindernisse auf der Strecke oder durch Knotenpunkte verursacht werden. So ist einerseits durch die Prioritäten an Knotenpunkten zu erklären, dass die Anteile in den Stop&Go-Verkehrszuständen ansteigen, je geringer der Rang eines Straßentyps ist. Zusätzlich gibt es auf Sammel- und Erschließungsstraßen in bebauten Gebieten vermutlich mit großem Abstand den größten Anteil von Parksuchverkehren sowie eigentliche Parkvorgänge. Hinsichtlich der Emissionen hat es seine Berechtigung, diese Verkehre den Stop&Go-Zuständen zuzuordnen. Die hohen Anteile auf Fern- und Bundesstraßen und städtischen Magistralen in bebauten Gebieten dürften dagegen tagsächlich auf auslastungsbedingte Effekte zurückzuführen sein. Im Gegensatz zu Stadt-Autobahnen sind die Knotenpunkte hier häufig lichtsignalanlagengesteuert und nicht planfrei angelegt, wodurch an diesen Stellen Kapazitätsengpässe auftreten.

Die Fahrleistungsanteile in der Differenzierung Straßenkategorie, Verkehrszustände und Steigungsklassen sind in Anhang A.3 aufgeführt.

2.3.4 Ergebnisse für weitere Fahrzeugkategorien

Die Ergebnisse der Fahrleistungsaufteilung der weiteren Fahrzeugkategorien unterscheidet sich von der Aufteilung bei Pkw insbesondere mit Blick auf die Anteile der unterschiedlichen Straßenkategorien. So ist beispielsweise der Autobahnanteil bei SNF deutlich höher als bei Pkw. Hinsichtlich der Verkehrszustände zeigen die Aufteilungen innerhalb der einzelnen Straßenkategorien aufgrund der abweichenden räumlichen und zeitlichen Nutzung des Streckennetzes (zur Methodik siehe Kapitel 2.2.4) im Detail zwar auch Unterschiede, die in Kapitel 2.3.3 für den Pkw-Verkehr dargestellten Tendenzen bleiben jedoch erhalten.

Aus diesem Grund werden im Folgenden an dieser Stelle ausschließlich die Fahrleistungsanteile differenziert nach Straßenkategorie dargestellt. In Tabelle 30 bis Tabelle 34 sind diese für die Fahrzeugkategorien SNF, LNF, KR/MR, LBus und RBus aufgeführt. Eine detaillierte Auflistung der Fahrleistungsanteile mit zusätzlicher Unterteilung nach Steigungsklassen und Verkehrszuständen ist im Anhang A.3 zu finden.

Tabelle 30: SNF-Fahrleistung differenziert nach HBEFA-Straßenkategorien in %

| g | s | v ^z | | | | | | | | | | | | | Σ |
|----|-------|----------------|------|------|------|------|------|------|----|-------|-----|------|------|--------|-------|
| | | <30 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 110 | 120 | 130 | >130 | |
| La | AB | | | | | 0,09 | | 0,52 | | 2,67 | | 5,67 | 5,66 | 35,00 | 49,62 |
| | FStr | | | | 0,02 | 0,07 | 0,18 | 0,32 | | 1,84 | | 0,75 | 0,06 | 0,39 | 3,62 |
| | HVS | | 0,06 | 0,02 | 1,17 | 0,38 | 3,40 | 1,07 | | 11,80 | | | | | 17,89 |
| | HVS-k | | 0,05 | 0,03 | 0,82 | 0,27 | 1,14 | 0,19 | | 2,12 | | | | | 4,61 |
| | SaS | | 0,05 | | 0,21 | 0,04 | 0,09 | 0,02 | | 0,96 | | | | | 1,37 |
| | SaS-k | | 0,03 | | 0,09 | | | | | 0,60 | | | | | 0,72 |
| | ErS | | 0,05 | | 0,15 | | | | | 0,31 | | | | | 0,50 |
| | Σ | | 0,24 | 0,05 | 2,46 | 0,85 | 4,80 | 2,11 | | 20,30 | | 6,42 | 5,72 | 35,39 | 78,34 |
| Ag | AB | | | | | 0,05 | | 0,60 | | 1,20 | | 1,32 | 0,89 | 3,66 | 7,72 |
| | St-AB | | | | 0,05 | 0,18 | 0,23 | 0,48 | | 0,73 | | 0,19 | | | 1,86 |
| | FStr | | 0,09 | | 2,82 | 0,32 | 0,95 | 0,22 | | 0,82 | | | | | 5,22 |
| | RiStr | | 0,03 | | 0,84 | 0,11 | 0,20 | 0,09 | | | | | | | 1,27 |
| | HVS | | 0,27 | 0,03 | 3,06 | 0,13 | 0,29 | 0,09 | | | | | | | 3,86 |
| | SaS | | 0,44 | | 0,62 | | | | | | | | | | 1,06 |
| | ErS | 0,01 | 0,36 | | 0,29 | | | | | | | | | | 0,66 |
| | Σ | 0,01 | 1,18 | 0,03 | 7,68 | 0,79 | 1,68 | 1,48 | | 2,75 | | 1,51 | 0,89 | 3,66 | 21,66 |
| Σ | | | | | | | | | | | | | | 100,00 | |

Für die hellgrün schraffierten Felder sind im HBEFA keine Emissionsfaktoren hinterlegt.

Tabelle 31: LNF-Fahrleistung differenziert nach HBEFA-Straßenkategorien in %

| g | s | v ^z | | | | | | | | | | | | | Σ |
|----|-------|----------------|------|------|-------|------|------|------|----|-------|-----|------|------|--------|-------|
| | | <30 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 110 | 120 | 130 | >130 | |
| La | AB | | | | | 0,09 | | 0,49 | | 2,04 | | 2,93 | 2,37 | 13,38 | 21,30 |
| | FStr | | | | 0,05 | 0,09 | 0,18 | 0,23 | | 0,99 | | 0,31 | 0,03 | 0,10 | 1,97 |
| | HVS | | 0,17 | 0,04 | 4,21 | 0,89 | 5,74 | 1,33 | | 11,19 | | | | | 23,57 |
| | HVS-k | | 0,20 | 0,06 | 2,83 | 0,58 | 1,98 | 0,29 | | 3,96 | | | | | 9,91 |
| | SaS | | 0,07 | | 0,28 | 0,05 | 0,12 | 0,03 | | 1,24 | | | | | 1,79 |
| | SaS-k | | 0,04 | | 0,12 | | | | | 0,79 | | | | | 0,94 |
| | ErS | | 0,06 | | 0,18 | | | | | 0,42 | | | | | 0,66 |
| | Σ | | 0,53 | 0,10 | 7,68 | 1,70 | 8,02 | 2,36 | | 20,63 | | 3,24 | 2,40 | 13,49 | 60,15 |
| Ag | AB | | | | | 0,10 | | 1,10 | | 1,53 | | 1,22 | 0,78 | 2,89 | 7,62 |
| | St-AB | | | | 0,14 | 0,20 | 0,21 | 0,30 | | 0,44 | | 0,08 | | | 1,37 |
| | FStr | | 0,31 | | 6,99 | 0,49 | 1,05 | 0,14 | | 0,54 | | | | | 9,51 |
| | RiStr | | 0,18 | | 3,41 | 0,24 | 0,29 | 0,11 | | | | | | | 4,24 |
| | HVS | | 1,04 | 0,10 | 10,42 | 0,32 | 0,54 | 0,12 | | | | | | | 12,54 |
| | SaS | | 1,19 | | 1,62 | | | | | | | | | | 2,80 |
| | ErS | 0,03 | 0,96 | | 0,78 | | | | | | | | | | 1,77 |
| | Σ | 0,03 | 3,67 | 0,10 | 23,36 | 1,35 | 2,09 | 1,77 | | 2,51 | | 1,30 | 0,78 | 2,89 | 39,85 |
| Σ | | | | | | | | | | | | | | 100,00 | |

Für die hellgrün schraffierten Felder sind im HBEFA keine Emissionsfaktoren hinterlegt.

Tabelle 32: KR/MR-Fahrleistung differenziert nach HBEFA-Straßenkategorien in %

| g | s | v ² | | | | | | | | | | | | | Σ |
|----|-------|----------------|------|------|-------|------|------|------|----|-------|-----|------|------|--------|-------|
| | | <30 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 110 | 120 | 130 | >130 | |
| La | AB | | | | | 0,05 | | 0,20 | | 0,74 | | 1,01 | 0,81 | 4,51 | 7,33 |
| | FStr | | | | 0,04 | 0,08 | 0,17 | 0,21 | | 1,05 | | 0,29 | 0,03 | 0,10 | 1,98 |
| | HVS | | 0,19 | 0,04 | 5,08 | 1,01 | 6,60 | 1,51 | | 13,92 | | | | | 28,36 |
| | HVS-k | | 0,23 | 0,07 | 3,42 | 0,62 | 2,17 | 0,31 | | 4,97 | | | | | 11,79 |
| | SaS | | 0,06 | | 0,28 | 0,05 | 0,12 | 0,03 | | 1,15 | | | | | 1,70 |
| | SaS-k | | 0,04 | | 0,11 | | | | | 0,76 | | | | | 0,91 |
| | ErS | | 0,06 | | 0,17 | | | | | 0,41 | | | | | 0,63 |
| | Σ | | 0,58 | 0,11 | 9,11 | 1,81 | 9,06 | 2,27 | | 23,01 | | 1,30 | 0,84 | 4,62 | 52,70 |
| Ag | AB | | | | | 0,06 | | 0,46 | | 0,67 | | 0,50 | 0,32 | 1,05 | 3,06 |
| | St-AB | | | | 0,14 | 0,19 | 0,17 | 0,24 | | 0,35 | | 0,06 | | | 1,14 |
| | FStr | | 0,19 | | 4,08 | 0,32 | 0,64 | 0,10 | | 0,34 | | | | | 5,67 |
| | RiStr | | 0,37 | | 7,04 | 0,54 | 0,51 | 0,23 | | | | | | | 8,68 |
| | HVS | | 2,02 | 0,21 | 18,77 | 0,68 | 0,84 | 0,25 | | | | | | | 22,77 |
| | SaS | | 1,56 | | 2,12 | | | | | | | | | | 3,67 |
| | ErS | 0,04 | 1,25 | | 1,02 | | | | | | | | | | 2,31 |
| | Σ | 0,04 | 5,37 | 0,21 | 33,17 | 1,79 | 2,16 | 1,28 | | 1,36 | | 0,56 | 0,32 | 1,05 | 47,30 |
| Σ | | | | | | | | | | | | | | 100,00 | |

Für die hellgrün schraffierten Felder sind im HBEFA keine Emissionsfaktoren hinterlegt.

Tabelle 33: LBus-Fahrleistung differenziert nach HBEFA-Straßenkategorien in %

| g | s | v ² | | | | | | | | | | | | | Σ |
|----|-------|----------------|------|------|-------|------|-------|------|----|-------|-----|------|------|--------|-------|
| | | <30 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 110 | 120 | 130 | >130 | |
| La | AB | | | | | 0,20 | | 0,44 | | 1,05 | | 1,04 | 0,80 | 4,06 | 7,58 |
| | FStr | | | | 0,11 | 0,20 | 0,27 | 0,35 | | 1,18 | | 0,23 | 0,03 | 0,09 | 2,45 |
| | HVS | | 0,35 | 0,08 | 6,09 | 1,46 | 7,28 | 1,72 | | 12,51 | | | | | 29,50 |
| | HVS-k | | 0,37 | 0,14 | 4,64 | 1,18 | 3,91 | 0,54 | | 5,97 | | | | | 16,76 |
| | SaS | | 0,04 | | 0,49 | 0,15 | 0,25 | 0,09 | | 0,45 | | | | | 1,46 |
| | SaS-k | | 0,02 | | 0,06 | | | | | 0,28 | | | | | 0,35 |
| | ErS | | 0,02 | | 0,05 | | | | | 0,12 | | | | | 0,19 |
| | Σ | | 0,79 | 0,22 | 11,45 | 3,18 | 11,72 | 3,14 | | 21,57 | | 1,27 | 0,83 | 4,15 | 58,31 |
| Ag | AB | | | | | 0,06 | | 0,49 | | 0,67 | | 0,49 | 0,30 | 0,99 | 2,99 |
| | St-AB | | | | 0,12 | 0,18 | 0,17 | 0,22 | | 0,34 | | 0,05 | | | 1,08 |
| | FStr | | 0,15 | | 3,37 | 0,27 | 0,56 | 0,09 | | 0,30 | | | | | 4,75 |
| | RiStr | | 0,34 | | 6,55 | 0,52 | 0,56 | 0,24 | | | | | | | 8,22 |
| | HVS | | 2,02 | 0,21 | 19,08 | 0,66 | 0,90 | 0,28 | | | | | | | 23,16 |
| | SaS | | 0,39 | | 0,55 | | | | | | | | | | 0,94 |
| | ErS | 0,01 | 0,30 | | 0,25 | | | | | | | | | | 0,55 |
| | Σ | 0,01 | 3,20 | 0,21 | 29,92 | 1,71 | 2,18 | 1,32 | | 1,31 | | 0,54 | 0,30 | 0,99 | 41,69 |
| Σ | | | | | | | | | | | | | | 100,00 | |

Für die hellgrün schraffierten Felder sind im HBEFA keine Emissionsfaktoren hinterlegt.

Tabelle 34: RBus-Fahrleistung differenziert nach HBEFA-Straßenkategorien in %

| g | s | v ^z | | | | | | | | | | | | | Σ |
|----|-------|----------------|------|------|-------|------|-------|------|----|-------|-----|------|------|--------|-------|
| | | <30 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 110 | 120 | 130 | >130 | |
| La | AB | | | | | 0,13 | | 0,69 | | 2,85 | | 4,14 | 3,36 | 18,96 | 30,13 |
| | FStr | | | | 0,08 | 0,16 | 0,33 | 0,43 | | 1,76 | | 0,63 | 0,06 | 0,21 | 3,66 |
| | HVS | | 0,19 | 0,05 | 4,74 | 1,16 | 7,74 | 1,82 | | 13,08 | | | | | 28,77 |
| | HVS-k | | 0,21 | 0,09 | 3,07 | 0,76 | 2,60 | 0,40 | | 4,09 | | | | | 11,22 |
| | SaS | | 0,02 | | 0,20 | 0,05 | 0,10 | 0,04 | | 0,37 | | | | | 0,78 |
| | SaS-k | | 0,01 | | 0,04 | | | | | 0,23 | | | | | 0,28 |
| | ErS | | 0,02 | | 0,05 | | | | | 0,11 | | | | | 0,18 |
| | Σ | | 0,45 | 0,13 | 8,19 | 2,26 | 10,76 | 3,37 | | 22,49 | | 4,78 | 3,42 | 19,16 | 75,01 |
| Ag | AB | | | | | 0,13 | | 1,48 | | 2,04 | | 1,66 | 1,07 | 4,02 | 10,39 |
| | St-AB | | | | 0,08 | 0,14 | 0,15 | 0,21 | | 0,31 | | 0,05 | | | 0,94 |
| | FStr | | 0,21 | | 4,85 | 0,34 | 0,73 | 0,10 | | 0,38 | | | | | 6,61 |
| | RiStr | | 0,06 | | 1,20 | 0,09 | 0,14 | 0,05 | | | | | | | 1,55 |
| | HVS | | 0,36 | 0,04 | 3,72 | 0,12 | 0,21 | 0,06 | | | | | | | 4,50 |
| | SaS | | 0,26 | | 0,35 | | | | | | | | | | 0,61 |
| | ErS | 0,01 | 0,21 | | 0,17 | | | | | | | | | | 0,38 |
| | Σ | 0,01 | 1,10 | 0,04 | 10,38 | 0,82 | 1,23 | 1,90 | | 2,73 | | 1,72 | 1,07 | 4,02 | 24,99 |
| Σ | | | | | | | | | | | | | | 100,00 | |

Für die hellgrün schraffierten Felder sind im HBEFA keine Emissionsfaktoren hinterlegt.

2.3.5 Zusätzliche Fahrtzeit durch Verkehrszustand: Plausibilisierung der Ergebnisse

Die zusätzliche Fahrtzeit durch den Verkehrszustand gibt an, wieviel Fahrtzeit zusätzlich zu einer festgelegten Soll-Fahrtzeit benötigt wird. Die im Folgenden angegebenen Werte sind immer relativ in Bezug auf die Soll-Fahrtzeit gesetzt.

Zur Berechnung der zusätzlichen Fahrtzeit wurde hier direkt die Aufteilung der Fahrleistung auf die Verkehrszustände nach HBEFA genutzt. Vorteil dieser Methode ist, dass sich dadurch ein direkter Vergleich mit den Auswirkungen der bisherigen Fahrleistungsaufteilung nach HBEFA durchführen lässt. Bei der Berechnung wurde für jede Verkehrssituation die mittlere nach HBEFA angesetzte Geschwindigkeit genutzt (siehe Kapitel 2.1.3). Den Fahrzeugen wurden diese Geschwindigkeiten zugewiesen, um die Fahrtzeiten zu berechnen. Bei Straßenkategorien, für die keine Fahrzyklen und damit keine mittleren Geschwindigkeiten bekannt sind, wurde analog zur Methode zur Zuweisung der Verkehrszustände verfahren und auf die Fahrzyklen geeigneter vergleichbarer Straßenkategorien zurückgegriffen (siehe Kapitel 2.2.4.3, insbesondere Abbildung 17). Dem wurde eine berechnete Fahrtzeit gegenübergestellt, die sich ergeben würde, würde in allen Verkehrssituationen die mittlere Geschwindigkeit der jeweiligen Straßenkategorie bei flüssigem Verkehr gefahren. Die Ergebnisse sind in Tabelle 35 zusammengefasst.

Tabelle 35: Zusätzliche Fahrtzeit (rel. zu $v_{\text{flüssig}}$) durch Verkehrszustände je Straßenkategorie

| g | s | v^z | | | | | | | | | | | | | |
|----|-------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----|---------------|-----|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | | <30 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 110 | 120 | 130 | >130 | Ø |
| La | AB | | | | | 14,2 % | | 16,2 % | | 23,0 % | | 31,7 % | 41,0 % | 36,1 % | 34,3 % |
| | FStr | | | | 29,6 % | 21,3 % | 27,9 % | 15,4 % | | 16,1 % | | 24,2 % | 36,9 % | 36,2 % | 20,4 % |
| | HVS | | 8,9 % | 11,0 % | 14,6 % | 20,3 % | 20,6 % | 13,3 % | | 24,9 % | | | | | 21,4 % |
| | HVS-k | | 9,9 % | 10,2 % | 15,4 % | 20,0 % | 24,4 % | 18,3 % | | 47,8 % | | | | | 29,5 % |
| | SaS | | 19,1 % | | 24,9 % | 21,6 % | 42,8 % | 23,6 % | | 46,9 % | | | | | 36,2 % |
| | SaS-k | | 27,5 % | | 27,0 % | | | | | 51,5 % | | | | | 42,9 % |
| | ErS | | 9,9 % | | 16,4 % | | | | | 51,2 % | | | | | 36,5 % |
| | Ø | | 11,7 % | 10,5 % | 15,8 % | 20,0 % | 21,9 % | 14,6 % | | 31,9 % | | 30,3 % | 40,9 % | 36,1 % | 27,6 % |
| Ag | AB | | | | | 32,2 % | | 22,7 % | | 21,2 % | | 35,4 % | 60,9 % | 55,6 % | 39,3 % |
| | St-AB | | | | 41,1 % | 38,8 % | 28,2 % | 20,4 % | | 21,2 % | | 28,4 % | | | 26,6 % |
| | FStr | | 31,4 % | | 51,2 % | 66,0 % | 38,7 % | 17,6 % | | 45,4 % | | | | | 48,9 % |
| | RiStr | | 29,3 % | | 61,8 % | 46,3 % | 40,1 % | 22,0 % | | | | | | | 56,6 % |
| | HVS | | 25,2 % | 36,5 % | 37,8 % | 36,2 % | 40,1 % | 24,1 % | | | | | | | 36,5 % |
| | SaS | | 35,2 % | | 59,3 % | | | | | | | | | | 47,0 % |
| | ErS | 34,1 % | 33,6 % | | 58,9 % | | | | | | | | | | 42,7 % |
| | Ø | 34,1 % | 32,2 % | 36,5 % | 47,1 % | 48,1 % | 38,6 % | 21,7 % | | 27,4 % | | 34,7 % | 60,9 % | 55,6 % | 42,5 % |
| Ø | | | | | | | | | | | | | | 34,0 % | |

Die zusätzliche Fahrtzeit aufgrund der Verkehrszustände beträgt im Mittel über alle Straßen im deutschen Streckennetz nach dieser Definition rund 34 %. Auf Strecken in bebauten Gebieten sind die Zeitverluste deutlich höher: Die Fahrtzeit erhöht sich hier im Mittel um 42,5 % während sie auf Strecken, die dem Gebietstyp „ländlich“ zugeordnet sind nur um 27,6 % zunimmt. Besonders hohe Zeitverluste treten einerseits auf Autobahnen in bebauten Gebieten auf. Dies ist insofern plausibel, da hier häufig dichter Verkehr herrscht als es auf Autobahnen in ländlichen Gebieten der Fall ist. Die hohen Verlustzeiten resultieren hier nicht aus hohen Anteilen im Stop&Go-Verkehr, sondern aus häufig auftretenden dichten und gesättigten Verkehrszuständen (vgl. Kapitel 2.3.3). Andererseits fallen im Agglomerationsgebiet im Streckennetz mit zulässigen Höchstgeschwindigkeiten von 50 km/h bzw. 60 km/h hohe Verlustzeiten an. Dies ist plausibel, da sich hier einerseits der Verkehr bündelt und dies gleichzeitig das Streckennetz ist, in dem lightsignalanlagengesteuerten Knotenpunkte die Regel darstellen. Im ländlichen Gebiet sind insbesondere Erschließungs- und Sammelstraßen mit zulässigen Höchstgeschwindigkeiten von 100 km/h von hohen Verlustzeiten betroffen. Auch dies ist gut erklärbar, da es sich – wie bereits beschrieben – um Streckentypen handelt, auf denen meist nur langsamer gefahren werden kann, als es die zulässige Höchstgeschwindigkeit erlaubt.

Ein Vergleich der Ergebnisse mit den Verlustzeiten, die sich aus der in der aktuellen Version des HBEFA hinterlegten Fahrleistungsaufteilung ergeben, ist nur mit Blick auf den gesamten Verkehr zielführend, da darin nur ein kleiner Teil der Straßenkategorien überhaupt belegt war (vgl. Kapitel 2.1.2). Für das gesamte Streckennetz liegt der Wert, der sich aus der neuen Aufteilung ergibt (34,0 %) rund 7,6 % höher als mit der bisherigen Aufteilung, mit der er 31,6 % betrug.

2.3.6 Emissionen: Bewertung und Einordnung der Ergebnisse

Die zentrale Anwendung, für die die ermittelten Fahrleistungsanteile je Verkehrssituation zum Einsatz kommen, ist die Berechnung der mittleren spezifischen Emissionen des Straßenverkehrs in Deutschland. Für einen Vergleich zwischen den bisherigen Werten nach HBEFA 4.1 und Ergebnissen auf Grundlage der hier ermittelten Fahrleistungsaufteilung wurde die in HBEFA 4.1 hinterlegte Fahrzeugflotte für das Jahr 2020 zugrunde gelegt. Die Zuordnung von Emissionsfaktoren für Straßenkategorien, für die im HBEFA keine Fahrzyklen hinterlegt sind, erfolgte analog zur Zuordnung, die für die Einteilung der Verkehrszustände verwendet wurde (siehe Kapitel 2.2.4.3, insbesondere Abbildung 17).

Wie auch bei der Betrachtung der Verlustzeiten (Kapitel 2.3.5) ist auch hier ein Vergleich auf Ebene der einzelnen Straßenkategorien wenig aussagekräftig. Da die Emissionsfaktoren jedoch stark von den Steigungsklassen abhängen, wurde an dieser Stelle dementsprechend differenziert. Ausgewertet wurden die Komponenten PM, NO_x und CO_{2äq}. Die Ergebnisse für die Fahrzeugkategorien Pkw und SNF sind in Tabelle 36 bzw. Tabelle 37 gegenübergestellt. Tabelle 38 fasst die Ergebnisse für die weiteren Fahrzeugkategorien zusammen, wobei auf eine Differenzierung nach Steigungsklassen verzichtet wurde.

Insbesondere bei der Fahrzeugkategorie Pkw zeigen sich sehr geringe Abweichungen. Für alle Schadstoffe liegt der Werte bei Betrachtung des gesamten Verkehrs unter +/-1 %. Bei den schweren Nutzfahrzeugen (SNF) ist die Abweichung bei PM vergleichbar gering, mit Werten jeweils um die 7 % für NO_x und CO_{2äq} sind die Werte für diese Schadstoffe aber deutlich höher. Auch bei den weiteren Fahrzeugkategorien liegen die Abweichungen in einem Bereich von +/-10 % mit Ausnahme der NO_x-Emissionen leichter Nutzfahrzeuge (LNF) mit -12,1 %. Dabei kann keine eindeutige Richtung der Abweichungen erkannt werden, positive und negative Werte treten gleichermaßen auf. Hinsichtlich der Auswertung nach Steigungsklassen wird deutlich, dass die Abweichungen mit zunehmender Steigung tendenziell ansteigen. Dies deutet darauf hin, dass insbesondere in den hohen Steigungsklassen größere Unterschiede bei der Verteilung der Verkehrszustände bzw. der Straßenkategorien vorliegen. Jedoch ist die Wirkrichtung bei Pkw und SNF entgegengesetzt, weshalb auch hier keine pauschale Über- oder Unterschätzung zu erkennen ist.

Tabelle 36: Spezifische Emissionswerte für die ermittelte Fahrleistungsaufteilung im Vergleich zu HBEFA 4.1 für Pkw

| Steigungs- klasse | PM in g/FzgKm | | | NO _x in g/FzgKm | | | CO _{2äq} in g/FzgKm | | |
|----------------------|---------------|---------------|-----------------|----------------------------|---------------|-----------------|------------------------------|---------------|-----------------|
| | HBEFA 4.1 | Neue Werte | Abwei- chung | HBEFA 4.1 | Neue Werte | Abwei- chung | HBEFA 4.1 | Neue Werte | Abwei- chung |
| 0 % | 3,58 | 3,64 | 1,7 % | 0,401 | 0,404 | 0,7 % | 161,9 | 160,9 | -0,6 % |
| +/-2 % | 3,74 | 3,73 | -0,1 % | 0,423 | 0,419 | -1,1 % | 162,9 | 161,9 | -0,6 % |
| +/-4 % | 4,34 | 4,09 | -5,7 % | 0,493 | 0,470 | -4,7 % | 168,1 | 166,5 | -0,9 % |
| +/-6 % | 4,89 | 4,44 | -9,2 % | 0,581 | 0,535 | -7,9 % | 179,9 | 181,4 | +0,8 % |
| Gesamt | 3,71 | 3,74 | +0,9 % | 0,418 | 0,420 | +0,5 % | 163,0 | 162,8 | -0,2 % |

Berechnet mit der HBEFA-Flotte für Deutschland für das Jahr 2020.

Tabelle 37: Spezifische Emissionswerte für die ermittelte Fahrleistungsaufteilung im Vergleich zu HBEFA 4.1 für SNF

| Steigungs- klasse | PM in g/FzgKm | | | NO _x in g/FzgKm | | | CO _{2äq} in g/FzgKm | | |
|----------------------|---------------|---------------|-----------------|----------------------------|---------------|----------------|------------------------------|---------------|---------------|
| | HBEFA 4.1 | Neue Werte | Abwei- chung | HBEFA 4.1 | Neue Werte | Delta | HBEFA 4.1 | Neue Werte | Delta |
| 0 % | 22,76 | 21,91 | -3,8 % | 1,394 | 1,436 | +3,1 % | 673,0 | 715,0 | +6,2 % |
| +/-2 % | 19,10 | 20,26 | +6,1 % | 1,566 | 1,765 | +12,7 % | 773,5 | 815,7 | +5,5 % |
| +/-4 % | 20,08 | 22,00 | +9,6 % | 1,369 | 1,633 | +19,3 % | 1060,4 | 1080,9 | +1,9 % |
| +/-6 % | 22,02 | 26,85 | +21,9 % | 1,504 | 1,845 | +22,7 % | 1389,3 | 1374,4 | -1,1 % |
| Gesamt | 21,46 | 21,63 | +0,8 % | 1,446 | 1,552 | +7,3 % | 740,0 | 790,1 | +6,8 % |

Berechnet mit der HBEFA-Flotte für Deutschland für das Jahr 2020.

Die Gesamtabweichung kann über der Abweichung aller Einzelwerte liegen, da sich die Gewichtung über die Fahrleistungsanteile zwischen HBEFA und den neuen Werten unterscheidet (z.B. CO_{2äq}).

Tabelle 38: Spezifische Emissionswerte für die ermittelte Fahrleistungsaufteilung im Vergleich zu HBEFA 4.1 für LNF, KR/MR, LBus und RBus

| Fahrzeug- kategorie | PM in mg/FzgKm | | | NO _x in g/FzgKm | | | CO _{2äq} in g/FzgKm | | |
|------------------------|----------------|---------------|-----------------|----------------------------|---------------|-----------------|------------------------------|---------------|-----------------|
| | HBEFA 4.1 | Neue Werte | Abwei- chung | HBEFA 4.1 | Neue Werte | Abwei- chung | HBEFA 4.1 | Neue Werte | Abwei- chung |
| LNF | 17,94 | 16,23 | -9,5 % | 1,128 | 0,991 | -12,1 % | 238,8 | 223,3 | -6,5 % |
| KR/MR | 72,45 | 79,66 | +9,9 % | 0,116 | 0,108 | -6,9 % | 102,5 | 100,7 | -1,8 % |
| LBus | 37,24 | 35,09 | -5,8 % | 2,867 | 3,022 | +5,4 % | 1043,7 | 1053,4 | +0,9 % |
| RBus | 69,73 | 62,98 | -9,7 % | 4,182 | 3,776 | -9,7 % | 772,7 | 758,3 | -1,9 % |

Berechnet mit der HBEFA-Flotte für Deutschland für das Jahr 2020.

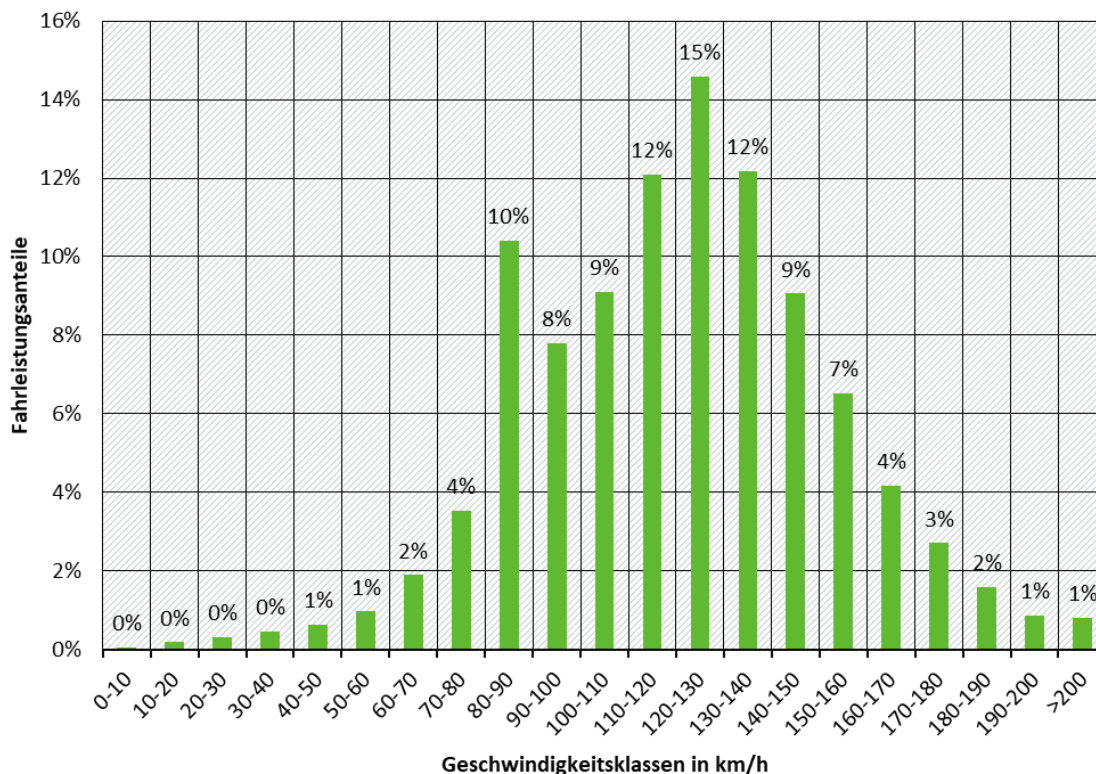
2.4 Fahrleistung nach gefahrenen Geschwindigkeiten

Neben der Zuordnung der Fahrleistungsanteile zu HBEFA-Verkehrssituationen wurden die vorliegenden FCD genutzt, um zu untersuchen, wie hoch die realisierten Geschwindigkeiten im deutschen Autobahnnetz waren. Von Interesse war hierbei insbesondere die Strecken ohne Tempolimit (Kapitel 2.4.1), denen zum Vergleich eine Auswertung des gesamten Autobahn-Streckennetz gegenübergestellt wird (Kapitel 2.4.2).

2.4.1 Autobahnen ohne Tempolimit

Für die Auswertung wurden die realisierten Geschwindigkeiten auf diesen Streckenabschnitten aus den Geschwindigkeitsperzentil-Daten in Klassen von jeweils 10 km/h zusammengefasst. Auf Autobahnen ohne Tempolimit wird circa 38 % der Fahrleistung mit einem Geschwindigkeitsniveau von über 130 km/h zurückgelegt. Dies entspricht einem Jahreswert von 51,5 Milliarden Fahrzeugkilometern. Abbildung 20 zeigt die Verteilung der Fahrleistungen in den jeweiligen Geschwindigkeitsklassen.

Abbildung 20: Fahrleistung auf Autobahnen ohne Tempolimit nach gefahrenen Geschwindigkeiten

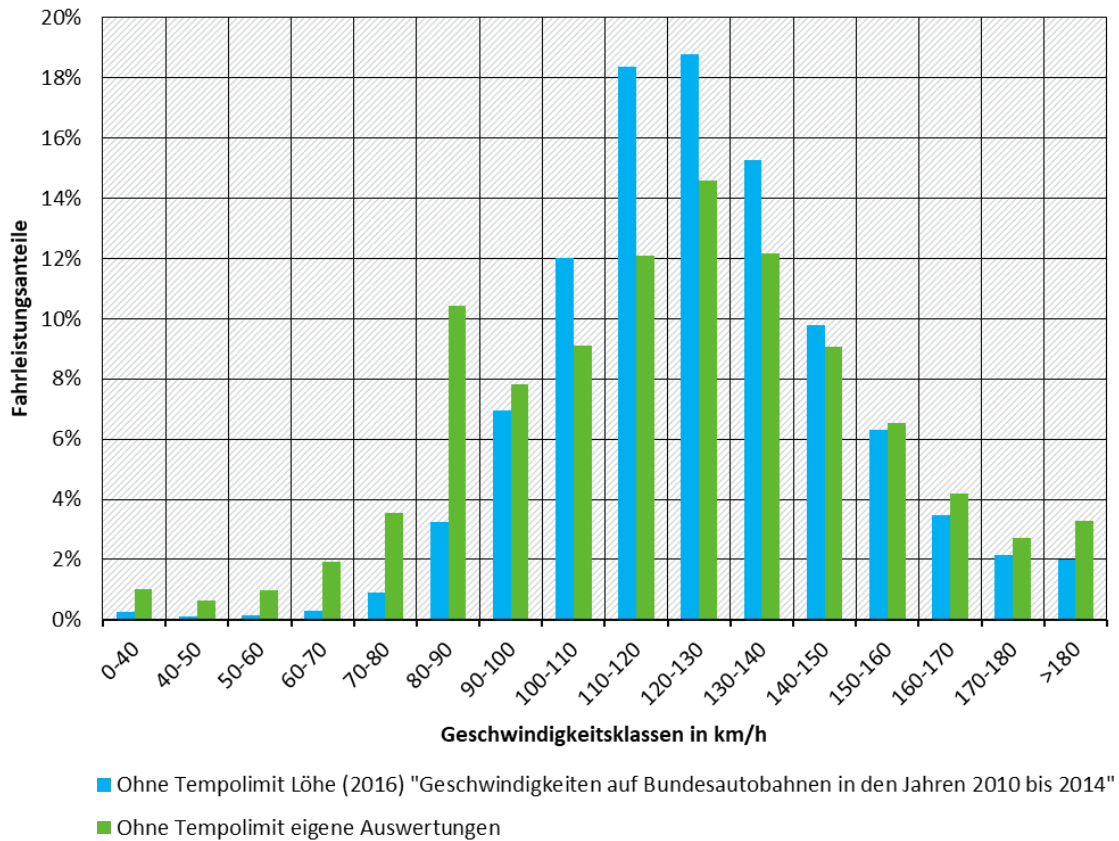


Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart

Es fällt klar auf, dass der Anteil in der Geschwindigkeitsklasse 80-90 km/h überproportional hoch ist. Die aggregierten Daten lassen keine eindeutige Aussage über die Gründe dafür zu, jedoch liegen zwei Punkte nahe. Erstens ist vermutlich ein gewisser Anteil durch Baustellenbereiche mit reduzierter zulässiger Höchstgeschwindigkeit bedingt. Zweitens legt TomTom die Methodik zur Differenzierung zwischen Pkw und Lkw nicht offen. Zwar wurden die Pkw-FCD von TomTom genutzt und in Abbildung 20 dargestellt, es ist jedoch nicht auszuschließen, dass darin ein gewisser Anteil Lkw enthalten ist.

In Abbildung 21 ist ein Vergleich zu den Ergebnissen einer Auswertung von Zählstellendaten (Löhe 2016) dargestellt.

Abbildung 21: Vergleich der Fahrleistung auf Autobahnen ohne Tempolimit nach gefahrenen Geschwindigkeiten



Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart, Datengrundlagen Löhle (2016) und eigene Auswertungen

Unabhängig von dem auch hier deutlich erkennbaren überproportionalen Anteil von Fahrzeugen in der Geschwindigkeitsklasse 80-90 km/h zeigt sich ein höherer Anteil in den Geschwindigkeitsklassen ≥ 150 km/h. Die Klasse ≥ 180 km/h hat proportional gesehen die größte relative Abweichung in den oberen Geschwindigkeitsklassen, auf sie entfallen über 50 % mehr Fahrleistung. Im Geschwindigkeitsbereich, der nach der in dieser Studie gewählten Vorgehensweise (siehe Kapitel 2.2.4) dem Verkehrszustand „flüssig“ zugeordnet ist (bei Autobahnen ohne Tempolimit liegt die Grenze zwischen einem dichten und flüssigen Verkehrszustand bei 137,2 km/h), liegt die mittlere Geschwindigkeit bei 158 km/h. Damit ist der Wert deutlich höher als die mittlere Geschwindigkeit nach HBEFA in diesem Verkehrszustand, die knapp 143 km/h beträgt. Allerdings muss betont werden, dass die in dieser Studie gewählte, der Datengrundlage geschuldete Abgrenzung der Verkehrszustände nur bedingt geeignet ist, um eine Aussage über die wirkliche mittlere Geschwindigkeit innerhalb der jeweiligen Verkehrszustände abzuleiten. Dennoch legt der große Unterschied mindestens eine Überprüfung der für Autobahnen ohne Tempolimit in den HBEFA-Fahrzyklen angenommenen Geschwindigkeitsverteilungen nahe. Aggregierte FCD, wie sie im vorliegenden Forschungsprojekt verwendet wurde, ist für eine Prüfung der Fahrzyklen einzelner Verkehrszustände ungeeignet. Ob disaggregierte FCD für eine solche Untersuchung geeignet ist, lässt sich auf dieser Grundlage nicht beantworten. Während die hohe räumliche Abdeckung und die Möglichkeit der Beobachtung langer Fahrtabschnitte sehr vielversprechend sind, ist unklar, inwiefern die Stichprobe durch unterschiedliche Fahrzeugtypen und Fahrzeuge bzw. Personen, die die Daten zur Verfügung stellen verzerrt ist. Weitere Möglichkeiten (Befahrungen, Erfassung von Trajektorien mit objekterkennenden Kamerasystemen etc.) vor dem Hintergrund der

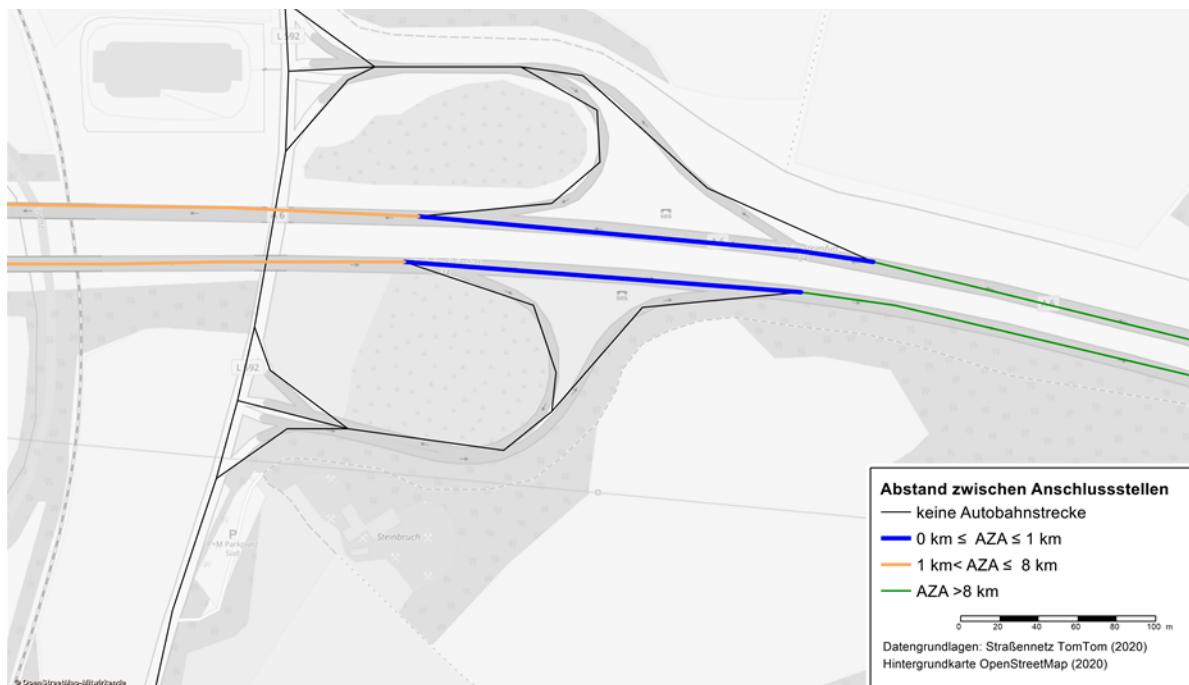
Vielzahl möglicher Einflüsse den Nachteil einer geringen Abdeckung. Grundlegend ist für beide Fälle eine eindeutige Definition der Abgrenzung der Verkehrszustände, insbesondere auf mehrstreifigen Autobahnen mit unterschiedlichen Schwerverkehrsanteilen.

Für eine weitere Differenzierung der Fahrleistungsanteile auf Autobahnen ohne Tempolimit wurde eine zusätzliche Kategorisierung der Streckenabschnitte vorgenommen. Für jeden Streckenabschnitt wurde die Entfernung zur nächsten und die Entfernung von der vorhergehenden Anschlussstelle berechnet. Somit lag für jeden Abschnitt der Abstand zwischen den umgebenden Anschlussstellen vor, der in drei Klassen unterteilt wurde: <1 km, 1-8 km und >8 km.

Abbildung 22 zeigt einen Auszug des Streckennetzes, in dem die Strecken je nach Abstand zur nächsten Anschlussstelle eingefärbt sind. Die erste Abstandsklasse mit Abständen <1 km (blau eingefärbter Streckenabschnitt) dient insbesondere der Identifizierung von Strecken innerhalb von Anschlussstellen, die aus der Betrachtung ausgeschlossen werden sollen. Die beiden anderen Abstandsklassen dienen der Differenzierung zwischen Bereichen, die in städtischen und stadtnahen Verflechtungsbereichen liegen (Abstand 1 bis 8 km) und solchen, die für weiträumigere Verbindungen genutzt werden (Abstand >8 km).

Abbildung 22: Streckenabschnitte differenziert nach Abstand zwischen den Anschlussstellen

Beispielhafte Darstellung der Anschlussstelle Sinsheim-Steinsfurt (A6)



Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart, Datenrundlagen siehe Abbildung

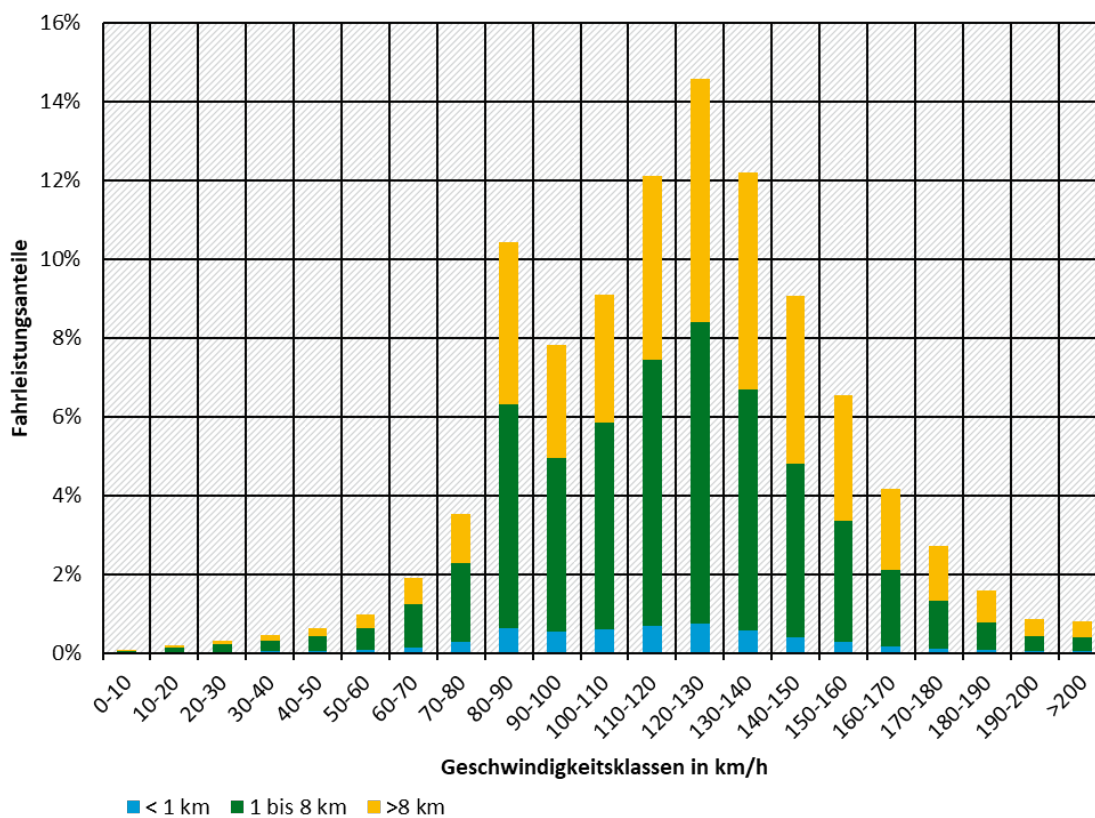
Die Grenzen der Abstände wurden dabei so gewählt, dass in beiden relevanten Gruppen vergleichbare Anteile an der Netzlänge liegen. Tabelle 39 zeigt die Streckenlänge für Autobahnabschnitte ohne Tempolimit unterteilt nach den Abstandsklassen zwischen den Anschlussstellen.

Tabelle 39: Klassenzuweisung nach Abständen zwischen Anschlussstellen

| Streckenlänge | Abstand zwischen Anschlussstellen | | |
|---------------|-----------------------------------|------------|-------|
| | <1 km | 1 bis 8 km | >8 km |
| in km | 1.145 | 9.247 | 8.533 |
| relativ | 6 % | 49 % | 45 % |

Wie in Abbildung 23 ersichtlich, besteht zwischen den Abstandsklassen tatsächlich ein Unterschied in den Verteilungen der gefahrenen Geschwindigkeiten.

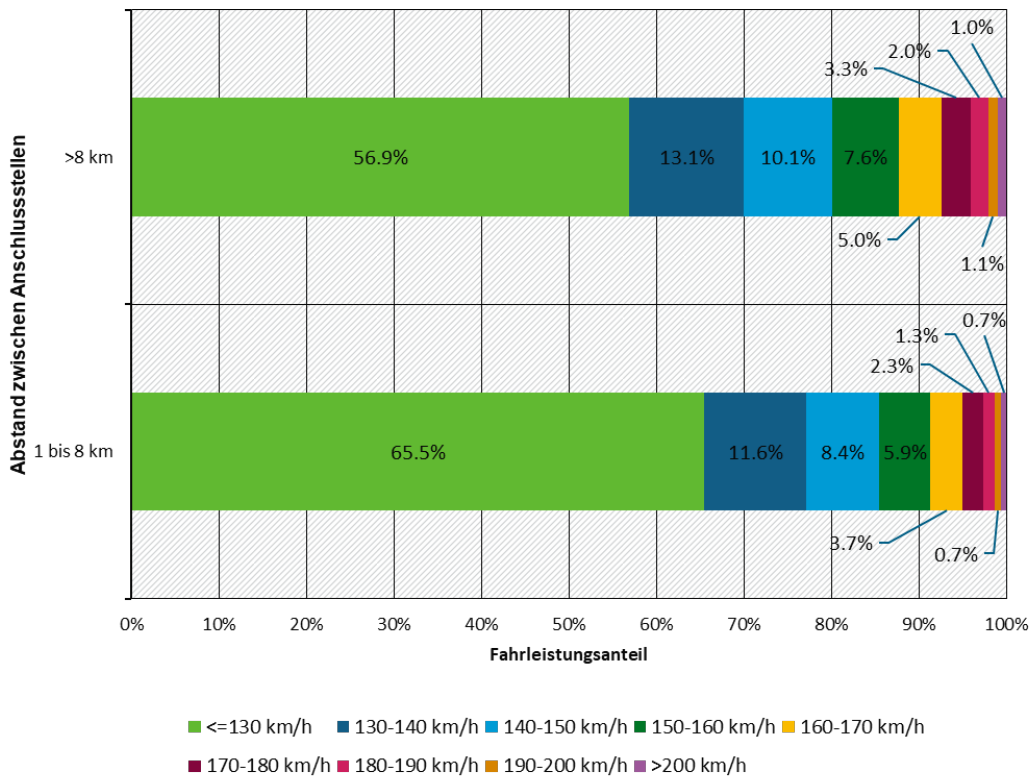
Abbildung 23: Fahrleistung auf Autobahnen ohne Tempolimit nach gefahrenen Geschwindigkeiten differenziert nach Abständen zwischen Anschlussstellen



Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart

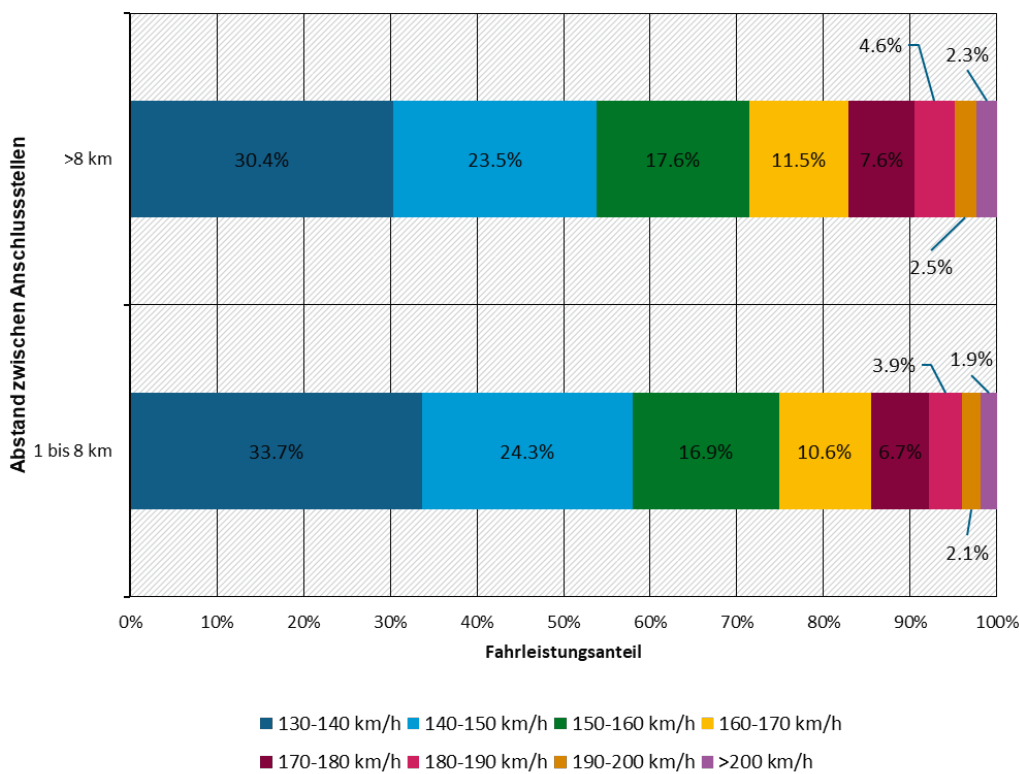
Deutlicher wird dies bei einem direkten Vergleich der beiden Abstandsklassen mit Abständen von über einem Kilometer (Abbildung 24). In Bereichen kurzer Abstände zwischen den Anschlussstellen werden im Mittel langsamere Geschwindigkeiten realisiert. Allerdings liegen in städtischen Verflechtungsbereichen in der Regel auch höhere Verkehrsdichten vor. Entsprechend ist der Fahrleistungsanteil bei nur geringfügig höherer Streckenlänge (Tabelle 39) in der Geschwindigkeitsklasse ≤ 130 bei der Abstandsklasse 1 bis 8 km rund ein Viertel höher als in der Klasse über 8 km. Werden nur die Geschwindigkeitsbereiche > 130 km/h betrachtet, also ein Bereich bei dem von einem flüssigen Verkehr ausgegangen werden kann, sind die Unterschiede zwar geringer, jedoch noch immer erkennbar (Abbildung 25).

Abbildung 24: Bedeutung der Abstände zwischen den Anschlussstellen auf die gefahrenen Geschwindigkeiten



Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart

Abbildung 25: Bedeutung der Abstände zwischen den Anschlussstellen auf die gefahrenen Geschwindigkeiten für Geschwindigkeitsklassen >130 km/h

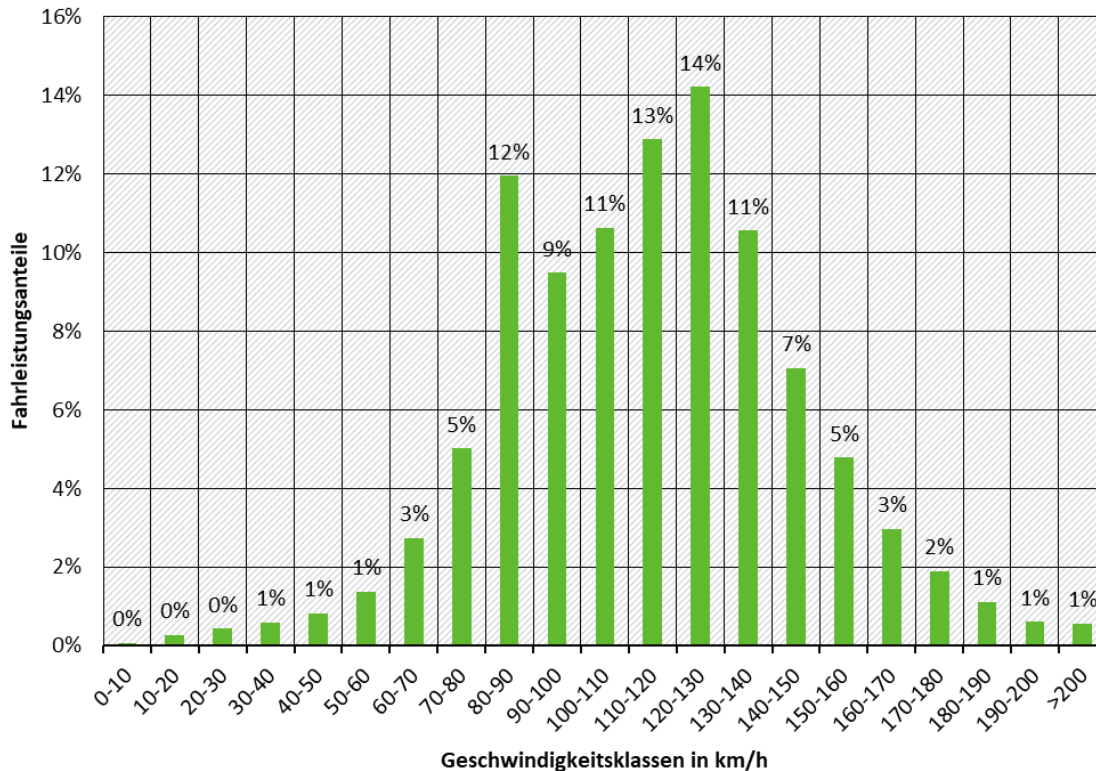


Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart

2.4.2 Gesamtes Autobahnnetz

In diesem Kapitel werden die Fahrleistungsanteile differenziert nach realisierten Geschwindigkeiten über alle Strecken des Autobahnnetzes betrachtet. Autobahnstrecken ohne Tempolimit gehen hier ebenfalls mit ein. In Abbildung 26 ist die Verteilung der Fahrleistungen in den jeweiligen Geschwindigkeitsklassen dargestellt. Die Anteile in den Geschwindigkeitsklassen >130 km/h sinken hier auf 30 % gegenüber dem Wert von 38 % bei den Autobahnen ohne Tempolimit. Der höchste Anteil liegt weiterhin in der Geschwindigkeitsklasse 120-130 km/h und ist lediglich um einen Prozentwert gesunken.

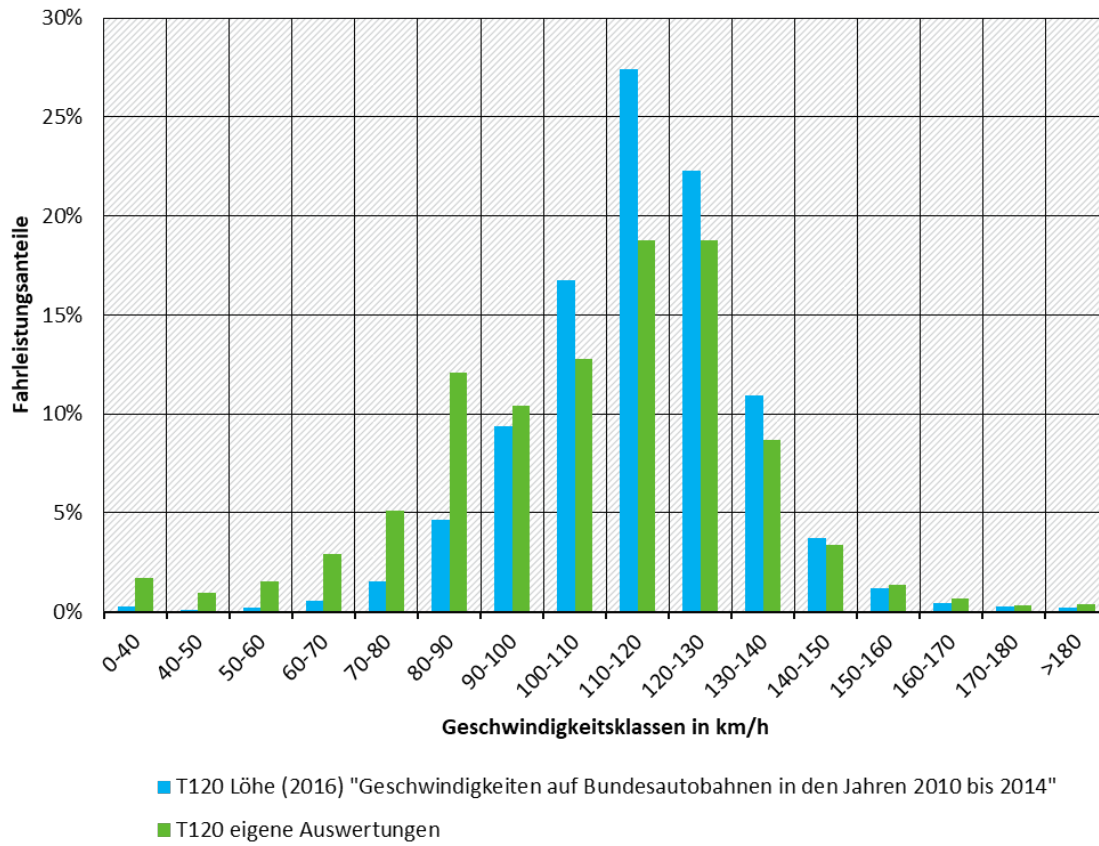
Abbildung 26: Fahrleistung auf Autobahnen nach gefahrenen Geschwindigkeiten



Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart

In Abbildung 27 ist wieder ein Vergleich zu den Ergebnissen von Löhe (2016) dargestellt. Die Auswertung bezieht sich nicht auf alle Strecken des Autobahnnetzes, sondern explizit auf solche, auf denen die zulässige Höchstgeschwindigkeit 120 km/h beträgt, da dafür aus Löhe (2016) Vergleichswerte vorhanden sind. Es ist wie in Abbildung 21 zu erkennen, dass ein erhöhter Anteil in der Geschwindigkeitsklasse 80-90 km/h besteht. Die Gründe dafür sind vermutlich wiederum die bereits genannten Streckenanteile mit Baustellen und ein eventueller Lkw-Anteil in dem verwendeten FCD-Daten. In den Geschwindigkeitsklassen 100-150 km/h zeigen die Auswertungen von Löhe (2016) einen höheren Fahrleistungsanteil, als die Auswertungen dieser Studie. In den hohen Geschwindigkeitsklassen ≤150 km/h, hier also in Bereichen deutlich über dem Tempolimit, fallen auch bei dieser Betrachtung in der vorliegenden Auswertung vergleichsweise hohe Werte auf.

Abbildung 27: Vergleich der Fahrleistung auf Autobahnen mit Tempolimit 120 nach gefahrenen Geschwindigkeiten

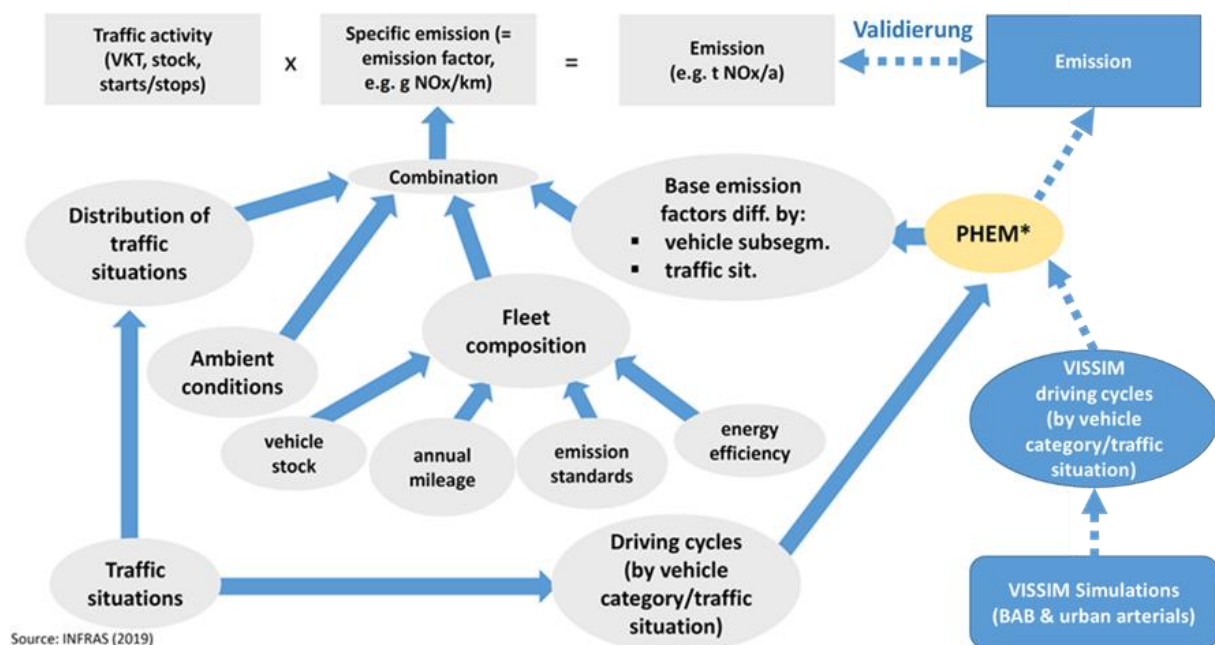


Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart, Datengrundlagen Löhle (2016) und eigene Auswertungen

2.5 Validierung ausgewählter Emissionswerte aus HBEFA

Für die Erstellung des HBEFA 4.1 wurde bereits das mikroskopische Fahrzeugemissionsmodell PHEM (Passenger car and Heavy duty Emission Model) verwendet. Dabei wurden Emissionswerte für unterschiedliche Verkehrssituationen basierend auf entsprechenden Fahrzeugtrajektorien aus den Motorkennfeldern für unterschiedliche Fahrzeugtypen berechnet (siehe INFRAS AG 2019). Die berücksichtigten Fahrzeugtrajektorien stammen hierbei aus realen Fahrzyklen, die empirisch ermittelt wurden und auch auf Rollen- und Motorprüfständen verwendet werden. Alle Fahrzyklen in HBEFA 4.1 wurden basierend auf neuen Fahrprofilen (aus Deutschland, Schweden, der Schweiz, Ungarn und Italien) überarbeitet. Die spezifischen Emissionsergebnisse der einzelnen Fahrzeugtypen werden über Flottenzusammensetzungen mit einer Verteilung der Verkehrssituationen kombiniert und bilden damit letztendlich die HBEFA 4.1 Emissionsberechnungsergebnisse, siehe nachstehende Abbildung 28.

Abbildung 28: Aufbau und Eingangsdaten von HBEFA 4.1 sowie ergänzende Validierung durch die VISSIM-PHEM-Simulationskopplung



Graue Felder: Ablauf und Eingangsdaten des HBEFA-Emissionsmodells. Blaue Felder: In dieser Studie durchgeführter Validierungsansatz über VISSIM-PHEM-Simulationskopplung.

Quelle: graue Felder INFRAS AG (2019), blaue Felder eigene Ergänzung, ISV Universität Graz

Die angestrebte Validierung ausgewählter Emissionswerte erfolgt in der gegenständlichen Untersuchung durch einen Vergleich der Tabellenwerte der HBEFA-Emissionswerte und der Emissionswerte einer direkten Berechnung mit dem mikroskopischen Fahrzeugemissionsmodell PHEM für ausgewählte Strecken und Verkehrssituationen. Die erforderlichen Fahrzeugtrajektorien (Weg-Zeit- bzw. Geschwindigkeit-Zeit-Verläufe) für die PHEM-Berechnungen wurden mit mikroskopischen Verkehrsflusssimulationen (PTV VISSIM) für ausgewählte Strecken (BAB-Autobahnstrecken und signalisierte Streckenzüge innerorts) und unterschiedliche Verkehrszustände generiert. In nachfolgendem Abschnitt wird näher auf die Simulationskopplung der Verkehrs- und Emissionsmodellierung eingegangen.

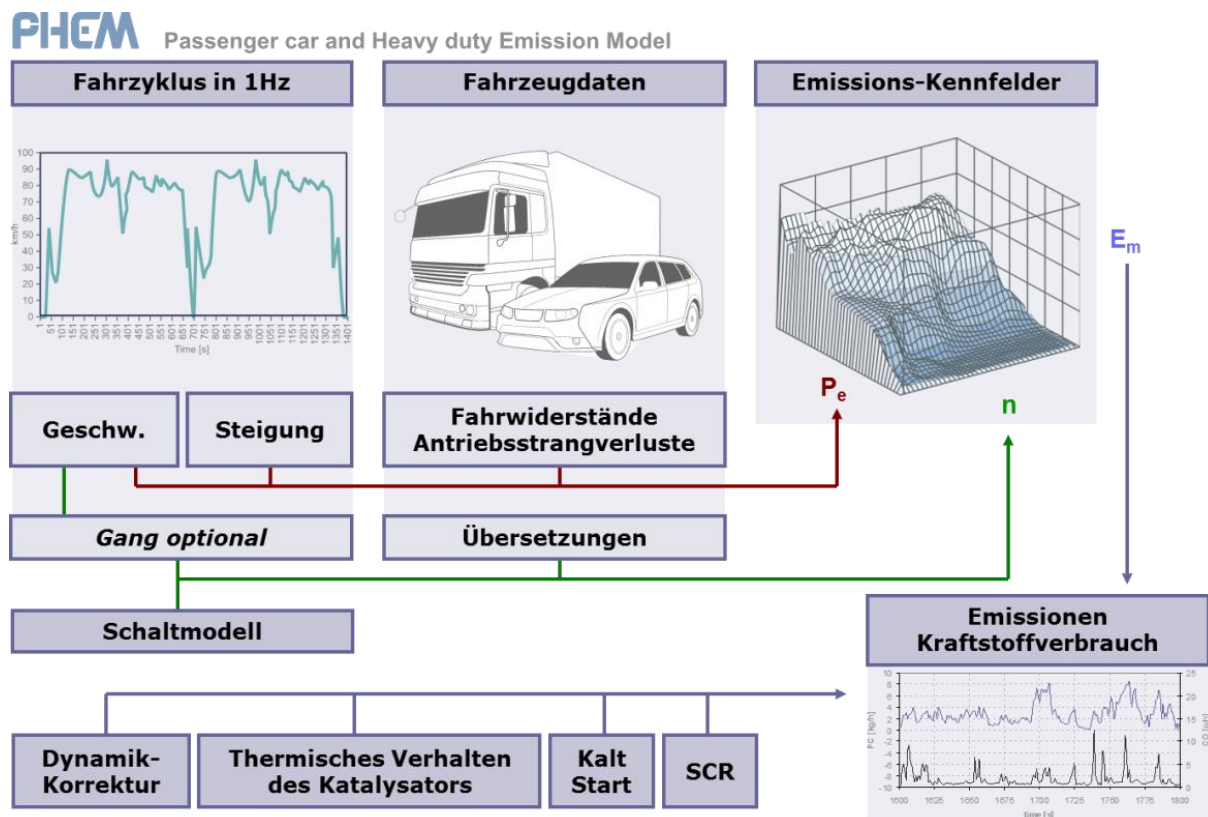
Die Kopplung von mikroskopischen Verkehrsflussmodellen (z. B. PTV VISSIM, AIMSUN etc.) wurde bereits in diversen Arbeiten untersucht und beschrieben (vgl. u.a. Zallinger 2010,

Hirschmann & Fellendorf 2010, Hirschmann et al. 2010, Kraschl-Hirschmann et al. 2011). Der Aufbau der Simulationsumgebung umfasst dabei die Kopplung eines mikroskopischen Verkehrsflusssimulationsmodells mit dem Längsdynamik- und Emissionsmodell PHEM. Dabei werden simulierte Fahrtrajektorien einzelner Fahrzeuge in 1-Hertz-Auflösung aus dem Verkehrsflussmodell via Fahrzeugprotokoll-Dateien an das Emissionsmodell übergeben, welches emissionstechnische Kenngrößen auf Basis von Motorkennfeldern berechnet. Deswegen ist auch insbesondere das longitudinale Fahrverhalten innerhalb der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation von essentieller Wichtigkeit, um die daraus resultierenden Emissionsberechnungen generieren zu können

Das in diesem Projekt verwendete Verkehrsflusssimulationsprogramm PTV VISSIM (siehe Fellendorf & Vortisch 2010) ist ein mikroskopisches, zeitschrittorientiertes und verhaltensbasiertes Simulationsmodell. Neben dem Individualverkehr (IV) kann auch der schienen- und der straßengebundene öffentliche Personennahverkehr (ÖV) modelliert werden. Wesentlich für die Güte des Simulationssystems ist die Qualität des Verkehrsflussmodells, d.h. des Verfahrens, nach dem die Fahrzeuge im Netz bewegt werden. Im Gegensatz zu einfacheren Modellen, in denen weitgehend konstante Geschwindigkeiten und ein deterministischer Folgevorgang von Fahrzeugen vorausgesetzt werden, verwendet VISSIM das psycho-physische Wahrnehmungsmodell von Wiedemann (Wiedemann 1974). Anhand weitreichender Parametrisierungsoptionen ist es möglich, lokale Fahrverhalten und fahrdynamische Kennwerte, welche starken Einfluss auf Emissionsberechnungen ausüben, ausreichend genau zu kalibrieren.

Bei PHEM handelt es sich um ein am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik der TU Graz entwickeltes kennfeldbasiertes Emissionsmodell, aufbauend auf einem Fahrzeuglängsdynamikmodell zur Berechnung der aktuellen Antriebs- und Motorleistung (siehe Hausberger 2003). Die Emissionen sind in dreidimensionalen Kennfeldern über Motordrehzahl und Motorleistung abgelegt und werden mit einer Korrektur für den Transientbetrieb versehen. Die Arbeitsweise des Modells ist in Abbildung 29 illustriert. Für die Interpolation der Emissionen aus den Kennfeldern wird neben der Motorleistung auch die Motordrehzahl benötigt. Diese wird aus der Fahrzeuggeschwindigkeit, dem dynamischen Radhalbmesser der Getriebeübersetzung sowie einem Gangschaltmodell berechnet. Für die Simulation der Emissionen aktueller Fahrzeugkonzepte stehen weitere Modelle für verschiedene Abgasnachbehandlungssysteme zur Verfügung. PHEM ist in der Lage, den Kraftstoffverbrauch und diverse Abgasemissionen wie NO_x , CO, HC und auch PM_{10} für beliebige simulierte oder gemessene Geschwindigkeitstrajektorien zu berechnen. Die im PHEM-Datensatz verfügbaren Fahrzeugmodelle umfassen alle im Straßenverkehr relevanten Fahrzeugkategorien (Pkw, LNF, SNF), worin sich alle im Rahmen der internationalen Kooperation ERMES (European Research on Mobile Emission Sources) vermessenen Fahrzeuge wiederfinden. PHEM stellt in Europa einen Standard für Emissionsberechnungen im Straßenverkehr dar.

Abbildung 29: Modellstruktur PHEM



Quelle: Hausberger (2003)

2.5.1 Validierungsergebnisse des fiktiven signalisierten Straßenzugs

Die Validierung der bestehenden Verkehrssituationen erfolgte, indem ein fiktiver signalisierter Straßenzug im mikroskopischen Verkehrssimulationsprogramm VISSIM modelliert und die spezifischen Verkehrssituationen von HBEFA 4.1 reproduziert wurden. Diese Validierungsmethodik und einzelne Validierungsergebnisse finden sich auch in der Masterarbeit von Trenkwalder 2021 wieder, welche projektbegleitend am Institut für Straßen- und Verkehrswesen der TU Graz verfasst wurde. Trenkwalder 2021 beschreibt in seiner Arbeit darüber hinaus auch im Detail die Berücksichtigung diverser Korrekturfaktoren für die Laufleistung, die Umgebungstemperatur und auch der Vorkonditionierungszyklen und unterscheidet ebenso die Validierungsergebnisse für unterschiedliche Simulationsszenarien. Die Unterscheidungsmerkmale der Szenariendefinition bei Trenkwalder 2021 umfasst neben den unterschiedlichen Steigungen, auch den Schwerverkehrsanteil und auch die Fahrverhaltensparameter zweier Fahrverhaltensmodelle in der mikroskopischen Verkehrsflussimulation, nämlich dem psycho-physischen Wahrnehmungsmodell von Wiedemann74 und Wiedemann99. Trenkwalder 2021 verfolgte in seiner Arbeit außerdem auch die Modellierung des fiktiven signalisierten Streckenzuges anhand einer makroskopischen Verkehrssimulation, wobei diese Ergebnisse nicht im vorliegenden Bericht integriert wurden. Dennoch lassen sich diverse inhaltliche Überschneidungen des vorliegenden Ergebnisberichts aus beschriebenen Gründen auch in der Arbeit von Trenkwalder 2021 wiederfinden.

Neben dem fiktiven signalisierten Streckenzug wurden zudem für mehrere typische städtische Streckenzüge mikroskopische Verkehrsflussmodelle in VISSIM (als Basis für die PHEM-Berechnungen) aufgebaut und kalibriert, um eine Potenzialermittlung und Quantifizierung der Auswirkung einer Optimierung für signalisierte Streckenzüge für den MIV-Verkehr auch anhand

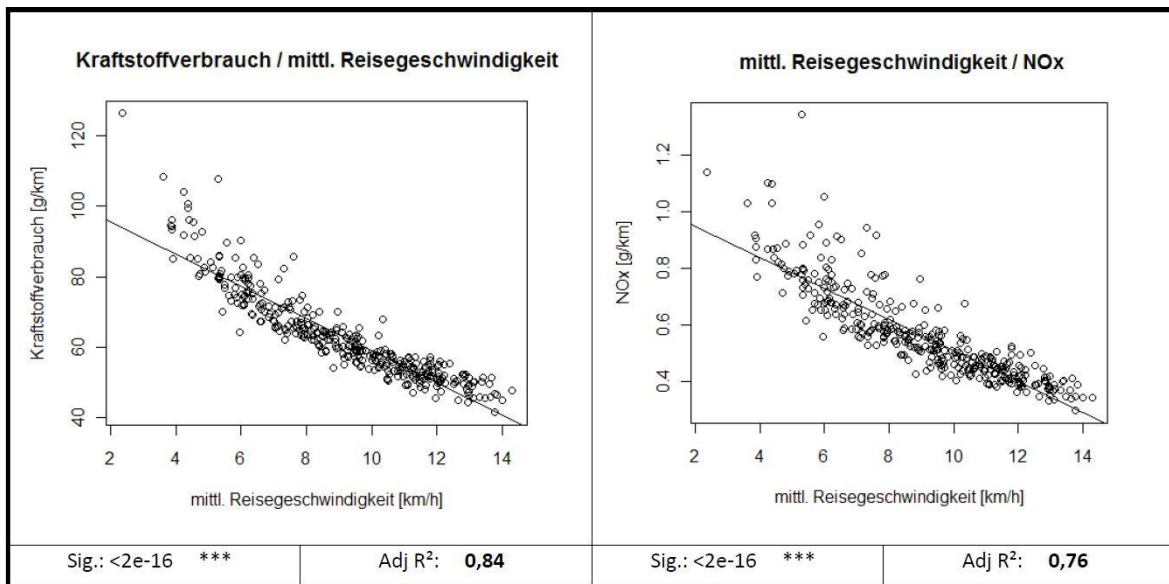
realer Streckenzüge beantworten zu können. Diese Potenzialermittlung wird losgelöst von der hier beschriebenen Validierung in Kapitel 3.3.8 beschrieben und dient der Quantifizierung der Umwelteffekte, welche sich durch die Optimierung des MIV-Verkehrsflusses an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage (LSA) ergeben.

In erster Instanz und zum Zweck der Validierung ausgewählter Emissionswerte aus HBEFA wurde ein fiktiver signalisierter Straßenzug mit 5 Knotenpunkten in konstantem Knotenpunktabstand gewählt, um dadurch die in der Realität vorkommenden und lokal unterschiedlichen Randbedingungen nicht so stark abzubilden, da diese die Validierungsergebnisse beeinflussen können. Zu diesen Randbedingungen zählen beispielsweise die spezifischen Teilpunktabstände, die exakten Knotenpunktgeometrien realer Streckenzüge und deren Abmessungen, aber auch das Vorhandensein von Fuß- und Radverkehr sowie Parkflächen oder Linien des öffentlichen Verkehrs. Durch die Nichtberücksichtigung dieser Randbedingungen konnte eine bessere Vergleichbarkeit zwischen den VISSIM/PHEM-Berechnungen und den HBEFA-Tabellenwerten gewährleistet werden.

Eine Verkehrssituation setzt sich wie bereits vorangehend beschrieben aus dem Gebiet (ländlich oder Agglomeration), dem Straßentyp, dem Verkehrszustand (Flüssig bis Stop&Go II) und aus der zulässigen Geschwindigkeit also dem geltenden Tempolimit zusammen. Für die Validierung der Emissionsfaktoren der einzelnen Verkehrssituationen, wurde mit dem mikroskopischen Verkehrssimulationsprogramm VISSIM ein fiktiver signalisierter Straßenzug für den Straßentyp einer Hauptverkehrsstraße mit Tempolimit von 50 km/h modelliert. Dieser Streckentyp hat auch einen erheblichen Anteil der Fahrleistungen, wie die zuvor gezeigten Ergebnisse der TomTom Datenanalyse gezeigt haben.

Um diese Verkehrssituationen aus HBEFA auch in der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation zu reproduzieren wurden unterschiedliche Stellschrauben variiert, diese umfassten die Verkehrsbelastungen, Umlaufzeiten aber auch die Grünzeitenanteile der signalisierten Knotenpunkte des Streckenzuges. Für die Reproduktion der Verkehrssituationen wurde in dieser Studie insbesondere die mittlere Reisegeschwindigkeit als verkehrliche Kenngröße und Zielgröße festgelegt, da diese einen signifikant hohen Zusammenhang mit Emissionen aufweist (Radl 2012). Entsprechend der Erkenntnisse von Radl 2012 liegt das Bestimmtheitsmaß und damit der Zusammenhang der mittleren Geschwindigkeit mit dem Kraftstoffverbrauch beim Durchfahren eines Straßenzuges im urbanen Bereich bei 84 %, mit den NO_x-Emissionen bei 76 % und für Feinstaubemissionen bei 82 %. Aber auch die relative positive Beschleunigung (RPA), welche auch ein Kriterium der HBEFA-Fahrzyklen ist, erklärt den Kraftstoffverbrauch zu 60 %, die NO_x-Emissionen zu 74 % und die PM-Emissionen zu 54 %. In Abbildung 30 ist die Korrelationsanalyse der mittleren Reisegeschwindigkeit mit dem Kraftstoffverbrauch und NO_x dargestellt.

Abbildung 30: Korrelationsanalyse der mittleren Reisegeschwindigkeit

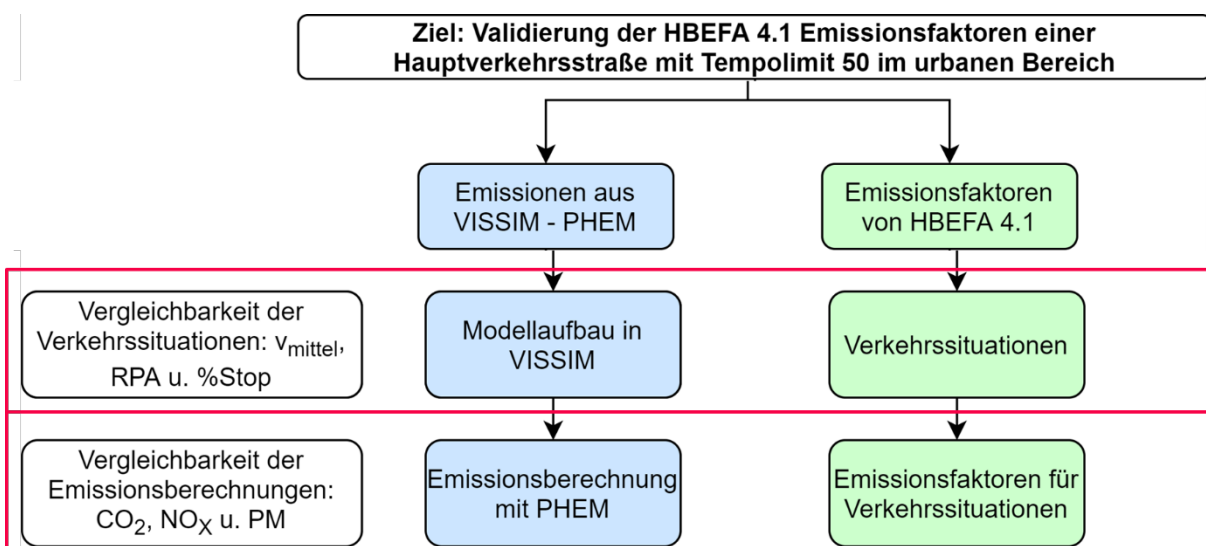


*** steht für eine sehr hohe Signifikanz

Quelle: Radl (2012)

Schlussfolgernd kann konstatiert werden, dass sich die mittlere Reisegeschwindigkeit als geeignete Kenngröße eignet, um die Schadstoffemissionen, welche vom Straßenverkehr im innerstädtischen Bereich verursacht werden, zu erklären. Für die HBEFA-Fahrzyklen wird auch die relative positive Beschleunigung (RPA) und die prozentuelle Haltedauer (%Stop) tabellarisch erfasst. Diese zwei Kenngrößen wurden zusätzlich zu den mittleren Geschwindigkeiten auch für die VISSIM-Fahrzyklen berechnet und den Werten aus HBEFA 4.1 gegenübergestellt. Um die Vergleichbarkeit der Verkehrssituationen bei der Validierung in möglichst hoher Genauigkeit zu gewährleisten und auch die Verkehrszustände genau abzubilden, wurde die Annäherung an die verkehrlichen Kenngrößen in einem iterativen Prozess durchgeführt.

Abbildung 31: Methodik der Validierung ausgewählter Emissionswerte aus HBEFA



Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Graz

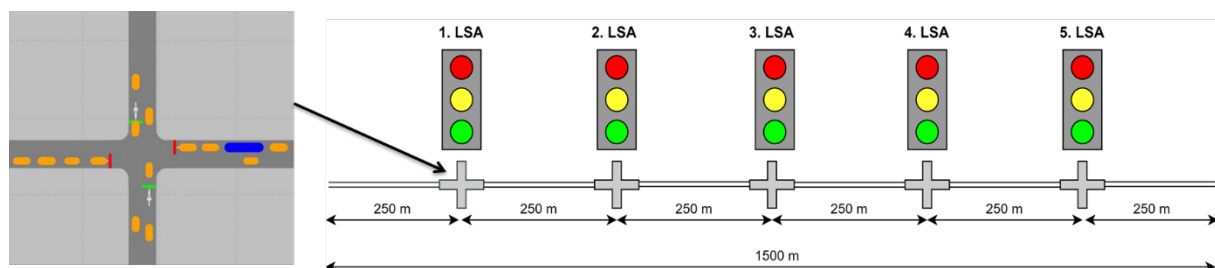
Um die Validierung der Emissionsfaktoren durchführen zu können musste eine vergleichbare Datenbasis der Emissionsprogramme HBEFA und PHEM geschaffen werden, um eine Vergleichbarkeit der Emissionsergebnisse zu ermöglichen. Ein wesentlicher Punkt umfasste hier die Vereinheitlichung der Fahrzeugflotte welche in den Emissionsberechnungen von HBEFA und PHEM verwendet werden, um eine angemessene Validierung der Emissionsfaktoren von HBEFA zu garantieren. Bei HBEFA wurde die Fahrzeugflottenzusammensetzung für Pkw, als auch für die SNF für das Land Deutschland und für den urbanen Bereich, für das Jahr 2020 ausgewählt, und die entsprechenden Emissionswerte der HBEFA-Tabellen aufbereitet. Die Fahrzeugflotte von PHEM wurde schließlich im nächsten Schritt an jene von HBEFA angepasst.

Bei HBEFA 4.1 wird pro Verkehrssituation ein einziger Standardfahrzyklus hinterlegt, mit welchem die Emissionsfaktoren der HBEFA-Tabellenwerte bestimmt wurden. Dieser Standardfahrzyklus wird auch durch die verkehrlichen Kenngrößen der mittleren Geschwindigkeit, positiven Beschleunigung (RPA) und prozentuelle Haltedauer (%Stop) charakterisiert. Innerhalb der mikroskopischen Simulationen in VISSIM wurden alle Fahrzeugprotokolle der Fahrzeuge innerhalb der Simulation ausgelesen und deren Fahrzyklen aufgezeichnet. Diese Fahrzyklen in 1 Hz Aggregation wurden im Fahrzeugemissionsmodell PHEM berücksichtigt und deren Emissionswerte berechnet. Die Validierung der durchschnittlichen Emissionen vergleicht demnach die Emissionsfaktoren einer großen Anzahl an VISSIM-Fahrzyklen mit einem einzelnen HBEFA-Standardfahrzyklus.

2.5.1.1 Simulationsaufbau

Für die Validierung eines urbanen signalisierten Streckenzuges wurde die Hauptverkehrsstraße mit einem Tempolimit von 50 km/h als Streckentyp gewählt. Dieser Streckentyp weist einen hohen Fahrleistungsanteil auf. Der gesamte Straßenzug weist eine Länge von 1.500 Metern auf, wobei pro Fahrtrichtung ein Fahrstreifen ohne Aufweitungsfahrstreifen an den Knotenpunkten modelliert wurde. Die Anzahl der signalisierten Knotenpunkte wurde dabei auf fünf festgelegt und der Teilpunkt Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden LSA-Knotenpunkte hatte dabei immer eine Länge von 250 Metern. In den Signalprogrammen der fünf LSA wurde ein Signalzeitenplan mit zwei Phasen erstellt. Bei der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation ist auch die Berechnungsfrequenz ein wichtiger Faktor. Diese wurde in der gegenständlichen Untersuchung auf von zehn Berechnungsschritte pro Simulationssekunde festgelegt. Es wurde zudem eine Mehrfachsimulation durchgeführt um der Stochastik der Simulationsergebnisse innerhalb der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation Rechnung zu tragen. Die Fahrzyklen der VISSIM-Simulation der zehn Simulationsläufe wurden in der Emissionsberechnung mit dem Emissionsmodell PHEM verwendet und anschließend der Mittelwert der zehn Simulationsläufe für die Auswertung und den Vergleich mit HBEFA verwendet.

Abbildung 32: Fiktiver signalisierter Streckenzug in der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation



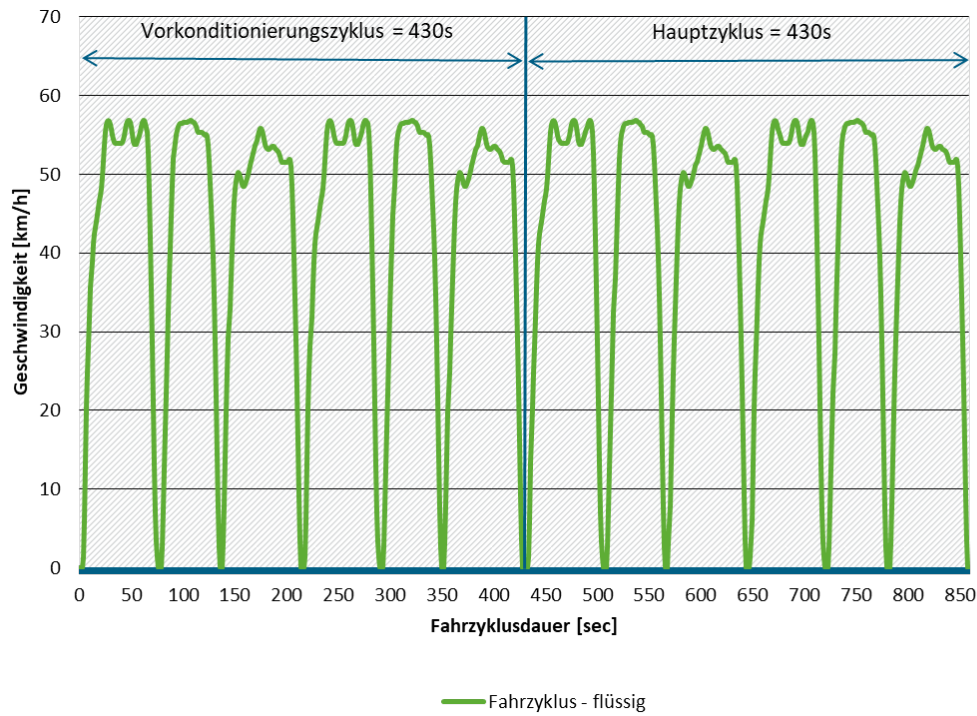
Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Graz

2.5.1.2 Berücksichtigung von Korrekturfaktoren für Laufleistung, Umgebungstemperatur, Vorkonditionierungszyklus

Da bei PHEM der Einfluss der Laufleistung und Umgebungstemperatur auf die Emissionen nicht berücksichtigt wird und bei den VISSIM-Fahrzyklen keine Vorkonditionierungszyklen enthalten sind, mussten Korrekturfaktoren erstellt werden,

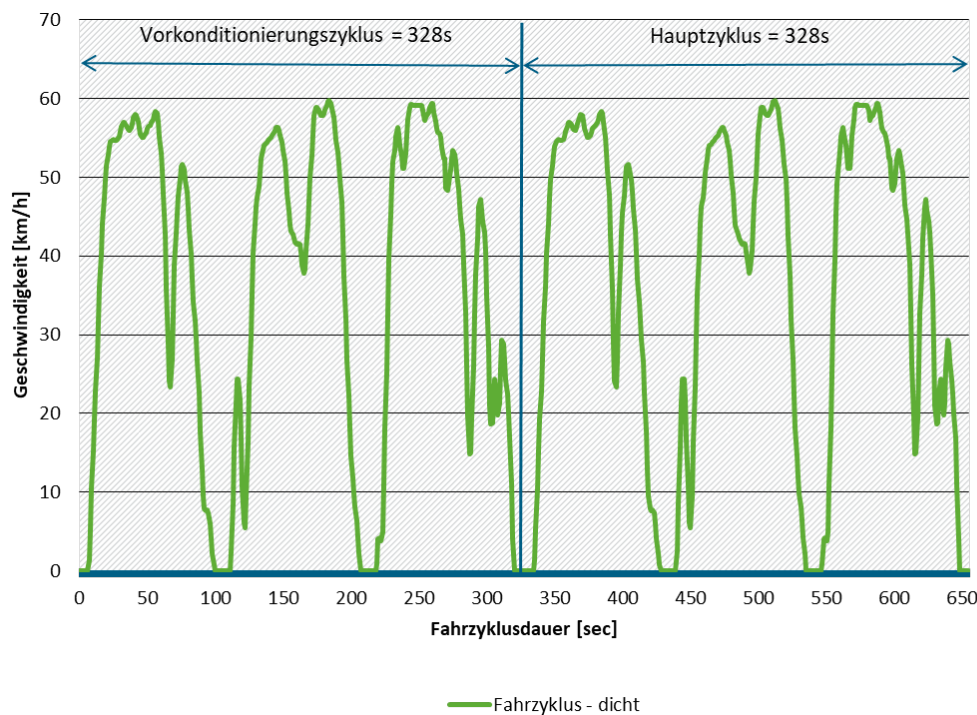
Um eine Validierung der Emissionsfaktoren von HBEFA mit dem Emissionsprogramm PHEM möglich zu machen mussten des weiteren Korrekturfaktoren etabliert werden, welche den Einfluss der Laufleistung und der Umgebungstemperatur auf die Emissionen berücksichtigt. Zudem besteht ein Standardfahrzyklus von HBEFA aus einem Vorkonditionierungszyklus und einem Hauptzyklus. Da die in VISSIM generierten Fahrzyklen keinen Vorkonditionierungszyklus beinhalten, musste auch hier ein Korrekturfaktor ermittelt werden. Ganz allgemein garantiert der Vorkonditionierungszyklus, dass zu Beginn der Auswertung des Hauptzyklus die gewünschte Abgastemperatur vorliegt und diese auch in der Emissionsberechnung mittels PHEM ins Kalkül gezogen werden kann. Die nachstehenden Abbildungen stellen die Fahrzyklen für PKWs mit dem Bezugsjahr 2020 bei einem Tempolimit von 50 km/h auf Hauptverkehrsstraßen (HVS) für alle Verkehrszustände in separaten Diagrammen dar. Die Steigung beträgt jeweils 0 %. Es ist ersichtlich, dass manche Fahrzyklen aus identen Segmenten zusammengesetzt sind, welche öfters hintereinander folgen. In den Verkehrszuständen flüssig, dicht und gesättigt ist der Hauptzyklus ident mit dem Vorkonditionierungszyklus. Der Vorkonditionierungszyklus für die Verkehrssituation von Stop&Go I entspricht dem Vorkonditionierungszyklus der Verkehrssituation dicht und der Verkehrssituation von Stop&Go II entspricht dem Vorkonditionierungszyklus der Verkehrssituation gesättigt. Die Dauer der Fahrzyklen der einzelnen Verkehrszustände bestehend aus dem Vorkonditionierungszyklus und dem Hauptzyklus ist zudem unterschiedlich lang. Der Vorkonditionierungszyklus beeinflusst die Emissionsberechnungen des Hauptzyklus, denn da dieser die Abgastemperatur zu Beginn der Emissionsberechnung bestimmt. Des Weiteren ist anzumerken, dass bei allen Verkehrszuständen die Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h deutlich überschritten wird (Ericsson et al. 2019). Dieser Umstand muss durch aus kritisch betrachtet werden, da die HBEFA-Fahrzyklen einen durchschnittlichen Fahrzyklus für die jeweilige Verkehrssituation abbilden soll, im Durchschnitt jedoch nur ein geringer Anteil der Fahrzeuge die zulässige Geschwindigkeit überschreitet, gerade wenn der Verkehrszustand nicht im flüssigen Bereich liegt. Die durchschnittlichen Fahrzyklen aus HBEFA spiegeln daher eher eine relativ aggressive Fahrweise wieder, welche hohe maximale Geschwindigkeitsbereiche beinhalten.

Abbildung 33: Fahrzyklus für Verkehrssituation flüssig, Deutschland, Pkw, 2020, Urban, 50 km/h, HVS und 0 % Steigung



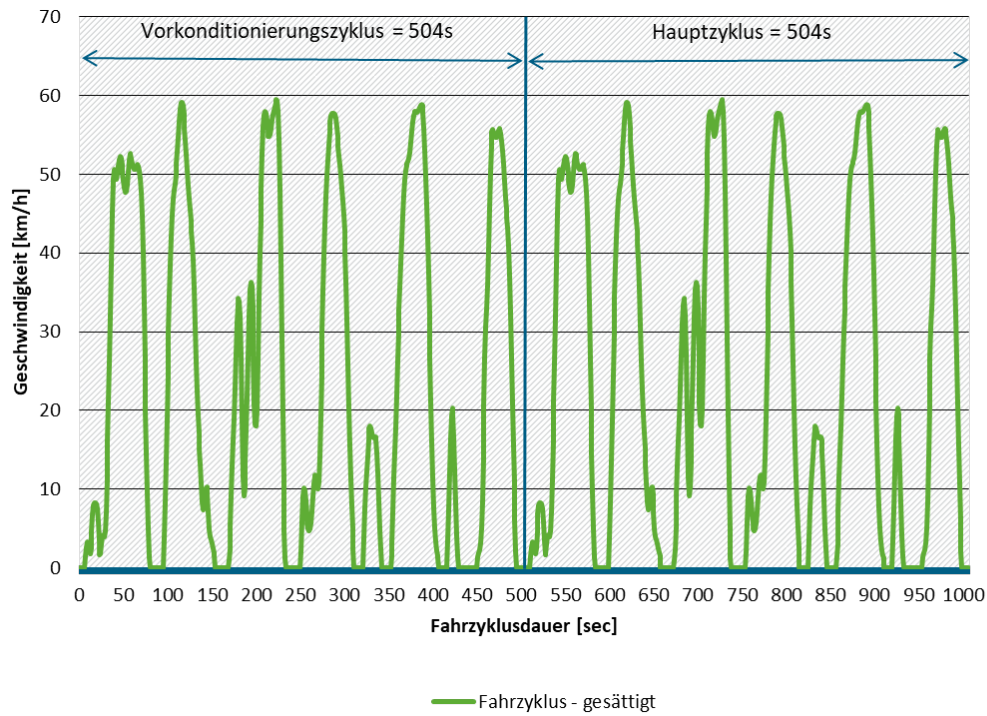
Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Graz

Abbildung 34: Fahrzyklus für Verkehrssituation dicht, Deutschland, Pkw, 2020, Urban, 50 km/h, HVS und 0 % Steigung



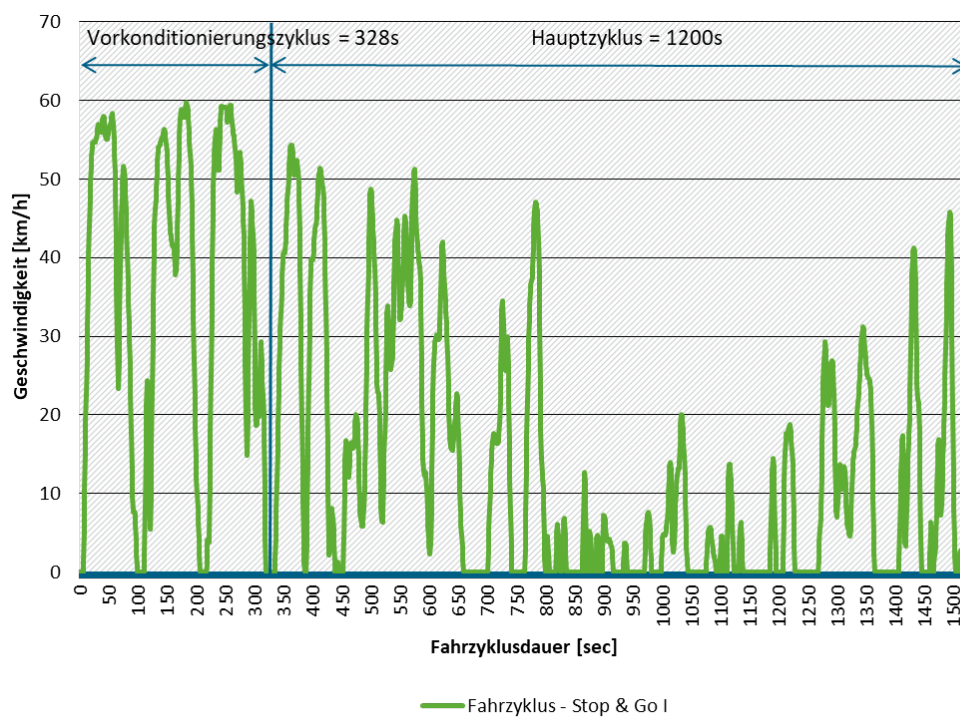
Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Graz

Abbildung 35: Fahrzyklus für Verkehrssituation gesättigt, Deutschland, Pkw, 2020, Urban, 50 km/h, HVS und 0 % Steigung



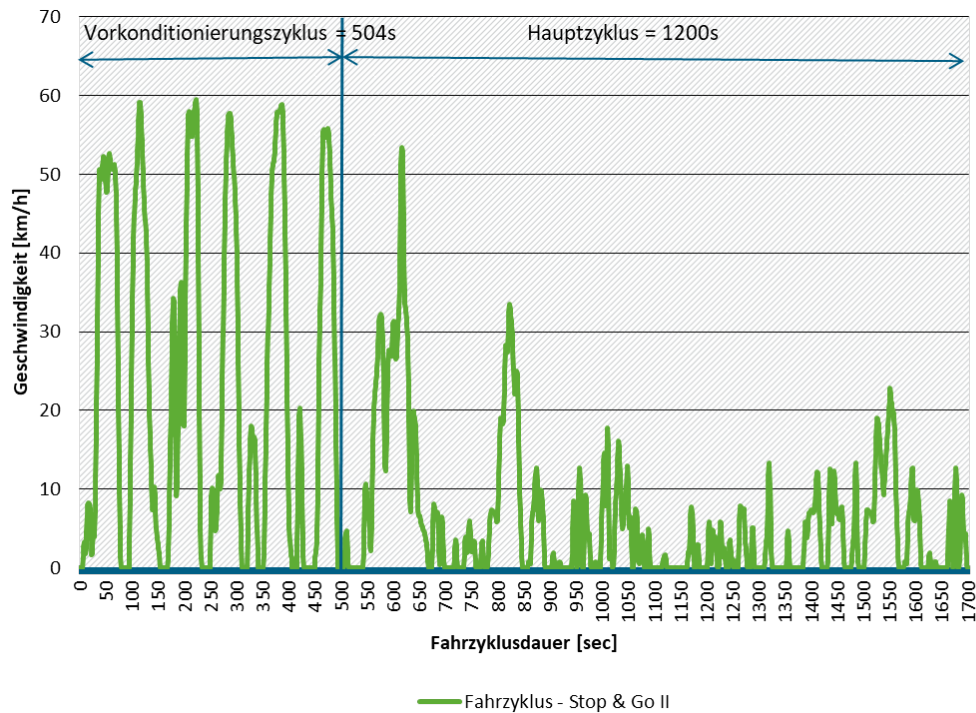
Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Graz

Abbildung 36: Fahrzyklus für Verkehrssituation Stop&Go, Deutschland, Pkw, 2020, Urban, 50 km/h, HVS und 0 % Steigung



Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Graz

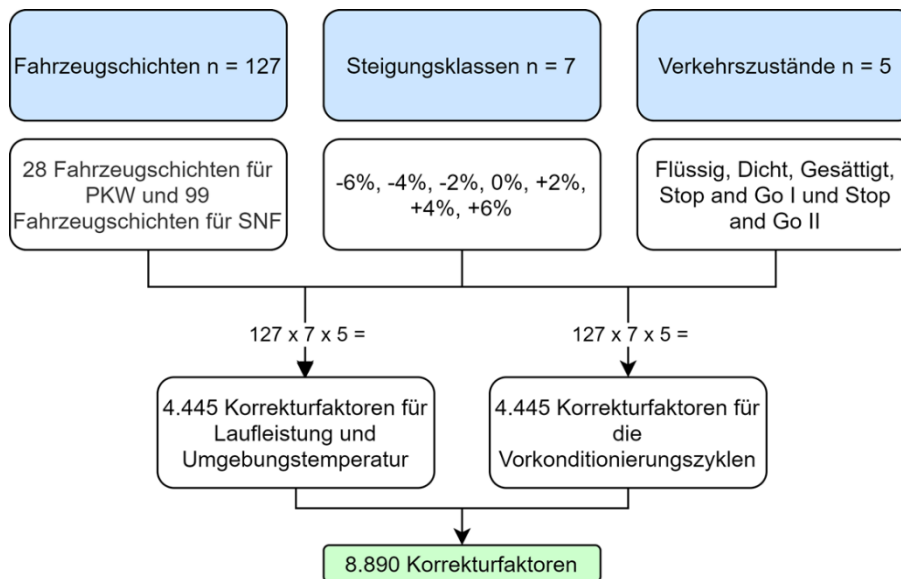
Abbildung 37: Fahrzyklus für Verkehrssituation Stop&Go II, Deutschland, Pkw, 2020, Urban, 50 km/h, HVS und 0 % Steigung



Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Graz

Äußere Einflüsse wie die Umgebungstemperatur und die Laufleistung der Fahrzeuge haben zudem eine Auswirkung auf die produzierten Emissionen. Daher wurden für die Laufleistung, die Umgebungstemperatur und für die Vorkonditionierungszyklen jeweils 4.445 Korrekturfaktoren generiert. Diese Anzahl resultiert daraus, da ein Korrekturfaktor pro Fahrzeugschicht (28 bei Pkw plus 99 bei SNF), für jeden Verkehrszustand (fünf Verkehrszustände von Flüssig bis Stop&Go II) und für jede Steigungsklasse (sieben Steigungsklassen von -6 % bis +6 % in zwei Prozentschritten) notwendig wurde. In Summe wurden damit 8.890 Korrekturfaktoren berechnet, um die Vergleichbarkeit zwischen den PHEM/VISSIM Ergebnissen und den HBEFA-Tabellenwerten zu garantieren. Nähere Ausfertigungen zu diesem Themenkomplex finden sich auch Trenkwalder 2021.

Abbildung 38: Übersicht der Korrekturfaktoren für Laufleistung, Umgebungstemperatur und Vorkonditionierungszyklen



Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Graz

2.5.1.3 Emissionsergebnisse des fiktiven signalisierten Straßenzugs

Emissionsergebnisse für 5 % Schwerverkehr und 0 % Steigung

Die mittels PHEM berechneten Emissionen werden in nachstehenden Tabellen den Emissionsfaktoren der HBEFA-Tabellenwerte gegenübergestellt. In den Berechnungen der prozentuellen Differenzen stellen die Emissionswerte aus der PHEM-Berechnung den Referenzwert von 100 % dar. Damit sagt ein negatives Vorzeichen in der Differenz-Darstellung aus, dass die PHEM-Emissionsergebnisse höhere Emissionen aufweist als jene der HBEFA-Tabellenwerte. Die Emissionswerte wurden für die Pkw- und Lkw-Flotte (SNF) zudem auch separat berechnet und tabellarisch erfasst. Auch die aggregierten Resultate der gesamten Fahrzeugflotte finden sich in nachstehender Tabelle wieder, wobei hier die Gewichtung anhand des Schwerverkehrsanteil von 5 % vorgenommen wurde. Der Schwerverkehrsanteil von 5 % auf urbanen, signalisierten Hauptverkehrsstraßen entspricht einer typischen Flottenzusammensetzung auf diesem Streckentyp. Die mittels VISSIM/PHEM generierten Emissionswerte werden in nachstehender Tabelle den HBEFA-Tabellenwerten von Hauptverkehrsstraßen gegenübergestellt. Da in HBEFA auch die Emissionsfaktoren für Sammelstraßen und urbane Fernstraßen tabellarisch vorliegen, wurden diese ebenso mit den VISSIM/PHEM Emissionsergebnissen verglichen.

Tendenziell ergaben sich die Emissionswerte aus der PHEM-Emissionsberechnung höhere Werte als in den HBEFA-Vergleichstabellen für Hauptverkehrsstraßen, Sammelstraßen und urbane Fernstraßen. Diese Aussage gilt für alle in dieser Studie betrachteten Emissionen CO₂, NO_x, sowie PM. Zu Abweichungen dieser Aussage kommt es bei den Verkehrszuständen Flüssig und Gesättigt wenn man die Lkw-Flotte betrachtet, da diese bei den HBEFA-tabellenwerten höhere Stickstoffoxid- sowie Feinstaubemissionen aufweisen. Die größten prozentuellen Abweichungen bei den betrachteten Emissionen sind in den Verkehrszuständen Flüssig, Stop&Go I und vor allem Stop&Go II zu verzeichnen. Die Verkehrszustände Dicht und Gesättigt weisen die geringsten prozentuellen Abweichungen auf, da die HBEFA-Tabellenwerte den in VISSIM/PHEM berechneten Emissionskennwerten am ehesten entsprechen.

Tabelle 40: Emissionen für 5 % Schwerverkehr und 0 % Steigung für Hauptverkehrsstraßen

| | | Flüssig | Dicht | Gesättigt | Stop&Go | Stop&Go II |
|----------------------------|---------|---------|---------|-----------|---------|------------|
| CO ₂ Pkw [g/km] | PHEM | 171,38 | 178,14 | 231,79 | 292,60 | 500,53 |
| | HBEFA | 153,03 | 163,48 | 202,96 | 263,88 | 428,14 |
| | Abw [%] | -10,71 | -8,23 | -12,44 | -9,81 | -14,46 |
| NO _x Pkw [g/km] | PHEM | 0,44 | 0,43 | 0,65 | 0,87 | 1,16 |
| | HBEFA | 0,32 | 0,40 | 0,47 | 0,55 | 0,78 |
| | Abw [%] | -28,69 | -6,14 | -28,29 | -37,16 | -32,64 |
| PM Pkw [g/km] | PHEM | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 |
| | HBEFA | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 |
| | Abw [%] | -48,37 | -20,42 | -13,62 | -32,41 | -32,74 |
| CO ₂ SNF [g/km] | PHEM | 999,03 | 1008,53 | 1346,59 | 1972,02 | 2392,44 |
| | HBEFA | 615,79 | 693,48 | 1201,86 | 1430,17 | 1741,65 |
| | Abw [%] | -38,36 | -31,24 | -10,75 | -27,48 | -27,20 |
| NO _x SNF [g/km] | PHEM | 2,13 | 3,63 | 4,54 | 7,91 | 13,42 |
| | HBEFA | 2,24 | 2,58 | 4,71 | 6,68 | 10,24 |
| | Abw [%] | 5,15 | -28,88 | 3,73 | -15,53 | -23,69 |
| PM SNF [g/km] | PHEM | 0,02 | 0,04 | 0,04 | 0,07 | 0,14 |
| | HBEFA | 0,03 | 0,03 | 0,05 | 0,07 | 0,11 |
| | Abw [%] | 11,68 | -15,13 | 17,78 | -1,77 | -20,19 |
| CO ₂ [g/km] | PHEM | 211,98 | 221,34 | 286,85 | 377,10 | 600,51 |
| | HBEFA | 176,17 | 189,98 | 252,91 | 322,19 | 493,82 |
| | Abw [%] | -16,89 | -14,17 | -11,83 | -14,56 | -17,77 |
| NO _x [g/km] | PHEM | 0,53 | 0,59 | 0,84 | 1,23 | 1,81 |
| | HBEFA | 0,41 | 0,51 | 0,68 | 0,85 | 1,26 |
| | Abw [%] | -21,61 | -14,14 | -19,46 | -30,30 | -30,62 |
| PM [g/km] | PHEM | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 |
| | HBEFA | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| | Abw [%] | -37,16 | -19,66 | -3,43 | -22,32 | -29,34 |

Tabelle 41: Emissionen für 5 % Schwerverkehr und 0 % Steigung für Sammelstraßen

| | | Flüssig | Dicht | Gesättigt | Stop&Go | Stop&Go II |
|----------------------------|---------|---------|---------|-----------|---------|------------|
| CO ₂ Pkw [g/km] | PHEM | 171,38 | 178,14 | 231,79 | 292,60 | 500,53 |
| | HBEFA | 146,36 | 167,58 | 213,23 | 263,91 | 428,12 |
| | Abw [%] | -14,60 | -5,93 | -8,01 | -9,80 | -14,47 |
| NO _x Pkw [g/km] | PHEM | 0,44 | 0,43 | 0,65 | 0,87 | 1,16 |
| | HBEFA | 0,30 | 0,36 | 0,51 | 0,55 | 0,78 |
| | Abw [%] | -32,47 | -16,44 | -22,00 | -37,16 | -32,63 |
| PM Pkw [g/km] | PHEM | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 |
| | HBEFA | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 |
| | Abw [%] | -50,45 | -27,56 | -10,19 | -32,41 | -32,74 |
| CO ₂ SNF [g/km] | PHEM | 999,03 | 1008,53 | 1346,59 | 1972,02 | 2392,44 |
| | HBEFA | 605,71 | 693,49 | 1279,69 | 1430,26 | 1741,62 |
| | Abw [%] | -39,37 | -31,24 | -4,97 | -27,47 | -27,20 |
| NO _x SNF [g/km] | PHEM | 2,13 | 3,63 | 4,54 | 7,91 | 13,42 |
| | HBEFA | 2,29 | 2,71 | 4,92 | 6,72 | 10,06 |
| | Abw [%] | 7,36 | -25,48 | 8,32 | -15,03 | -25,04 |
| PM SNF [g/km] | PHEM | 0,02 | 0,04 | 0,04 | 0,07 | 0,14 |
| | HBEFA | 0,03 | 0,03 | 0,05 | 0,07 | 0,11 |
| | Abw [%] | 12,05 | -15,26 | 20,83 | -1,82 | -20,19 |
| CO ₂ [g/km] | PHEM | 211,98 | 221,34 | 286,85 | 377,10 | 600,51 |
| | HBEFA | 169,63 | 193,87 | 266,55 | 322,23 | 493,79 |
| | Abw [%] | -20,12 | -12,41 | -7,08 | -14,55 | -17,77 |
| NO _x [g/km] | PHEM | 0,53 | 0,59 | 0,84 | 1,23 | 1,81 |
| | HBEFA | 0,40 | 0,47 | 0,73 | 0,86 | 1,25 |
| | Abw [%] | -24,19 | -20,12 | -13,61 | -30,14 | -31,11 |
| PM [g/km] | PHEM | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 |
| | HBEFA | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| | Abw [%] | -38,79 | -24,56 | -0,11 | -22,34 | -29,35 |

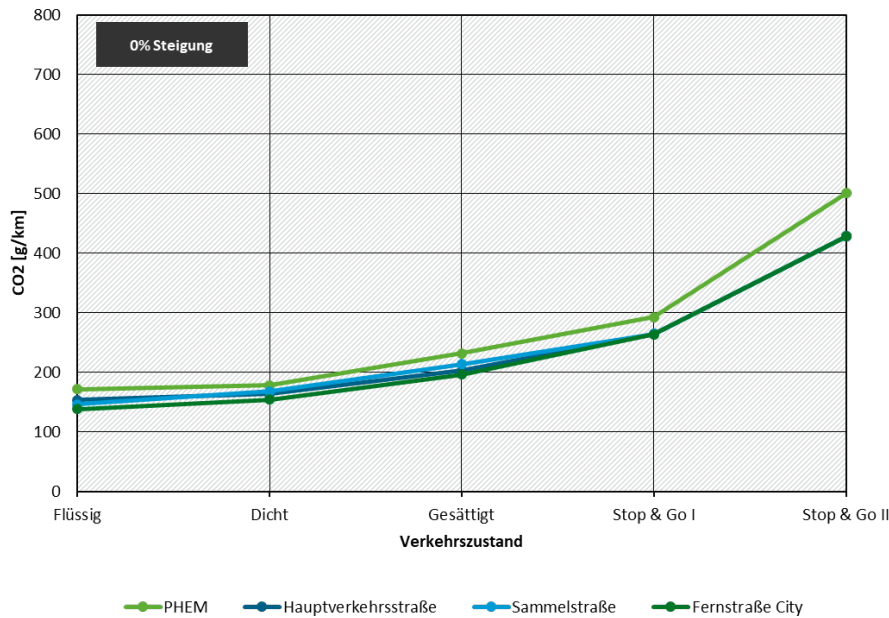
Tabelle 42: Emissionen für 5 % Schwerverkehr und 0 % Steigung für Fernstraße City

| | | Flüssig | Dicht | Gesättigt | Stop&Go | Stop&Go II |
|----------------------------|---------|---------|---------|-----------|---------|------------|
| CO ₂ Pkw [g/km] | PHEM | 171,38 | 178,14 | 231,79 | 292,60 | 500,53 |
| | HBEFA | 137,92 | 153,95 | 195,78 | 263,85 | 428,19 |
| | Abw [%] | -19,52 | -13,58 | -15,54 | -9,83 | -14,45 |
| NO _x Pkw [g/km] | PHEM | 0,44 | 0,43 | 0,65 | 0,87 | 1,16 |
| | HBEFA | 0,29 | 0,34 | 0,44 | 0,55 | 0,78 |
| | Abw [%] | -34,81 | -20,14 | -32,99 | -37,16 | -32,63 |
| PM Pkw [g/km] | PHEM | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 |
| | HBEFA | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 |
| | Abw [%] | -53,98 | -27,32 | -10,11 | -32,41 | -32,75 |
| CO ₂ SNF [g/km] | PHEM | 999,03 | 1008,53 | 1346,59 | 1972,02 | 2392,44 |
| | HBEFA | 625,81 | 746,85 | 831,55 | 1429,87 | 1742,98 |
| | Abw [%] | -37,36 | -25,95 | -38,25 | -27,49 | -27,15 |
| NO _x SNF [g/km] | PHEM | 2,13 | 3,63 | 4,54 | 7,91 | 13,42 |
| | HBEFA | 1,77 | 2,34 | 3,84 | 6,51 | 11,08 |
| | Abw [%] | -17,05 | -35,56 | -15,47 | -17,68 | -17,45 |
| PM SNF [g/km] | PHEM | 0,02 | 0,04 | 0,04 | 0,07 | 0,14 |
| | HBEFA | 0,03 | 0,03 | 0,04 | 0,07 | 0,11 |
| | Abw [%] | 5,23 | -21,20 | -4,46 | -2,09 | -20,15 |
| CO ₂ [g/km] | PHEM | 211,98 | 221,34 | 286,85 | 377,10 | 600,51 |
| | HBEFA | 162,31 | 183,59 | 227,57 | 322,15 | 493,93 |
| | Abw [%] | -23,43 | -17,06 | -20,67 | -14,57 | -17,75 |
| NO _x [g/km] | PHEM | 0,53 | 0,59 | 0,84 | 1,23 | 1,81 |
| | HBEFA | 0,36 | 0,44 | 0,61 | 0,85 | 1,30 |
| | Abw [%] | -31,01 | 25,74 | -28,08 | -30,99 | -28,30 |
| PM [g/km] | PHEM | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 |
| | HBEFA | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| | Abw [%] | -42,94 | 26,23 | -8,02 | -22,43 | -29,34 |

Die resultierenden Emissionen für CO₂, NO_x und PM der PHEM-Emissionsberechnungen sowie der HBEFA-Tabellenwerte wurden ebenso grafisch dargestellt. In den Diagrammen ist der Vergleich der Emissionsergebnisse aus PHEM wurde den HBEFA-Emissionsfaktoren für die Sammelstraße, Hauptverkehrsstraße und Fernstraße City für Deutschland mit dem Bezugsjahr Jahr 2020 für den urbanen Bereich und der zulässigen Geschwindigkeit von 50 km/h dargestellt.

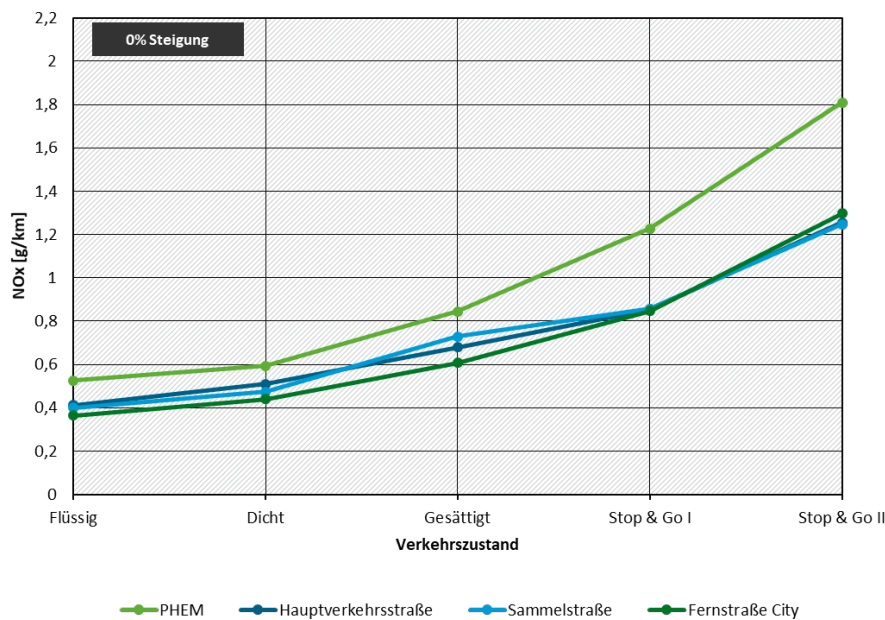
Alle Diagrammverläufe der Emissionswerte kommen einer quadratischen Funktion nahe und gerade bei stockendem, zähfließendem Verkehr und Stau-Situationen in den Verkehrszuständen Stop&Go steigen die Emissionen stark an. Wie die zuvor dargestellten Tabellenwerte bereits belegen so liegen die Emissionen der Graphen von PHEM von CO₂, NO_x und PM über jenen der HBEFA-Tabellenwerte. Im Verkehrszustand Stop&Go II sind dabei die größten absoluten Abweichungen festzustellen. Die Abweichungen der CO₂-Emissionen der PHEM-Berechnungsergebnisse zu den HBEFA-Tabellenwerte sind geringer als bei den Vergleichen der NO_x- und PM-Emissionen.

Abbildung 39: CO₂-Emissionen für 5 % Schwerverkehr; 0 % Steigung



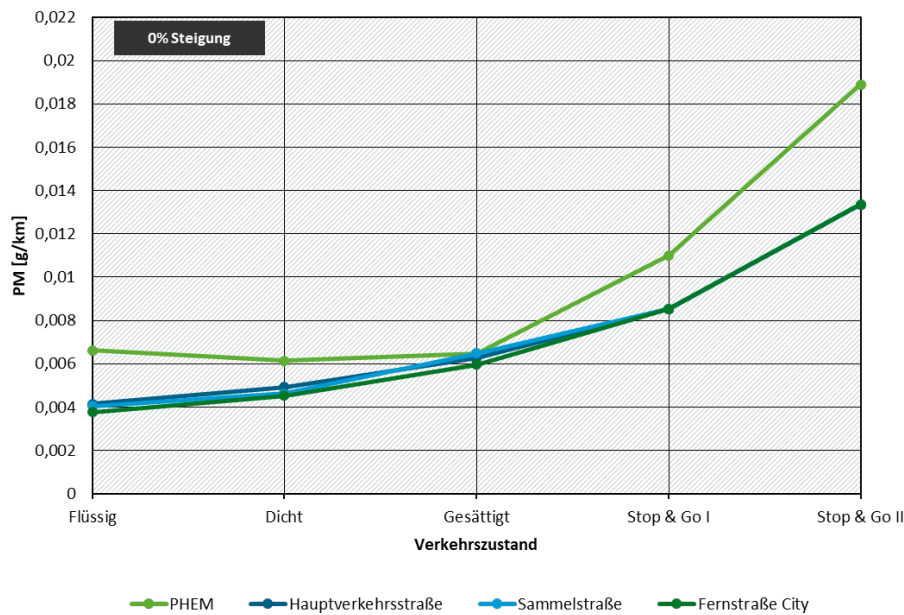
Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Graz

Abbildung 40: NO_x-Emissionen für 5 % Schwerverkehr; 0 % Steigung



Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Graz

Abbildung 41: PM-Emissionen für 5 % Schwerverkehr; 0 % Steigung

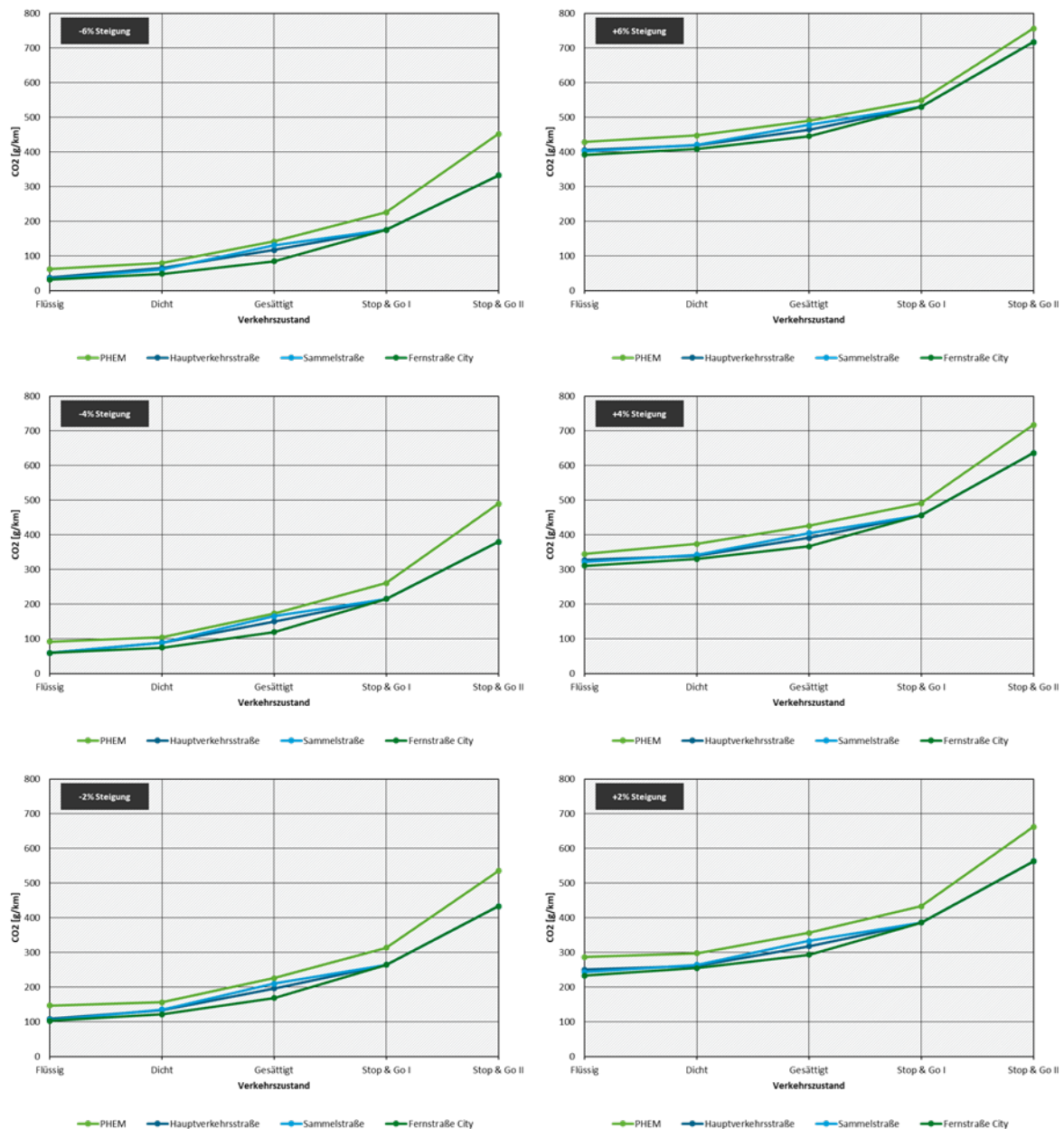


Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Graz

Emissionsergebnisse für 5 % Schwerverkehr und variierter Steigung

Neben den Emissionsberechnungen und Gegenüberstellungen für 0 % Steigung wurden auch die Emissionen für die Steigungen -6 %, -4 % und -2 % sowie +2 %, +4 % +6 % mittels PHEM berechnet und den Emissionsfaktoren aus HBEFA gegenübergestellt. Die aggregierte Gegenüberstellung findet sich in Abbildung 42 , wobei der Schwerverkehrsanteil von fünf Prozent beibehalten wurde, um ceteris paribus Bedingungen aufrecht zu erhalten. Die mit PHEM berechneten CO₂-Emissionen überschreiten stets die Emissionsfaktoren von HBEFA in allen fünf Verkehrszuständen und auch für alle sechs berücksichtigten Steigungsklassen. Die größten prozentuellen Abweichungen bei den Steigungsklassen mit Gefälle bei -6 %, -4 % und -2 % sind bei den Verkehrszuständen Flüssig, Stop&Go I und Stop&Go II ersichtlich.

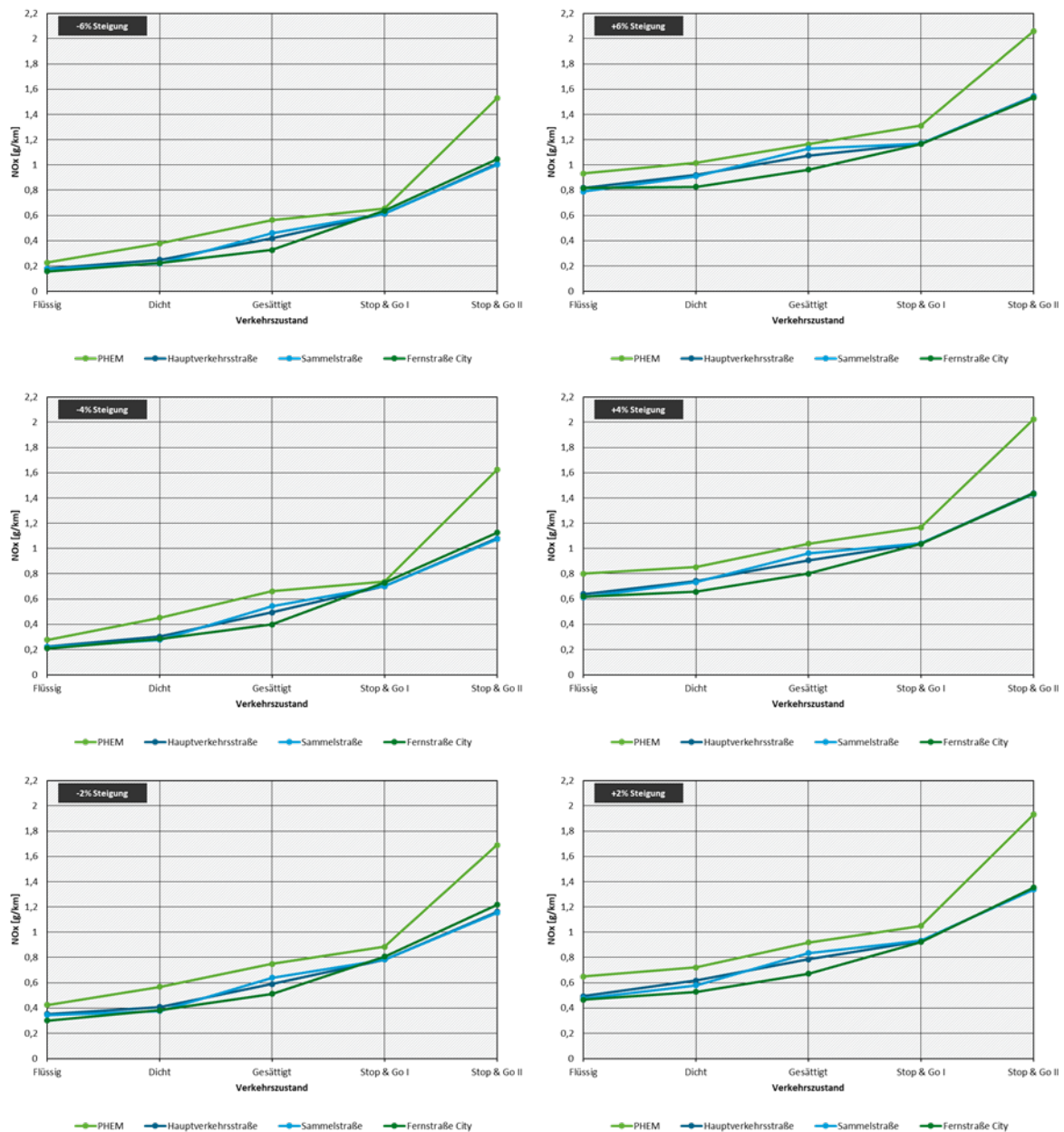
Abbildung 42: CO₂-Emissionen für 5 % Schwerverkehr und variiertes Steigung



Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Graz

Die mit PHEM berechneten NO_x-Emissionen und die Emissionsfaktoren von HBEFA sind in Abbildung 43 abgebildet. Beim Verkehrszustand Stop&Go II sind hier die größten prozentuellen Unterschiede und auch die größten absoluten Abweichungen zwischen den berechneten PHEM Ergebnissen und den HBEFA Emissionsfaktoren zu verzeichnen. Diese Erkenntnis manifestiert sich in allen Ergebnissen für alle Steigungsklassen. Die Emissionen der PHEM-Berechnungen liegen auch hier stets über jenen der HBEFA-Tabellenwerte. Die geringsten prozentuellen Unterschiede bei den NO_x-Emissionen ergeben sich für die Steigungsklassen -6 %, -4 %, -2 %, +2 % und +4 % beim Verkehrszustand Stop&Go I. Die geringsten prozentuellen Unterschiede für die Steigungsklasse +6 % tritt im Verkehrszustand Gesättigt auf.

Abbildung 43: NO_x-Emissionen für 5 % Schwerverkehr und variierter Steigung

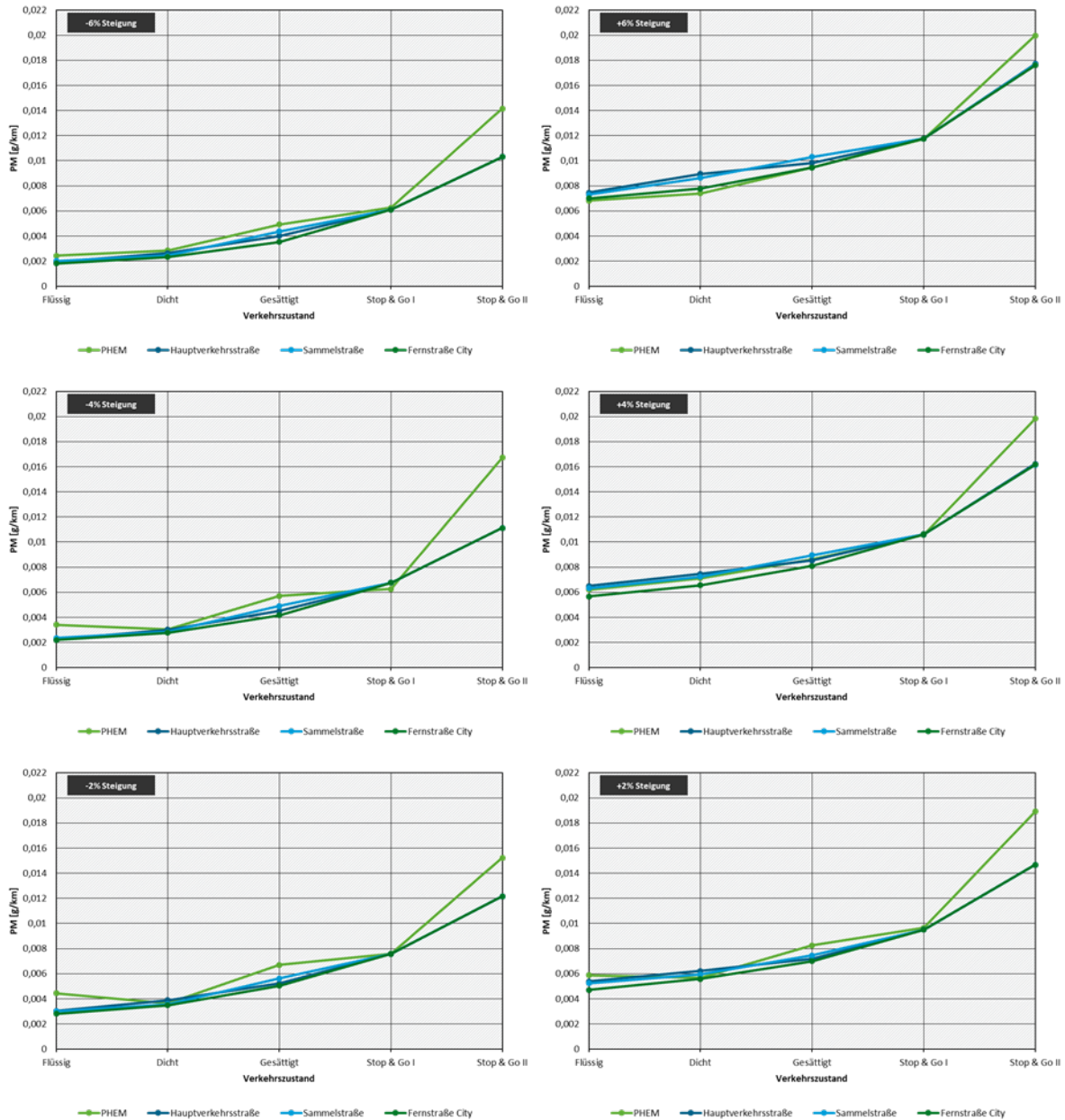


Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Graz

Die mit PM-Emissionen aus den PHEM-Emissionsberechnungen und die Emissionsfaktoren von HBEFA wurden in Abbildung 44 grafisch dargestellt. Die PM-Emissionsergebnisse aus den PHEM-Emissionsberechnungen überschreiten die Emissionsfaktoren von HBEFA vor allem bei den Verkehrszuständen Flüssig, Gesättigt und Stop&Go II. Bei den Verkehrszuständen Dicht und Stop&Go I sind die prozentuellen Differenzen der PM-Emissionen nur sehr gering und nicht immer liegen die PHEM-Emissionswerte über jenen der HBEFA-Emissionsfaktoren. Bei den Steigungsklassen -6 %, -4 %, -2 % und +2 % sind prozentuelle Unterschreitungen zu verzeichnen. Sehr geringe prozentuelle Abweichungen der PM-Emissionen zwischen PHEM und HBEFA für alle Verkehrszustände ergeben sich bei der Steigungsklasse +4 %. Lediglich im Verkehrszustand Stop&Go II unterschreitet der Emissionsfaktor von HBEFA die mit PHEM berechneten Emissionen relativ deutlich um -18,2 %. Die größten prozentuellen Differenzen der Feinstaubemissionen in der Steigungsklasse +6 % treten bei den Verkehrszuständen Dicht und

Stop&Go II auf. Beim Verkehrszustand Dicht weicht der PHEM-Emissionswert um 21,1 % vom Emissionsfaktor von HBEFA ab, wobei der PHEM-Emissionswert höher ist. Im Gegensatz dazu unterschreitet der Emissionsfaktor von HBEFA den Emissionswert der PHEM-Berechnung beim Verkehrszustand Stop&Go II um -11,3 %. Die geringsten prozentuellen Differenzen ergeben sich beim Verkehrszustand Stop&Go I. Diese liegen im Bereich von lediglich 0,2 %.

Abbildung 44: PM- Emissionen für 5 % Schwerverkehr und variierter Steigung



Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Graz

Die gesamten Ergebnisse der Emissionen mit berechneten prozentuellen Differenzen aller Steigungsklassen und für die unterschiedlichen Straßenkategorien sind in tabellarischer Form in Anhang A.4 einzusehen.

2.5.1.4 Zusammenfassung

Das Ziel einer Validierung der Emissionsfaktoren von HBEFA 4.1 für den urbanen Bereich wurde anhand eines Emissionsvergleichs aus PHEM-Emissionsergebnisse verfolgt. Um die HBEFA-Emissionsfaktoren genau zu validieren, wurde mit dem mikroskopischen Verkehrssimulationsprogramm VISSIM ein fiktiver signalisierter Straßenzug mit 5 signalisierten Knotenpunkten für eine einstreifige Hauptverkehrsstraße mit Tempolimit von 50 km/h modelliert, wobei sich der Knotenpunktabstand auf konstante 250m ergab. Anschließend wurden unterschiedliche HBEFA-Verkehrssituationen in VISSIM nachgebildet, wobei sich die Verkehrssituationen insbesondere durch die vorherrschenden Verkehrszustände und die zu berücksichtigende Steigung unterschieden. Die Verkehrssituationen galten in VISSIM als reproduziert, sobald die mittlere Reisegeschwindigkeit der VISSIM-Fahrzyklen den mittleren Geschwindigkeiten der HBEFA-Fahrzyklen entsprochen haben. Die mittlere Reisegeschwindigkeit wurde als Kenngröße für den Vergleich gewählt, weil diese laut Radl 2012 den größten erklärungsgrad auf die Emissionen hat. Für die generierten Fahrzyklen aus VISSIM wurden zudem auch die verkehrlichen Kenngrößen relative positive Beschleunigung und die prozentuelle Haltezeit berechnet und jenen der HBEFA-Zyklen iterativ angenähert, um mögliche Rückschlüsse auf der nachgeschalteten Emissionsberechnung machen zu können.

Die Emissionsberechnungen basierend auf den generierten Fahrzyklen aus VISSIM wurden mit dem mikroskopischen Emissionssimulationsprogramm PHEM durchgeführt, wobei die Fahrzeugtrajektorien in 1 Hz Schritten aufbereitet und auch die Anteile der Fahrzeugflottenzusammensetzung aus HBEFA in PHEM geladen wurden. Für die Emissionsberechnungen in PHEM wurden die Fahrzeugflotten-Anteile von Deutschland für das Jahr 2020 und für den urbanen Bereich aus HBEFA 4.1 gewählt. In weiterer Folge wurde bei der Gegenüberstellung der HBEFA-Emissionsfaktoren mit den PHEM-Emissionsberechnungen festgestellt, dass Korrekturfaktoren für die Laufleistung, Umgebungstemperatur und Vorkonditionierungszyklen notwendig sind. Diese Korrekturfaktoren wurden bei der Aufbereitung der Emissionsergebnisse der PHEM-Emissionsberechnung mitberücksichtigt. Eine genauere Ausführung der Erstellung der Korrekturfaktoren ist in Trenkwalder 2021 nachzulesen.

In vorliegender Studie wurden mehrere Simulationsszenarien erstellt und mit dem Fokus auf den sich ergebenden Emissionswerten der PHEM-Emissionsberechnungen ausgewertet. Beim Vergleich der PHEM-Emissionsergebnisse mit den HBEFA-Tabellenwerten wurde festgestellt, dass die resultierenden Emissionen im urbanen Bereich einer signalisierten Hauptverkehrsstraße aus VISSIM/PHEM in den meisten Fällen höher liegt, als die Emissionstabellenwerte aus HBEFA 4.1. Insbesondere in den Verkehrszuständen Flüssig und Stop&Go II sind diese Ergebnisse offensichtlich. Bei den Verkehrszuständen Dicht und Gesättigt wichen die berechneten PHEM-Emissionswerte nicht so stark von dem HBEFA-Emissionsfaktoren ab.

Die Differenzen bei den Emissionen zwischen PHEM-Emissionsberechnungen und HBEFA-Tabellenwerte sind bei allen Verkehrszuständen relativ hoch. Ein nicht von der Hand zu weisender Grund ist, dass die Standardfahrzyklen die den HBEFA-Tabellenwerten im urbanen Bereich zugrunde liegen sowohl signalisierte als auch nicht signalisierte Knotenpunkte abdecken müssen. Eine Trennung von signalisierten Streckenzügen zu nicht signalisierten Streckenzügen wurde noch in HBEFA 2.1 berücksichtigt, danach jedoch nicht mehr. In vorliegender Studie werden die HBEFA-Emissionen jedoch mit PHEM-Emissionswerten verglichen, die auf einer großen Anzahl von Fahrzyklen an einem signalisierten Streckenzug beruhen, wobei der Streckenzug keine vorfahrtsgerichteten Knotenpunkte enthält. Dies kann ein Mitgrund für die tendenziell geringeren HBEFA-Emissionen im Gegensatz zu den PHEM-

Emissionsergebnissen sein. Bei vorfahrtsregelungen Kreuzungen in Hauptfahrtrichtung ist seltener ein Halt notwendig und somit ergeben sich in der Regel weniger Anfahrvorgänge, welche die Emissionen stark beeinflussen. Es empfiehlt sich somit in weiteren Untersuchungen zu evaluieren inwiefern eine Berücksichtigung eines Fahrzyklus pro Verkehrssituation in den HBEFA-Tabellenwerten im urbanen Bereich ausreichend ist oder ob eine Unterscheidung des Signalisierungs-Grades in den HBEFA-Emissionsfaktoren sinnvoll wäre.

2.5.2 Validierungsergebnisse des BAB-Straßenzugs

Tabelle 43 zeigt die Ergebnisse und den Emissionsvergleich zwischen den durch PHEM ermittelten Emissionskennwerten in der Einheit g/km und den Tabellenwerten aus HBEFA für das Simulationsszenario >130 km/h bei 0 % Steigung. Die HBEFA-Tabellenwerte wurden hier anhand des modellierten und vorliegenden Schwerverkehrsanteils ermittelt. In den Verkehrszuständen flüssig und dicht liegen die durch VISSIM/PHEM ermittelten Emissionsfaktoren über den HBEFA-Tabellenwerten. Im gesättigten Verkehrszustand stellt sich durch die höhere Verkehrsbelastung ein harmonischer Verkehrsfluss ein, weswegen auch die PHEM Emissionsfaktoren geringer ausfallen als jene aus den HBEFA-Tabellenwerten. Die relativen Abweichungen liegen bei flüssigem Verkehrszustand für die Schadstoffe CO₂, NO_x und PM zwischen -9,2 % und -15,2 %, bei dichtem Verkehrszustand für zwischen -8,4 % und -11,1 % und bei gesättigten Verkehrszustand zwischen +2,3 % und +4,5 %.

Tabelle 43: Vergleich PHEM-Berechnung vs. HBEFA-Werte, >130 km/h und 0 % Steigung

| Schadstoff | Verkehrszustand | Emissionsfaktoren in g/km | | | Rel. Abweichung |
|-----------------|-----------------|---------------------------|----------|-----------|-----------------|
| | | PHEM | HBEFA | Differenz | |
| CO ₂ | flüssig | 306,3164 | 277,9976 | -28,3188 | -9,2% |
| NO _x | flüssig | 0,8837 | 0,7491 | -0,1347 | -15,2% |
| PM | flüssig | 0,0097 | 0,0082 | -0,0014 | -14,8% |
| CO ₂ | dicht | 287,2986 | 263,2265 | -24,0721 | -8,4% |
| NO _x | dicht | 0,7616 | 0,6767 | -0,0849 | -11,1% |
| PM | dicht | 0,0083 | 0,0074 | -0,0009 | -10,5% |
| CO ₂ | gesättigt | 264,0133 | 271,7310 | 7,7178 | 2,9% |
| NO _x | gesättigt | 0,6309 | 0,6595 | 0,0286 | 4,5% |
| PM | gesättigt | 0,0068 | 0,0070 | 0,0002 | 2,3% |

Tabelle 44 zeigt die Emissionsfaktoren für das Simulationsszenario 120 km/h bei 0 % Steigung. Im Vergleich zu Tabelle 43 fallen die Emissionsfaktoren geringer aus, da das Geschwindigkeitsniveau geringer ist und auch die Wunschgeschwindigkeitsverteilungen nicht so stark streuen. Auch hier liegen die durch PHEM/VISSIM berechneten Emissionsfaktoren zu meist über jenen der HBEFA-Tabellenwerte außer im gesättigten Verkehrszustand.

Tabelle 44: Vergleich PHEM-Berechnung vs. HBEFA-Werte, 120 km/h und 0 % Steigung

| Schadstoff | Verkehrszustand | Emissionsfaktoren in g/km | | | Rel. Abweichung |
|-----------------|-----------------|---------------------------|----------|-----------|-----------------|
| | | PHEM | HBEFA | Differenz | |
| CO ₂ | flüssig | 271,2654 | 240,9732 | -30,2922 | -11,2% |
| NO _x | flüssig | 0,5697 | 0,4785 | -0,0912 | -16,0% |
| PM | flüssig | 0,0075 | 0,0065 | -0,0011 | -14,1% |
| CO ₂ | dicht | 254,1746 | 230,5903 | -23,5843 | -9,3% |
| NO _x | dicht | 0,5319 | 0,4610 | -0,0709 | -13,3% |
| PM | dicht | 0,0066 | 0,0059 | -0,0008 | -11,4% |
| CO ₂ | gesättigt | 264,3625 | 263,9467 | -0,4158 | -0,2% |
| NO _x | gesättigt | 0,6020 | 0,5795 | -0,0225 | -3,7% |
| PM | gesättigt | 0,0062 | 0,0061 | -0,0001 | -2,1% |

Der Emissionsvergleich der PHEM-Berechnungsergebnisse und der HBEFA-Werte für das Geschwindigkeitslimit bei 100 km/h und 0 % Steigung ist in Tabelle 45 ersichtlich. Hier sind die durch PHEM ermittelten Emissionsfaktoren durchwegs höher als jene der HBEFA-Tabellenwerte, wobei die geringste relative Abweichung wie bereits zuvor für den gesättigten Verkehrszustand auftritt. Die relativen Abweichungen sind für NO_x im Allgemeinen am höchsten, während die CO₂ Emissionsfaktoren zwischen den PHEM- und HBEFA-Werten die beste Übereinstimmung erzielen.

Tabelle 45: Vergleich PHEM-Berechnung vs. HBEFA-Werte, 100 km/h und 0 % Steigung

| Schadstoff | Verkehrszustand | Emissionsfaktoren in g/km | | | Rel. Abweichung |
|-----------------|-----------------|---------------------------|----------|-----------|-----------------|
| | | PHEM | HBEFA | Differenz | |
| CO ₂ | flüssig | 247,1841 | 219,1112 | -28,0729 | -11,4% |
| NO _x | flüssig | 0,4698 | 0,3711 | -0,0987 | -21,0% |
| PM | flüssig | 0,0060 | 0,0052 | -0,0008 | -13,1% |
| CO ₂ | dicht | 227,1841 | 213,7728 | -13,4113 | -5,9% |
| NO _x | dicht | 0,4516 | 0,3859 | -0,0657 | -14,6% |
| PM | dicht | 0,0057 | 0,0051 | -0,0007 | -11,7% |
| CO ₂ | gesättigt | 269,5312 | 256,9628 | -12,5684 | -4,7% |
| NO _x | gesättigt | 0,6010 | 0,5361 | -0,0649 | -10,8% |
| PM | gesättigt | 0,0061 | 0,0056 | -0,0005 | -8,2% |

Neben den Simulationsszenarien mit 0 % Steigung wurde auch die Steigungsklasse von +4 % simuliert, um den Einfluss der Steigung auf die Emissionsfaktoren und deren Vergleich greifbar zu machen.

Tabelle 46: Vergleich PHEM-Berechnung vs. HBEFA-Werte, >130 km/h und +4 % Steigung

| Schadstoff | Verkehrszustand | Emissionsfaktoren in g/km | | | Rel. Abweichung |
|-----------------|-----------------|---------------------------|----------|-----------|-----------------|
| | | PHEM | HBEFA | Differenz | |
| CO ₂ | flüssig | 693,9344 | 625,4566 | -68,4778 | -9,9% |
| NO _x | flüssig | 1,7479 | 1,4672 | -0,2806 | -16,1% |
| PM | flüssig | 0,0184 | 0,0163 | -0,0021 | -11,2% |
| CO ₂ | dicht | 686,1793 | 603,1360 | -83,0433 | -12,1% |
| NO _x | dicht | 1,6478 | 1,3719 | -0,2759 | -16,7% |
| PM | dicht | 0,0162 | 0,0145 | -0,0018 | -10,8% |
| CO ₂ | gesättigt | 620,3647 | 569,7814 | -50,5833 | -8,2% |
| NO _x | gesättigt | 1,3585 | 1,1043 | -0,2542 | -18,7% |
| PM | gesättigt | 0,0132 | 0,0119 | -0,0012 | -9,4% |

Vergleicht man voranstehende Tabelle 46 für das Szenario >130 km/h mit +4% Steigung mit Tabelle 43 (Szenario >130 km/h mit 0 % Steigung) so erkennt man die deutlich höheren Emissionsfaktoren, welche durch die Steigung hervorgerufen wird. Die Werte liegen bei 4 % Steigung rund 50 % höher als ohne Berücksichtigung der Steigung. Die Emissionsfaktoren durch die PHEM-Berechnung liegt durchwegs höher als die HBEFA-Tabellenwerte, dabei liegen die relativen Abweichungen im Schwankungsbereich von -8,2 % bis -18,7 %.

Ergänzend dazu wurde auch die Steigung von +4 % bei einer Höchstgeschwindigkeit von 120 km/h simuliert und deren Ergebnisse in Tabelle 47 aufbereitet. Im Vergleich zu Tabelle 46 sind die absoluten Werte der Emissionsfaktoren geringer, da die Geschwindigkeiten geringer sind. Auch in diesem Szenario liegen die Emissionswerte der PHEM-Berechnung im höheren Bereich als die HBEFA-Emissionsfaktoren, wobei die relative Abweichung sich zwischen den Grenzen von -6,9 % und +19,0 % bewegt.

Tabelle 47: Vergleich PHEM-Berechnung vs. HBEFA-Werte, 120 km/h und +4 % Steigung

| Schadstoff | Verkehrszustand | Emissionsfaktoren in g/km | | | Rel. Abweichung |
|-----------------|-----------------|---------------------------|----------|-----------|-----------------|
| | | PHEM | HBEFA | Differenz | |
| CO ₂ | flüssig | 628,7135 | 579,0953 | -49,6181 | -7,9% |
| NO _x | flüssig | 1,4362 | 1,2444 | -0,1919 | -13,4% |
| PM | flüssig | 0,0142 | 0,0118 | -0,0024 | -16,6% |
| CO ₂ | dicht | 613,9724 | 563,6331 | -50,3394 | -8,2% |
| NO _x | dicht | 1,3537 | 1,0971 | -0,2566 | -19,0% |
| PM | dicht | 0,0123 | 0,0105 | -0,0018 | -14,5% |
| CO ₂ | gesättigt | 597,6348 | 556,2290 | -41,4058 | -6,9% |
| NO _x | gesättigt | 1,1772 | 0,9710 | -0,2062 | -17,5% |
| PM | gesättigt | 0,0113 | 0,0101 | -0,0012 | -10,3% |

Tabelle 48 komplementiert die gesammelten Ergebnisse der Szenarien mit +4 % Steigung und zeigt die PHEM-Emissionsfaktoren und die HBEFA-Emissionswerte bei einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h. Abermals liegen die PHEM-Emissionsfaktoren in einem höheren Bereich als die Emissionsfaktoren welche sich aus den HBEFA-Tabellenwerten errechnen lassen. Dabei reichen die relativen Abweichungen von -5,6 % bis -20,6 %, wobei die Abweichungen im flüssigen Verkehrszustand am höchsten sind. Im flüssigen Verkehrszustand beeinflussen sich die einzelnen Fahrzeuge in der Simulation nur im geringen Ausmaß, weswegen die Wunschgeschwindigkeiten insbesondere der Pkw erreicht werden kann. Die Wunschgeschwindigkeitsverteilung bei einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h liegt jedoch teilweise deutlich darüber und es können auch Fahrzeuge mit Wunschgeschwindigkeiten von bis zu 130 km/h in der Simulation erkannt werden.

Tabelle 48: Vergleich PHEM-Berechnung vs. HBEFA-Werte, 100 km/h und +4 % Steigung

| Schadstoff | Verkehrszustand | Emissionsfaktoren in g/km | | | Rel. Abweichung |
|-----------------|-----------------|---------------------------|----------|-----------|-----------------|
| | | PHEM | HBEFA | Differenz | |
| CO ₂ | flüssig | 614,2570 | 551,3940 | -62,8630 | -10,2% |
| NO _x | flüssig | 1,1839 | 0,9404 | -0,2435 | -20,6% |
| PM | flüssig | 0,0118 | 0,0095 | -0,0022 | -18,9% |
| CO ₂ | dicht | 592,6971 | 543,6083 | -49,0888 | -8,3% |
| NO _x | dicht | 1,0737 | 0,8844 | -0,1893 | -17,6% |
| PM | dicht | 0,0105 | 0,0091 | -0,0014 | -13,6% |
| CO ₂ | gesättigt | 581,9874 | 549,5589 | -32,4285 | -5,6% |
| NO _x | gesättigt | 1,0133 | 0,8652 | -0,1482 | -14,6% |
| PM | gesättigt | 0,0103 | 0,0091 | -0,0012 | -11,5% |

Es wurden nicht nur die Steigungsstrecken mit +4 % simuliert, sondern parallel dazu auch Gefällestrrecken mit einem Gefälle von -4 %. Tabelle 49 zeigt die Emissionsfaktoren für die Gefällestrrecke bei einer freien Geschwindigkeitwahl. Es wird deutlich, dass die PHEM-Emissionswerte höher sind als jene aus den HBEFA-Emissionstabellen. Die relativen Abweichungen der Emissionsfaktoren für die Gefällestrrecke liegen hier auch in einem höheren Bereich als bei der Steigungsstrrecke mit +4% (Tabelle 46) oder bei Steigung von 0 % (Tabelle 43). Dies relativen Abweichungen liegen demnach zwischen -10,8 % und -27,3 %, wobei die Abweichungen für NO_x tendenziell am höchsten sind.

Tabelle 49: Vergleich PHEM-Berechnung vs. HBEFA-Werte, >130 km/h und -4 % Steigung

| Schadstoff | Verkehrszustand | Emissionsfaktoren in g/km | | | Rel. Abweichung |
|-----------------|-----------------|---------------------------|---------|-----------|-----------------|
| | | PHEM | HBEFA | Differenz | |
| CO ₂ | flüssig | 98,3749 | 87,7170 | -10,6580 | -10,8% |
| NO _x | flüssig | 0,4134 | 0,3005 | -0,1129 | -27,3% |
| PM | flüssig | 0,0045 | 0,0037 | -0,0008 | -18,1% |
| CO ₂ | dicht | 91,9278 | 77,0035 | -14,9243 | -16,2% |
| NO _x | dicht | 0,3421 | 0,2661 | -0,0760 | -22,2% |
| PM | dicht | 0,0039 | 0,0033 | -0,0006 | -15,6% |
| CO ₂ | gesättigt | 112,8375 | 93,9544 | -18,8831 | -16,7% |
| NO _x | gesättigt | 0,5836 | 0,4574 | -0,1262 | -21,6% |
| PM | gesättigt | 0,0043 | 0,0035 | -0,0008 | -18,6% |

Tabelle 50 ergänzt die Ergebnisse für die Gefällestrrecken von -4 % Gefälle bei einer zulässigen Geschwindigkeit von 120 km/h. Auch hier sind die Emissionsfaktoren der VISSIM/PHEM-Berechnung höher als die HBEFA-Emissionsfaktoren und weichen zwischen -13,7 % und -27,8 % voneinander ab.

Tabelle 50: Vergleich PHEM-Berechnung vs. HBEFA-Werte, 120 km/h und -4 % Steigung

| Schadstoff | Verkehrszustand | Emissionsfaktoren in g/km | | | Rel. Abweichung |
|-----------------|-----------------|---------------------------|---------|-----------|-----------------|
| | | PHEM | HBEFA | Differenz | |
| CO ₂ | flüssig | 68,2548 | 55,9449 | -12,3099 | -18,0% |
| NO _x | flüssig | 0,2437 | 0,1759 | -0,0678 | -27,8% |
| PM | flüssig | 0,0031 | 0,0025 | -0,0006 | -19,4% |
| CO ₂ | dicht | 65,2548 | 50,3238 | -14,9311 | -22,9% |
| NO _x | dicht | 0,2275 | 0,1728 | -0,0547 | -24,0% |
| PM | dicht | 0,0028 | 0,0022 | -0,0006 | -22,0% |
| CO ₂ | gesättigt | 106,6583 | 89,7834 | -16,8748 | -15,8% |
| NO _x | gesättigt | 0,5202 | 0,4263 | -0,0939 | -18,1% |
| PM | gesättigt | 0,0037 | 0,0032 | -0,0005 | -13,7% |

Tabelle 51 stellt die Emissionsfaktoren für das Szenario der Gefällestrecke von -4 % mit 100 km/h Höchstgeschwindigkeit gegenüber. Die PHEM-Emissionsfaktoren liegen hier zwischen -14,2 % und -28 % höher als die HBEFA-Emissionswerte.

Tabelle 51: Vergleich PHEM-Berechnung vs. HBEFA-Werte, 100 km/h und -4 % Steigung

| Schadstoff | Verkehrszustand | Emissionsfaktoren in g/km | | | Rel. Abweichung |
|-----------------|-----------------|---------------------------|---------|-----------|-----------------|
| | | PHEM | HBEFA | Differenz | |
| CO ₂ | flüssig | 43,8544 | 35,7255 | -8,1289 | -18,5% |
| NO _x | flüssig | 0,1690 | 0,1308 | -0,0381 | -22,6% |
| PM | flüssig | 0,0020 | 0,0017 | -0,0004 | -18,0% |
| CO ₂ | dicht | 46,3647 | 35,4347 | -10,9300 | -23,6% |
| NO _x | dicht | 0,1775 | 0,1455 | -0,0319 | -18,0% |
| PM | dicht | 0,0019 | 0,0016 | -0,0003 | -15,2% |
| CO ₂ | gesättigt | 96,5441 | 80,5458 | -15,9983 | -16,6% |
| NO _x | gesättigt | 0,5560 | 0,4005 | -0,1556 | -28,0% |
| PM | gesättigt | 0,0033 | 0,0029 | -0,0005 | -14,2% |

2.6 Fazit

In diesem Kapitel wurden erstens die Methodik und die Ergebnisse einer Überarbeitung der Fahrleistungsanteile des HBEFA für die durchschnittlichen Verkehrssituationen in Deutschland dargestellt. Zweitens wurden ausgewählte Aspekte der hinterlegten Fahrzyklen und Emissionsfaktoren überprüft, nämlich die realisierten Geschwindigkeiten auf Autobahnen und die Emissionsfaktoren für ausgewählte Innerortsstrecken sowie einen Autobahnabschnitt.

Aus diesen Arbeiten lassen sich folgende Schlussfolgerungen zusammenfassen:

- ▶ Auf Grundlage der genutzten Daten konnte eine umfassende Neuberechnung der Fahrleistungsanteile je HBEFA-Verkehrssituation durchgeführt werden. Zu diesem Zweck wurden mehrere Datenquellen kombiniert, unterschiedliche Hochrechnungsansätze genutzt und eine Vielzahl spezifischer Annahmen getroffen. Die Methodik ist somit prinzipiell reproduzierbar, da aber voraussichtlich bei einer regelmäßigen Wiederholung der Berechnung nicht immer auf dieselben Datenquellen zurückgegriffen werden kann, wäre eine solche Wiederholung mit nahezu vergleichbarem Aufwand verbunden, wie er bei der vorliegenden Untersuchung betrieben wurde.
- ▶ Insbesondere die Zuweisung der Straßenkategorien stellte sich als problematisch dar, da einerseits die Definitionen des HBEFA keine klare Abgrenzung zulassen, andererseits bezogen auf die Fragestellung keine hinreichend gute Datenlage zum Straßennetz in Deutschland besteht. Beide Probleme treten besonders bei der Zuweisung des Gebietstyps zu Tage. Das in dieser Studie verwendete Kriterium der Flächennutzung war aus Sicht der Autoren die beste Möglichkeit, die Einteilung flächendeckend durchzuführen. Dennoch sind damit Ungenauigkeiten verbunden, die zumindest in Teilen durch zusätzliche Korrekturschritte behoben werden konnten. Die Aussagekraft dieses Kriteriums kann für Autobahnen und autobahnähnliche Strecken generell hinterfragt werden. Auch mit Blick auf die zulässige Höchstgeschwindigkeit ist die bestehende Datenlage nicht optimal.
Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass ein erster Schritt hin zu einer systematischen, regelmäßig wiederholbaren Auswertung der Fahrleistungen in Deutschland zum Zweck der Aktualisierung des HBEFA eine geeignete Straßennetzgrundlage wäre, die jene Informationen enthält, die eine eindeutige Zuordenbarkeit der HBEFA-Straßenkategorien ermöglichen.
- ▶ Hinsichtlich der Zuweisung der Verkehrszustände erscheint die gewählte Methodik als geeignet, sofern aggregierte FCD als Basis zur Verfügung steht. Wenn die Aggregation der Daten anhand der gefahrenen Geschwindigkeiten erfolgt, wäre vor allem in sehr niedrigen Geschwindigkeitsbereichen eine feinere Auflösung wünschenswert, da hier die Reisezeitverluste aber auch die Emissionsfaktoren überproportional hoch sind.
- ▶ Es wurden mehrere Straßenkategorien identifiziert, die – zumindest nach den im Rahmen der Untersuchung gewählten Kriterien – im deutschen Straßennetz häufig auftreten, für die im HBEFA derzeit noch keine Emissionsfaktoren hinterlegt sind. Dabei sind in erster Linie Fern- und Bundesstraßen in Agglomerationen mit einem Tempolimit von 50 km/h zu nennen. Weiterhin sind außerortsgelegene Erschließungs- bzw. Sammelstraßen ohne explizites Tempolimit (folglich mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h) nicht abgebildet. Zuletzt sind autobahnähnliche Straßen, auf denen Geschwindigkeiten von mehr als 100 km/h zulässig sind, zu nennen. Es ist anzunehmen, dass die Fahr- und Emissionscharakteristiken auf den genannten Straßenkategorien sehr ähnlich zu denen anderer Straßenkategorien sind, für die bereits Emissionsfaktoren

vorliegen. Im Rahmen der Arbeit wurde zwar eine Zuordnung vorgenommen, diese diene jedoch ausschließlich der weiteren Bearbeitung und Berechnung mittlerer Emissionsfaktoren im Rahmen dieser Untersuchung. Sie ersetzt keine systematische Untersuchung und Festlegung der Emissionsfaktoren für diese Straßenkategorien für zukünftige Versionen des HBEFA.

- ▶ Die Überprüfung der mittleren Emissionen über alle Verkehrssituationen (also die Anwendung der gesamtdurchschnittlichen aggregierten Verkehrssituation in HBEFA) zeigt, dass sich diese bei Verwendung der neu ermittelten Fahrleistungsanteile nur geringfügig von den Werten des HBEFA 4.1 unterscheiden. Vor dem Hintergrund der doch sehr stark veränderten Fahrleistungsaufteilungen zeigen sich die Emissionswerte damit als stabil.
- ▶ Mit Blick auf die realisierten Geschwindigkeiten auf Autobahnen zeigen die ausgewerteten FCD größere Anteile in hohen Geschwindigkeitsklassen als dies einerseits durch Löhe (2016) bei einer Auswertung von Zählstellendaten festgestellt wurde, andererseits auch gegenüber der mittleren Geschwindigkeiten, die im HBEFA auf Autobahnen ohne Geschwindigkeitsbeschränkung angenommen sind. Hinsichtlich der realisierten Geschwindigkeiten ist der Vergleich zwischen den mittleren Geschwindigkeiten der HBEFA-Fahrzyklen und denen der aggregierten Geschwindigkeitsperzentile der FCD allerdings nur bedingt aussagekräftig. Für die Überprüfung der Fahrzyklen stellen z. B. Trajektorien von Einzelfahrzeugen eine bessere Datengrundlage dar.
- ▶ Die Validierungsergebnisse ausgewählter Emissionswerte für den urbanen Raum zeigen, dass die Differenzen bei den Emissionen zwischen HBEFA und dem mikroskopischen Fahrzeugemissionsmodell PHEM relativ hoch sind. Dabei sind die Emissionswerte in HBEFA weitgehend niedriger als jene aus PHEM. Je nach Verkehrszustand liegen die mittleren Abweichungen einzelner Emissionsfaktoren im Bereich von 20 % bis 30 % und hängen stark von der Fahrdynamik der zugrundeliegenden HBEFA-Fahrzyklen und der in VISSIM simulierten Fahrzyklen ab.
- ▶ Auch die Vergleiche der Emissionsfaktoren der VISSIM/PHEM-Berechnung und der HBEFA-Tabellenwerte für einen ausgewählten BAB-Strecken zug der A8 zeigen, dass die Emissionswerte bei den PHEM-Berechnungen der einzelnen simulierten Fahrzeugtrajektorien höher sind als die HBEFA-Tabellenwerte. Die Abweichungen einzelner Emissionsfaktoren liegen hierbei weitgehend im Bereich von 10 % bis 20 %. Damit weichen die Emissionsfaktoren auf den Autobahnstrecken weniger stark ab als die Emissionsfaktoren im urbanen Bereich für signalisierte Streckenzüge.

3 Teil 2: Strukturierung und Quantifizierung von Maßnahmen zur Verstetigung des Verkehrs

3.1 Identifizierung und Strukturierung von Maßnahmen

Dieses Kapitel hat zum Ziel, das gesamte Spektrum der verfügbaren verkehrspolitischen und -planerischen Maßnahmen zu kategorisieren und zu beschreiben, die auf den Verkehrsfluss wirken und eine Minderung der durch den Straßenverkehr verursachten Luftschadstoff- und/oder Treibhausgasemissionen verursachen. Konkrete, aus Luftreinhalteplänen und anderen politischen Planwerken stammende Maßnahmen wurden zu Maßnahmentypen zusammengefasst. Diese werden hinsichtlich ihrer Wirkungsweisen klassifiziert und beschrieben. Im Zentrum steht dabei die verstetigende Wirkung der Maßnahmen, die aus diesem Grund zunächst definiert und von weiteren Wirkungsansätzen abgegrenzt werden soll.

3.1.1 Definition und Abgrenzung von Maßnahmen zur Verstetigung des Verkehrs

Die gesamten Emissionen einer Menge von Fahrzeugen, die eine bestimmte Strecke zurücklegen, lässt sich allgemein gemäß folgender Formel berechnen:

$$E = \sum_n \int_0^{l_n} f(x_n) dx_n$$

mit

| | |
|------------|---|
| E | Gesamtemissionen in einer Mengeneinheit (z.B. t_{CO_2}) |
| $n \in N$ | Fahrzeug aus der Menge aller betrachteter Fahrzeuge |
| l_n, x_n | Länge l der Strecke und aktuelle Position x eines Fahrzeugs n |
| $f(x_n)$ | spezifische Emissionen je Fahrzeugkilometer (z.B. g_{CO_2}/km) |

Die Emissionen ergeben sich also aus der Anzahl der Fahrzeuge, der jeweiligen zurückgelegten Streckenlänge und dem an jedem Ort der Strecke gültigen spezifischen Emissionsfaktor. Dabei ergibt sich der Emissionsfaktor einerseits aus den Eigenschaften des Fahrzeugs, andererseits aus dem Fahrzustand. Der Fahrzustand wiederum ist ein Resultat aus Streckeneigenschaften (insbesondere Steigung) und Fahrverhalten. Die drei relevantesten Größen, die das Fahrverhalten mit Blick auf die spezifischen Emissionen definieren, sind Geschwindigkeitsänderungen (Brems- und Beschleunigungsvorgänge), das eigentliche Geschwindigkeitsniveau und die Gangwahl. Diese drei Größen werden maßgeblich (aber nicht ausschließlich) durch die Umgebungssituation (hauptsächlich Streckeneigenschaften und weitere Verkehrsteilnehmende) bestimmt.

Folgende Anpassungen können zu einer Verringerung der Emissionen führen:

- Minderung der Fahrleistung (Zahl der Fahrzeuge und/oder zurückgelegte Strecke)
- Minderung der spezifischen fahrzeugseitigen Emissionen
- Veränderung der Streckeneigenschaften (insbesondere Steigung)
- Reduzierung der Brems- und Beschleunigungsvorgänge bzw. -intensität
- Veränderung des Geschwindigkeitsniveaus
- Veränderung der Gangwahl

Allgemein gilt, je gleichmäßiger die gefahrene Geschwindigkeit ist, desto geringer sind die spezifischen Emissionen. Unter einer Verstetigung des Verkehrs wird im Folgenden das Erreichen eines gleichmäßigeren Verkehrsflusses verstanden, also eine Minderung der Beschleunigungs- und Abbremsvorgänge. Wie oben beschrieben, wird das Fahrverhalten primär durch die fahrende Person, die Streckeneigenschaften und andere Verkehrsteilnehmende beeinflusst. Entsprechend können Maßnahmen zur Verstetigung an unterschiedlichen Stellen ansetzen. In der folgenden Klassifizierung der Maßnahmen werden diese unterschiedlichen Ansatzpunkte differenziert betrachtet. Dabei ist zu beachten, dass die Verstetigung ein Nebeneffekt einer anderen Wirkung sein kann, die ebenfalls auf die verkehrsbedingten Emissionen wirkt. Die beiden bedeutendsten Beispiele sind:

- ▶ Ein verändertes Geschwindigkeitsniveau (z.B. durch das Herabsetzen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit) hat auch zur Folge, dass weniger Beschleunigungsvorgänge erfolgen müssen, um die angestrebte Geschwindigkeit zu erreichen, respektive Bremsvorgänge, um die hohe Fahrgeschwindigkeit zu reduzieren.
- ▶ Eine reduzierte Fahrleistung (primäres Ziel vieler Maßnahmen) bedeutet eine geringere gegenseitige Beeinflussung unter den Verkehrsteilnehmenden, was in aller Regel zu einer Verflüssigung des Verkehrs führt.

Aus diesem Grund werden auch Maßnahmen, die eine indirekte Wirkung auf den Verkehrsfluss (insbesondere über eine reduzierte Fahrleistung) haben, in die Maßnahmenammlung aufgenommen. Dagegen werden Maßnahmen, deren primäres Ziel in einer Minderung der fahrzeugseitigen Emissionen besteht, nicht aufgeführt. Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass Maßnahmen dieser Kategorie (derzeit allen voran Emissionsstandards und Maßnahmen zur Förderung von Elektrofahrzeugen) für die Ziele des Klimaschutzes und der Luftreinhaltung von zentraler Bedeutung sind (siehe Infobox „Potenzialabschätzung und Einordnung von Verstetigungsmaßnahmen“). Da für die Luftreinhaltung die Menge der Luftschadstoffe am Immissionsort maßgebend ist, gibt es in diesem Bereich auch unterschiedliche transmissions- oder immissionsortbezogene Maßnahmen (z.B. verstärkte Straßenreinigung, Filtersäulen). Diese Art von Maßnahmen wird in den folgenden Ausführungen ebenfalls nicht berücksichtigt, da auch sie keinen Bezug zum Verkehrsfluss haben.

Potenzialabschätzung von Verstetigungsmaßnahmen im Kontext der Klimaziele

Das Potenzial von Maßnahmen im Verkehrssektor zum Klimaschutz und zur Luftreinhaltung ist primär auf drei Einflussgrößen zurückzuführen: die Menge der Fahrzeugkilometer, die technischen Eigenschaften der Fahrzeuge und der eingesetzten Kraftstoffe sowie die Fahrweise. Eine Verstetigung des Verkehrs wirkt auf die Fahrweise. Verglichen mit den Potenzialen aus veränderten Fahrzeug- und Kraftstoffeigenschaften bzw. aus einer Fahrleistungsreduktion sind die Potenziale einer Verstetigung beschränkt.

Dies lässt sich durch eine einfache Abschätzung anhand einer Veränderung der Verkehrszustände nach HBEFA veranschaulichen (Grundlage: HBEFA-Berechnung, Fahrleistungsaufteilung nach Kapitel 2.3). Ein hypothetischer Zustand von durchwegs flüssigen Verkehrszuständen in ganz Deutschland würde zu einer CO₂-Einsparung von rund 4 % im Straßenverkehr (100 % entspricht der gesamten Fahrleistung aller sechs Fahrzeugkategorien aus HBEFA in Deutschland) führen. Ein Zustand mit perfekter Stauvermeidung (Annahme: Verschiebung der Fahrleistung im Stop&Go-Zustand in einem gesättigten Verkehrszustand) würde zu einer Reduktion der Treibhausgasemissionen um rund 3 % führen. Das maximale Potenzial (Annahme: Auf jeder Straßenkategorie wird der Verkehrszustand mit dem niedrigsten CO₂-Emissionsfaktor gewählt) liegt mit 10 % deutlich höher. Dies ist dadurch begründet, dass speziell bei Strecken mit hohen zulässigen Höchstgeschwindigkeiten der flüssige Verkehrszustand nicht die niedrigsten Emissionsfaktoren aufweist, da bei hohen Geschwindigkeiten überproportional viel Energie verbraucht wird. Alle aufgezeigten Effekte dürften noch durch Rebound-Effekte abgeschwächt werden, die in der einfachen zugrundeliegenden Potenzialuntersuchung nicht berücksichtigt wurden.

Diese aufgezeigten Obergrenzen erreichbarer Einsparungen machen deutlich, dass durch eine Verbesserung des Verkehrsflusses nur ein verhältnismäßig kleiner Beitrag zum Erreichen der Klimaziele geleistet werden kann. Die deutlich größeren Beiträge werden in den Bereichen Fahrzeugtechnik und Verkehrsreduktion geleistet werden müssen. Nichtsdestotrotz sollte die Bedeutung einer verkehrlichen Verstetigung nicht unterschätzt werden, da die Potenziale in diesen Bereichen wiederum technisch bzw. gesellschaftlich begrenzt sind.

3.1.2 Identifikation von Maßnahmen

Zur Identifikation von Maßnahmen im Bereich der Luftreinhaltung wurde die MARLIS-Datenbank der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt 2021) ausgewertet. Aktuell enthält die Datenbank 6.885 Maßnahmen, wobei 6.444 aus Deutschland enthalten sind. Die meisten Maßnahmen stammen aus kommunalen Luftreinhalteplänen oder Green-City-Plänen. Rund ein Viertel der Maßnahmen bezieht sich auf eine fahrzeugseitige Minderung der Emissionsfaktoren durch Einflussnahme auf die Fahrzeugflotte. Etwa ein weiteres Viertel der Maßnahmen hatte keinen Verkehrsbezug oder war keiner Einzelmaßnahme klar zuordenbar, da es sich um konzeptionelle Maßnahmen oder Maßnahmenbündel handelte. Die verbleibenden Maßnahmen wurden in die Auswertung aufgenommen und zur Entwicklung der gewählten Kategorisierung (siehe Kapitel 3.1.3) genutzt.

Für verkehrlichen Maßnahmen, die zum Ziel des Klimaschutzes ergriffen wurden oder geplant sind, liegt keine vergleichbare Sammlung vor. Auch sind die rechtlichen Vorgaben und die Zuständigkeiten im deutschen föderalen System weniger eindeutig. Zusätzlich ist der Fokus – anders als bei der Luftreinhaltung – häufig nicht auf den Verkehr gerichtet. Andere Sektoren (Gebäude, Industrie, ...) spielen in den Konzepten zum Klimaschutz eine ebenso große, wenn nicht größere Rolle. Auf der Kommunal-, Landkreis- und Landesebene gibt es Pläne und Konzepte mit unterschiedlich konkret ausgearbeiteten Maßnahmenvorschlägen (Integrierte

Klimaschutzkonzepte, Masterpläne Klimaschutz, Klimaschutzpläne, Klimaschutzteilkonzepte). Auf den kleinräumigen politischen Ebenen (Kommunen, Landkreise, Regionen) sind insbesondere Klimaschutzteilkonzepte im Bereich der Mobilität interessant, da darin förderrechtlich ein Maßnahmenkatalog gefordert ist. Für die Identifikation verkehrlicher Maßnahmen wurden folgende Konzepte, die unterhalb der Bundesebene angesiedelt sind, ausgewertet:

- ▶ NRW – Klimaplan (Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen 2015)
- ▶ Thüringen – Integrierte Energie- und Klimaschutzstrategie (TMUEN 2019)
- ▶ Hamburg – Hamburger Klimaplan, erste Fortschreibung (Bürgerschaft der Freien und Hansestadt Hamburg 2019)
- ▶ Rheinland – Klimaschutzteilkonzept „Mobilität für das Rheinland“ (Kampmeier et al. 2016)
- ▶ Landkreis Neu-Ulm – Klimaschutz-Teilkonzept Mobilität (Pfaffinger et al. 2016)
- ▶ Landkreis Vulkaneifel – Klimaschutzteilkonzept „Nachhaltige Mobilität für den Landkreis Vulkaneifel“ (Ansbacher et al. 2019)
- ▶ Stuttgart – Masterplan 100 % Klimaschutz (Schrade et al. 2017)
- ▶ Ludwigshafen am Rhein – Klimaschutz-Teilkonzept „Klimafreundliche Mobilität“ (Kutzner et al. 2014)
- ▶ Böblingen – Klimaschutz-Teilkonzept „Klimafreundliche Mobilität für die Stadt Böblingen“ (Dünnebeil et al. 2017)
- ▶ Stralsund – Klimaschutz-Teilkonzept „Klimafreundliche Mobilität – Stralsund steigt um“ (IVAS 2015)

Auf Bundesebene gab es zum Zeitpunkt der Erstellung des Berichts noch kein sektorspezifisches Klimaschutzkonzept für den Verkehr. Im Klimaschutzplan der Bundesregierung sind mehrere Maßnahmen im Verkehrsbereich grob skizziert. Weiterhin existiert eine Vielzahl von Untersuchungen, in denen Pfade zur Erreichung der Klimaziele im Verkehrssektor aufgezeigt und damit verbundene Maßnahmen beschrieben werden. Auf Bundesebene wurden somit folgende Quellen geprüft:

- ▶ Klimaschutzplan 2050 – Klimapolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung (BMU 2016)
- ▶ Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050 (BMU 2019)
- ▶ Klimaschutz im Verkehr: Maßnahmen zur Erreichung des Sektorziels 2030 (Agora Verkehrswende 2018a)
- ▶ Renewbility III (Zimmer et al. 2016)
- ▶ Klimaschutzplan 2050 der deutschen Zivilgesellschaft (Adler et al. 2016)

3.1.3 Strukturierung in Maßnahmentypen und -kategorien

Aus den analysierten Quellen wurden insgesamt 46 Maßnahmentypen kondensiert, die jeweils auf unterschiedliche Weise auf die Emissionen des Straßenverkehrs, insbesondere unter Berücksichtigung der Wirkungsmechanismen im Bereich der Verkehrsverstetigung, wirken. Jede Maßnahme, die in einer der ausgewerteten Quellen gefunden wurde, wurde einem dieser Maßnahmentypen zugeordnet.

Die Maßnahmentypen wurden wiederum in Kategorien eingeteilt. Die grundlegende Struktur der Maßnahmenkategorien richtet sich nach der räumlichen Wirkung und dem primären Ansatzpunkt, über den eine Emissionsminderung erreicht werden soll. Für die Einteilung ist zunächst der primäre Wirkungsort entscheidend. Er wird an dieser Stelle als jener Raum definiert, in dem die angestrebten Verbesserungen eintreten sollen. Dieser kann sich vom gesamten räumlichen Wirkungsbereich der Maßnahme unterscheiden. Beispiel Ortsumfahrung: Der primäre Wirkungsort ist hier das Ortszentrum, in dem verkehrliche Entlastungen erreicht werden sollen, der gesamte Wirkungsbereich muss dagegen alle Netzelemente mit einbeziehen, auf denen Veränderungen in den relevanten verkehrlichen Kenngrößen auftreten, also mindestens die neugebaute Strecke einschließlich ihrer Zulaufstrecken.

Bei vielen Maßnahmentypen sind unterschiedliche räumliche Skalierungen möglich. Die Optimierung einer Lichtsignalanlagensteuerung kann ebenso einen einzelnen Knotenpunkt wie das gesamte Stadtgebiet betreffen. Grundsätzlich wird eine typische Maßnahme in diesen Fällen der kleinstmöglichen Skalierung zugerechnet, also in der Regel einer Strecke oder einem Knotenpunkt. Ein Teil der Maßnahmentypen hat keinen direkten Bezug zu bestimmten Netzelementen oder zu einem definierten Gebiet. Für diese Maßnahmen wird der primäre Wirkungsort als „Großräumig bzw. ohne spezifischen Raumbezug“ bezeichnet. In diesem Fall gibt es keine Unterscheidung zwischen primären Wirkungsort und gesamten Wirkungsbereich.

Ähnlich verhält es sich mit Blick auf die zweite Gliederungsebene, dem primären Ansatzpunkt bzw. Wirkungsmechanismus einer Maßnahme. Zum Zweck der Strukturierung wurde versucht, die Maßnahmentypen hinsichtlich der jeweiligen angestrebten Hauptwirkung zusammenzufassen. Da bei vielen Maßnahmen mehrere Ziele verfolgt werden und die Betonungen dieser Ziele in den Beschreibungen der analysierten Maßnahmen auch innerhalb eines Typs unterschiedlich sein können, kann die Zuordnung hier nicht eindeutig sein. Die Strukturierung der Maßnahmen ist damit als eine von mehreren möglichen Ausprägungen anzusehen.

Die Maßnahmentypen und die resultierende Struktur der Kategorien sind in Tabelle 52 zusammengefasst.

Tabelle 52: Strukturierung der Maßnahmen und Maßnahmenzahl je Kategorie

| Primärer Wirkungs-ort | Primärer Ansatzpunkt der Maßnahme | Maßnahmentypen |
|----------------------------|---|---|
| Maßnahmenort (Strecke) | Reduzierung von Störungen auf der Fahrbahn | <ul style="list-style-type: none"> • Be- und Entladevorgänge des Lieferverkehrs optimieren (Ladezonen, Ladekonzepte) • Park- und Halteverbote ausweisen und Verstöße kontrollieren • Müllabfuhr und Straßenreinigung zeitlich und räumlich optimieren • Baustellenmanagement • Straßenraum MIV-freundlich umgestalten (Fahrbahnverbreiterung, Rückbau Entschleunigungselemente, Busbuchten, ...) |
| | Erhöhung der Kapazität auf einzelnen Strecken | <ul style="list-style-type: none"> • Zusätzlichen Fahrstreifen für den MIV einrichten • Zulässige Höchstgeschwindigkeit verkehrabhängig steuern |
| | Lokale Beeinflussung des Fahrverhaltens und des Geschwindigkeitsniveaus | <ul style="list-style-type: none"> • Dynamische Hinweise und Informationen im Straßenraum geben • (Lkw-)Überholverbote anordnen • Zulässige Höchstgeschwindigkeit herabsetzen (lokal) |
| | Priorisierung des Umweltverbundes an Strecken | <ul style="list-style-type: none"> • Verkehrsberuhigung herbeiführen (Verkehrsberuhigter Bereich, Shared Space, stadt- und straßenbauliche Elemente, ...) • Fußgängerüberweg ausweisen (Zebrastreifen) • Fahrradverkehr im Mischverkehr aufwerten (Radstreifen, Fahrradstraße) • MIV-Verkehrsfläche umwidmen (Fahradweg, Busfahrstreifen, Umweltfahrstreifen, ...) |
| Maßnahmenort (Knotenpunkt) | Optimierung des Verkehrsflusses an Knotenpunkten | <ul style="list-style-type: none"> • LSA-Programm für MIV optimieren (Signalzeitenpläne überarbeiten, Grüne Welle, verkehrabhängige bzw. umweltsensitive Steuerung) • Knotenpunkt ohne LSA für den MIV optimieren • Knotenpunkt zu Kreisverkehrsplatz umgestalten • LSA-gesteuerten Knotenpunkt zu planfreien Knoten umgestalten • LSA-Nachtabstaltung einrichten |
| | Bevorrechtigung von ÖV, Rad- und Fußverkehr an Knotenpunkten | <ul style="list-style-type: none"> • ÖV-Bevorrechtigung an LSA-gesteuerten Knotenpunkten einrichten • Knotenpunktgestaltung und LSA-Programme für Rad- und Fußverkehr optimieren • Freigabeanforderung für zu Fuß Gehende an LSA-gesteuerten Knotenpunkten einrichten |
| Definiertes Gebiet | Reduzierung der MIV-Fahrleistung in einem definierten Gebiet | <ul style="list-style-type: none"> • Routenwahl-Information für den MIV (häufig Lkw) verbessern/bereitstellen (Wegweisung, Leitsystem, Navigationssystem, Netzkategorisierung) • Lkw-Fahrverbote und -beschränkungen ausweisen • Kleinräumige routenwahlbeeinflussende Netzgestaltung einsetzen (z.B. Einbahnstraßen, Abbiegeverbote) • Entlastungsstrecke (aus-)bauen (Ortsumfahrung, (Stadt-)Tunnel) • Pfortnerung an LSA einrichten |

| Primärer Wirkungs-ort | Primärer Ansatzpunkt der Maßnahme | Maßnahmentypen |
|---|---|--|
| | | <ul style="list-style-type: none"> • MIV-Nutzung in einem bestimmten Gebiet bepreisen (City-Maut) • Fahrverbote aussprechen (autofreie Tage, alternierende Fahrerlaubnis nach Nummernschild, Diesel-Fahrverbote, ...) |
| | Mit Bezug zum ruhenden Verkehr | <ul style="list-style-type: none"> • Öffentlichen Parkraum verknappen und/oder verteuern (Parkraummanagement bzw. -bewirtschaftung) • Parkleitsystem verbessern/aufbauen • Parkplatzkapazitäten außerhalb des Straßenraums ausbauen (z.B. Parkhäuser) |
| Großräumig bzw. ohne spezifischen Raumbezug | Minderung der MIV-Fahrleistung im Personenverkehr | <ul style="list-style-type: none"> • ÖPNV-Attraktivität steigern, ohne Einfluss im MIV-Verkehrsraum (Ausbau Angebot Schiene, Tarife, Komfort und Information, ...) • Angebot im ÖSPV ausweiten (Takt verdichten, Fahrplan ausweiten) • Fahrrad- und Fußverkehrs fördern (ohne Eingriff in den MIV-Verkehrsraum) • Fahrgemeinschaften fördern (Vermittlungsportale, Mitfahrbänke, ...) • Carsharing-Angebote fördern/betreiben • Intermodale Wege vereinfachen (Mobilitätsstationen, Park+Ride, Bike+Ride, ...) • Pkw-Verkehr verteuern (Maut, Kraftstoffsteuer, Kfz-Steuer, ...) • Öffentlichkeitsarbeit machen, Beratung und Information bieten |
| | Minderung der MIV-Fahrleistung im Güterverkehr | <ul style="list-style-type: none"> • Großräumigen Lkw-Verkehr reduzieren • Kleinräumigen Lieferverkehr besser organisieren (Mikrohub, Lastenräder, kooperative Belieferung, Paketstationen, ...) |
| | Beeinflussung des Fahrverhaltens und des Geschwindigkeitsniveaus ohne spezifischen räumlichen Bezug | <ul style="list-style-type: none"> • Fahrtraining für Privatpersonen oder Unternehmen fördern oder für ÖPNV-Fahrer*innen/städtische Mitarbeiter*innen anbieten • (Hoch-)automatisiertes und autonomes Fahren ermöglichen • Regelgeschwindigkeit innerorts reduzieren • Regelgeschwindigkeit außerorts und auf Autobahnen reduzieren |

Wie an der Benennung der Maßnahmentypen in Tabelle 52 zu erkennen ist, sind diese unterschiedlich konkret, da unterschiedlich große Gruppen von Maßnahmen zusammengefasst wurden. Die Differenzierung orientiert sich insbesondere daran, welche Wirkungsmechanismen mit Bezug auf den Verkehrsfluss vorliegen. Somit sind Eingriffe in den Straßenraum verhältnismäßig genau spezifiziert und abgegrenzt (z.B. „Zusätzlichen Fahrstreifen für den MIV einrichten“, siehe Kapitel 3.2.2). Maßnahmen deren primäres Ziel eine Minderung der MIV-Fahrleistung ist, sind dagegen breiter zusammengefasst (z.B. „Fahrrad- und Fußverkehrs fördern (ohne Eingriff in den MIV-Verkehrsraum)“, siehe Kapitel 3.2.9). In den Maßnahmenbeschreibungen werden Beispiele für konkrete Ausgestaltungen gegeben und Instrumente benannt, die zur Umsetzung zur Verfügung stehen oder benötigt würden.

3.1.4 Beschreibung und Wirkungsabschätzung

Für die Einordnung der Maßnahmen ist es nötig, zwischen den Wirkungsbereichen Luftreinhaltung und Klimaschutz eine klare Abgrenzung vorzunehmen (siehe dazu Kapitel 1.1 „Einordnung und Begrifflichkeiten“). Einzelne Maßnahmen können in den beiden Bereichen entgegengesetzte Wirkungen verursachen. Das anschaulichste Beispiel ist eine Ortsumfahrung, die durch induzierten und umwegigen Verkehr eine Zunahme der Treibhausgasemissionen bewirken kann, gleichzeitig aber zu einer deutlichen Minderung der Stickoxid- und Feinstaubbelastungen im umfahrenen Ortszentrum beiträgt.

Im Folgenden werden die identifizierten typischen Maßnahmen dargestellt, ihre verkehrlichen Effekte beschrieben, eine qualitative Bewertung ihrer Wirkungen für die Luftreinhaltung und den Klimaschutz vorgenommen, sowie auf die Möglichkeiten zur modellhaften Abbildung der Maßnahmen eingegangen. Dabei werden die in Tabelle 52 aufgeführten Maßnahmenkategorien kapitelweise zusammengefasst. Jedes Kapitel umfasst eine tabellarische Zusammenfassung in der die enthaltenen Maßnahmentypen systematisch hinsichtlich ihrer Wirkungen bewertet wurden. Die Tabellen sind im Anhang A.5 zusammengefasst dargestellt. Im Folgenden werden die in den Tabellen beschriebenen Maßnahmenwirkungen kurz erläutert.

Wirkungen, die zu einer Verstetigung des Verkehrs beitragen (nur am primären Wirkungsort differenziert betrachtet):

- ▶ **Weniger Störungen**
Die Wirkung ist hier, dass Ursachen für Brems-, Halte- und Beschleunigungsvorgänge auf der Strecke oder an einem Knotenpunkt beseitigt bzw. vermindert werden. Mögliche Hindernisse auf der freien Strecke sind parkende oder haltende Fahrzeuge und bestimmte geschwindigkeitsreduzierende Straßenraumelemente. An Knotenpunkten kann eine ungünstige LSA-Steuerung als verkehrsflussstörender Faktor angesehen werden. Der Wirkungsbereich umfasst keine auslastungsbedingten Effekte.
- ▶ **Verändertes Fahrverhalten**
Manche Maßnahmen zielen darauf ab, die Verkehrsteilnehmenden direkt zu einem energiesparenderem (bzw. auch emissionsarmen) Fahrverhalten zu bewegen, wobei das Vermeiden unnötiger Brems- und Beschleunigungsvorgänge eine wichtige Rolle spielt. Entsprechende Maßnahmen sind meist informativer oder bewusstseinsbildender Natur. Daneben wird die verstetigende Wirkung eines generell veränderten Geschwindigkeitsniveaus (i.d.R. durch eine veränderte zulässige Höchstgeschwindigkeit) unter dieser Wirkungskategorie geführt.
- ▶ **Erhöhte Kapazität (Angebot)**
Maßnahmen, deren verstetigende Wirkung durch eine angebotsseitig erhöhte Kapazität hervorgerufen werden, können baulicher Natur sein oder durch eine optimierte Knotenpunktsteuerung erreicht werden.
Eine klare Trennung zwischen Maßnahmen zur Vermeidung von Störungen und Maßnahmen zur Steigerung der angebotsseitigen Kapazität ist schwierig, da im weitesten Sinne jedes Hindernis als kapazitätsbeschränkend begriffen werden kann. Da die Unterscheidung zum Zweck der Systematisierung der Maßnahmen dennoch sinnvoll ist, wird die Abgrenzung so definiert, dass Maßnahmen, die auch eine verstetigende Wirkung zeigen, obwohl keine hohen Auslastungen vorliegen, als Abbau von Störungen interpretiert werden, während Maßnahmen, die ihre Effektivität nur bei hohen Auslastungen zeigen, als kapazitätssteigernd eingeordnet werden.

- ▶ **Reduzierte MIV-Fahrleistung**
Ebenso wie kapazitätssteigernde Maßnahmen, wirken Maßnahmen zur Reduzierung der Fahrleistung auslastungsbedingt insbesondere bei hohen Verkehrsstärken auf den Verkehrsfluss.

Weitere verkehrliche Effekte (werden sowohl am primären Wirkungsort als auch für den gesamten Wirkungsbereich aufgeführt):

- ▶ **Reduzierte MIV-Fahrleistung**
Eine reduzierte MIV-Fahrleistung wirkt nicht nur indirekt über den Verkehrsfluss und damit über die spezifischen Emissionswerte auf die Gesamtemissionen, sondern in erster Linie durch die eigentliche Minderung der zurückgelegten Fahrzeugkilometer. Maßnahmen, die bei dieser Wirkungskategorie ansetzen, haben in den allermeisten Fällen eine Veränderung der Fahrleistung in einem bestimmten Gebiet (durch veränderte Ziel- und Routenwahl) oder eine generelle Reduzierung der Fahrleistung im MIV (hauptsächlich durch eine veränderte Moduswahl) zum Ziel.
- ▶ **Niedrigere Emissionsfaktoren**
Hier werden alle Wirkungen, die die spezifischen Emissionsfaktoren beeinflussen, zusammengefasst, ausgenommen derer, die aus der Verkehrsverstetigung resultieren. Darunter fallen insbesondere veränderte Eigenschaften der Fahrzeugflotte sowie die direkten Effekte eines veränderten Geschwindigkeitsniveaus. Diese gehen – wie beschrieben – zwangsläufig mit einer Änderung des Verkehrsflusses einher, weshalb bei solchen Maßnahmen in der Kategorie „Verstetigter Verkehr durch verändertes Fahrverhalten“ ebenfalls Wirkungen ausgewiesen werden.
- ▶ **Verringerte Emissionen ÖV**
Durch den straßengebundenen öffentlichen Verkehr (ÖPSV) trägt auch der öffentliche Verkehr zu den Schadstoffemissionen des Straßenverkehrs bei. Sofern die Emissionen des ÖPSV maßgeblich durch eine Maßnahme beeinflusst werden, werden die Wirkungen in dieser Kategorie ausgewiesen. Dabei wird nicht wie beim MIV nach Ursache der Emissionsänderung unterschieden. Wirkungen von Maßnahmen auf die Emissionen des schienengebundenen ÖV sowie sonstiger nicht-straßengebundener Verkehrsmittel werden nicht berücksichtigt.
- ▶ **Verstetigter Verkehr im gesamten Wirkungsbereich**
Eine Maßnahme kann auch auf den Verkehrsfluss außerhalb ihres primären Wirkungsbereichs Einfluss haben. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn bauliche Maßnahmen zur Entlastung bestimmter Strecken oder Gebiete vorgenommen werden (z.B. Bau von Ortsumfahrungen).

Für jede typische Maßnahme wurde eine Einschätzung hinsichtlich der aufgeführten verkehrlichen Effekte vorgenommen, die in der jeweiligen Tabelle dargestellt wird. Die dazu verwendeten Symbole sind in Tabelle 53 erläutert.

Tabelle 53: Darstellung der verkehrlichen Maßnahmenwirkungen

| Symbol | Bedeutung |
|-------------------|--|
| + , - , +/- | Der Effekt ist von anderen Einflussfaktoren abgrenzbar und kann theoretisch begründet werden. Die Symbole beinhalten keine Aussage über die Größe des Effekts. Dies bedeutet, dass der Effekt in vielen Fällen so klein sein kann, dass eine Beobachtung oder Messung nur sehr beschränkt möglich sein kann. Die Effektstärke ist jedoch theoretisch berechenbar. Die Wirkungsrichtung kann mit der gewünschten Zielrichtung übereinstimmen (+), nicht übereinstimmen (-) oder in Abhängigkeit der konkreten Ausgestaltung der Maßnahme in beide Richtungen ausschlagen (+/-). |
| leer | Leere Maßnahmenfelder symbolisieren, dass kein Effekt bzw. ein so geringer Effekt zu erwarten ist, dass auch modellgestützt keine sinnvolle Aussage über dessen Größenordnung und Wirkungsrichtung möglich ist. |
| O | Ebenso wie bei leeren Maßnahmenfeldern ist hier kein bzw. ein sehr geringer Effekt zu erwarten. Entgegen dieser Einschätzung werden die so markierten Wirkungen in Maßnahmenbeschreibungen jedoch häufig als primäre Effekte hervorgehoben. |
| Grüne Färbung | Primärer Effekt eines Maßnahmentyps, der in den Beschreibungen der ausgewerteten Maßnahmen häufig betont wurde. |
| Hellgrüne Färbung | Sekundäre Maßnahmeneffekte. Diese finden nur teilweise in den Maßnahmenbeschreibungen Berücksichtigung und können auch negativ, also entgegen der eigentlichen Zielrichtung der Maßnahme wirken. |

Im Gegensatz zu der bisher beschriebenen Bewertung der verkehrlichen Wirkungen wird bezüglich der Wirkungen auf die Luftschadstoff- und Treibhausgasemissionen eine qualitative Abschätzung der Stärke des Effekts vorgenommen. Dabei werden bei Luftschadstoffen immer die Veränderungen am primären Wirkungsort bewertet. Bei Treibhausgasen ist der Verursachungsort nicht von Bedeutung. Gleichzeitig entfalten manche Maßnahmen ihre Wirkung erst, wenn sie in einem größeren Maßstab umgesetzt werden. Eine ÖPNV-Bevorrechtigung an einem einzelnen Knotenpunkt wird keinen erkennbaren Modal-Shift hin zugunsten des öffentlichen Verkehrs bewirken, eine konsequente netzweite Beschleunigung des ÖPNV dagegen schon. Aus diesem Grund sind die angezeigten Effektstärken mit Blick auf die Treibhausgasemissionen immer auf eine flächendeckende Umsetzung der jeweiligen Maßnahme bezogen. Die jeweilige Bedeutung der Symbole ist in Tabelle 54 dargestellt.

Tabelle 54: Darstellung Maßnahmenwirkung mit Blick auf Luftreinhaltung und Klimaschutz

| Symbol | Bedeutung |
|--------|---|
| ↑↑ | Starke positive Wirkung |
| ↑ | Positive Wirkung |
| ↗ | Geringe positive Wirkung |
| → | Keine oder vernachlässigbar kleine Wirkung |
| ↑↓ | Wirkungsrichtung der Maßnahme hängt von der konkreten Ausgestaltung der Maßnahme ab und kann nicht pauschal beurteilt werden. |
| ↘ | Maßnahme wirkt vermutlich kontraproduktiv. |
| ? | Wirkung nicht abschätzbar |

3.2 Maßnahmenammlung

Im Folgenden wird in jedem Unterkapitel genauer auf eine Maßnahmenkategorie eingegangen. Dabei werden zunächst die zu erwartenden Wirkungszusammenhänge der einzelnen Maßnahmentypen tabellarisch zusammengefasst. Im Anschluss werden die jeweiligen Maßnahmentypen mit Beispielen und den jeweiligen nutzbaren Instrumenten beschrieben sowie die erwarteten Wirkungszusammenhänge erläutert. Zuletzt wird für die Maßnahmenkategorie ein Überblick zu den Möglichkeiten der modellhaften Wirkungsabschätzung gegeben.

3.2.1 Maßnahmen zur Reduzierung von Störungen auf der freien Strecke

Bei Maßnahmen dieser Kategorie geht es primär darum Elemente zu beseitigen, die den Verkehrsfluss auf einer Strecke behindern können. Dazu zählen Fahrzeuge, die in zweiter Reihe halten oder parken (insbesondere Lieferfahrzeuge, Fahrzeuge der Müllabfuhr, haltende Fahrzeuge des ÖPNV), langsame Verkehrsteilnehmende (Straßenreinigungsfahrzeuge oder Fahrradfahrende), Baustellen oder hinderliche bauliche Elemente (Poller, Fahrbahnversatz etc.). In Tabelle 55 sind die zugeordneten Maßnahmentypen aufgeführt.

Tabelle 55: Maßnahmen zur Reduzierung von Störungen auf der freien Strecke

| Maßnahmentyp | Effekte am primären Wirkungsort | | | | | | | ...im gesamten Wirkungsbereich | | | | |
|---|---------------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|----------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------------|
| | Verstetigter Verkehr durch... | | | | Sonstige verkehrliche Effekte | | | Verkehrliche Effekte | | | | |
| | weniger Störungen | verändertes Fahrverhalten | erhöhte Kapazität (Angebot) | reduzierte MIV-Fahrleistung | reduzierte MIV-Fahrleistung | niedrigere Emissionsfaktoren | verringert Emissionen ÖSPV | verringerte Luftschadstoffbelastung | verstetigter Verkehr | reduzierte MIV-Fahrleistung | niedrigere Emissionsfaktoren | verringerte Treibhausgasemissionen |
| Be- und Entladevorgänge des Lieferverkehrs optimieren (Ladezonen, Ladekonzepte) | + | | | | | | | ↗ | | | | ↗ |
| Park- und Halteverbote ausweisen und Verstöße kontrollieren | + | - | | | | | | ↗ | | | | ↗ |
| Müllabfuhr und Straßenreinigung zeitlich und räumlich optimieren | + | | | | + | | | ↗ | | - | | ↗ |
| Baustellenmanagement | + | | | + | + | | | ↗ | | +/- | | ? |
| Straßenraum MIV-freundlich umgestalten (Fahrbahnverbreiterung, Rückbau Entschleunigungselemente, Busbuchten, ...) | + | - | | | - | | | ↕ | | | | ↗ |

Der erste genannte Maßnahmentyp „**Be- und Entladevorgänge des Lieferverkehrs optimieren**“ ist häufig ein Bestandteil von City-Logistik-Konzepten. Maßnahmen dieser Art sind häufig mit der Einführung oder Ausweitung eines Parkraummanagements verknüpft. Zum Teil werden Ver- und Entsorgungskonzepte entwickelt, wobei auch zeitliche Restriktionen eine Rolle spielen können. Im Detail kann zwischen Maßnahmen, die auf Lieferungen durch KEP-Dienstleister und auf Lieferungen für den Einzelhandel abzielen, unterschieden werden.

Entsprechend können für die Umsetzung primär zwei Instrumente eingesetzt werden: Die Markierung spezifischer Ladezonen im öffentlichen Raum (z.B. auf Kosten von Parkplätzen) oder das Erreichen einer Kooperation mit den zu adressierenden Ladengeschäften. Langfristig kann die Berücksichtigung von Lieferkonzepten in der Stadt-/Bauleitplanung berücksichtigt werden. Die Umsetzung der Maßnahme liegt in der Verantwortung der kommunalen Ebene. Für die Wirksamkeit ist die Kontrolle der Einhaltung von großer Bedeutung. Zu erwartende Wirkungen sind:

- ▶ Lieferfahrzeuge werden während des Be- und Entladevorgangs weniger häufig in zweiter Reihe geparkt, weshalb der Verkehrsfluss auf der entsprechenden Strecke weniger behindert wird. Baier et al. (2003) stellen den Zusammenhang zwischen Verkehrsqualität und Verkehrsstärke für unterschiedliche Hauptstraßentypen und den Einfluss von Liefervorgängen auf diesen Zusammenhang dar. Nach ihren Ergebnissen ist der Einfluss bei hohen Verkehrsstärken durchaus als relevant einzustufen.
- ▶ Werden an einer stark belasteten Stelle häufige Behinderungen des Verkehrsflusses durch Lieferfahrzeuge ausgemacht, kann von einer nachvollziehbaren Minderung der Luftschadstoffbelastungen ausgegangen werden.
- ▶ Es werden ebenso Haltevorgänge auf Fuß- und Radwegen reduziert – diese Modi profitieren gleichermaßen von der Maßnahme. Jene Verkehrsmittel, deren Flächen zu Ladezonen umgenutzt werden, erfahren einen Nachteil. Dies dürften häufig Flächen des ruhenden MIV sein. Insgesamt wirkt die Maßnahme aber so kleinräumig und zeitlich beschränkt, dass keine Veränderungen in der Moduswahl und ebenso wenig des Routenwahlverhaltens zu erwarten sind.
- ▶ Selbst bei einer großflächigen Ausweitung der Maßnahme auf alle potentiellen Standorte in einer Gemeinde wird die Wirkung auf den Treibhausgasausstoß vernachlässigbar gering sein.

Park- und Halteverbote auszuweisen und Verstöße kontrollieren ist integraler Bestandteil eines jeden Parkraummanagements (siehe Maßnahmentyp „Öffentlichen Parkraum verknappen und/oder verteuern“, Kapitel 3.2.8). In kommunalen Planwerken werden jedoch auch streckenzugspezifische Maßnahmen beschrieben, die – unabhängig von einem umfassenden Parkraummanagement – direkt darauf abzielen, Behinderungen des fließenden Verkehrs durch den ruhenden Verkehr zu unterbinden. Ein besonderes Augenmerk liegt auf dem Zu- und Ablauf von Knotenpunkten. Aber auch das Parken in zweiter Reihe kann den Verkehrsfluss empfindlich stören und durch eine höhere Kontrollichte und konsequentes Ahnden reduziert werden. Die Umsetzung von Maßnahmen dieses Typs liegt in der Verantwortung der Gemeinden. Da die Konsequenzen für Falschparken im Bußgeldkatalog der festgeschrieben sind, kann über das Instrument der Bundesgesetzgebung ebenfalls auf die Wirksamkeit des Maßnahmentyps Einfluss genommen werden. Zu erwartende Wirkungen sind:

- ▶ Behinderungen des fließenden Verkehrs durch Park- und Haltevorgängen auf der Fahrbahn und in zweiter Reihe sowie durch Ein- und Ausparkvorgänge können durch den Maßnahmentyp reduziert werden. Baier et al. (2003) untersuchten neben den Einfluss von Halte- und Parkvorgängen in zweiter Reihe (s.o. Lieferverkehre) auch die Bedeutung von Einparkvorgängen auf die Verkehrsqualität. Dabei stellten sie auch insbesondere bei hohen Verkehrsstärken einen Zusammenhang fest. Dagegen sind die Störungen, die aufgrund von ein- und ausparkenden Fahrzeugen entstehen, nach Riel (2002) vernachlässigbar gering bzw. selten.

- ▶ Da von der Maßnahme betroffene Fahrer*innen nicht mehr den aus ihrer Sicht optimalen Platz zum Abstellen des Fahrzeugs nutzen können, kann es zu zusätzlichem Parksuchverkehr in vernachlässigbarer Größenordnung kommen.
- ▶ Lokal kann die Maßnahme geringe Verbesserungen für die Luftschadstoffbelastungen bedeuten, sofern der ruhende Verkehr an einer kritischen Stelle als Problem identifiziert wurde.
- ▶ Auch wenn die Maßnahme als lokale Push-Maßnahme gegen den MIV gewertet werden kann, ist nicht von Wirkungen auf Ziel- und Moduswahl auszugehen.
- ▶ Hinsichtlich des Klimaschutzes ist die Maßnahme in dieser Form – also dann, wenn sie sich ausschließlich auf Parkvorgänge, die den Verkehrsfluss behindern, bezieht – nicht von Relevanz. Dies gilt nicht für eine weitergehende Beschränkung der Verfügbarkeit von Stellplätzen und eine konsequente Überwachung des Parkraums im Rahmen eines umfassenden Parkraummanagements (siehe unten).

Unter dem Maßnahmentyp **„Müllabfuhr und Straßenreinigung zeitlich und räumlich optimieren“** versammeln sich Maßnahmen, die die Einsatzzeiten und Routenwahl kommunaler Fahrzeuge für Dienstleistungen im Straßenraum so optimieren, dass möglichst geringe Behinderungen für den fließenden Verkehr entstehen. Am häufigsten wird dabei eine Verlegung der Zeiten der Müllabfuhr in verkehrsschwache Zeiten als konkrete Maßnahme benannt. Sofern an einer durch die Einsatzfahrzeuge häufig befahrenen Route ein lokaler Luftschadstoff-Hotspot liegt, kann die Routenwahl der kommunalen Fahrzeuge geändert werden. In jüngeren kommunalen Plänen, insbesondere in Green-City-Plänen werden Maßnahmen der algorithmusgestützten Routenwahloptimierung angeführt. Diese können auch die Erfassung der Füllstandmenge der Müllbehälter durch spezielle Sensorik umfassen, auf deren Grundlage die Routenwahl dynamisch berechnet wird. Die Umsetzung der Maßnahmen unterliegt der kommunalen Verantwortlichkeit. Zu erwartende Wirkungen sind:

- ▶ Behinderungen des fließenden Verkehrs durch kommunale Dienstleistungen wie Müllabfuhr und Straßenreinigung werden durch eine Verlegung in die Schwachverkehrszeit reduziert. Dabei sind arbeitsrechtliche und ökonomische Gesichtspunkte zu berücksichtigen.
- ▶ Eine optimierte Routenwahl kann Fahrzeugkilometer einsparen. Eine solche Optimierung wird in der Regel auf eine lokale Minderung (an stark belasteten Strecken) ausgerichtet sein, wodurch zwar eine Reduzierung der Fahrleistung am Maßnahmenort, durch eine erhöhte Umwegigkeit aber insgesamt eine Zunahme der Fahrleistung resultiert.
- ▶ Sofern eine Strecke stark durch Betriebsfahrzeuge belastet ist (z.B. auf der Zufahrtsroute zum Betriebshof), ist durch eine veränderte Routenwahl eine nachvollziehbare Entlastung von Luftschadstoffen denkbar. Der aus einer Veränderung der Einsatzzeiten hervorgehende Effekt dürfte in einer Größenordnung liegen, die als vernachlässigbar angesehen werden kann.
- ▶ Es ist nicht davon auszugehen, dass der erzielbare Rückgang der Störungen des Verkehrs durch die Betriebsfahrzeuge einen Einfluss auf die Abfahrtszeit-, Routen- oder Verkehrsmittelwahl der anderen Verkehrsteilnehmenden hat.
- ▶ Auf das gesamte Verkehrsgeschehen bezogen ist die Maßnahmenwirkung so gering, dass kein wahrnehmbarer Effekt im Bereich des Klimaschutzes zu erwarten ist.

Die Maßnahmengruppe „**Baustellenmanagement**“ betrifft alle Baumaßnahmen, durch die der Straßenraum beeinflusst wird. Somit können die Maßnahmen hinsichtlich der Zeitdauer und der räumlichen Ausdehnung sehr unterschiedlich sein und von einer Beeinträchtigung eines kurzen Streckenabschnitts für die Dauer einiger Tage bis hin zur Großbaustelle über mehrere Jahre reichen. Allgemein besteht das Ziel aber darin, den Verkehrsablauf so geringfügig wie möglich zu beeinflussen. Dafür stehen der öffentlichen Hand unterschiedliche Instrumente zur Verfügung, da entsprechende Baumaßnahmen angemeldet werden müssen bzw. durch die öffentlichen Baulastträger selbst veranlasst oder durchgeführt werden. Arbeiten, die eine größere Inanspruchnahme der Verkehrsfläche bedeuten, können in Schwachverkehrszeiten verlegt werden. Weiterhin können Baumaßnahmen koordiniert werden, so dass mehrere Arbeiten in einer Baustelle effizient miteinander verbunden werden. Räumlich getrennte Baumaßnahmen werden so aufeinander abgestimmt, dass Alternativrouten auf wichtigen Verkehrsbeziehungen nicht zeitgleich beeinträchtigt werden. Weiterhin kann durch Information über zukünftige Baustellen (z.B. Tunnelsperrungen) und eine Wegweisung zur Umfahrung der beeinträchtigten Netzbereiche eine Reduzierung der Verkehrsstärke in den stark beeinträchtigten Bereichen führen. In Luftreinhalteplänen werden auch immer wieder Maßnahmen genannt, die auf den Baustellenbetrieb selbst ausgerichtet sind (z.B. Einsatz emissionsarmer Baustellenfahrzeuge, Reifenwaschanlagen an der Baustellenausfahrt). Diese Maßnahmen sind nicht Bestandteil dieser Maßnahmengruppe, da sie keine direkten Auswirkungen auf den Verkehrsfluss haben. Die Maßnahme kann sowohl auf Ebene aller Baulastträger des Straßennetzes angesiedelt sein. Mit Blick auf den Verkehrsfluss, den Luftschadstoffausstoß und die Treibhausgasemissionen sind diese Wirkungen zu erwarten:

- ▶ Ein Baustellenmanagement zielt primär darauf ab, möglichst geringe Beeinträchtigungen des Verkehrsflusses hervorzurufen. Je nach Umfang der Baumaßnahmen und der eingesetzten Maßnahmen des Baustellenmanagements kann die Größenordnung der Effekte sehr unterschiedlich sein.
- ▶ Informationen und eine gute Wegweisung reduzieren die Verkehrsstärke im Bereich der Baumaßnahmen. Nimmt man als Vergleichsfall eine Baustelle ohne geeignete informierende Maßnahmen an, verbessert sich der Verkehrsfluss durch eine Entlastung der beeinträchtigten Netzelemente. Dadurch entstehen voraussichtlich jedoch Umwege, die absolut eine Zunahme der Fahrleistung bedeuten. Durch eine verbesserte Koordination von Baumaßnahmen untereinander kann aber auch ein positiver Effekt hinsichtlich der Umwegigkeit gegenüber einem Vergleichsfall, der keine solche Koordination vorsieht, erreicht werden.
- ▶ Weitere Verkehrsteilnehmende (Fußgängerinnen und Fußgänger, Radfahrende, ÖV-Nutzende) werden durch ein Baustellenmanagement in der Regel nicht benachteiligt. Vereinzelt adressieren Maßnahmen des Baustellenmanagements diese explizit (z.B. fußgängerfreundliche Wegführung im Baustellenbereich). Eine Auswirkung auf die Moduswahl ist auch bei einer großflächigen Umsetzung nicht zu erwarten.
- ▶ Die Maßnahmeneffekte können entsprechend des unterschiedlichen Umfangs der betrachteten Baumaßnahmen unterschiedlich groß sein. Grundsätzlich sind die Baumaßnahmen zeitlich und räumlich immer auf einen kleinen Teil des Netzes beschränkt, weshalb entsprechende Maßnahmen keine konstant hohe Wirkung haben können. Im Bereich einer Baustelle kann zeitlich begrenzt eine hohe Minderung der Schadstoffbelastungen erzielt werden. Aufgrund der zeitlichen Beschränkung ist ein Vergleich der Effektstärke mit anderen Maßnahmen aber schwer. Können schlechte Verkehrszustände beispielsweise bei einer Großbaustelle dadurch über längere

Zeiträume vermieden werden, kann dies als wahrnehmbarer Beitrag zur Verbesserung der Luftqualität gewertet werden. Für ein großräumiges, intelligentes Baustellenmanagement (z.B. angewandt auf ein gesamtstädtisches Netz oder auf das Netz der deutschen Autobahnen) kann die Hypothese formuliert werden, dass ein geringer jedoch nachvollziehbarer Beitrag zur Minderung der Treibhausgasemissionen entstehen kann. Um dies zu bestätigen, wäre eine umfassende Betrachtung und Hochrechnung der Wirkung von Baustellenmanagement-Maßnahmen nötig.

Der letzte Maßnahmentyp dieser Kategorie ist die **MIV-freundliche Umgestaltung des Straßenraums** mit dem Ziel eines stetigeren Verkehrsflusses, ohne dabei primär die Streckenkapazität, also den Verkehrsfluss im ausgelasteten Zustand im Blick zu haben. Zu diesem Zweck können entschleunigende Elemente zurückgebaut (z.B. optische Bremsen, Fahrbahnversatz) oder die Fahrbahn verbreitert werden. Auch die bauliche Umgestaltung von Haltestellen zu Busbuchten, um Rückstaus hinter den haltenden Fahrzeugen zu vermeiden, kann diesem Maßnahmentyp zugeordnet werden. In Einzelfällen wird in Verbindung mit Maßnahmen dieses Typs das Heraufsetzen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit vorgeschlagen (zu Wirkungen einer geänderten zulässigen Höchstgeschwindigkeit siehe Maßnahme „Zulässige Höchstgeschwindigkeit herabsetzen“, Kapitel 3.2.3). Maßnahmen dieses Typs sind vor allem auf das Innerortsstreckennetz anwendbar, entsprechend liegt die Umsetzung bei der kommunalen Ebene. Eine veränderte Streckenführung im Außerortsbereich kann ebenfalls diesem Maßnahmentyp zugeordnet werden. Die Verantwortlichkeiten liegen dann beim entsprechenden Aufgabenträger. Zu erwartende Wirkungen sind:

- ▶ Am Maßnahmenort wird durch die baulichen Maßnahmen eine Verstetigung erzielt.
- ▶ In Abhängigkeit der Netzstruktur kann eine Maßnahme dieses Typs zu einer veränderten Routenwahl und damit zu höheren Verkehrsstärken am Maßnahmenort führen, da die Strecke attraktiver wird. Dieser Effekt kann insbesondere im untergeordneten Netz auftreten, wenn die Routenwähländerung mit einer geringen Umwegigkeit verbunden ist.
- ▶ Da in der Regel geschwindigkeitsreduzierende Straßenraumelemente entfernt werden, die ein Abbremsen und Beschleunigen der Fahrzeuge verursachen, kann eine Zunahme des generellen Geschwindigkeitsniveaus am Maßnahmenort auftreten. Beispielsweise wird dies von Koshy und Arasan (2005) bei der Umgestaltung von Haltestellen zu Busbuchten festgestellt.
- ▶ Da der angestrebte Verstetigungseffekt den möglichen Effekten durch die Aufwertung der Strecke für den MIV entgegenwirkt, kann die Wirkung für auf die lokale Luftreinhaltung sowohl positiv als auch negativ ausfallen.
- ▶ Eine MIV-freundliche Straßenraumgestaltung kann in bestimmten Fällen als gegenläufige Maßnahme zu einer Verkehrsberuhigung gewertet werden. Insofern können Maßnahmen dieses Typs den Zielen der Aufenthaltsqualität und einer attraktiven Nutzbarkeit durch nichtmotorisierte Verkehrsteilnehmende entgegenwirken. Aufgrund der lokalen Beschränkung der Maßnahmen kann eine Wirkung auf die Moduswahl aber ausgeschlossen werden.
- ▶ Im Gesamtnetz dürften Stellen, an denen eine entsprechende Umgestaltung des Straßenraums in Erwägung zu ziehen wäre, selten sein. Insofern ist auch bei einer großräumigen Umsetzung der Maßnahme keine relevante Veränderung der Menge der emittierten Treibhausgase zu erwarten.

Maßnahmen dieser Kategorie wirken in den allermeisten Fällen räumlich und/oder zeitlich sehr beschränkt auf den Verkehrsfluss. Die theoretisch nachvollziehbaren Wirkungen sind damit so gering, dass sie sich durch gemessene Luftschadstoffbelastungen und bei den messbaren verkehrlichen Grundgrößen für die Berechnung der Treibhausgasemissionen (Verkehrsstärken und -zustände) nicht nachweisen lassen. Lokale Wirkungen können logisch erklärt und berechnet werden. Mithilfe von Verkehrsflussmodellen könnten verursachte Veränderungen abgebildet und untersucht werden, was jedoch sehr hohe Anforderungen an die Eingangsdaten voraussetzt. Dementsprechend sind bei Maßnahmen dieser Kategorie in den ausgewerteten Planwerken in aller Regel keine quantitativen Effektstärken, sondern ausschließlich qualitative Einschätzungen gegeben. Aufgrund der unterschiedlichen Ausprägungen jeder individuellen Maßnahme sind auch verallgemeinernde Aussagen kaum möglich. Grundlegende Forschungsarbeiten im Bereich der Wirkungsanalyse zu Maßnahmen dieser Kategorie sind selten. Sumpf (2008) beschäftigte sich in seiner Arbeit ausführlich mit der Simulation unterschiedlicher Hindernisse im Straßenraum (u.a. Engstellen, Bushaltestellen) und deren Wirkung auf Emissionen und Kraftstoffverbrauch. Die differenzierten Ergebnisse können für die Abschätzung individueller Maßnahmenwirkungen Anhaltspunkte liefern.

3.2.2 Maßnahmen zur Erhöhung der Kapazität auf einzelnen Strecken

Eine erhöhte Kapazität führt zu einer Verringerung der Auslastung und damit zu einer Verstetigung des Verkehrsflusses. In diesem Zusammenhang sind primär zwei Maßnahmentypen zu nennen, deren Wirkungen in Tabelle 56 zusammengefasst sind.

Tabelle 56: Maßnahmen zur Erhöhung der Kapazität auf einzelnen Strecken

| Maßnahmentyp | Effekte am primären Wirkungsort | | | | | | | ...im gesamten Wirkungsbereich | | | | |
|--|---------------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|----------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------------|
| | Verstetigter Verkehr durch... | | | | Sonstige verkehrliche Effekte | | | verringerte Luftschadstoffbelastung | Verkehrliche Effekte | | | |
| | weniger Störungen | verändertes Fahrverhalten | erhöhte Kapazität (Angebot) | reduzierte MIV-Fahrleistung | reduzierte MIV-Fahrleistung | niedrigere Emissionsfaktoren | verringert Emissionen ÖSPV | | verstetigter Verkehr | reduzierte MIV-Fahrleistung | niedrigere Emissionsfaktoren | verringerte Treibhausgasemissionen |
| Zusätzlichen Fahrstreifen für den MIV einrichten | | | + | - | - | | | ↕↕ | | - | | ↕↕ |
| Zulässige Höchstgeschwindigkeit verkehrsabhängig steuern | | + | + | | | + | | ↗ | | | | ↗ |

Eine mögliche Maßnahme, um die Qualität des Verkehrsablaufs auf Strecken mit hoher Auslastung zu verbessern, ist die **Bereitstellung zusätzlicher Fahrstreifen für den MIV**. Im Fernstraßennetz werden solche Ausbaumaßnahmen eingesetzt, um lokale Engpässe zu reduzieren und um die Kapazität ganzer Netzabschnitte zu erhöhen. Auf innerörtlichen Straßen sind Ausbaumaßnahmen aufgrund einer veränderten Planungsphilosophie (Abkehr von der autogerechten Stadt) und begrenzter Flächen eher die Ausnahme. Entsprechend wird ein tatsächlicher Ausbau der Verkehrsinfrastruktur auch in Luftreinhalteplänen größtenteils im

Außerortsbereich vorgeschlagen, bzw. auf Ausbaupläne des Bundes an Autobahnen und Bundesstraßen verwiesen. Alternativ zu einem Ausbau einer Strecke und der damit verbundenen Flächeninanspruchnahme kann die Kapazität auch zeitweise durch verkehrstechnische Maßnahmen, nämlich durch Richtungswechselbetrieb oder eine temporäre Seitenstreifenfreigabe erhöht werden. Zu erwartende Wirkungen sind:

- ▶ Die lokal erhöhte Kapazität und die damit verbundene bessere Verkehrsqualität steht im Vordergrund der Maßnahme. Da durch die verbesserte Verkehrsqualität ein Fahrtzeitgewinn auf der ausgebauten Strecke realisiert werden kann, wird diese unter Umständen stärker nachgefragt, z.B. durch eine veränderte Routenwahl. Dadurch können die positiven Effekte einer Kapazitätserhöhung auf den Verkehrsfluss durch eine erhöhte Belastung reduziert werden.
- ▶ Der Ausbau der Straßeninfrastruktur kann zusätzlichen Verkehr induzieren. Verringerte Raumwiderstände beeinflussen die Zielwahl und die Moduswahl. Bei gleichem Zeitaufwand können größere Entfernungen zurückgelegt werden.
- ▶ In den meisten Fällen führt eine Verflüssigung des Verkehrs zu einer Minderung des Schadstoffausstoßes. Strecken, auf denen hohe Geschwindigkeiten zulässig sind – insbesondere Strecken ohne Geschwindigkeitsbeschränkung – stellen eine Ausnahme dar, da im dichten Verkehr mit langsameren Geschwindigkeiten effizienter gefahren wird. Ein Kapazitätsausbau im Bundesstraßen- und Autobahnnetz kann deshalb trotz einer erzielten Verstetigung zu erhöhten spezifischen Emissionsfaktoren führen.
- ▶ Da einerseits die Nachfragewirkungen der verstetigenden Wirkung der Maßnahme entgegenwirken, andererseits der Zusammenhang zwischen Verkehrszustand und Emissionen hier keine klare Wirkungsrichtung aufweist, kann keine pauschale Aussage über die Wirkungsrichtung hinsichtlich des Schadstoffausstoßes getroffen werden. Dies gilt sowohl lokal für Luftschadstoffe als auch bei einer großflächigen Betrachtung für die Treibhausgasemissionen. Benz und Kesenheimer (2009) ermittelten eine Zunahme der CO₂-Emissionen des Verkehrs um 0,85 % durch einen deutschlandweiten Ausbau der Engstellen auf Autobahnen (die Autoren wiesen darauf hin, dass der Wert unterhalb der Berechnungsgenauigkeit liegt).

Eine zweite Maßnahme zur Verbesserung des Verkehrsablaufs auf Streckenzügen mit planfreien Knotenpunkten ist die **verkehrsabhängige Steuerung der zulässigen Höchstgeschwindigkeiten**. Da die Effektstärke der Maßnahme auf Strecken mit einer hohen zulässigen Höchstgeschwindigkeit (>100 km/h) besonders groß ist, wird diese Art der Verkehrsbeeinflussung insbesondere auf Autobahnen und autobahnähnlichen Strecken eingesetzt. Hinsichtlich der Wirkungen ist die Maßnahme, sofern sie primär auf eine Steigerung der Kapazität abzielt, von einer umweltsensitiven Streckenbeeinflussung, wie sie beispielsweise von Weyland et al. (2022) beschrieben wird, abzugrenzen. Zu erwartende Wirkungen sind:

- ▶ Eine Streckenbeeinflussungsanlage reduziert durch die Harmonisierung des Verkehrsflusses die Wahrscheinlichkeit eines Verkehrszusammenbruchs, so dass die Leistungsfähigkeit auch bei höheren Verkehrsstärken länger erhalten bleibt (vgl. z.B. Schick 2003).
- ▶ Da auf die gefahrenen Geschwindigkeiten Einfluss genommen wird, verändert sich der Verkehrsfluss (weniger starke Brems- und Beschleunigungsvorgänge zum Erreichen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit, gleichmäßigeres Geschwindigkeitsniveau zwischen

den einzelnen Verkehrsteilnehmenden). Weiterhin werden die maximal gefahrenen Geschwindigkeiten reduziert, was für den Schadstoffausstoß von großer Bedeutung ist.

- ▶ Die Größe der Wirkung auf den Schadstoffausstoß durch diesen Maßnahmentyp ist im Vergleich zu einem statischen Tempolimit gering, da der Wirkungsbereich zeitlich beschränkt ist: bei flüssigem Verkehr ist die Maßnahme nicht aktiv, bei starken Überlastungen ist sie unwirksam. Lokal kann die verstetigende Wirkung einen Beitrag zur Luftreinhaltung leisten, wobei, wie oben beschrieben, die Maßnahme nur bei einem hohen Ausgangsniveau der zulässigen Höchstgeschwindigkeit und damit in der Regel nicht an kritischen Immissionsorten angewandt werden kann. Auch bei einer flächendeckenden verkehrsabhängigen Steuerung der zulässigen Höchstgeschwindigkeiten im Fernstraßennetz wäre der Beitrag zum Klimaschutz voraussichtlich gering. Diese Aussagen gelten, sofern die Schaltung primär zur Vermeidung eines Zusammenbruchs des Verkehrs eingesetzt wird. Umweltsensitive Schaltungen können eine zusätzliche Minderung der Schadstoffemissionen bewirken (vgl. Weyland et al. 2022).
- ▶ Ein wichtiger weiterer Aspekt zur Begründung von Maßnahmen dieses Typs ist eine Erhöhung der Verkehrssicherheit.

Am Maßnahmenort können, sowohl mit Blick auf die Veränderung der Verkehrsstärken und die Verkehrszustände als auch die verursachten Emissionen, Ergebnisse aus Messungen gewonnen werden. Dagegen können die netzweiten Auswirkungen messtechnisch kaum erfasst werden. Da die Umsetzung kapazitätssteigernder Maßnahmen in der Regel für das hochrangige Straßennetz diskutiert wird, ist der Einsatz von Verkehrsnachfragemodellen zu Untersuchung der Wirkung solcher Maßnahmen gut geeignet und in der Praxis vielfach angewandt. Hinsichtlich der Bewertung von Maßnahmen dieser Kategorie kann auf die Methodik von Verfahren wie die standardisierte Bewertung oder die Bewertung von BVWP-Vorhaben geblickt werden.

3.2.3 Maßnahmen zur lokalen Beeinflussung des Fahrverhaltens und des Geschwindigkeitsniveaus

In dieser Kategorie sind Maßnahmen zusammengefasst die lokal an einer Strecke wirken, deren Effekte dabei jedoch nicht durch das Beseitigen verkehrsflussstörender Elemente im Straßenraum oder durch die Erhöhung der Kapazität der Strecke verursacht werden. Vielmehr sollen Regeln oder Informationen für die Verkehrsteilnehmenden die negativen Folgen des Verkehrs verringern. Maßnahmen dieser Kategorie sind in Tabelle 57 aufgeführt.

Tabelle 57: Maßnahmen zur lokalen Beeinflussung des Fahrverhaltens und des Geschwindigkeitsniveaus

| Maßnahmentyp | Effekte am primären Wirkungsort | | | | | | | ...im gesamten Wirkungsbereich | | | | |
|--|---------------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|----------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------------|
| | Verstetigter Verkehr durch... | | | | Sonstige verkehrliche Effekte | | | Verkehrliche Effekte | | | | |
| | weniger Störungen | verändertes Fahrverhalten | erhöhte Kapazität (Angebot) | reduzierte MIV-Fahrleistung | reduzierte MIV-Fahrleistung | niedrigere Emissionsfaktoren | verringert Emissionen ÖSPV | verringerte Luftschadstoffbelastung | verstetigter Verkehr | reduzierte MIV-Fahrleistung | niedrigere Emissionsfaktoren | verringerte Treibhausgasemissionen |
| Dynamische Hinweise und Informationen im Straßenraum geben | | + | | | | + | | → | | | | → |
| (Lkw-)Überholverbote anordnen | | + | + | | | | | → | | | | → |
| Zulässige Höchstgeschwindigkeit herabsetzen (lokal) | | + | +/- | | | +/- | | ↕ | | | | → |

Die Maßnahme „**Dynamische Hinweise und Informationen im Straßenraum geben**“ umfasst alle Arten von dynamischen Anzeigen, die auf eine angepasste Fahrweise abzielen, aber keine verbindlichen Regeln für die Verkehrsteilnehmenden bedeuten. Dazu können Hinweise durch Streckenbeeinflussungsanlagen (Hinweise über Verkehrszustand, Wetter oder Fahrbahnbeschaffenheit) gezählt werden. Dynamische Netzbeeinflussungsmaßnahmen (Wechselwegweisung) werden aufgrund anderer primärer Wirkungsansätze einer anderen Maßnahmenkategorie zugeordnet (siehe Kapitel 3.2.7). Die Wirkungen sind in einer Vielzahl von Studien zu Streckenbeeinflussungsanlagen untersucht worden (z.B. Schick 2003, Busch et al. 2009), wobei die Wirkung auf die Emissionen i.d.R. nicht im Vordergrund steht und deshalb keine expliziten Größen ausgewiesen sind. Daneben können auch Geschwindigkeitsempfehlungen im Zulauf einer LSA als Ausprägung dieses Maßnahmentyps angesehen werden. Einen Überblick über Forschungsarbeiten zu Wirkungen kooperativer LSA-Steuerungen (u.a. Geschwindigkeitsempfehlungen) geben beispielsweise Santa et al. (2014) und Otto (2011). Sowohl innerorts als auch außerorts können Umweltdaten erfasst werden und beispielsweise über hohe Luftschadstoffbelastungen informiert werden. Entsprechende Informationen werden häufig in Kombination mit einer Anpassung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit geschaltet. Folgende Wirkungen sind mit diesem Maßnahmentyp verbunden:

- ▶ Die Informationen zielen immer darauf ab, das Fahrverhalten der Verkehrsteilnehmenden lokal zu beeinflussen. Es soll eine gleichmäßigere, vorsichtigere Fahrweise und ggf. eine reduzierte Maximalgeschwindigkeit erreicht werden.
- ▶ Da die Anpassungen des Fahrverhaltens freiwillig sind, werden dadurch keine Nachfrageeffekte entstehen.
- ▶ Wichtige weitere Aspekte zur Begründung von Maßnahmen dieses Typs können eine erhöhte Verkehrssicherheit und eine Minderung der Lärmemissionen sein.

Streckenbeeinflussungsanlagen können maßgeblich zur Verkehrssicherheit beitragen. Durch das Vermeiden von Unfällen wird indirekt auch der Verkehrsfluss verbessert.

- ▶ Die Effektstärke von Maßnahmen dieses Typs wird i.d.R. sowohl für die lokalen Luftschadstoffbelastungen als auch für die Treibhausgasemissionen vernachlässigbar gering sein. Wirksamkeitsuntersuchungen, in denen verallgemeinerbare Aussagen gemacht werden, die die Wirkungskette bis hin zu den verursachten Schadstoffemissionen miteinbeziehen, sind nicht bekannt.

Bei der **Anordnung von (Lkw-)Überholverböten** steht entweder der Aspekt der Verkehrssicherheit oder des Verkehrsflusses im Vordergrund. Für den Verkehrsfluss und die Luftschadstoffemissionen ist die Anordnung insbesondere auf mehrstreifigen Streckenzügen von Relevanz. Auf anderen Strecken sind Überholvorgänge so selten, dass ihr Einfluss auf die Luftschadstoffemissionen vernachlässigbar ist. Insbesondere auf Strecken mit nach Fahrzeugkategorie differenzierten zulässigen Höchstgeschwindigkeiten (Pkw und Lkw auf Autobahnen) zielt die Maßnahme auf einen verbesserten Verkehrsfluss ab. Die wichtigsten Wirkungen dieses Maßnahmentyps sind:

- ▶ Der Verkehrsfluss wird nicht durch ausscherende Lkw behindert, das Geschwindigkeitsniveau auf den einzelnen Fahrstreifen wird harmonischer.
- ▶ Die Streckenkapazität wird erhöht, die Wahrscheinlichkeit eines Verkehrszusammenbruchs nimmt ab. Schick (2003) und eine Vielzahl anderer Untersuchungen weisen auf die positiven Effekte im Rahmen von Untersuchungen zu Streckenbeeinflussungsanlagen hin. In einem noch laufenden Forschungsvorhaben der Bundesanstalt für Straßenwesen (FE 03.0577/2019/IRB) werden derzeit die Einsatzempfehlungen und die Wirksamkeit sowohl statischer als auch dynamischer Lkw-Überholverbote überprüft.
- ▶ Die Maßnahme wirkt nur lokal und primär im ausgelasteten Zustand. Aufgrund dieser zeitlichen und räumlichen Einschränkung ist die Bedeutung für die Luftreinhaltung und den Klimaschutz als gering einzuschätzen.

Das **lokale Herabsetzen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit** ist von flächendeckenden Maßnahmen abzugrenzen, die eine Änderung der StVO voraussetzen würden (siehe dazu Kapitel 3.2.11). Für die Luftreinhaltung ist der Maßnahmentyp sehr bedeutend und wird entsprechend häufig in Luftreinhalteplänen aufgeführt. Der Anordnung einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit, die von der Regelgeschwindigkeit abweicht, ist in der VwV-StVO Grenzen gesetzt. Für die Zwecke der Luftreinhaltung kann das Tempolimit nur an Stellen herabgesetzt werden, für die im Rahmen der Luftreinhalteplanung eine Wirkung dieser Maßnahme festgestellt wurde. Insbesondere in Green-City-Plänen werden auch im Innerortsbereich dynamische Geschwindigkeitsregelungen vorgeschlagen. Dabei können auch umweltsensitive Steuerungen zum Einsatz kommen, die beispielsweise Prognosen bezüglich der Luftschadstoffbelastungen aus Immissionsrechnungen berücksichtigen. Andere Gründe können u.a. die Verkehrssicherheit und der Lärmschutz sein. Wie bei allen Verkehrsregeln ist für die Wirksamkeit nicht nur deren Anordnung, sondern auch deren Befolgung von Bedeutung. Insofern müssen Geschwindigkeitskontrollen im Rahmen des Maßnahmentyps mitgeführt werden. Maßnahmen dieses Typs können folgende Wirkungen zugeschrieben werden:

- ▶ Die Maßnahme wirkt innerorts und außerorts unterschiedlich. Die wichtigsten Effekte sind in Kapitel 3.2.11 für flächendeckende Geschwindigkeitsbeschränkungen für diese beiden Gebiete getrennt aufgeführt.

- ▶ Für lokale Maßnahmen lässt sich hinsichtlich der Luftreinhaltung zusammenfassen, dass bei Innerortsstrecken die Wirkungsrichtung individuell unterschiedlich positiv oder negativ sein kann. Im Außerortsbereich, bei hohen Ausgangsgeschwindigkeiten ist die Bilanz in aller Regel positiv.
- ▶ Zum Zweck des Klimaschutzes sind lokale Einzelmaßnahmen nicht in hinreichendem Maß skalierbar und damit nicht von besonderer Relevanz.

Maßnahmen zur Beeinflussung des lokalen Fahrverhaltens und des Geschwindigkeitsniveaus können sehr unterschiedlicher Natur sein. Messungen wurden hinsichtlich der Wirkungen auf die Emissionsfaktoren durch Tempolimits, insbesondere im Innerortsbereich vorgenommen, da hier die Ergebnisse uneindeutig sind und stark von lokalen Gegebenheiten abhängen. Auf Außerortsstrecken werden die HBEFA-Emissionsfaktoren als Datenquelle genutzt. Entsprechend spielt im Innerortsbereich die Verkehrsflusssimulation bei der Emissionsberechnung eine Rolle, im Außerortsbereich steht bei der Untersuchung des Verkehrsflusses die Beschreibung verkehrlicher Parameter (Kapazität, Zusammenbruchswahrscheinlichkeit etc.) im Vordergrund. Da die Wirkung von Maßnahmen dieser Kategorie auf die Verkehrsnachfrage beschränkt ist, spielt die Verkehrsnachfragemodellierung bei deren Wirkungsbewertung keine erwähnenswerte Rolle.

3.2.4 Maßnahmen zur Priorisierung des Umweltverbundes an Strecken

Mit dem Ziel der Luftreinhaltung und des Klimaschutzes werden auch Maßnahmen diskutiert die eine Umverteilung des Straßenraums zu Lasten des MIV zum Ziel haben. Solche Maßnahmen können zur Förderung von Fuß, Rad und/oder ÖV konzeptionell für das gesamte Netz beschrieben werden. Die Wirkung auf den Verkehrsfluss ergibt sich dabei aus der konkreten Umsetzung an den einzelnen Strecken. In Tabelle 58 sind die Möglichkeiten dieser konkreten Einzelmaßnahmen aufgeführt.

Tabelle 58: Maßnahmen zur Priorisierung des Umweltverbundes an Strecken

| Maßnahmentyp | Effekte am primären Wirkungsort | | | | | | | ...im gesamten Wirkungsbereich | | | | |
|--|---------------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|----------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------------|
| | Verstetigter Verkehr durch... | | | | Sonstige verkehrliche Effekte | | | Verkehrliche Effekte | | | | |
| | weniger Störungen | verändertes Fahrverhalten | erhöhte Kapazität (Angebot) | reduzierte MIV-Fahrleistung | reduzierte MIV-Fahrleistung | niedrigere Emissionsfaktoren | verringert Emissionen ÖSPV | verringerte Luftschadstoffbelastung | verstetigter Verkehr | reduzierte MIV-Fahrleistung | niedrigere Emissionsfaktoren | verringerte Treibhausgasemissionen |
| Verkehrsberuhigung herbeiführen (Verkehrsberuhigter Bereich, Shared Space, stadt- und straßenbauliche Elemente, ...) | - | +/- | | | + | +/- | | ↕↔ | | +/- | | ↗ |
| Fußgängerüberweg ausweisen (Zebrastrifen) | - | | | | | | | ↘ | | o | | → |
| Fahrradverkehr im Mischverkehr aufwerten (Schutzstreifen, Fahrradstraße) | - | +/- | | | | | | ? | | | | ↗ |
| MIV-Verkehrsfläche umwidmen (Fahrradweg, Busfahrstreifen, Umweltfahrstreifen, ...) | | | - | + | + | | | ↕↔ | | o | | ↗ |

Die Maßnahme „**Verkehrsberuhigung herbeiführen**“ kann unter Einsatz verschiedener Instrumente erfolgen. Im untergeordneten Straßennetz können verkehrsberuhigte Bereiche, gekennzeichnet durch Verkehrszeichen 325.1, ausgewiesen werden. Generell kann eine Verkehrsberuhigung durch stadt- und straßenraumgestalterische Möglichkeiten erzielt werden. Dazu zählen z.B. Aufpflasterungen, Verkehrsinseln oder Verschwenkungen der Fahrbahn. Shared-Space-Konzepte zielen auf ein gleichwertiges miteinander aller Verkehrsteilnehmenden ab. Hinsichtlich des Verkehrsflusses und der Schadstoffemissionen sind folgende Wirkungen aufzuführen:

- ▶ Der freie Verkehrsfluss des motorisierten Verkehrs steht auf dem betroffenen Streckenabschnitt nicht mehr im Vordergrund. Hindernisse (baulicher Art oder durch andere Verkehrsteilnehmende) führen zu einem schlechteren Verkehrsfluss.
- ▶ Eine Verkehrsberuhigung kann sowohl positiv als auch negativ auf das Fahrverhalten wirken. Es können zusätzliche Brems- und Beschleunigungsvorgänge entstehen. Katsarov (2014) stellt einen Vorher-Nachher-Vergleich der Geschwindigkeitsverteilung in einem zum Shared-Space umgestalteten Straßenraum dar, der im umgestalteten Fall einen deutlich harmonischeren Verkehrsfluss zeigt.
- ▶ Wie bei einer Geschwindigkeitsbeschränkung, wird die Strecke für den MIV unattraktiver, wodurch erwünschte oder unerwünschte Verlagerungen entstehen können.
- ▶ Auch mit Blick auf die Emissionsfaktoren, die sich aufgrund der gefahrenen Geschwindigkeiten unabhängig vom Verkehrsfluss ergeben, ist nicht eindeutig zu sagen, ob die Wirkung positiv ist. Wie bereits bezüglich einer Absenkung der zulässigen Höchstgeschwindigkeiten beschrieben, kann der spezifische Verbrauch bei sehr langsamen Fahrgeschwindigkeiten zunehmen. Bei sehr niedrigen zulässigen Höchstgeschwindigkeiten (Schrittgeschwindigkeit bzw. 20 km/h) werden diese jedoch selten eingehalten (vgl. Baier und Engelen 2015). Bei elektrisch angetriebenen Fahrzeugen sollte es nicht zu einer Zunahme des spezifischen Verbrauchs kommen.
- ▶ Ob die Maßnahme in ihrer Gesamtheit zur Reduktion der lokalen Luftschadstoffbelastung beiträgt, hängt davon ab, inwieweit eine Minderung der Verkehrsstärke am Maßnahmenort herbeigeführt werden kann.
- ▶ Maßnahmen dieses Typs können die Attraktivität des Straßenraums zum Aufenthalt und zur Nutzung durch nichtmotorisierte Verkehrsteilnehmende erhöhen. Insbesondere Shared-Space-Konzepte können aber auch zu Verunsicherung führen (vgl. u.a. Baier und Engelen 2015, RIS Logis.net 2009).
- ▶ Eine pauschale Aussage über die Wirkung auf die Gesamtfahrleistung und damit auf die Treibhausgasemissionen ist schwierig. Einzelne Untersuchungen zeigen einen sehr positiven Effekt für die umgestalteten Innenstadtbereiche, die Gesamtfahrleistung ist jedoch nicht zu beurteilen. In Deutschland stellt die Gemeinde Rudersberg ein positives Beispiel für den Einsatz einer Shared-Space-Fläche dar, die Belastung auf der umgestalteten Hauptverkehrsstraße ging um ca. 30 % zurück (vgl. Gemeinde Rudersberg 2019, Koska et al. 2020). Oslo weist in einer Darstellung einer umfassenden Straßenraumumgestaltung und Verkehrsberuhigung in der Innenstadt einen Rückgang der Fahrleistung von 19 % aus, verweist dabei aber gleichzeitig auf parallel umgesetzte Maßnahmen, die in dieselbe Richtung wirken dürften (vgl. Tennøy und Hagen 2020). Insgesamt wird daraus die Möglichkeit, auch bei globaler Betrachtung einen leicht positiven Effekt erzielen zu können, abgeleitet.

Vereinzelt wird in Luftreinhalteplänen die Maßnahme „**Fußgängerüberwege ausweisen**“ genannt. Damit gehen folgende Wirkungen einher:

- ▶ Durch den querenden Fußverkehr entstehen Störungen im Verkehrsfluss des MIV.
- ▶ Die Betonung liegt in der Maßnahmenbeschreibung auf der Förderung des Fußverkehrs. Mit Blick auf die Moduswahlentscheidung ist dabei von keiner wahrnehmbaren Veränderung auszugehen. Dies gilt bei einer isolierten Betrachtung des Maßnahmentyps. Fußgängerüberwege können dennoch in umfassenden Fußverkehrskonzepten einen bedeutenden Baustein darstellen, weshalb die Schlussfolgerung, diese sein somit unwichtig, falsch wäre.
- ▶ Aufgrund der zusätzlichen Störung des Verkehrsflusses ist bei den Luftschadstoffemissionen am Maßnahmenort von einer Mehrbelastung auszugehen. Für eine großflächige Umsetzung ist die Maßnahme nicht geeignet, weshalb keine Wirkung auf die Treibhausgase ausgewiesen werden kann.

Der Maßnahmentyp „**Fahrradverkehr im Mischverkehr aufwerten**“ umfasst zwei verkehrsrechtliche Instrumente, die mit Blick auf ihre Wirkungsweise zusammengefasst werden können: Fahrradstraßen und Schutzstreifen für Fahrradfahrende. In beiden Fällen wird Fahrradfahrenden eine besondere Stellung auf der Verkehrsfläche des motorisierten Verkehrs eingeräumt. Daraus ergeben sich folgende Effekte:

- ▶ Die motorisierten Verkehrsteilnehmenden müssen ihre Fahrweise den Fahrradfahrenden zusätzlich anpassen. Hinzu kommt, dass die von der Maßnahmenumsetzung betroffene Strecke für Fahrradfahrende attraktiver wird, deren Verkehrsstärke dort zunimmt und somit zusätzliche Störungen für den motorisierten Verkehr auftreten.
- ▶ Ebenso wie bei Maßnahmen der Verkehrsberuhigung kann sich aufgrund von Rücksichtnahme ein gleichförmigerer Fahrstil einstellen, es können aber auch zu zusätzlichen Brems- und Beschleunigungsmanövern hervorgerufen werden. Inwiefern sich die Maßnahme auf die Fahrweise und den Verkehrsfluss und damit auf die spezifischen Emissionen auswirkt, ist nicht ausreichend untersucht. Dallmeyer (2014) simuliert den Effekt zwar, weist jedoch keine quantitativen Wirkungen aus. Beispielhaft könnten Steigungstrecken, an denen der Radverkehr langsam und die Fahrzeugbeschleunigung energieintensiv ist, für eine Untersuchung von Interesse sein.
- ▶ Sofern die Beeinträchtigung für den Autoverkehr auf der betroffenen Strecke groß werden (z.B. auf vielbefahrenen Fahrradstraßen) können sich Routenwahleffekte einstellen.
- ▶ Insgesamt ist damit unklar und voraussichtlich einzelfallspezifisch, inwieweit Wirkungen auf die lokale Luftschadstoffbelastung eintreten.
- ▶ Der verbreitete Einsatz von Fahrradstraßen und Schutzstreifen kann ein wichtiger Bestandteil des Ausbaus der Fahrradinfrastruktur sein. Ahrens et al. (2013) weisen für eine konsequente Radverkehrsförderung ein Potenzial zur Fahrleistungsminderung des Pkw-Verkehrs von rund 10 % aus (optimistischer Fall). Zwar kommt ein großer Teil dieser Veränderung von einem angenommenen Bewusstseinswandel und der Zusammenhang zwischen Infrastruktur und diesem Wandel ist nicht belegt. Dennoch kann die Annahme formuliert werden, dass dieser Maßnahmentyp einen wahrnehmbaren Beitrag zum Klimaschutz im Verkehrssektor leisten kann. Dieser würde jedoch

ausschließlich aus dem Rückgang der MIV-Fahrleistung resultieren, der Effekt des Verkehrsflusses wäre im Vergleich dazu vernachlässigbar.

Der letzte Maßnahmentyp dieser Kategorie ist das **Umwidmen von MIV-Verkehrsflächen**. Der Maßnahmentyp grenzt sich dadurch von anderen Maßnahmen dieser Kategorie ab, dass die umgewidmete Verkehrsfläche nicht mehr (allgemein) durch den MIV genutzt werden darf. In der praktischen Umsetzung bedeutet eine solche Maßnahme für den motorisierten Verkehr häufig die Wegnahme eines Fahrstreifens. Gleichzeitig werden entsprechend der neuen Nutzung andere Modi (bzw. bestimmte MIV-Fahrzeuge) aufgewertet, etwa der Radverkehr durch das Einrichten eines baulich getrennten Fahrradweges oder der ÖPNV durch einen Busfahrstreifen, die zur Beschleunigung und zu einer erhöhten Pünktlichkeit des ÖPNV beiträgt. Innerhalb dieses Maßnahmentyps sind Umweltfahrstreifen oder HOV-Lanes (Heavy-Occupied-Vehicle-Lanes) eine Sonderform, da hier weiterhin der MIV die umgewidmeten Verkehrsflächen nutzen darf, jedoch nur ausgewählte Fahrzeuge. Zusammengefasst ergeben sich diese Wirkungen:

- ▶ Die Kapazität der Strecke für den MIV nimmt ab. Inwiefern dies von Bedeutung ist, hängt von der ursprünglichen Verkehrsstärke und dem Streckentyp ab. Da die Kapazität innerorts vor allem durch die Knotenpunkte vorgegeben wird, sind vor allem die Fahrstreifenanzahl und die Aufweitungen im Knotenpunktbereich relevant.
- ▶ Sofern sich durch eine Verschlechterung des Verkehrszustandes die Fahrtzeiten auf der Strecke erhöhen, ist es möglich, dass sich ein Rückgang der Verkehrsstärke am Maßnahmenort einstellt. Gleichzeitig führen die verursachten Ausweichverkehre zu einer höheren Verkehrsbelastung im umliegenden Netz. Uhlig et al. (2018) untersuchte für die Stadt Kiel die Wirkung eines beidseitigen Busstreifens auf dem Theodor-Heuss-Ring. Die Zahl der Fahrstreifen pro Richtung wurde von drei auf zwei Fahrstreifen reduziert. Zusätzlich wurde die zulässige Geschwindigkeit von 70 km/h auf 50 km/h begrenzt und es wurden zwei neue Schnellbuslinien eingerichtet. Dadurch sank die Pkw-Fahrleistung im Untersuchungsraum um 3 %. Dieser relativ große Rückgang erklärt sich zum Teil durch die Wahl direkterer Routen, was mit Verlagerungen ins untergeordnete Netz einhergeht.
- ▶ Hinsichtlich der Luftschadstoffemissionen kann sich somit eine Zunahme oder eine Abnahme einstellen (Minderung durch lokal niedrigere Verkehrsstärken, Zunahme aufgrund einer Verschlechterung der Verkehrszustände). Dies hängt von der spezifischen Situation im Einzelfall ab.
- ▶ Neben dem Ziel eines Rückgangs der MIV-Verkehrsstärke am Maßnahmenort, wird die Förderung des jeweiligen zukünftigen Nutzers der Verkehrsfläche (z.B. ÖPNV oder Fahrradverkehr) als Maßnahmenziel benannt. Der Beitrag zur Minderung der Fahrleistung des MIV, der durch eine solche Attraktivitätssteigerung hervorgerufen wird, wird durch Einzelmaßnahmen gering sein.
- ▶ Wie auch bei anderen Maßnahmen dieser Kategorie wird die Umwidmung von Fahrstreifen für den Klimaschutz vor allem dann von Bedeutung sein, wenn sie in ein größeres netzplanerisches Gesamtkonzept eingebettet ist. Hat ein solches Konzept einen innerstädtischen klimafreundlichen Verkehr als Ziel, kann der Rückbau von Verkehrsflächen des MIV einen wichtigen Baustein darstellen und gleichermaßen wie das Einrichten von Fahrradstraßen und Schutzstreifen einen wahrnehmbaren Beitrag zur Reduktion des Treibhausgasausstoßes leisten.

Die Wirkungen der Maßnahmen dieser Kategorie auf den Verkehrsfluss und die damit verbundenen Effekte auf die Schadstoffemissionen sind nur wenig untersucht. Mikroskopische Simulationen der Effekte zwischen unterschiedlichen Verkehrsteilnehmenden im städtischen Verkehr können hier neue Erkenntnisse liefern. Dallmeyer (2014) beschreibt die Modellierung entsprechender Situationen, wendet diese jedoch nicht auf die Wirkungen für Energieverbrauch und Luftschadstoffausstoß aus. Die Effekte auf die MIV-Fahrleistung und damit die indirekte Wirkung auf den Verkehrsfluss über die Auslastung der Infrastruktur kann mit Verkehrsnachfragemodellen grundsätzlich abgebildet werden. Infrastrukturelle Maßnahmen zur Förderung der aktiven Mobilität, die in dieser Maßnahmenkategorie eine entscheidende Rolle spielen, sind in der Praxis häufig nicht oder nur stark abstrahiert modellierbar. Eine zunehmend genauere Abbildung in Verkehrsmodellen könnte (und wird) präzisere Erkenntnisse über die Wirksamkeit der Maßnahmen dieser Kategorie liefern.

3.2.5 Maßnahmen zur Optimierung des MIV-Verkehrsflusses an Knotenpunkten

Insbesondere an Knotenpunkten wird der Verkehrsfluss gestört, sofern diese nicht planfrei ausgebaut sind. Innerorts liegen hier die Kapazitätsengpässe. Über die Steuerung sowie die bauliche Ausgestaltung der Knotenpunkte kann auf das Maß der Störung Einfluss genommen werden. Die in Tabelle 59 genannten Maßnahmen haben primär zum Ziel, den Verkehrsfluss für den motorisierten Verkehr zu optimieren.

Tabelle 59: Maßnahmen zur Optimierung des MIV-Verkehrsflusses an Knotenpunkten

| Maßnahmentyp | Effekte am primären Wirkungsort | | | | | | | ...im gesamten Wirkungsbereich | | | | |
|---|---------------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------------|
| | Verstetigter Verkehr durch... | | | | Sonstige verkehrliche Effekte | | | Verkehrliche Effekte | | | | |
| | weniger Störungen | verändertes Fahrverhalten | erhöhte Kapazität (Angebot) | reduzierte MIV-Fahrleistung | reduzierte MIV-Fahrleistung | niedrigere Emissionsfaktoren | verringert Emissionen ÖSPV | verringerte Luftschadstoffbelastung | verstetigter Verkehr generell | reduzierte MIV-Fahrleistung | niedrigere Emissionsfaktoren | verringerte Treibhausgasemissionen |
| LSA-Programm für MIV optimieren (Signalzeitenpläne überarbeiten, Grüne Welle, verkehrsabhängige bzw. umweltsensitive Steuerung) | + | | + | | | | | ↑ | | - | | ↕ |
| Knotenpunkt ohne LSA für den MIV optimieren | + | | + | | | | | ↗ | | - | | → |
| Knotenpunkt zu Kreisverkehrsplatz umgestalten | +/- | +/- | +/- | | | | | ↕ | | | | → |
| LSA-gesteuerten Knotenpunkt zu planfreien Knoten umgestalten | + | | + | - | - | | | ↗ | | | | → |
| LSA-Nachtabstaltung einrichten | + | | | | | | | ↗ | | | | → |

Unter den Maßnahmen, die sich auf die Ausgestaltung von Knotenpunkten beziehen, wird mit Abstand am häufigsten eine **Optimierung der Steuerungen von Lichtsignalanlagen für den MIV** genannt. Maßnahmen dieses Typs können neben der reinen Anpassung der Steuerung auch bauliche Maßnahmen zur Veränderung des Knotenpunktlayouts und der Organisation der

Ströme umfassen. Diese Optimierung kann unterschiedliche Kriterien verfolgen. Zur Berechnung der Leistungsfähigkeit eines Knotenpunktes wird die mittlere Verlustzeit am schlechtestbewerteten Strom herangezogen, weshalb eine Optimierung nach diesem Kriterium naheliegend sein kann. Die Optimierung kann aber auch mit Blick auf die Gesamtverlustzeit erfolgen oder den Schadstoffausstoß minimieren, wofür die Brems- und Anfahrvorgänge von zusätzlicher Bedeutung sind. Weiterhin sind unterschiedliche Steuerungsansätze möglich: Festzeitsteuerung, verkehrsabhängige oder umweltsensitive Steuerungsverfahren, mit oder ohne Freigabeanforderungen durch nichtmotorisierte Verkehrsteilnehmende, einer Priorisierung des öffentlichen Verkehrs oder einer Berücksichtigung umliegender LSA-gesteuerter Knotenpunkte (grüne Welle). Die Wirkung des Maßnahmentyps ist im Überlastungsfall eingeschränkt – auch bei einer idealen Steuerung kann oberhalb der Kapazitätsgrenze kein flüssiger Verkehr erreicht werden. Aus diesem Grund kann eine LSA-Optimierung mit einer Pfortnerung kombiniert werden (siehe Kapitel 3.2.7). Entgegen der vielfachen Annahme, dass eine Optimierung der Steuerung von LSA-Knotenpunkten eine einmalig durchzuführende Maßnahme ist, ist die konkrete Umsetzung der Maßnahme mit einem dauerhaften zusätzlichen Personalbedarf verbunden, da die Steuerungsverfahren regelmäßig überprüft und angepasst werden müssen. Mit dem Steuerungsprogramm einer LSA können unterschiedliche verkehrsplanerische Ziele verfolgt werden. Von Bedeutung ist neben der Verflüssigung des MIV die Förderung des Umweltverbundes durch geringe Wartezeiten (siehe Kapitel 3.2.6). Verkehrsabhängige Steuerungsverfahren für den ÖPNV stellen Möglichkeiten dar, das zweitgenannte Ziel zu erreichen. Sie stehen zum Teil im Widerspruch zur Optimierung des MIV-Verkehrsflusses, insbesondere durch eine fallweise eingeschränkte Vereinbarkeit mit Grüne-Welle-Programmen. Insofern haben sich in den Städten unterschiedliche Planungsphilosophien herausgebildet, weshalb eine allgemeingültige Beurteilung des Optimierungspotenzials mit dem Ziel einer Verbesserung des Verkehrsflusses schwierig ist. Allgemeinhin kann von folgenden Effekten ausgegangen werden:

- ▶ Ziel einer Verkehrssteuerung ist es, die vorhandenen Kapazitäten an einem Knotenpunkt so auf die konkurrierenden Verkehrsströme zu verteilen, dass die Verlustzeiten und die Zahl der Halte minimiert werden.
- ▶ Eine Änderung der Knotensteuerung wird die Routenwahlentscheidungen der Verkehrsteilnehmenden im Regelfall kaum beeinflussen. Die Verkehrsstärken am Maßnahmenort bleiben deshalb weitgehend unverändert.
- ▶ Die Verbesserung des Verkehrsflusses und die damit verbundenen vermiedenen Brems- und Anfahrsvorgänge können zu einem relevanten Rückgang der spezifischen Emissionsfaktoren führen. Brilon et al. (2007) führen in ihrer Literaturanalyse zum Nutzen fortgeschrittener Lichtsignalanlagen die Ergebnisse mehrerer Forschungsprojekte an. Eine Koordinierung von Knotenpunkten ohne und mit einer verkehrsabhängigen Steuerung kann gegenüber einer unkoordinierten Festzeitsteuerung die Fahrtzeit, die Zahl der Halte und die Emissionen deutlich reduzieren. Bei den Emissionen liegen die berichteten Einsparungen in den meisten Fällen in einer Größenordnung von 10 % bis 15 %. Das gute Kosten-Nutzen-Verhältnis von LSA-Optimierungsmaßnahmen wird dabei betont. Sumpf (2008) untersuchte die Wirkung unterschiedlicher LSA-Koordinierungen und stellte fest, dass der Verbrauch und die Emissionen in einem sehr ungünstigen Fall um das Dreifache gegenüber einer guten Koordinierung ansteigen können. Hohmann et al. (2013) stellen nur ein zusätzliches sehr geringes Verbesserungspotenzial (die Werte liegen in einem Bereich der eine eindeutige Aussage schwierig macht) durch adaptive Steuerungsansätze gegenüber konventionellen Steuerungsverfahren fest. Schüler et al. (2008) stellen ein Verfahren vor, das eine

emissionsoptimierte verkehrsabhängige Steuerung eines Streckenzugs ermöglicht. In einem Feldtest führt die Anwendung zu einer Minderung der NO_x-Emissionen um 5 % und der Treibhausgasemissionen um 3 %. Lüßmann (2015) untersucht die Wirkung von C2X-Kommunikation, die einerseits eine optimale Zufahrtsgeschwindigkeit (Fahrer*innen-/Fahrzeuginformation) andererseits eine Koordinierung der LSA-Grünzeiten aufgrund der exakten Verkehrslage zulässt. In dem von ihm untersuchten Beispiel wird ein netzweiter Rückgang der CO₂-Emissionen um rund 6 % erreicht. Die Spannweite der Einspareffekte ist insbesondere durch eine unterschiedliche Wahl des Bezugs- oder Ausgangszustands begründet. Während gegenüber einer komplett fehlenden Koordination hohe Einsparpotenziale möglich sind, sind unter realen Bedingungen meist nur geringere Einsparmöglichkeiten vorhanden, wie die letztgenannten beiden Forschungsarbeiten zeigen.

- ▶ Die Maßnahme führt in der Regel zu Fahrtzeitverkürzungen für den MIV (das Verhältnis zwischen Emissionsrückgang und Reisezitrückgang ist nicht eindeutig, vgl. Brilon et al. 2007). Bei einer Optimierung der Steuerung eines einzelnen Knotenpunktes oder der Steuerungen für einen bestimmten Streckenzug, ist nicht davon auszugehen, dass sich dies wahrnehmbar auf die Moduswahl auswirkt. Eine umfassende Optimierung aller LSA-Steuerungen in einem bestimmten Gebiet kann, je nach Ausgangssituation und Optimierungspotenzial, dagegen die Attraktivität des MIV in einem Maß erhöhen, dass sich Wirkungen auf die Verkehrsnachfrage einstellen. Dieser Nachfrageeffekt kann als Rebound-Effekt bezeichnet werden, da er mit Blick auf die angestrebten Emissionsminderungen dem Ziel der Maßnahme entgegenläuft. Dieser Effekt wird in vielen Maßnahmenuntersuchungen nicht berücksichtigt.
- ▶ Dieser Effekt wird dadurch verstärkt, dass durch eine Optimierung nach Zielen des MIV anderen Zielen nur eine geringere Priorität eingeräumt werden kann, also die Förderung des Fuß- und Radverkehrs oder die Beschleunigung des öffentlichen Verkehrs in den Hintergrund tritt.
- ▶ Die Wahl des LSA-Programms erfordert immer eine Abwägung zwischen Kapazität und Verkehrssicherheit. Mehr Phasen erhöhen die Sicherheit, reduzieren aber die verfügbare Grünzeit. Eine Optimierung mit dem Ziel eines verbesserten Verkehrsflusses muss somit immer die Aspekte der Verkehrssicherheit mitberücksichtigen.
- ▶ Aufgrund der genannten gegenläufigen Effekte bei einer großflächigen Umsetzung kann die Wirkungsrichtung im Bereich des Klimaschutzes nicht eindeutig festgelegt werden. Da vielbefahrene Knotenpunkte häufig Hotspots lokaler Luftschadstoffbelastung darstellen, können Maßnahmen dieses Typs im Bereich der Luftreinhaltung dennoch von großer Bedeutung sein.

Auch **Knotenpunkte ohne LSA** können durch bauliche und verkehrsrechtliche Maßnahmen mit Blick auf den Verkehrsfluss optimiert werden. Bei Maßnahmen dieser Art, die sich in Luftreinhalteplänen finden, steht häufig das Vermeiden von Rückstaus durch Abbiegeströme (in der Regel der linksabbiegenden Ströme) im Mittelpunkt. Zu diesem Zweck sollen Abbiegestreifen geschaffen oder verlängert werden. Sofern das Linksabbiegen oder Querverkehre untersagt werden, wird dies dem Maßnahmentyp „kleinräumige routenwahlbeeinflussende Netzgestaltung“ zugeschrieben (Kapitel 3.2.7). Zusammenfassend stehen folgende Effekte mit der Maßnahme in Zusammenhang:

- ▶ Eine bauliche oder verkehrsrechtliche Umgestaltung eines Knotenpunkts reduziert die Störungen der bevorrechtigten Ströme durch wartende Fahrzeuge in den untergeordneten Strömen entstehen.
- ▶ Ein Ausbau der Abbiegefahrstreifen geht in aller Regel mit einem erhöhten Flächenverbrauch einher. Nur in Einzelfällen wird die Möglichkeit bestehen, bei gleichem Ressourcenverbrauch durch Umverteilung eine Verbesserung herbeizuführen. Bei einer Ausweitung der Flächeninanspruchnahme ist die Maßnahme evtl. mit Auswirkungen für andere Verkehrsteilnehmende verbunden.
- ▶ Die Maßnahme kann durch eine Minderung von Rückstaus und eine Verbesserung der Qualität des Verkehrsablaufs lokal am Ort der Maßnahme zu einer Verbesserung der Luftqualität beitragen. Die Bedeutung des Maßnahmentyps für die Luftreinhaltung wird dadurch geschmälert, dass nicht signalisierte, plangleiche Knotenpunkte in der Regel keine Hotspots der Luftschadstoffbelastung darstellen.
- ▶ Die Gestaltung der Maßnahme muss ortsspezifische Randbedingungen beachten und ist aufwendig in der Umsetzung. Für ein relevantes Verbesserungspotenzial an einem Knoten müssen mehrere Faktoren zusammenfallen, weshalb ein breites Ausrollen der Maßnahme unrealistisch ist. Im Sinne des Klimaschutzes ist sie wenig bedeutsam.

Einen bestehenden **Knotenpunkt zu einem Kreisverkehrsplatz umzugestalten**, ist ein weiterer Maßnahmentyp, der häufig mit dem Ziel eines verbesserten Verkehrsflusses vorgeschlagen wird. In Planwerken im Bereich des Klimaschutzes bzw. der Luftreinhaltung wird der Maßnahmentyp meist für Knotenpunkte mit geringen Verkehrsstärken, die bereits über eine LSA-Steuerung verfügen, vorgeschlagen. Vor allem im Außerortsbereich werden aber auch vorfahrtgeregelt Knotenpunkte umgestaltet. Als Wirkungen lassen sich anführen:

- ▶ Da sich die Verkehrsregelung zwischen einem ungesteuerten bzw. LSA-gesteuerten Knotenpunkt und einem Kreisverkehr fundamental unterscheidet, wirken unterschiedliche Faktoren auf den Verkehrsfluss. Bei einem Kreisverkehrsplatz wird die Anzahl der vollständigen Halte in der Regel zwar geringer sein, jedoch müssen alle Fahrzeuge ihre Fahrt verlangsamen und im Anschluss daran wieder beschleunigen. Damit ist eine Vergleichbarkeit anhand einfacher Kenngrößen zur Beschreibung des Verkehrsflusses nur bedingt möglich.
- ▶ Auch die Kapazität kann sich, insbesondere in Abhängigkeit der Verteilung der Belastungen an den einzelnen Knotenarmen, durch eine Umgestaltung verbessern oder verschlechtern.
- ▶ Insofern sind auch die Wirkungen auf die lokale Luftreinhaltung nicht eindeutig zu bestimmen. Untersuchungen deuten in unterschiedliche Richtungen. Da die Verkehrsstärken tageszeitlich starken Schwankungen unterliegen, können die Wirkungen sich auch im Tagesverlauf verändern. Da eine LSA-Steuerung im Gegensatz zu einem Kreisverkehr an die jeweilige verkehrliche Situation besser angepasst werden kann, kann diese bei starken tageszeitlichen Schwankungen Vorteile haben. (vgl. u.a. Züger und Burch 2000, FGSV 2015b).
- ▶ Da die Flächeninanspruchnahme durch einen Kreisverkehr vergleichsweise hoch ist und die Einsatzbereiche hinsichtlich der Nachfrage beschränkt sind, hängt die Eignung eines Kreisverkehrs von den lokalen Gegebenheiten ab.

Die **Umgestaltung eines LSA-gesteuerten Knotenpunktes zu einem planfreien Knotenpunkt** ist eine infrastrukturelle Maßnahme die aufgrund des Umfangs, des Aufwands und der Notwendigkeit geeigneter Rahmenbedingungen nur selten vorgeschlagen wird. Gleichzeitig ist sie aus verkehrlicher Sicht von hoher Relevanz, da sie mit starken Wirkungen verbunden ist:

- ▶ Störungen im Verkehrsfluss fallen vollständig weg, sofern die Knotenpunktkapazität nicht überschritten wird. Zusätzlich erhöht sich die Kapazität des Knotens, wodurch sich der Verkehrsfluss in Summe verbessern wird.
- ▶ Es kann davon ausgegangen werden, dass eine entsprechende Maßnahme nur an stark belasteten Knoten durchgeführt wird, an denen sich die LSA-Steuerung an der Grenze der Leistungsfähigkeit befindet. Damit wird die Maßnahme zu einer maßgeblichen Verkürzung der Verlustzeiten am entsprechenden Knotenpunkt führen. Dies kann, sofern sich dies bei gegebener Netztopographie anbietet, zu Verlagerungen bei der Routenwahl führen und zusätzlichen Verkehr an Maßnahmenort verursachen.
- ▶ Mit Blick auf die Luftreinhaltung wird sich am Maßnahmenort mit hoher Wahrscheinlichkeit dennoch eine Verbesserung einstellen, da der verbesserte Verkehrsfluss die Routenwahleffekte dominiert.
- ▶ Eine Ausweitung der Umgestaltung von LSA-gesteuerten Knotenpunkten zu planfreien Knoten in Deutschland mit der Argumentation des Klimaschutzes ist unwahrscheinlich und da nur wenige Knotenpunkte die Voraussetzung erfüllen hinsichtlich der Wirksamkeit unbedeutend. Der Maßnahmentyp bedeutet eine langfristige bauliche Priorisierung des motorisierten Verkehrs, wodurch Mehrverkehr verursacht wird. Aufgrund der massiven baulichen Tätigkeiten bei der Maßnahmenumsetzung wären auch die Aufwände der Infrastrukturherstellung in die Klimabilanzierung zu berücksichtigen.

Das **Einrichten einer LSA-Nachtabstaltung** ist im weiteren Sinne auch eine Optimierung der LSA-Steuerung mit dem Ziel eines verbesserten Verkehrsflusses, weist jedoch den Unterschied auf, dass keine kapazitätsbezogenen Effekte auftreten werden. Die Wirkungen der Maßnahme sind:

- ▶ Der Verkehrsfluss wird verbessert, da weniger Halte notwendig sind. Der GDV (2008) stellt ausschließlich die Fahrzeiteinsparungen (rund 3 %) dar, jedoch keine Kenngrößen des Verkehrsablaufs.
- ▶ Das zentrale Argument gegen die Maßnahme ergibt sich aus einer Minderung der Verkehrssicherheit (vgl. GDV 2008).
- ▶ Es ergeben sich keine Wirkungen auf Modus- und Routenwahl.
- ▶ Am Maßnahmenort können geringe Verbesserungen der Luftschadstoffemissionen erreicht werden, wobei dies keinen Effekt auf die Immissionen in den kritischen Zeitbereichen der Spitzenstunden haben wird.
- ▶ Bei einer großflächigen Betrachtung ist die Maßnahme für den Klimaschutz von untergeordneter Bedeutung.

Der Verkehrsfluss realer Knotenpunkte (mit und ohne Lichtsignalsteuerung, unterschiedliche Topographien, unterschiedliche Steuerungsverfahren) ist in vielen Studien untersucht worden. Die verkehrlichen Wirkungen wurden dabei häufig nicht gemessen, sondern mit

Verkehrsflussmodellen simuliert. In vielen Fälle wurden zusätzlich die Emissionen des Straßenverkehrs berechnet. Die Ergebnisse der Studien zeigen, dass es schwer ist die Wirkungen von Maßnahmen an Knotenpunkten auf den Verkehrsfluss und die Emissionen zu verallgemeinern. Die kombinierte Wirkung aus verändertem Verkehrsfluss und veränderter Verkehrsnachfrage auf den Energieverbrauch und die Gesamtemissionen ist bisher unzureichend untersucht.

3.2.6 Maßnahmen zur Bevorrechtigung von ÖV, Rad- und Fußverkehr an Knotenpunkten

Die an einem Knotenpunkt vorhandenen Kapazitäten werden durch die Steuerung zwischen den Strömen, aber auch unter den verschiedenen Verkehrsteilnehmenden aufgeteilt. Die im vorhergehenden Kapitel genannten Maßnahmen waren auf eine Optimierung des Verkehrsflusses im MIV ausgerichtet. Gleichzeitig werden häufig Maßnahmen diskutiert, die zu einer Umverteilung der Netzkapazitäten hin zum Umweltverbund führen sollen. Knotenpunktbezogene Maßnahmen dieser Art sind in Tabelle 60 aufgeführt. Grundsätzlich gilt für alle Maßnahmen dieser Kategorie, dass eine Optimierung für einen bestimmten Verkehrsteilnehmenden die eines anderen nicht ausschließt. Karrer et al. (2021) demonstrieren dies am Beispiel der Ausstattung eines Knotenpunktes mit einer modernen Selbst-Steuerung, durch die alle Verkehrsteilnehmenden profitieren. Mit dem Blick auf den Verkehrsfluss im MIV kann jedoch argumentiert werden, dass ein Wegfall der Randbedingungen für die anderen Verkehrsteilnehmenden noch bessere Ergebnisse erzielt werden könnten.

Tabelle 60: Maßnahmen zur Bevorrechtigung von ÖV, Rad- und Fußverkehr an Knotenpunkten

| Maßnahmentyp | Effekte am primären Wirkungsort | | | | | | | ...im gesamten Wirkungsbereich | | | | |
|--|---------------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------------|
| | Verstetigter Verkehr durch... | | | | Sonstige verkehrliche Effekte | | | Verkehrliche Effekte | | | | |
| | weniger Störungen | verändertes Fahrverhalten | erhöhte Kapazität (Angebot) | reduzierte MIV-Fahrleistung | reduzierte MIV-Fahrleistung | niedrigere Emissionsfaktoren | verringert Emissionen ÖSPV | verringerte Luftschadstoffbelastung | verstetigter Verkehr generell | reduzierte MIV-Fahrleistung | niedrigere Emissionsfaktoren | verringerte Treibhausgasemissionen |
| ÖV-Bevorrechtigung an LSA-gesteuerten Knotenpunkten einrichten | - | | - | | | | + | ↕↔ | | ○ | | ↔ |
| Knotenpunktgestaltung und LSA-Programme für Rad- und Fußverkehr optimieren | - | | - | | | | | ↘ | | ○ | | ↔ |
| Freigabeanforderung für zu Fuß Gehende an LSA-gesteuerten Knotenpunkten einrichten | +/- | | +/- | | | | | ↕↔ | | ○ | | → |

Maßnahmen vom Typ „**ÖV-Bevorrechtigung an LSA-gesteuerten Knotenpunkten einrichten**“ wird auch in Luftreinhalteplänen jüngerer Datums sowie in Green-City-Plänen des Öfteren genannt, was darauf hindeutet, dass für eine Optimierung in diese Richtung noch Potenziale bestehen. Die Busse oder Straßenbahnen fordern vor Erreichen des Knotenpunktes Grünzeit an, woraufhin das Signalprogramm angepasst wird. Problematisch ist eine ÖV-

Bevorrechtigung insbesondere für eine LSA-Koordinierung mit dem Ziel einer Grünen Welle. Neuere, dynamische Steuerungsverfahren können diesen Widerspruch zwar in Maßen abfangen (z.B. Selbst-Steuerung, vgl. Karrer et al. 2021), eine Priorisierung des öffentlichen Verkehrs bedeutet in der letzten Konsequenz dennoch Einschränkungen für die anderen Verkehrsteilnehmenden. Entsprechend ergeben sich folgende Effekte:

- ▶ Gegenüber einer Optimierung nach Kriterien des MIV-Verkehrsflusses wird bei einer ÖV-Priorisierung der Verkehrsfluss des MIV durch zusätzliche Halte am Knotenpunkt gestört und die Kapazität geschmälert. Dies kann zu höheren Verlustzeiten und einem schlechteren Verkehrsfluss führen. Daraus ist, wie Eingangs in diesem Kapitel erläutert, nicht zu folgern, dass eine Optimierung nicht sowohl eine ÖV-Priorisierung zulässt und gleichzeitig die Verkehrsqualität des MIV verbessern kann.
- ▶ Die Emissionen des öffentlichen Straßenpersonenverkehrs werden durch die Maßnahme am Knotenpunkt voraussichtlich sinken, da die Häufigkeit der Haltevorgänge sinkt.
- ▶ Für die Minderung der Luftschadstoffe stehen sich diese beiden Effekte gegenüber. Deshalb ist keine pauschale Aussage möglich, wie sich die Maßnahme auf die lokale Luftqualität auswirken wird.
- ▶ Das zentrale Argument für eine Einführung der Maßnahme ist meist eine Attraktivitätssteigerung des öffentlichen Verkehrs. Diese geht neben der Beschleunigung vor allem von einer erhöhten Zuverlässigkeit aus.
- ▶ Die Maßnahme wird in vielen Fällen nicht mit Blick auf einzelne Knotenpunkte vorgeschlagen, sondern als eine flächige Optimierung bzw. Neuausrichtung der LSA-Steuerungen. In viele Kommunen sind die LSA-Steuerungen bereits stark für eine Priorisierung des öffentlichen Verkehrs ausgelegt. Insofern ist das Potenzial der Maßnahme nicht eindeutig zu bewerten.

Neben dem öffentlichen Verkehr können **Knotenpunktgestaltung und LSA-Programme auf die Bedürfnisse des Rad- und Fußverkehrs ausgerichtet werden**. Dazu kann eine Vielzahl unterschiedlicher LSA-Programme sowie eine veränderte Aufteilung der Verkehrsflächen beitragen. Egeler et al. (2015) geben einen guten Überblick über Ausgestaltungsmöglichkeiten für die Schweiz (u.a. Grüne Wellen für den Radverkehr, Diagonalqueren für den Fußverkehr, beides als genauer zu untersuchende Optionen identifiziert). Die Wirkungen sind:

- ▶ Gegenüber einer Optimierung hinsichtlich des Verkehrsflusses des MIV wird bei einer Bevorzugung des nichtmotorisierten Verkehrs der Verkehrsfluss des MIV durch zusätzliche Halte am Knotenpunkt gestört. Zusätzlich kann die Kapazität für die Ströme des MIV reduziert sein. Dies kann zusätzlich zu höheren Verlustzeiten und einem schlechteren Verkehrsfluss beitragen. Auch hier gilt, dass sich eine Optimierung für den Rad- oder Fußverkehr nicht zwangsläufig negativ auswirken muss (s.o.). Beyer (2009) zeigt auf Grundlage von Simulationen bei einer Untersuchung zur Einführung einer grünen Welle, dass nur in Einzelfällen höhere Fahrtzeiten und häufigere Haltevorgänge für den MIV entstehen würden.
- ▶ Lokal wird sich damit eine Zunahme der Emissionen ergeben.
- ▶ Den Rad- und Fußverkehr betreffende Maßnahmen sind für die Verkehrssicherheit bedeutsam. Durch eine Senkung der Wartezeiten können regelwidrige Querungsvorgänge reduziert bzw. vermieden werden (vgl. Egeler et al. 2015).

- ▶ Das primäre Argument für die Maßnahme liegt in einer Umverteilung der Straßenkapazitäten hin zum Fahrrad- und Fußverkehr, wodurch eine veränderte Moduswahl angestrebt wird. Bei der Umsetzung der Maßnahme an einzelnen Knotenpunkten ist kein wahrnehmbarer Effekt auf das Verkehrsnachfrageverhalten zu erwarten.
- ▶ Im Kontext einer umfassenden Rad- und/oder Fußverkehrsförderung stellt die Priorisierung des nichtmotorisierten Verkehrs an Knotenpunkten eine notwendige Komponente dar. Dennoch ist das Potenzial der daraus resultierenden Treibhausgasemissionsminderung aufgrund der damit einhergehenden Verschlechterungen des Verkehrsflusses für den MIV beschränkt. Inwiefern sich die Ziele einer Verstärkung des motorisierten Verkehrs und einer Bevorrechtigung der aktiven Mobilität in städtischen Räumen unter diesem Gesichtspunkt aufheben, ist nach derzeitiger Studienlage nicht klar zu beantworten.

Das **Einrichten einer Freigabeanforderung für zu Fuß Gehende an LSA-gesteuerten Knotenpunkten** wird vereinzelt in Luftreinhalteplänen als geeignete Maßnahme angesehen. Dazu ließen sich auch die Möglichkeit einer Freigabeanforderung durch Radfahrende zählen, diese tauchen in den Planwerken jedoch nicht explizit auf. Die Wirkungen sind stark einzelfallabhängig:

- ▶ Der Maßnahmentyp wird für Knotenpunkte vorgeschlagen, an denen eine positive Wirkung auf den Verkehrsfluss des MIV erwartet wird. Dies ist prinzipiell bei sehr geringen Fußverkehrsstärken der Fall. Wie bereits beschrieben, sind komplexe Steuerungssysteme notwendig, um Freigabeanforderungen – auch für den Fußverkehr – mit einer Koordinierung mit umliegenden LSA-gesteuerten Knotenpunkten zu kombinieren. Sofern die Entscheidung zwischen konventioneller Grünen Welle und Freigabeanforderung für den Fußverkehr getroffen werden muss, wirkt zweitens voraussichtlich negativ auf den Verkehrsfluss.
- ▶ Ebenso wirkt die Maßnahme bei einer seltenen Anforderung der Grünzeit durch zu Fuß Gehende positiv auf die Kapazität der anderen Verkehrsteilnehmenden, bei einer häufigen Anforderung jedoch negativ.
- ▶ Damit kann lokal der verkehrsbedingte Luftschadstoffausstoß gesenkt aber auch erhöht werden.
- ▶ Neben der Verbesserung des Verkehrsflusses für den MIV wird für die Maßnahme auch das Argument der Fußverkehrsförderung ins Feld geführt. Sofern damit eine Verkürzung der mittleren Wartezeiten erreicht werden kann, ist dies zwar positiv, das Verkehrsnachfrageverhalten wird sich durch eine einzelne Maßnahme dieser Art aber kaum beeinflussen lassen. Andererseits werden LSA mit Bedarfsanforderung häufig auch als „Bettelampel“ empfunden, weshalb vorhandene Bedarfsanforderungen teilweise wieder umgerüstet werden. Eine Freigabe des Fuß- und Radverkehr erfolgt dann unabhängig von der Verkehrsmenge in jedem Umlauf.
- ▶ Analog zu einer generellen Priorisierung des nichtmotorisierten Verkehrs an Knotenpunkten kann die Freigabezeit Anforderung für den Fußverkehr (und auch für Radverkehr) als ein Bestandteil der infrastrukturellen Förderung dieser Modi angesehen werden. Die lokalen Einsatzbereiche sind jedoch beschränkt, sodass der Maßnahme keine klare Wirksamkeit zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen zugeschrieben werden sollte.

Die Wirkungen von Maßnahmen dieser Kategorie auf den Verkehrsfluss des motorisierten Verkehrs an Knotenpunkten ist aufgrund der zu berücksichtigenden Wechselwirkungen hoch komplex. Pauschale Aussagen sind nicht möglich. Karrer et al. 2021 zeigen, dass durch moderne Steuerungsverfahren für alle Verkehrsteilnehmende gleichermaßen Optimierungspotenzial genutzt werden kann. Da die Verbesserungsmöglichkeiten offensichtlich auch hier vom Ausgangszustand abhängen, lässt sich diese Aussage ebenfalls nicht verallgemeinern. Untersuchungen zur Wirkung auf den Verkehrsfluss können nur einzelfallbezogen sein. Somit ist die Übertragung der Veränderungen der Reisezeiten (und weiterer Variablen wie Komfort oder Sicherheitsempfinden) für eine großflächigere Untersuchung der Verkehrsnachfragewirkungen kaum zu leisten, mit dem Resultat, dass entsprechende Untersuchungen nicht vorliegen und mit Blick auf die Gesamtemissionsbilanz nur Vermutungen zur Wirkungsrichtung angestellt werden können. Für eine Bewertung der Umweltwirkungen von Knotenpunktsteuerungen wäre es interessant, die Auswirkungen unterschiedlicher Planungsphilosophien unter Einsatz gleicher Technik zu vergleichen und als Bezugsgröße nicht den Status-Quo zu wählen.

3.2.7 Maßnahmen zur Reduzierung der MIV-Fahrleistung in einem definierten Gebiet

Eine große Anzahl von Maßnahmentypen, die im Rahmen der Luftreinhaltung und zum Klimaschutz im Verkehr vorgeschlagen werden, hat eine Reduzierung der MIV-Fahrleistung innerhalb eines bestimmten Gebiets zum Ziel. Die Maßnahmen können dabei auf bestimmte Fahrzeugkategorien (z.B. ausschließlich schwere Nutzfahrzeuge) bezogen sein. Sofern bestimmte Fahrzeugsegmente (z.B. Differenzierung nach Abgasnorm) adressiert werden, wird eine Veränderung der Flottenzusammensetzung und damit die Änderung der fahrzeugseitigen Emissionsfaktoren als primäres Maßnahmenziel angesehen. Sofern die Maßnahme keine maßgebliche Wirkung auf den Verkehrsfluss hat, wird diese nicht in die Maßnahmenammlung aufgenommen. Die im folgenden aufgeführten Maßnahmentypen leisten grundsätzlich einen positiven Effekt zur Luftreinhaltung am Maßnahmenort, da hier der Verkehr reduziert wird. Global, mit Blick auf den Klimaschutz, können unterschiedliche Maßnahmentypen in dieser Kategorie sehr unterschiedlich wirken, je nachdem, ob sie eine räumliche Verlagerung oder eine Gesamtreduktion des MIV bedeuten. Alle Maßnahmentypen dieser Kategorie sind in Tabelle 61 gegenübergestellt.

Tabelle 61: Maßnahmen zur Reduzierung der MIV-Fahrleistung in einem definierten Gebiet

| Maßnahmentyp | Effekte am primären Wirkungsort | | | | | | | ...im gesamten Wirkungsbereich | | | | |
|---|---------------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------------|
| | Verstetigter Verkehr durch... | | | | Sonstige verkehrliche Effekte | | | Verkehrliche Effekte | | | | |
| | weniger Hindernisse | verändertes Fahrverhalten | erhöhte Kapazität (Angebot) | reduzierte MIV-Fahrleistung | reduzierte MIV-Fahrleistung | niedrigere Emissionsfaktoren | verringert Emissionen ÖSPV | verringerte Luftschadstoffbelastung | verstetigter Verkehr generell | reduzierte MIV-Fahrleistung | niedrigere Emissionsfaktoren | verringerte Treibhausgasemissionen |
| Routenwahl-Information für den MIV (häufig Lkw) verbessern/bereitstellen (Wegweisung, Leitsystem, Navigationssystem, Netzkategorisierung) | | | | + | + | | | ➔ | +/- | | | ↕ |
| Lkw-Fahrverbote und -beschränkungen ausweisen | | | | + | + | | | ↑ | - | | | ↕ |
| Kleinräumige routenwahlbeeinflussende Netzgestaltung einsetzen (z.B. Einbahnstraßen, Abbiegeverbote) | | | + | + | + | | | ➔ | - | | | ↕ |
| Entlastungsstrecke (aus-)bauen (Ortsumfahrung, (Stadt-)Tunnel) | | | | + | + | | | ↑ | + | - | | ↕ |
| Pförtnerung an LSA einrichten | | | | + | + | | | ↑ | - | +/- | | ↕ |
| MIV-Nutzung in einem bestimmten Gebiet bepreisen (City-Maut) | | | | + | + | (+) | | ↑↑ | + | (+) | | ↑↑ |
| Fahrverbote aussprechen (autofreie Tage, alternierende Fahrerlaubnis nach Nummernschild, Diesel-Fahrverbote, ...) | | | | + | + | (+) | | ↑↑ | + | (+) | | ↑↑ |

Anmerkung: Die in Klammern gesetzten Effekte bei Gebiets-Bepreisung und Fahrverboten treten auf, wenn fahrzeugflottenspezifische Regelungen getroffen werden.

Sehr häufig werden Maßnahmen im Bereich der **Routenwahl-Information für den MIV** vorgeschlagen. Die Maßnahmen dieses Typs unterscheiden sich zentral in drei Gesichtspunkten: Erstens können unterschiedliche Medien eingesetzt werden, um die Informationen an die Verkehrsteilnehmenden heranzutragen (Wegweisung im Straßenraum vs. individuelle Endnutzer-Information über Navigationssysteme). Zweitens können die Informationen dynamisch oder statisch sein, was in engem Zusammenhang mit dem gewählten Medium steht. Drittens kann der Maßnahmenraum bei diesem Maßnahmentyp sehr unterschiedlich sein (z. B. Wechselwegweisung auf Autobahnen vs. Kategorisierung des innerörtlichen Hauptstraßennetzes). Durch eine zunehmende Nutzung privatwirtschaftlich angebotener, echtzeitdatenbasierter Navigationssoftware verlieren andere Informationsmedien an Bedeutung. Damit ist es wichtig, die gewünschten Informationen diesen Medien zuzuspielen, was beispielsweise direkt durch eine öffentlich-private Zusammenarbeit oder indirekt über eine Veränderung der Netzkategorisierung und/oder eine Kombination mit baulichen Maßnahmen erfolgen kann (vgl. Rühl 2018). Folgende Effekte gehen mit Maßnahmen dieses Typs einher:

- Durch die Verlagerungen der Verkehre verändern sich die Verkehrsstärken und damit die Verkehrszustände auf den betroffenen Strecken. Für die Verflüssigung des Verkehrs sind

vor allem dynamische Routenwahlempfehlungen von Relevanz, da hier das Ziel einer systemoptimalen Netzauslastung verfolgt werden kann, womit Verlustzeiten und schlechte Verkehrszustände global reduziert werden.

- ▶ Die Maßnahmen haben zum Ziel, auf gewünschten Netzabschnitten die Verkehrsstärken zu senken, womit die Fahrleistung am primären Wirkungsort abnimmt. Damit kann dort ein Effekt im Sinne der Luftreinhaltung erzielt werden. Die Wirksamkeit hängt maßgeblich davon ab, ob die zusätzlichen Informationen gegenüber den verfügbaren Informationen aus kommerziellen Routenwahlssystemen einen Mehrwert für den individuellen Nutzer bieten können oder aber ob es gelingt, diese mit den neuen Informationen zu überlagern.
- ▶ Grundsätzlich stellen zusätzliche Informationen immer eine Verbesserung des Verkehrsangebots des betroffenen Verkehrssystems (hier der MIV) dar. Matschke (2007) untersuchte die Wirkung von dynamischer Navigation und kam im Vergleich zu statischer Navigation auf einen Rückgang der Reisezeiten je nach Annahmen von etwa 3 % bis 5 %. Da heute aber bereits dynamische Echtzeitinformationen mit sehr guter Datengrundlage „frei“ verfügbar sind, ist der Informationsgewinn durch etwaige Maßnahmen als so gering einzuschätzen, dass kaum Wirkungen auf die Reisezeiten und damit die Verkehrsnachfrage zu erwarten sind.
- ▶ In Summe kann davon ausgegangen werden, dass der Verkehr räumlich verlagert (und das in geringem Maße) und nicht vermieden wird. Schygulla et al. (2011) berichten zwar von einer Einsparung von 5 % Fahrleistung und 7 % Kraftstoffverbrauch (statistisch nicht gesichert) durch den Einsatz von dynamischer Tourenplanungssoftware. Der Bezugsfall stellt jedoch auch hier eine Situation dar, die heute kaum noch vorkommen dürfte. Busch et al. (2009) stellen zwar positive Wirkungen auf die Gesamtfahrtzeit, jedoch negative Effekte hinsichtlich der zurückgelegten Fahrzeugkilometer durch den Einsatz einer Wechselwegweisung fest. Sofern erreicht werden kann, dass mehr Fahrzeugkilometer in besseren Verkehrszuständen zurückgelegt werden, können dadurch Emissionseinsparungen erreicht werden. In Summe kann die Treibhausgasbilanz einer Maßnahme dieses Typs damit in beide Richtungen ausschlagen.

Das **Ausweisen von Lkw-Durchfahrtsverboten und -beschränkungen** ist mit Blick auf die Häufigkeit der Nennungen in Planwerken eine für den lokalen Immissionsschutz sehr bedeutende Maßnahme. Die Beschränkungen gelten dabei meist für Kraftfahrzeuge >3,5 t oder >7,5 t zulässiges Gesamtgewicht. Sie können dauerhaft oder zeitlich begrenzt sein. In den allermeisten Fällen handelt es sich um Durchfahrtsverbote, Quell- Ziel- und Binnenverkehre sind also ausgenommen. Dies führt dazu, dass eine effiziente Kontrolle der Einhaltung erschwert ist, weshalb Maßnahmen dieses Typs mit einer Ausweitung der Kontrolldichte kombiniert werden sollten. Für die Luftreinhaltung und den Klimaschutz ergeben sich folgende Wirkungen:

- ▶ Am primären Wirkungsort kann von einer deutlichen Minderung der Lkw-Fahrleistung ausgegangen werden. Damit ist zwar nur ein geringer Teil des gesamten MIV betroffen, die Wirkung auf den Verkehrsfluss wird durch eine Veränderung des Schwerverkehrsanteils insbesondere im urbanen Gebieten, in denen Anfahrtsvorgänge an Knotenpunkten von Bedeutung sind, überproportional beeinflusst.
- ▶ Insgesamt kann die Maßnahme damit am primären Wirkungsort einen relevanten Beitrag zur Luftreinhaltung leisten. Diegmann et al. (2014) führen mehrere Untersuchungen mit Immissionsmessungen auf. Demnach nahmen die NO_x-Emissionen an einer zuvor „durch

hohen Lkw-Anteil geprägten Hauptverkehrsstraße“ um 20 % ab. Bei PM₁₀ wurde in verschiedenen Studien ein Rückgang zwischen 7 % und 10 % festgestellt.

- ▶ Fahrbeschränkungen für Lkw sind nur sinnvoll, wenn es verhältnismäßig direkte Alternativrouten mit einer ausreichenden Kapazität und abseits sensibler Gebiete bestehen (vgl. Diegmann et al. 2014). Sofern die Ausweichstrecken nicht bereits im Ausgangszustand hohe Auslastungsgrade aufweisen kann im Mittel eine Minderung der spezifischen Emissionsfaktoren erreicht werden.
- ▶ Die Maßnahme wird keine wahrnehmbaren Effekte im Bereich der Ziel- und Moduswahl im Güterverkehr haben. Die veränderte Routenwahl führt aller Wahrscheinlichkeit nach zu einer erhöhten Umwegigkeit aus der eine erhöhte Fahrleistung resultiert.
- ▶ Damit ist die Wirkungsrichtung der Maßnahme im Bereich des Klimaschutzes von ihrer konkreten Umsetzung abhängig. Diegmann et al. (2020) weisen für die dynamische Schaltung eines Lkw-Fahrverbots aufgrund der Zuwächse bei den Fahrzeugkilometern im Schwerverkehr in Summe durchwegs negative Umweltwirkungen aus.
- ▶ Maßnahmen dieses Typs werden häufig auch mit Gesichtspunkten der Lärminderung begründet.

Regelungen und Ansätze der Straßenraumgestaltung, die die Zulässigkeit bestimmter Verkehrsströme einschränken, werden unter dem Maßnahmentyp „**Kleinräumige routenwahlbeeinflussende Netzgestaltung**“ zusammengefasst. Maßnahmen dieser Art wirken zwar kleinräumig, der primäre Wirkungsort geht jedoch über den Ort, an dem die Maßnahme durchgeführt wird hinaus, da Verkehr zwangsläufig räumlich verlagert wird, weshalb sie kategorisch hier eingeordnet sind. Darunter fallen beispielsweise Abbiegeverbote oder Einbahnstraßenregelungen, durch die insbesondere Durchgangsverkehre durch sensible Gebiete vermieden werden sollen. In einzelnen Luftreinhalteplänen werden auch gegenläufige Überlegungen angestellt, nämlich die Öffnung untergeordneter Strecken für Durchgangsverkehre, um die verkehrliche Bündelung zu reduzieren und so Hotspots zu entlasten. Da dies jedoch derzeit gemeinhin akzeptierter verkehrsplanerischer Prinzipien widerspricht, ist eine Umsetzung solcher Maßnahmen nicht bekannt. Die zentralen Effekte der Maßnahme sind:

- ▶ Durch die Verlagerungen der Verkehre verändern sich die Verkehrsstärken am Maßnahmenort und in den umliegenden Gebieten. Am Maßnahmenort kann aufgrund der verkehrlichen Regelungen für die verbleibenden Ströme mit einer zusätzlichen Verflüssigung gerechnet werden, da sich für diese letztlich die Kapazität erhöht (z.B. keine Begegnungsfälle bei Einbahnstraßen, kein Rückstau durch Linksabbieger).
- ▶ Die Maßnahmen haben zum Ziel, auf gewünschten Netzabschnitten die Verkehrsstärken zu senken, womit die Fahrleistung am primären Wirkungsort abnimmt. Damit kann dort ein wahrnehmbarer Effekt im Sinne der Luftreinhaltung erzielt werden.
- ▶ Einschränkungen für den MIV machen diesen Modus weniger attraktiv. Da die Beschränkungen sehr lokal wirken und in der Regel nur angeordnet werden, wenn entsprechende Routenwahlalternativen vorhanden sind, ist nicht von einer Beeinflussung der Ziel- und Moduswahl auszugehen. Gleichzeitig führen die Maßnahmen dieses Typs zu einer erhöhten Umwegigkeit und damit aller Voraussicht nach zu einer höheren Gesamtfahrleistung.

- ▶ Ob ein (geringfügiger) Effekt für den Klimaschutz erzielt werden kann hängt somit davon ab, ob die Verbesserungen des Verkehrsflusses oder die zusätzlichen Fahrzeugkilometer infolge der erhöhten Umwegigkeit überwiegen.

Der **Aus- oder Neubau von Entlastungsstrecken** wirkt auf dasselbe Ziel hin, nämlich die Minderung der Verkehrsstärken in einem bestimmten Bereich durch eine räumliche Verlagerung. Die häufigste Variante eines solchen Netzausbaus stellt die Ortsumfahrung dar, durch die in aller Regel ein historisch durch den Ortskern führender Streckenzug entlastet wird. Aber auch Tunnel, insbesondere Stadttunnel sowie der Ausbau von Ein- und Ausfallstraßen in größere Ortschaften kann zu diesem Maßnahmentyp gerechnet werden. Solche umfassenden Infrastrukturmaßnahmen sind häufig nicht ursprünglich durch Gesichtspunkte der Luftreinhaltung oder des Klimaschutzes begründet. Im Rahmen der Bundesverkehrswegeplanung spielt insbesondere die erhöhte Erreichbarkeit, ausgedrückt durch eine verkürzte Reisezeit bei der Begründung eine zentrale Rolle. Maßnahmen dieses Typs sind in der Regel in einem Raumordnungsverfahren und einer Umweltverträglichkeitsprüfung zu untersuchen, weshalb auf eine große Zahl modellbasierter Wirkungsabschätzungen zurückgegriffen werden kann. Die Wirkungen solcher Maßnahmen für die Luftreinhaltung und den Klimaschutz lassen sich verallgemeinert wie folgt zusammenfassen:

- ▶ Am primären Maßnahmenort, also in dem entlasteten Gebiet oder auf dem entlasteten Streckenzug, kann eine Minderung der Fahrleistung erreicht werden. Da entsprechende Ausbaumaßnahmen insbesondere an Orten stark belasteter oder überlasteter Infrastruktur geplant werden, geht damit in der Regel eine deutliche Verbesserung des Verkehrsflusses einher. Heinrichs et al. (2001) weisen jedoch darauf hin, dass der Anteil des Durchgangsverkehrs und damit des verlagerbaren Verkehrs in Wirklichkeit deutlich niedriger lag als in den von ihnen ausgewerteten Untersuchungen.
- ▶ Insgesamt werden die verkehrsbedingten Luftschadstoffbelastungen am primären Maßnahmenort reduziert.
- ▶ In aller Regel wird die Reisezeit auf bestimmten Verbindungen wahrnehmbar verkürzt. Damit geht induzierter Verkehr einher und die Fahrleistung des MIV nimmt zu.
- ▶ In Summe wird die Fahrleistung durch Maßnahmen dieses Typs zunehmen, da – zusätzlich zum induzierten Verkehr – die Aus- und Neubaustrecken eine höhere Umwegigkeit aufweisen als die ursprünglich gewählten Routen. Insofern kann die Treibhausgasbilanz der jeweiligen Maßnahmen positiv oder negativ ausfallen, da der erhöhten Fahrleistung eine deutliche Veränderung der Fahrsituationen (also befahrener Streckentyp und Verkehrszustand) entgegenwirkt.
- ▶ Kosten, Material und Flächenverbrauch sind weitere relevante Aspekte, die bei Maßnahmen dieses Typs zu berücksichtigen sind.
- ▶ Maßnahmen dieses Typs werden häufig auch mit Gesichtspunkten der Lärminderung begründet.

Mit Maßnahmen vom Typ „**Pförtnerung durch LSA einrichten**“ können zwei unterschiedliche Ziele verfolgt werden. Erstens kann dadurch die Entlastung von überlasteten Streckenzügen erreicht werden, sodass in diesen Bereichen eine Koordinierung der Lichtsignalanlagen ihre positive Wirkung entfalten kann. Damit ist eine Pförtnerung, auch als Zuflussdosierung bezeichnet und ist häufig in Kombination mit einer Verbesserung der LSA-Steuerung in verkehrlichen Planwerken zu finden. Die Maßnahme trägt dann indirekt zur Wirkung des

Maßnahmentyps „LSA für MIV-Verkehrsfluss optimieren“ bei (siehe Kapitel 3.2.5). Zweitens kann sie ebenfalls direkt darauf abzielen, die MIV-Fahrleistung in einem bestimmten Gebiet zu senken. Dies wird jedoch sehr selten als Primärziel angeführt. Überlegungen, eine Pfortnerung entsprechend stringent zu gestalten und durch eine Kombination mit dem Ausbau von P+R-Plätzen einen wahrnehmbaren Modal-Shift hervorzurufen wurde für den Luftreinhalteplan Stuttgart (Regierungspräsidium Stuttgart 2018) untersucht, jedoch aufgrund hoher zu erwartender Rückstaus nicht umgesetzt. Eine Zuflussdosierung kann ebenso wie andere dynamische Verkehrsmanagement-Maßnahmen umweltsensitiv gestaltet werden (Beispiele siehe Diegmann et al. 2020). Die zu erwartenden Effekte einer Pfortnerung lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- ▶ Die Maßnahme kann Grundlage für eine effektive Koordinierung der LSA-Steuerung von Knotenpunkten im gepförtnernten Gebiet sein. Der Effekt eines verbesserten Verkehrsflusses kommt dann durch die Kombination der beiden Maßnahmen zustande.
- ▶ Am primären Wirkungsort, also innerhalb des gepförtnernten Gebietes, kann von einer geringfügigen Minderung der Fahrleistung ausgegangen werden.
- ▶ Durch den Maßnahmentyp können höhere Fahrtzeiten für die Ein- und Durchfahrt im primären Wirkungsgebiet erwartet werden (in einem Untersuchungsraum von Diegmann et al. 2020 nehmen die Fahrtzeiten jedoch auch ab). Daraus können Verlagerungen des Verkehrs (räumlich, modal) resultieren, die zu einer geringeren MIV-Fahrleistung im primären Wirkungsgebiet führen.
- ▶ Insgesamt kann die Maßnahme damit am primären Wirkungsort einen Beitrag zur Luftreinhaltung leisten. Sofern dadurch eine Koordination der LSA-Knotenpunkte an den Einfallstraßen erreicht wird, kann dieser im Bereich dieser Strecken deutlich sein (vgl. Boltze et al. 2011, Diegmann et al. 2020).
- ▶ Problematisch ist die Maßnahme dahingehend, dass im Bereich der Pfortneranlage aktive Wartezeiten und damit ein schlechter Verkehrszustand provoziert werden. Auf den gesamten Wirkungsraum bezogen kann somit auch eine Verschlechterung der Verkehrszustände eintreten.
- ▶ Damit ist die Wirkungsrichtung der Maßnahme im Bereich des Klimaschutzes von ihrer konkreten Umsetzung abhängig. Diegmann et al. (2020) weisen zwar grundsätzlich positive Wirkungen aus, die Betrachtung ist jedoch auf den primären Wirkungsort (gepförtnerter Bereich) beschränkt.

Der Maßnahmentyp einer **gebietsbezogenen Bepreisung der MIV-Nutzung (City-Maut)** ist klar auf eine räumlich beschränkte Reduzierung der Verkehrsstärken des motorisierten Verkehrs ausgerichtet. International gibt es mehrere Beispiele für die Umsetzung des Maßnahmentyps, wobei sich die konkrete Umsetzung hinsichtlich des Tarifsystems und der Abrechnung unterscheidet (für einen Überblick siehe Roth 2009 und Leihs et al. 2014). Bekannte Beispiele sind London, Bergen, Oslo, Stockholm, Mailand und Singapur. Damit besteht zu den Wirkungen eine gute Wissensbasis, die Effekte sind im Folgenden zusammengefasst:

- ▶ Die Verkehrsstärken im bepreisten Gebiet können – je nach Ausgestaltung der Maßnahme und Höhe der Preise – deutlich gesenkt werden. Dies wirkt sich auch auf den Verkehrsfluss aus. In London war ein Effekt von 15 % Fahrleistungsrückgang in den Mautstunden bei einem Mautsatz von 5 Pfund pro Tag und später von 21 % bei einem Mautsatz von 8 Pfund pro Tag zu beobachten (inzwischen sind die Mautsätze deutlich höher). In Stockholm wurde

ebenfalls ein Rückgang der Fahrleistung im Stadtgebiet von rund 20 % festgestellt, wobei der Wert bei Einführung der Maut etwas höher war und in den folgenden Jahren leicht nachließ. Der Mautsatz ist zonenabhängig und betrug zum Zeitpunkt der Auswertung maximal umgerechnet rund 6 € pro Tag. In Mailand war der Mautsatz des Ecopass-Systems von der Fahrzeugemissionsklasse abhängig. Der Fahrleistungsrückgang von in Summe rund 15 % unterschied sich dadurch stark nach Fahrzeugkategorien (London, Stockholm, Mailand vgl. Leihns et al. 2014). Modelluntersuchen für Graz kommen auf einen Fahrleistungsrückgang von rund 20 % bei einem Mautsatz von 3 € pro Tag und Fahrzeug und nur geringfügig höheren Minderungen von 23 % bei einem Mautsatz von 8 € (Dippold et al. 2018). Ebenfalls aus Modellrechnungen stammt die Effektstärke von 10 % Fahrleistungsrückgang im Stadtgebiet Stuttgart bei einer Bepreisung der Einfahrt in die Innenstadt von Stuttgart mit 5 € (Ritz 2019).

- ▶ Damit können die lokalen Luftschadstoffemissionen ebenfalls deutlich reduziert werden. In London wurde beispielsweise ein Jahr nach Einführung der City-Maut durch den Verkehr im Mautgebiet ein Rückgang des NO_x-, PM₁₀ und CO₂-Ausstoßes um jeweils rund 15 % berechnet, was sich einerseits aus der Fahrleistungsminderung, andererseits aus der Verbesserung der Verkehrszustände ergibt. Für Stockholm liegen die berechneten Emissionsrückgänge zwischen 8 % und 14 %, also deutlich geringer als der Fahrleistungsrückgang, was leider nicht begründet wird. Aufgrund der Emissionsklassenabhängigen Ausgestaltung waren die Rückgänge der Emissionen lokal wirksamer Luftschadstoffe ausgeprägter als der Rückgang des Kraftstoffverbrauchs und der CO₂-Emissionen (London, Stockholm, Mailand vgl. Leihns et al. 2014).
- ▶ Durch die Maßnahme werden modale Verlagerungen bei Wegen von in das betroffene Gebiet auftreten. Gleichzeitig wird die Ziel- und Routenwahl beeinflusst. Aufgrund der modalen Verlagerungen wird die Fahrleistung in den allermeisten Fällen durch Maßnahmen dieses Typs im gesamten Wirkungsbereich abnehmen. Außerhalb des bepreisten Gebietes kann es aufgrund einer veränderten Zielwahl oder durch die Wahl von Umfahrungsrouten punktuell zu deutlichen Zunahmen der Verkehrsstärken kommen.
- ▶ Durch einen deutlichen Rückgang der Verkehrsstärken des MIV im innerstädtischen Bereich kann ein zusätzlicher positiver Effekt für den Fuß- und Radverkehr erzielt werden. Dieser kann verstärkt und auf den öffentlichen Verkehr ausgeweitet werden, wenn dadurch eine Umverteilung des Verkehrsraums und der Knotenpunktkapazitäten erfolgt.
- ▶ Die Maßnahme kann fahrzeugtyp oder antriebssystemabhängig gestaltet werden. In diesem Fall ist zusätzlich von einer Wirkung auf die Fahrzeugflotte auszugehen.
- ▶ Mit Blick auf den Klimaschutz wird die Maßnahme aufgrund der Verbesserung des Verkehrsflusses in stark belasteten Innenstadtbereichen und der generellen Fahrleistungsminderung einen positiven Effekt haben.

Generelle Fahrverbote auszusprechen wird in der Luftreinhalteplanung immer wieder als letzte Möglichkeit diskutiert vorgegebene Grenzwerte einzuhalten. Maßnahmen dieses Typs beziehen sich auf ein klar definiertes Gebiet, zum Teil auf einzelne Straßenzüge. Dabei sind sehr unterschiedliche Ausgestaltungen möglich. Häufig werden autofreie Tage oder Fahrerlaubnisse in Abhängigkeit des Fahrzeugkennzeichens (z.B. Alternierend grade/ungerade letzte Ziffer) genannt. Während die negativ zu bewertende soziale Komponente einer City-Maut entfällt, sind Maßnahmen dieses Typs in der Regel mit unterschiedlichen gravierenden Einschränkungen verbunden, deren Betroffene mehr oder weniger willkürlich ausgewählt werden. Fahrverbote

können auch antriebstypspezifisch sein. Für den Verkehrsfluss, die Luftreinhaltung und den Klimaschutz ergeben sich ähnliche Konsequenzen wie bei einer gebietsbezogenen Bepreisung:

- ▶ Sofern die Maßnahme antriebstypspezifisch ausgestaltet ist, muss geprüft werden, inwieweit verkehrliche Effekte durch eine Anpassung der Fahrzeugflotte abgefangen werden. Das Instrument der Umweltzonen, wie es derzeit in Deutschland Anwendung findet, kann mit Blick auf die Wirkungen nur bedingt diesem Maßnahmentyp zugeordnet werden. Mehrere Untersuchungen zeigen, dass Umweltzonen (insbesondere längere Zeit nach ihrer Einführung) sehr geringe bis keine Effekte auf die Verkehrsnachfrage haben und primär über eine Anpassung der Flottenzusammensetzung Wirkung zeigen (vgl. u.a. Leihls et al. 2014, Diegmann und Pfäffin 2015, Dahmen 2019). Strengere antriebsartspezifische Beschränkungen (z.B. Diesel-Fahrverbote oder Null-Emissions-Zonen) würden dagegen aller Voraussicht nach zu Nachfrageeffekten führen, zumindest bis ein Austausch der Fahrzeugflotte stattgefunden hätte.
- ▶ Je nach Ausgestaltung der Maßnahme können die Verkehrsstärken im betroffenen Gebiet deutlich gesenkt werden. Dies wirkt sich auch auf den Verkehrsfluss aus.
- ▶ Damit können die lokalen Luftschadstoffemissionen ebenfalls deutlich reduziert werden.
- ▶ Durch die Maßnahme werden modale Verlagerungen sowie Ziel- und Routenwahleffekte bei Wegen, die das betroffene Gebiet als Quelle und/oder Ziel haben bzw. durchlaufen, auftreten. Aufgrund der modalen Verlagerungen wird die Fahrleistung in den allermeisten Fällen durch Maßnahmen dieses Typs im gesamten Wirkungsbereich abnehmen. Außerhalb des einfahrtbeschränkten Gebietes kann es aufgrund einer veränderten Zielwahl oder durch die Wahl von Umfahrrouten punktuell zu deutlichen Zunahmen der Verkehrsstärken kommen.
- ▶ Durch einen deutlichen Rückgang der Verkehrsstärken des MIV im innerstädtischen Bereich kann ein zusätzlicher positiver Effekt für den Fuß- und Radverkehr erzielt werden. Dieser kann verstärkt und auf den öffentlichen Verkehr ausgeweitet werden, wenn dadurch eine Umverteilung des Verkehrsraums und der Knotenpunktkapazitäten erfolgt.
- ▶ Mit Blick auf den Klimaschutz wird die Maßnahme aufgrund der Verbesserung des Verkehrsflusses in stark belasteten Innenstadtbereichen und der generellen Fahrleistungsminderung einen positiven Effekt haben.

Die Wirkung der Maßnahmen dieser Kategorie auf den Verkehrsfluss ergibt sich grundsätzlich durch Auslastungseffekte. Da es sich um großräumige Effekte handelt, werden in der Regel keine mikroskopischen Verkehrsflussmodelle angewandt, sondern makroskopische Ansätze wie HBEFA, die mit Verkehrsnachfragemodellen gekoppelt werden. Die Wirkungen auf die Streckenbelastungen (aus Verkehrsnachfrageeffekten und Routenwahlentscheidungen) können mit Verkehrsnachfragemodellen für diese Maßnahmenkategorie nach dem Stand der Technik hinreichend gut abgebildet werden (vgl. z.B. Ritz 2019). Problematisch ist dagegen, dass die zeitliche Auflösung der ermittelten Verkehrsstärken häufig nicht ausreicht, um Aussagen über die Verteilung der Verkehrszustände abzuleiten. Tagesmodelle liefern mittlere tägliche Verkehrsstärken (DTV), diese können für eine HBEFA-Berechnung jedoch nur unter Verwendung pauschaler Tagesganglinien genutzt werden, da Stundenwerte als Mindestanforderung für Emissionsberechnungen gelten (Friedrich et al. 2019). Spitzenstundenmodelle sind in der zeitlichen Auflösung meist hinreichend genau, aber wiederum für die CO₂-Bilanzierung nur mit annahmenbasierten Hochrechnungen geeignet.

3.2.8 Maßnahmen zur Reduzierung des Parksuchverkehrs

Maßnahmen, die auf den ruhenden Verkehr wirken, stellen einen Sonderfall dar. Sie können sowohl darauf abzielen den MIV zu reduzieren, als auch darauf diesen verträglicher zu gestalten, indem Störungen durch ein- und ausparkende Fahrzeuge im Straßenraum und Parksuchverkehr vermieden werden. Tabelle 62 zeigt die in Planwerken identifizierten Maßnahmentypen dieser Kategorie und deren Wirkungen.

Tabelle 62: Maßnahmen mit Bezug zum ruhenden Verkehr

| Maßnahmentyp | Effekte am primären Wirkungsort | | | | | | | ...im gesamten Wirkungsbereich | | | | |
|--|---------------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------------|
| | Verstetigter Verkehr durch... | | | | Sonstige verkehrliche Effekte | | | verringerte Luftschadstoffbelastung | Verkehrliche Effekte | | | |
| | weniger Hindernisse | verändertes Fahrverhalten | erhöhte Kapazität (Angebot) | reduzierte MIV-Fahrleistung | reduzierte MIV-Fahrleistung | niedrigere Emissionsfaktoren | verringert Emissionen ÖSPV | | verstetigter Verkehr generell | reduzierte MIV-Fahrleistung | niedrigere Emissionsfaktoren | verringerte Treibhausgasemissionen |
| Öffentlichen Parkraum verknappen und/oder verteuern (Parkraummanagement bzw. -bewirtschaftung) | + | -/+ | | + | + | | | ↑ | | + | | ↑ |
| Parkleitsystem verbessern/aufbauen | + | + | | | +/- | | | ↗ | | +/- | | ? |
| Parkplatzkapazitäten außerhalb des Straßenraums ausbauen (z.B. Parkhäuser) | + | + | | | +/- | | | ↗ | | | | ↗ |

Mit Blick auf den ruhenden Verkehr werden unterschiedliche Einzelmaßnahmen häufig unter den Begriffen Parkraummanagement oder Parkraumbewirtschaftung zusammengefasst. Sofern diese Maßnahmen auf eine Verringerung der Schadstoffemissionen ausgerichtet sind, handelt es sich dabei in aller Regel um eine **Verknappung und/oder der Verteuerung des öffentlichen Parkraums** oder aber um eine Bevorzugung emissionsarmer Fahrzeuge. Da Sonderrechte für emissionsarme Fahrzeugtypen keine primäre Auswirkung auf den Verkehrsfluss haben, wird auf diese Maßnahmenausprägung an dieser Stelle nicht weiter eingegangen. Eine Verknappung des Parkraums kann entweder über einen generellen Rückbau von Parkständen oder über eine Veränderung der Nutzungsmodalitäten erfolgen. Die Modalitäten können sich sowohl hinsichtlich der möglichen Parkdauern als auch der Preise nach Nutzergruppen unterscheiden, in der Regel zwischen Kurzzeitparkern und Anwohnern. Für die bei einem Parkraummanagement festlegbaren Nutzerregelungen gibt es Rahmenvorgaben, die Entscheidungshoheit liegt weitgehend bei den Kommunen (vgl. Bauer et al. 2016). Insbesondere die Beschränkung der Preise für Bewohnerparkausweise boten bisher kaum Gestaltungsspielraum; die Gesetzesgrundlage wurde jedoch im Jahr 2020 gelockert (DStGB 2020). Neben nutzergruppenspezifischen Regelungen und der räumlichen und zeitlichen Differenzierung der Maßnahmenausgestaltung ist eine konsequente Überwachung der Befolgung bei diesem Maßnahmentyp von besonderer Bedeutung. Die wesentlichen Auswirkungen sind:

- ▶ Als Maßnahmenbegründung wird immer wieder angeführt, dass durch die Maßnahme die Anzahl der Ein- und Ausparkvorgänge, die den Verkehrsfluss beeinträchtigen, reduziert wird (Wirkungsbeschreibung siehe Maßnahmentyp „Park- und Halteverbote ausweisen und Verstöße kontrollieren“, Kapitel 3.2.1).
- ▶ Auch eine Minderung des Parksuchverkehrs wird immer wieder als Grund für diesen Maßnahmentyp angeführt. Der Anteil des Parksuchverkehrs am innerstädtischen Verkehr ist zwar schwer zu beziffern, dürfte in Summe jedoch nicht unerheblich sein (siehe unten, Maßnahmentyp „Parkleitsystem). Je nach Ausgestaltung der konkreten Maßnahme kann dieser durch ein Parkraummanagement jedoch gleichermaßen zu- wie abnehmen, da es auch schwieriger werden kann einen Parkplatz zu finden. Das Reduktionspotenzial durch Maßnahmen vom Typ Parkraummanagement ist somit kaum pauschal zu benennen.
- ▶ Zentrales Ziel des Maßnahmentyps ist aber zumeist eine Reduktion der MIV-Fahrleistung. Diese soll primär dadurch erreicht werden, dass die Verwendung des Pkw für eine Fahrt in das parkraumbewirtschaftete Gebiet weniger attraktiv wird. Einen spürbaren Effekt hervorzurufen erfordert eine stringente Maßnahmengestaltung. Die Maßnahme kann dann eine veränderte Zielwahl und Moduswahl bewirken. Theoretisch ist mit dem Rückgang der Fahrleistung im Gebiet der Parkraumbewirtschaftung aufgrund der Auslastungseffekte auch eine Verbesserung des Verkehrsflusses verbunden, diese sollte vernachlässigbar gering sein. Eine Quantifizierung des Effekts ist schwierig. In Publikationen, die für ein Parkraummanagement argumentieren, wird immer wieder die Stadt München als Beispiel angeführt, in der die Pkw-Nutzung in den 10 Jahren nach Einführung des Parkraummanagements um 14 % zurückging (vgl. Agora Verkehrswende 2018b, Bauer et al. 2016). Dabei wird aber auch darauf hingewiesen, dass dieser Effekt nicht isoliert auf die Maßnahme zurückzuführen ist. Ritz (2019) berechnet einen Rückgang der Pkw-Fahrleistung von 11 % des regionalen Verkehrs im Stadtgebiet Stuttgart durch eine räumliche Ausweitung der Parkraumbewirtschaftung und deutlich erhöhte Preise (z.B. Verdoppelung in bestehenden Gebieten).
- ▶ Der Beitrag zur Luftreinhaltung basiert primär auf dem Rückgang der Fahrleistung. Die Auswirkungen des veränderten Verkehrsflusses sind im Vergleich dazu voraussichtlich vernachlässigbar gering.
- ▶ Durch eine Anpassung der Zielwahl kann außerhalb des Maßnahmenbereichs stellenweise Mehrverkehr auftreten, in Summe wird die Maßnahme über eine geringere Gesamtfahrleistung auch auf den Treibhausgasausstoß einen positiven Effekt aufweisen. Sofern ein Parkraummanagement konsequent umgesetzt wird, kann infolge der Nachfrageeffekte ein wahrnehmbarer Beitrag zum Klimaschutz erwartet werden.

Der **Aufbau oder die Verbesserung von Parkleitsystemen** ist vom Wirkungsprinzip her von Parkraummanagementmaßnahmen abzugrenzen, da Parkleitsysteme eine Verbesserung der Informationslage für den MIV bedeuten und damit als Angebotsverbesserung gewertet werden können. Für Parkleitsysteme gelten vergleichbare Differenzierungsmerkmale wie für die generelle Wegweisung (siehe Kapitel 3.2.7): individuelle Information vs. Informationen im Straßenraum, statische vs. dynamische Information, kleinräumige vs. großräumige Information. Klassische Parkleitsysteme existieren in vielen Städten und informieren über eine Beschilderung über die Lage von größeren Parkplätzen und Parkhäusern. Häufig enthalten die Wegweisungen auch dynamische Informationen über die Auslastung der Anlagen. Noch nicht Stand der Praxis, jedoch inzwischen vielfach erprobt sind unterschiedliche Detektionsmöglichkeiten der Belegungsgrade von Parkständen im Straßenraum. Damit könnten auch kleinräumigere

Informationen zur Unterstützung bei der Parkplatzsuche verfügbar gemacht werden. Solche Informationen über eine Beschilderung im Straßenraum zu übermitteln erscheint nur in Ausnahmefällen sinnvoll. Individuelle Informationen über Navigationssysteme erscheinen zielführender. Grundsätzliche Wirkungszusammenhänge sind:

- ▶ Ein wirksames Parkleitsystem kann dazu beitragen, dass weniger bzw. weniger langwierige Ein- und Ausparkvorgänge stattfinden, da geeignete Parkstände schneller gefunden werden können. Ein Parkleitsystem, das die Auslastungen der Parkhäuser im Stadtgebiet und damit einen zuverlässig verfügbaren Parkstand anzeigt, kann außerdem zu einer Verlagerung vom Straßenrandparken zur Nutzung der Parkhäuser führen (Boltze et al. 1994).
- ▶ Die angestrebte Wirkung von Maßnahmen dieses Typs ist eine Reduzierung des Parksuchverkehrs. In unterschiedlichen Studien werden sehr hohe Anteile des Verkehrs ausgewiesen, die auf die Parkplatzsuche entfallen (vgl. Literaturanalyse von Hampshire und Shoup 2018). Dabei ist die Bezugsgröße nicht immer eindeutig. Hampshire und Shoup (2018) untersuchten 12 Straßenabschnitte in der Stuttgarter Innenstadt und stellten einen Anteil des Parksuchverkehrs von rund 15 % fest (es ist aufgrund der Methodik zu vermuten, dass dieser Anteil auf die Anzahl der Fahrzeuge bezogen ist, die die Straßenabschnitte im Messzeitraum durchfahren). Boltze et al. (1994) stellen die von ihnen gewählte Bezugsgröße klar dar (Gesamtverkehrsleistung in der Innenstadt von Frankfurt am Main) und weisen für einen Dienstag einen Parksuchverkehrsanteil von 7,3 % aus. Cookson und Pishue (2017) geben in ihrer vielbeachteten Studie Parksuchzeiten von 5 bis 7 Minuten (off-street) und 7 bis 10 Minuten (on-street) für deutsche Großstädte an. Rikus et al. (2015) Auch hier ist nicht klar, welche Fahrten in die Grundgesamtheit einbezogen sind. Van Ommeren (2011) betrachten den gesamten Verkehr in den Niederlanden und kommen zu deutlich niedrigeren Zahlen. Obwohl Fahrten, die am Wohnort oder auf einem vom Arbeitgeber zur Verfügung gestellten Arbeitsplatz enden, ausgeschlossen wurden, beträgt nach ihrer Auswertung die mittlere Parksuchzeit in den Niederlanden im Mittel nur 36 Sekunden oder 3 % der Weglänge. Das Potenzial von Parkleitsystemen ist zusätzlich dahingehend beschränkt, dass diese nur wirken, wenn einerseits eine ausreichend hohe Auslastung (volle Belegung bestimmter Parkhäuser oder Gebiete), andererseits jedoch keine vollkommene Überlastung (volle Belegung aller potentiellen Parkmöglichkeiten) gegeben sind. Boltze et al. (1994) beschreiben dies für Frankfurt an Samstagen und weisen dann einen mittleren Rückgang der Parksuchzeit von 10 Minuten auf 7 Minuten aus. Waterson et al. (2001) quantifizieren das Potenzial von Zeiteinsparungen mit einem modellbasierten Ansatz und zeigen dabei auf, wie viele Einflussfaktoren die Wirksamkeit der Systeme beeinflussen. Die Zeiteinsparungen bei über 95 % Auslastung sind am höchsten, wobei die Warte- und Gehzeiten eingerechnet sind und deshalb keine klare Aussage für die eingesparte Fahrtweite abgeleitet werden kann. In der umfangreichen Studie (Rikus et al. 2015) wird das Minderungspotenzial des Parksuchverkehrs für Deutschland abgeschätzt. Durch eine deutlich höhere Abdeckung mit Sensorik und die aktive und passive Verfügbarkeit von Nutzerdaten und deren Verwendung könnten demnach gegenüber dem Business-as-usual-Szenario etwa 25 % des Parksuchverkehrs im Privatverkehr und rund 40 % des Parksuchverkehrs durch den Wirtschaftsverkehr vermieden werden.
- ▶ Innerhalb des Gebiets, in dem das Parkleitsystem wirkt, wird die Fahrleistung entsprechend der Minderung des Parksuchverkehrs zunächst reduziert. Durch eine Attraktivitätssteigerung aufgrund der verbesserten Information kann dieses Gebiet jedoch als Fahrziel attraktiver werden – es wird häufiger mit dem MIV in dieses Gebiet

gefahren – mit zunehmender Wirksamkeit und Qualität des Parkleitsystems nimmt auch dieser Rebound-Effekt zu. Auch in Summe, über das Gebiet des Parkleitsystems hinaus ist damit unklar, welcher Effekt überwiegt und ob tatsächlich Fahrleistung eingespart wird.

- ▶ Lokal kann durch ein entsprechendes System somit zur Luftreinhaltung beigetragen werden, indem Parksuchverkehr aus Gebieten ferngehalten werden kann. Der Beitrag zum Klimaschutz ist fraglich. Die Abschätzungen von Rikus et al. (2015) belaufen sich auf eine Summe von rund 0,5 Mio. Tonnen CO₂, dabei wird jedoch ein möglicher Rebound-Effekt nicht berücksichtigt.

Im Rahmen älterer Luftreinhaltepläne wird vereinzelt vorgeschlagen, **Parkraumkapazitäten außerhalb des Straßenraums auszubauen**, um die Verkehrsnachfrage räumlich zu steuern und den Parksuchverkehr sowie die Behinderung des Verkehrsflusses durch Ein- und Ausparkvorgänge zu reduzieren. Der Ausbau von Park+Ride-Angeboten ist von diesem Maßnahmentyp abzugrenzen und wird in Kapitel 3.2.9 beschrieben, da dieser eine andere primäre Zielstellung hat. Folgende Wirkungen sind zu erwarten:

- ▶ Sofern ein ausreichend großes Parkraumangebot geschaffen und zu attraktiven Bedingungen und Kosten verfügbar gemacht wird, wird der Parksuchverkehr und die Anzahl schwieriger Parkmanöver abnehmen. Die Nähe zum eigentlichen Zielort eines Weges bleibt jedoch als Einflusskriterium der Parkplatzwahl erhalten. Insofern kann die Maßnahme nur eine räumlich beschränkte Reduktion der Auslastung des Straßenraumparkens bewirken. Sie kann ergänzend zu einer Reduktion der Parkstände im Straßenraum sinnvoll sein, die Effekte auf den Verkehrsfluss sind dann aber vielmehr dem Parkplatzrückbau zuzuschreiben.
- ▶ Die Maßnahme stellt eine Verbesserung des Angebots im MIV dar, womit sie theoretisch zu Mehrverkehr führt. Räumlich kann der Verkehr dadurch verlagert werden, womit im Rahmen der Luftreinhaltung die Möglichkeit besteht, stark betroffene Bereiche zu entlasten.
- ▶ Abseits des primären Wirkungsorts, also dort wo der zu vermeidende Parksuchverkehr stattfindet, wird die MIV-Fahrleistung ausschließlich durch die attraktivitätssteigernde Wirkung der zusätzlichen Parkflächen beeinflusst. Dieser Effekt ist zwar theoretisch begründbar, er wird aber vernachlässigbar gering sein. In Summe werden Maßnahmen dieses Typs für den Klimaschutz irrelevant sein.

Die Möglichkeiten, ein Fahrzeug abzustellen, haben weitreichende Folgen für den fließenden Verkehr, für dessen Verkehrsqualität und für die verursachten Emissionen. Mit Blick auf den Verkehrsfluss wurde die Wirkung von ein- und ausparkenden Fahrzeugen mehrfach untersucht (u.a. Baier et al. 2003). Über die Bedeutung von Parksuchverkehr auf den Verkehrsfluss, also das Fahrverhalten während des Suchvorgangs sind keine Untersuchungen bekannt. Inwiefern der Unterschied zum normalen Fahrverhalten mit Bezug auf die spezifischen Emissionen relevant ist, ist fraglich. Die Nachfrageeffekte von Maßnahmen des Parkraummanagements wurden mehrfach untersucht und können in Verkehrsnachfragemodellen prognosefähig abgebildet werden. Böhnke (2005) beschreibt einen Ansatz der Modellierung. Durch eine Berücksichtigung des ruhenden Verkehrs könnten auch die Rebound-Effekte durch Parkleitsysteme modellhaft abgebildet werden. Diese wurden bei Wirkungsabschätzungen – die Empirie ist generell dünn, Rikus et al. (2015) stellen für Deutschland eine wichtige Ausnahme dar – bisher vernachlässigt.

3.2.9 Maßnahmen zur Minderung der MIV-Fahrleistung im Personenverkehr ohne Bezug zur Straßeninfrastruktur

Maßnahmen dieser Kategorie haben das primäre Ziel, die Fahrleistung im Personenverkehr zu senken. Da sie in der Regel nicht direkt an einem bestimmten Maßnahmenort, sondern auf Wege und Wegekettens sowie das generelle Mobilitätsverhalten wirken. Die Maßnahmen haben gemein, dass mit ihnen kein infrastruktureller Eingriff in den Verkehrsraum des MIV verbunden ist. Für die Kategorisierung hinsichtlich der Wirkung auf den Verkehrsfluss ist dies insofern sinnvoll, dass Effekte auf den MIV-Verkehrsfluss dann ausschließlich auslastungsbedingt sein können. Bei der Maßnahmenumsetzung ist die Abgrenzung der Maßnahmen nach diesem Gesichtspunkt meist weniger scharf. Zur Förderung des Umweltverbundes ist es die Regel Maßnahmen dieser Kategorie mit Maßnahmen zur Aufwertung des Umweltverbunds im Straßenraum (Kapitel 3.2.4) zu kombinieren.

Tabelle 63: Maßnahmen zur Minderung der MIV-Fahrleistung im Personenverkehr ohne Bezug zur Straßeninfrastruktur

| Maßnahmentyp | Effekte am primären Wirkungsort | | | | | | | ...im gesamten Wirkungsbereich | | | | |
|---|---------------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| | Verstetigter Verkehr durch... | | | | Sonstige verkehrliche Effekte | | | Verkehrliche Effekte | Treibhausgasemissionen | | | |
| | weniger Hindernisse | verändertes Fahrverhalten | erhöhte Kapazität (Angebot) | reduzierte MIV-Fahrleistung | reduzierte MIV-Fahrleistung | niedrigere Emissionsfaktoren | verringert Emissionen ÖSPV | | | verringerte Luftschadstoffbelastung | verstetigter Verkehr generell | reduzierte MIV-Fahrleistung |
| ÖPNV-Attraktivität steigern, ohne Einfluss im MIV-Verkehrsraum (Ausbau Angebot Schiene, Tarife, Komfort und Information, ...) | | | | + | + | | | ↑ | | | | ↑↑ |
| Angebot im ÖSPV ausweiten (Takt verdichten, Fahrplan ausweiten) | - | | | | + | | - | ↔ | | | | ↑ |
| Fahrrad- und Fußverkehr fördern (ohne Eingriff in den MIV-Verkehrsraum) | +/- | | | | + | | | ↔ | | | | ↑ |
| Fahrgemeinschaften fördern (Vermittlungsportale, Mitfahrbänke, ...) | | | | | + | | | → | | | | ↔ |
| Carsharing-Angebote fördern/betreiben | | | | | +/- | | | ↕ | | | | ↕ |
| Intermodale Wege vereinfachen (Mobilitätsstationen, Park+Ride, Bike+Ride, ...) | | | | | + | | | ↔ | | | | ↔ |
| Pkw-Verkehr verteuern (Maut, Kraftstoffsteuer, Kfz-Steuer, ...) | | + | | + | + | + | + | ↑↑ | | | | ↑↑ |
| Öffentlichkeitsarbeit betreiben, Beratung und Information bieten | | + | | | + | + | | ? | | | | ? |

Viele Maßnahmen zur **Steigerung der ÖPNV-Attraktivität** haben keinen direkten Einfluss auf die durch den MIV genutzte Infrastruktur. Der Ausbau des Schienenverkehrsangebots erfolgt häufig auf separaten Trassen. Das Angebot kann räumlich durch Netzausbau oder Streckenreaktivierung oder zeitlich durch eine Takterhöhung oder eine Ausweitung des

Angebots in den Schwachverkehrszeiten erfolgen. Auch organisatorische und preisliche Maßnahmen haben keinen direkten Einfluss auf den Verkehrsfluss des MIV. Die Wirkungen auf die Nachfrage können dagegen deutlich ausfallen. Für die verursachten Luftschadstoffemissionen sind die folgenden Wirkungen von Bedeutung:

- ▶ Die Fahrleistung im MIV kann aufgrund modaler Verlagerungen abhängig von der konkreten Maßnahmenausgestaltung in unterschiedlichem Maße reduziert werden. Der Effekt von Pull-Maßnahmen ohne eine Kombination mit Push-Maßnahmen ist jedoch begrenzt. Die Erhebung von durch diesen Maßnahmentyp verursachten Nachfrageeffekten ist nur bedingt möglich, da diese in aller Regel nicht isoliert von anderen Einflüssen beobachtet werden können. Modellrechnungen zeigen die Spannweite der Größenordnung auf: Eine Taktverdichtung des S-Bahn-Verkehrs in der Region Stuttgart von 30 min (Schwachverkehrszeit) bzw. 20 min (Hauptverkehrszeit) auf 15min bewirkt einen Fahrleistungsrückgang im MIV um 1 %. Ein kostenloser öffentlicher Verkehr würde in der Region Stuttgart zu einem Rückgang von 6 % der Fahrleistung führen. Die Zahlen basieren auf Modellrechnungen von Ritz (2019).
- ▶ Maßnahmen, die einen wahrnehmbaren Rückgang der Fahrleistung verursachen (z.B. kostenloser ÖV, s.o.) würden sich auch auslastungsbedingt auf den Verkehrsfluss im MIV auswirken.
- ▶ Der Maßnahmentyp ist zur Luftreinhaltung weniger geeignet als zum Klimaschutz, da er nur begrenzt räumlich zielgerichtet eingesetzt werden kann.

Maßnahmen, bei denen das **Angebot des öffentlichen Straßenpersonenverkehrs (ÖPSV) ausgeweitet** wird, verursachen auch eine Attraktivitätssteigerung für den ÖV, zusätzlich wird die Verkehrsfläche des MIV aber durch weitere Fahrzeuge genutzt. Wie auch beim Schienenpersonenverkehr kann die Angebotsausweitung räumlicher oder zeitlicher Natur sein. Insbesondere das Angebot von OnDemand-Services als Komponente des öffentlichen Verkehrs ist hier zu nennen, da es in mehreren Green City Plänen als Maßnahme geführt wird. Die Services beschränken sich derzeit jeweils auf eine verhältnismäßig kleine Flotte. Die Verfügbarkeit autonomer Fahrzeuge würde entsprechende Angebote mit großen Fahrzeugzahlen und kleinen Gefäßgrößen ermöglichen. Die Wirkungen sind:

- ▶ Zusätzliche ÖV-Straßenfahrzeuge wirken sich auf den Verkehrsfluss aus. Die Fahrzeuge können Hindernisse für die freie Fahrt des MIV darstellen, insbesondere an Haltestellen. Besonders deutlich wird dies beim Gedanken an zukünftige OnDemand-Verkehre, sollten diese eine hohe Verfügbarkeit und ein dichtes Haltepunktnetz haben.
- ▶ Die Angebotsausweitung hat einen attraktivitätssteigernden Effekt und verursacht damit modale Verlagerungen hin zum ÖV. Die MIV-Nachfrage nimmt somit ab, allerdings in einem Maß, das keine wahrnehmbaren Effekte auf den Verkehrsfluss vermuten lässt. Bei einer massiven Ausweitung des öffentlichen Verkehrs kann der motorisierte Verkehr in Summe zunehmen. Richter et al. (2021) haben die Wirkungen von in den öffentlichen Verkehr integrierten On-Demand-Verkehren in der Region Stuttgart untersucht. Bei einem guten On-Demand-Angebot (Hohe zeitliche Verfügbarkeit, Haustür-Abholung) verdoppelt sich im Binnenverkehr die Zahl der Fahrzeugkilometer des motorisierten Verkehrs nahezu. Eine solche Änderung würde voraussichtlich auch auslastungsbedingte Konsequenzen für den Verkehrsfluss bedeuten.
- ▶ Die Emissionen und der Energieverbrauch durch den ÖSPV werden zunehmen.

- Der Maßnahmentyp ist zur Luftreinhaltung weniger geeignet als zum Klimaschutz, da die Wirkung nur beschränkt räumlich zielgerichtet gesteuert werden kann.

Als **Förderung des Rad- und Fußverkehrs ohne infrastrukturelle Maßnahmen im MIV-Verkehrsraum** können beispielhaft folgende, in Luftreinhaltungs- und Klimaschutzplänen vielfach aufgeführte Maßnahmen genannt werden: Aufwertung von Fuß- und Fahrradwegen, Wegweisung, Fahrradverleihsysteme oder bewusstseinsbildende Maßnahmen und Marketing. Eine gesammelte Beschreibung vieler Maßnahmen dieses Typs gibt Bracher (2016). Unter den erstgenannten Punkt fallen auch Maßnahmen, deren Ziel die Vermeidung von Konfliktpunkten zwischen unterschiedlichen Verkehrsmitteln bzw. von Führungsformen im Mischverkehr ist. Beim Längsverkehr liegt das Augenmerk dabei insbesondere auf dem Radverkehr, da der Fußverkehr sich die Verkehrsfläche in der Regel nicht mit dem MIV teilt. Baulich getrennte Radwege können dabei für den Radverkehr unterschiedlich komfortabel ausgestaltet sein. Pläne jüngerer Datums beinhalten häufiger den Ausbau von Radschnellwegen, bei denen eine strikte bauliche Trennung vorgesehen ist. Im Querverkehr können Unter- oder Überführungsbauwerke für den Fahrrad- und/oder den Fußverkehr eine räumliche Trennung bewirken. Erwartbare Wirkungen sind:

- Die Behinderungen des Verkehrsflusses des MIV können in Abhängigkeit von der konkreten Maßnahme in unterschiedliche Richtung wirken. Sofern das Fuß- und Radwegenetz im Zuge einer Maßnahme nicht ausgebaut wird, der Fuß- und Radverkehr durch die Maßnahme aber effektiv gesteigert werden kann, ergeben sich zusätzliche Behinderungen. Die Wirkungen auf den Verkehrsfluss im MIV können an Steigungsstrecken mit hohem Radverkehrsaufkommen, auf denen MIV und Radverkehr gemischt geführt werden, zugespitzt beobachtet werden. Wird durch einen Ausbau des Fuß- oder Radwegenetzes dagegen ein Rückgang der Fahrradverkehrsstärken auf Strecken gemischter Nutzung oder ein Rückgang der plangleich geführten Querverkehre durch nichtmotorisierte Verkehrsteilnehmende erreicht, wirkt sich dies auch positiv auf den Verkehrsfluss im MIV aus.
- Das zentrale Ziel von Maßnahmen dieses Typs ist die Reduzierung der Fahrleistung im MIV durch modale Verlagerungen. Darüber, wie groß die Maßnahmenwirkung sein kann, lassen bisherige Untersuchungen keine eindeutige Aussage zu. Ahrens et al. (2013) weisen in ihrem optimistischen Szenario bei einem angenommenen Bewusstseinswandel und einer konsequenten Radverkehrsförderung ein Potenzial zur Fahrleistungsminderung des Pkw-Verkehrs von rund 10 % aus. Ritz (2019) ermittelt für die Region Stuttgart bei einer Vervollständigung des Hauptradroutennetzes und einer zunehmenden Pedelec-Nutzung einen Rückgang der Pkw-Fahrleistung um 1 %. Beide Untersuchungen weisen auf die Bedeutung der getroffenen Annahmen für ihre Ergebnisse hin. Rabenstein (2015) untersuchte die potentiellen Wirkungen einer Einzelmaßnahme, die diesem Maßnahmentyp zugerechnet werden kann, nämlich von öffentlichen Fahrradverleihsystemen. Er hebt die überhöhten Erwartungen an die Wirkungen solcher Systeme hervor und identifiziert ein Einsparpotenzial von unter 0,1 % der MIV-Fahrleistung in den untersuchten Städten.
- Unter Annahme der oben dargestellten maximalen Minderungspotenziale könnten wahrnehmbare auslastungsbedingte Effekte für den Verkehrsfluss entstehen.
- Für die Luftreinhaltung kann insbesondere eine punktuelle Streckenentlastung vom Fuß-Querverkehr oder Rad-Längsverkehr durch Über- oder Unterführungen oder Entlastungsstrecken für den Fahrradverkehr relevant sein, um den Verkehrsfluss zu

verbessern. Es ist aber davon auszugehen, dass an stark belasteten Hotspots entsprechende Maßnahmen nur in Einzelfällen sinnvoll sein können, da diese meist an großen Straßen liegen, an denen keine Interaktion zwischen Fuß- und Radverkehr und dem MIV auftritt. Die nachfragebezogenen Wirkungen sind räumlich weniger gerichtet, weshalb sie für die Luftreinhaltung von geringerer Bedeutung sind.

- ▶ Für den Klimaschutz kann eine umfassende Förderung des nichtmotorisierten Verkehrs durch eine Kombination vieler Maßnahmen dieses Typs eine gewisse Bedeutung haben. Diese resultiert größtenteils aus dem moduswahlbedingten Fahrleistungsrückgang (s.o.) und nur sehr eingeschränkt aus Veränderungen im Verkehrsfluss.

Maßnahmen, die explizit das Ziel eines erhöhten Besetzungsgrades in Privatfahrzeugen haben, dabei aber nicht in den Verkehrsraum des MIV eingreifen (z.B. durch Sondernutzungsrechte von Fahrstreifen bei höherem Besetzungsgrad), werden unter dem Maßnahmentyp **„Fahrgemeinschaften fördern“** zusammengefasst. In Mobilitätsplänen werden hier häufig Vermittlungsangebote oder Mitfahrbänke genannt. Heinitz (2020) fasst die Möglichkeiten der Förderung von Fahrgemeinschaften zusammen, weist jedoch auch darauf hin, dass die wichtigsten Maßnahmen im Bereich allgemeiner verkehrlicher Rahmenbedingungen ansetzen (z.B. ÖV-Angebot und km-Kosten bei MIV-Fahrten). Erwartbare Wirkungen sind:

- ▶ Die Annahme, dass durch einen erhöhten Besetzungsgrad die Fahrleistung im MIV sinkt, ist theoretisch begründbar. Beobachtungen oder modellhafte Abschätzungen zu Maßnahmen dieses Typs mit Aussagen über die Wirksamkeit im Bereich der Fahrleistungsreduktion sind den Autoren nicht bekannt.
- ▶ Der Maßnahmentyp ist zur Luftreinhaltung weniger geeignet als zum Klimaschutz, da bei der Wirkung nur eine beschränkte räumliche Zielgerichtetheit gegeben ist. Allgemein übertragbare Nachweise der Wirksamkeit fehlen. Da der Besetzungsgrad in der Vergangenheit trotz zahlreichen Entwicklungen im Bereich dieses Maßnahmentyps in der Vergangenheit nicht erhöht wurde, wird die Wirksamkeit eine Stufe niedriger als bei Maßnahmen zur Förderung der Verkehrsmittel des klassischen Umweltverbundes angenommen.

Carsharing-Angebote zu fördern oder zu betreiben wird in vielen der analysierten Planwerke als Baustein der verkehrlichen Luftreinhaltung oder als Beitrag zum Klimaschutz genannt. Die öffentliche Hand kann rechtliche Rahmenbedingungen anpassen oder entsprechende Systeme finanziell fördern. Auf kommunaler Ebene können Stellplätze zur Verfügung gestellt werden, kleine Kommunen betreiben vereinzelt Carsharing-Systeme für die Einwohnerinnen und Einwohner der Gemeinde. Grundsätzlich kann zwischen free-floating und stationsbasiertem Carsharing unterschieden werden. Aufgrund der unterschiedlichen Konzepte und Rahmenbedingungen sind die Wirkungen der Systeme nicht pauschal zu erfassen, folgende Zusammenhänge können jedoch allgemein formuliert werden:

- ▶ Eines der wichtigsten Argumente, die für Carsharing vorgebracht werden, ist der Ersatz mehrerer privater Fahrzeuge durch ein einzelnes Carsharing-Fahrzeug. Der Bundesverband Carsharing (2016) gibt Werte zwischen 1 und 20 Fahrzeugen an. Hülsmann et al. (2018) widersprechen dem zumindest für free-floating Carsharing-Systeme und weisen in Summe eine Zunahme der Fahrzeugzahlen aufgrund von Carsharing aus.
- ▶ Durch die Fahrzeugverfügbarkeit wird auch das Verkehrsverhalten verändert. Ob Carsharing eine positive oder negative Wirkung auf die Fahrleistung im MIV hat, ist nicht

abschließend geklärt. Eine positive Wirkung ist vor allem dann zu erwarten, wenn das beschriebene Ziel einer Senkung des Motorisierungsgrads erreicht wird. Eine negative Wirkung tritt ein, wenn Verlagerungen von Modi des Umweltverbundes hin zum Carsharing stattfinden. Beispielsweise schreiben Hülsmann et al. (2018) Carsharing eine negative Bilanz zu, während Fromm et al. (2019) eine positive Wirkung ausweisen (in beiden Fällen für free-floating Carsharing).

- Der Maßnahmentyp ist zur Luftreinhaltung weniger geeignet als zum Klimaschutz, da bei der Wirkung nur eine beschränkte räumliche Zielgerichtetheit gegeben ist. Die Wirkungsrichtung der Maßnahme ist auch bei den Emissionen nicht eindeutig. Durch den Einsatz emissionsarmer Fahrzeuge in der Carsharing-Flotte kann die Emissionswirkung positiv beeinflusst werden.

Der Maßnahmentyp „**Intermodale Wege vereinfachen**“ umfasst Maßnahmen, die eine bessere Verknüpfung unterschiedlicher Modi und damit eine Vereinfachung intermodaler Wege anstrebt. Derzeit machen die häufigsten intermodalen Verkehrsmittelkombinationen Fahrrad und ÖV bzw. Pkw und ÖV gemeinsam rund 2,5 % der Wege in Deutschland aus (DLR 2021). Konkrete Maßnahmen sind insbesondere der (Aus)bau von Verknüpfungspunkten (Mobilitätsstationen, Park+Ride-Plätzen sowie Bike+Ride-Plätzen) aber auch Maßnahmen wie die Ermöglichung oder Vereinfachung der Fahrradmitnahme im ÖV. Bei diesem Maßnahmentyp ist die Abgrenzung zu anderen Maßnahmentypen häufig nicht einfach. Beispielsweise werden bei Wirkungsberechnungen von Mobilitätsstationen häufig die Potenziale von Carsharing oder anderen Mobilitätsangeboten eingerechnet, die grundsätzlich auch ohne eine Mobilitätsstation geschaffen werden können. Stein und Bauer (2019) und Schäfer et al. (2021) geben einen Überblick, welche Angebotsänderungen mit Mobilitätsstationen verknüpft sein können und zeigen damit, dass der Begriff weit über Maßnahmen zur Stärkung einer intermodalen Verkettung hinausgeht. Erwartbare Wirkungen sind:

- Generell ist das zentrale Ziel dieses Maßnahmentyps, die MIV-Fahrleistung zu reduzieren. Bei einem Ausbau von Park+Ride-Anlagen besteht zusätzlich das Ziel, die verkehrliche Situation auf Einfallstraßen mit hohen Belastungen zu entspannen. Eine Quantifizierung der Potenziale ist schwierig und die wenigen vorliegenden Untersuchungen zeichnen kein eindeutiges Bild. Pfertner (2017) und Schäfer et al. (2021) stellen beide auf Grundlage von Befragungen eine Emissionswirkungsabschätzung von Mobilitätsstationen an. Pfertner (2017) berechnet ein Einsparpotenzial von rund 1 % der Emissionen des Verkehrs im Stadtgebiet für die Stadt Würzburg. Schäfer et al. (2021) geben eine mögliche Reduktion der MIV-Fahrleistung von nahezu 50 % bei den befragten Personen aufgrund einer Mitbring-Plattform und Fahrgemeinschaften aus. Dieses Ergebnis wird jedoch auch von den Autor*innen selbst kritisch hinterfragt. Für den Ausbau von Park+Ride-Anlagen ergibt sich ebenfalls ein ambivalentes Bild. Mingardo (2013) berechnet für die Park+Ride-Anlagen in Rotterdam eine negative Bilanz in Punkto Fahrleistung und Treibhausgasausstoß, für die Anlagen in Den Haag sind die Ergebnisse positiv. In zwei Untersuchungen aus Deutschland werden unterschiedliche Methoden angewandt. Während Mingardo (2013) sich ebenfalls auf Befragungsdaten stützt, berechnet Ritz (2019) die Potenziale zusätzlicher Park+Ride-Anlagen in der Region Stuttgart nachfragemodellgestützt. Die ermittelte Wirkung auf die Fahrleistung ist mit unter 1 % vernachlässigbar gering.
- Im Vergleich zu anderen Maßnahmen dieser Kategorie ist hier eine räumlich gezielte Ausgestaltung möglich (z.B. durch P+R-Anlagen vor stark belasteten Einfallstraßen). Die

Maßnahmenwirkungen sind voraussichtlich positiv. Sie können nachvollzogen und berechnet werden.

Eine allgemeine **Verteuerung des Pkw-Verkehrs** ist ein viel diskutierter und untersuchter Maßnahmentyp. An dieser Stelle werden alle Maßnahmen gesammelt, deren Umsetzung nur auf Bundesebene sinnvoll erscheint. Dementsprechend werden Maßnahmen dieses Typs in Luftreinhalteplänen kaum thematisiert und vielmehr in bundesweiten Untersuchungen zum Erreichen der Klimaziele als Option angesehen bzw. empfohlen (u.a. Agora Verkehrswende 2018a, Zimmer et al. 2016). Der Maßnahmentyp umfasst Instrumente zur fahrleistungsabhängigen Bepreisung (Kraftstoff- bzw. Energiebesteuerung, Pkw-Maut) ebenso wie eine höhere Besteuerung des Fahrzeugbesitzes oder der Fahrzeuganschaffung. Roth (2009) gibt einen umfangreichen Überblick über preispolitische Maßnahmen im Verkehr und bewertet deren Wirksamkeit qualitativ. Die Wirkungen preispolitischer Maßnahmen auf die Schadstoffemissionen hängt stark davon ab, ob und in welche Maße die Emissionen selbst bepreist werden (z.B. über Kraftstoffpreise). Auf diesen Aspekt wird bei den folgenden zu erwartenden Emissionen gesondert hingewiesen:

- ▶ Sofern die Bepreisung emissions- bzw. verbrauchsabhängig ausgestaltet ist und eine gewisse Höhe erreicht, kann davon ausgegangen werden, dass eine emissions- und verbrauchsmindernde Fahrweise gewählt wird. Einsparungspotenziale liegen dabei vor allem im Vermeiden sehr hoher Fahrgeschwindigkeiten (Ausgangsniveau > 130 km/h). Der Zusammenhang ist theoretisch begründbar, bisher aber nicht ausreichend untersucht um eine Abschätzung der Wirksamkeit zuzulassen.
- ▶ Das primäre Ziel der Maßnahme ist die Minderung der MIV-Fahrleistung. Die Effektstärke hängt dabei offensichtlich von der Höhe der Preise ab. Eine verbreitete Annahme zur Preiselastizität der MIV-Fahrleistung ist der Wert von -0,3 (z.B. Baum et al. 2005). Eine Preiserhöhung von 10 % führt demnach zu einer Fahrleistungsminderung von 3 %, womit sich die Wirksamkeit von Maßnahmen dieses Typs überschlägig abschätzen lässt. Die Ermittlung von Preiselastizitäten ist mit vielen Unsicherheiten behaftet und ein pauschaler Wert kann aufgrund vieler Einflussgrößen (Höhe der Änderung, Preisausgangsniveau, Einkommensniveau, verfügbare Alternativen, kurz- oder langfristige Anpassung...) nur beschränkt aussagekräftig sein. Hautzinger et al. (2004) fassen in ihrer umfassenden Arbeit zu Kraftstoffpreiselastizitäten in Deutschland ihre Ergebnisse in einer Spanne von -0,1 bis -0,6 zusammen. Roth (2009) stellt zusammenfassend sowohl bei umgesetzten Maßnahmen als auch bei Wirkungsabschätzungen Rückgänge der Fahrleistung im Bereich zwischen 5 % und 20 % fest. Konkrete Rechenbeispiele liefern Baum et al. (2005) mit einer Fahrleistungsreduktion von 18 % auf Autobahnen bei einer Maut von 5 ct/km auf Autobahnen, wobei etwa die Hälfte der eingesparten Fahrzeugkilometer in der Untersuchung auf das Bundesstraßennetz verlagert wird. Ritz (2019) modelliert hinsichtlich der Straßenklassen ein umgekehrtes Bepreisungssystem: Auf Autobahnen fallen keine zusätzlichen Gebühren an, Fahrten auf Außerortsstrecken werden mit 5 ct/km und auf Innerortsstrecken mit 15 ct/km belastet. Die Ergebnisse zeigen einen Rückgang der Fahrleistung im regionalen Verkehr um 14 %.
- ▶ In Abhängigkeit der Höhe der Preise kann eine Maßnahme dieses Typs die Fahrleistung in einem Ausmaß reduzieren, dass dies auslastungsbedingt spürbare Wirkungen auf den Verkehrsfluss hat. Damit ist ein Rebound-Effekt zu erwarten; da die Reisezeiten abnehmen, werden bestimmte Personengruppen häufiger oder zusätzlich den MIV nutzen. Dies wird insbesondere für wohlhabende Personengruppen der Fall sein, da die

Zeitwertsätze einkommensabhängig sind. Der Umverteilung der Erreichbarkeiten kann durch die Rückführung der generierten Einnahmen entgegengewirkt werden (s.u.).

- ▶ Sofern die Fahrleistung in einem solchen Ausmaß abnimmt, werden auch weitere sekundäre Effekte wahrnehmbar sein, z.B. im Bereich der Verkehrssicherheit und der Lärmimmissionen.
- ▶ Maßnahmen dieses Typs generieren Einnahmen, die je nach Ausgestaltung des Instrumentes über die Finanzierung des Verkehrsangebots oder eine sozial gerechte Förderung der Mobilitätsbefähigung zur Sicherung der Erreichbarkeiten beitragen können.
- ▶ Eine emissions- bzw. verbrauchsabhängige Bepreisung wird auch auf die spezifischen Emissionsfaktoren der Flotte des MIVs aber auch des ÖVs wirken.
- ▶ Die theoretischen Emissionseinsparpotenziale preislicher Maßnahmen sind in Abhängigkeit der angesetzten Kostensätze beliebig hoch, die realen Potenziale durch die gesellschaftliche Akzeptanz beschränkt. Diese kann voraussichtlich durch eine Rückführung der Einnahmen erhöht werden. Sofern die Emissionsminderung im Vordergrund steht, sollte das Preiskonzept an die verursachten Emissionen gekoppelt sein. Zusätzlich kann beispielsweise über eine streckentypabhängige Bepreisung eine räumliche Steuerung vorgenommen werden, was die Wirksamkeit bestimmter Maßnahmen dieses Typs für die Luftreinhaltung zusätzlich erhöht.

Unter dem Maßnahmentyp „**Öffentlichkeitsarbeit betreiben, Beratung und Information bieten**“ fallen eine Vielzahl von Soft-Policy-Ansätzen zusammen, die in nahezu jedem Planwerk genannt werden. Agora Verkehrswende (2019) gibt einen Überblick über Ansätze in dem Bereich. Die für den Verkehrsfluss wichtigsten Wirkungen sind:

- ▶ Primär sollen durch Maßnahmen dieses Typs ein oder mehrere Verkehrsmittel des Umweltverbundes gefördert werden, wodurch ein Rückgang der MIV-Nutzung erreicht werden soll. Agora Verkehrswende (2019) stellt einzelne Wirkungsevaluationen vor, etwa den Rückgang der Autonutzung um 1 % in Nürnberg aufgrund einer ÖPNV-Kampagne. Insbesondere die Wirkungen von Neubürger*innen-Marketing wurden in mehreren deutschen Städten untersucht und werden als effizient bewertet. So gingen bei den Teilnehmenden die Anzahl der Wege mit dem MIV in Frankfurt am Main um 44 %, in Halle um 31 % und in München um 10 % zurück. Die unterschiedlichen Größenordnungen und das Fehlen von Informationen über die Anteile der Teilnehmenden macht eine Verallgemeinerung schwierig.
- ▶ Durch Maßnahmen der Öffentlichkeitsarbeit kann auch auf andere Verhaltensweisen und Entscheidungen Einfluss genommen werden. Dabei kann auch direkt die Fahrweise adressiert werden, wobei dies in den analysierten Planwerken kaum der Fall ist – in diesem Bezug finden häufiger Fahrtrainings Erwähnung, auf die in Kapitel 3.2.11 eingegangen wird. Auch die Entscheidungen über Fahrzeugbesitz und Fahrzeugwahl können durch Marketingmaßnahmen beeinflusst werden, dieses Feld wird jedoch insbesondere durch privatwirtschaftliche Akteure bedient.
- ▶ Die Wirksamkeit von Maßnahmen dieses Typs wurde zwar immer wieder untersucht, die Quantifizierung ist u.a. aufgrund der problematischen Abgrenzung zu anderen Entwicklungen und der Schwierigkeit der Identifikation einer geeigneten Kontrollgruppe

aber nicht immer aussagekräftig. Insgesamt kann somit keine Aussage zur Bedeutung des Maßnahmentyps für die Luftreinhaltung und den Klimaschutz vorgenommen werden.

Die Wirkungsmechanismen von Maßnahmen dieses Typs mit Bezug auf die modalen Verlagerungen können sehr unterschiedlich sein. Anpassungen „harter Faktoren“ des Angebots (z.B. Preise, Fahrplan) können mithilfe von Verkehrsnachfragemodellen gut auf ihre Wirksamkeit hin untersucht werden. Das Verkehrsangebot im Radverkehr stellt einen Grenzfall dar, eine detaillierte Modellierung der Radwegeinfrastruktur gewinnt momentan in der Praxis an Verbreitung, die Verfügbarkeit geeigneter Abstellanlagen ist in Nachfragemodellen kaum berücksichtigt. Öffentlichkeitsarbeit, Imagebildung, verbesserte Fahrplanauskunftssysteme und vergleichbare häufig in Luftreinhaltungs- und Klimaschutzplänen genannte Maßnahmen sind in ihrer Wirkung dagegen nur schwer quantifizierbar, empirische Grundlagen sind dünn. Selbiges gilt für neue Mobilitätsformen wie Ride- und Carsharing ebenso wie für intermodale Verknüpfungen unterschiedlicher Verkehrsmittel. Der Zusammenhang zwischen Verkehrsnachfrage und Verkehrsfluss kann makroskopisch beschrieben werden, beispielsweise, wie in Verkehrsnachfragemodellen verbreitet umgesetzt, durch eine Kopplung des Nachfragemodells mit HBEFA. Das Vorgehen stößt aber bei genauerem Blick auf die zeitliche Modellauflösung in vielen Fällen an seine Grenzen (Ansatz im Forschungsvorhaben siehe Kapitel 3.3). Mikroskopische Umlegungsverfahren können genauere Ergebnisse liefern, sind jedoch mit Blick auf die Eingangsdaten anspruchsvoll. Bestimmte Maßnahmentypen (ÖPSV ausweiten, Rad- und Fußverkehr fördern) können zu zusätzlichen Interaktionen zwischen MIV und den anderen Verkehrsteilnehmenden führen. Der Wirkung solcher Interaktionen auf den Verkehrsfluss und auf die Emissionen des Straßenverkehrs wurde bisher nur vereinzelt, z.B. durch Dallmeyer (2014), Beachtung geschenkt.

3.2.10 Maßnahmen zur Minderung der MIV-Fahrleistung im Güterverkehr ohne Bezug zur Straßeninfrastruktur

Der Lkw-Verkehr macht rund 10 % der Fahrleistung des motorisierten Verkehrs in Deutschland aus, wovon sich ein überproportional großer Anteil auf Fernstraßen abspielt. Aufgrund der für Lkw geltenden niedrigeren zulässigen Höchstgeschwindigkeit ist dieser Verkehr für den dortigen Verkehrsfluss von hoher Relevanz. Innerhalb von urbanen Räumen ist vor allem die in der letzten Meile stattfindenden Lieferprozesse für den Verkehrsfluss relevant. Entsprechend dieser Unterscheidung wurden Maßnahmen, die speziell auf den Güterverkehr bezogen sind in zwei Maßnahmentypen zusammengefasst. Deren Wirkungen sind in Tabelle 64 dargestellt.

Tabelle 64: Maßnahmen zur Minderung der MIV-Fahrleistung im Güterverkehr ohne Bezug zur Straßeninfrastruktur

| Maßnahmentyp | Effekte am primären Wirkungsort | | | | | | | ...im gesamten Wirkungsbereich | | | | |
|--|---------------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------------|
| | Verstetigter Verkehr durch... | | | | Sonstige verkehrliche Effekte | | | Verkehrliche Effekte | | | | |
| | weniger Hindernisse | verändertes Fahrverhalten | erhöhte Kapazität (Angebot) | reduzierte MIV-Fahrleistung | reduzierte MIV-Fahrleistung | niedrigere Emissionsfaktoren | verringert Emissionen ÖSPV | verringerte Luftschadstoffbelastung | verstetigter Verkehr generell | reduzierte MIV-Fahrleistung | niedrigere Emissionsfaktoren | verringerte Treibhausgasemissionen |
| Großräumigen Lkw-Verkehr reduzieren | | + | | + | + | | | ↑ | | | | ↑↑ |
| Kleinräumigen Lieferverkehr besser organisieren (Mikrohubs, Lastenräder, kooperative Belieferung, Paketstationen, ...) | + | | | | + | | | ↗ | | | | ↗ |

Unter den Maßnahmentyp „**Großräumigen Lkw-Verkehr reduzieren**“ fallen sowohl Maßnahmen aus kommunalen Luftreinhalteplänen als auch Maßnahmen, die auf Landes- oder Bundesebene aufgeführt werden. Ein Teil dieser Maßnahmen zielt auf eine Attraktivitätssteigerung von Verkehrsmittelalternativen (meist Bahn, vereinzelt Binnenschifffahrt) ab. Die Reaktivierung oder Kapazitätssteigerung von Bahnanlagen werden auf allen politischen Ebenen thematisiert. Auch der Neu- und Ausbau von Güterverkehrszentren wird vereinzelt in Luftreinhalteplänen genannt, um eine weitreichende Verlagerung auf die Schiene zu erreichen, wird ein deutschlandweiter Umbau der Terminals als Voraussetzung angesehen (vgl. Lobig et al. 2016). Eine Umgestaltung und oder Erhöhung der Lkw-Maut kann ebenfalls diesem Maßnahmentyp zugerechnet werden. Aufgrund der bereits verwendeten Onboard-Streckenerfassung sind Anpassungen des Bepreisungssystems einfach möglich. Agora Verkehrswende (2019) schlagen beispielsweise eine Ausweitung der Maut auf das gesamte Straßennetz vor. Als Wirkungen sind zu nennen:

- ▶ Da die veränderte Fahrzeugzusammensetzung zu einem anderen Fahrverhalten des Kollektivs führt, wird der Verkehr damit verstetigt. Weiterhin sinkt die Wahrscheinlichkeit eines Verkehrszusammenbruchs und die Qualität des Verkehrsablaufs nimmt mit einem abnehmenden Schwerverkehrsanteil zu (FGSV 2015a). Bei einem starken Rückgang der Fahrleistung kann auch die Gesamtverkehrsstärke für die Verstetigung bedeutend werden.
- ▶ Zentral zielen jedoch alle Maßnahmen, die diesem Typ zugeordnet sind, auf eine Minderung der Fahrleistung des Straßengüterverkehrs ab. Lobig et al. (2016) entwickeln drei Szenarien, in denen Pfade zur Verlagerung des Güterverkehrs auf die Schiene untersucht werden. Das maximale Verlagerungspotenzial liegt demnach bei 20 % der Lkw-Fahrleistung. Es gilt zu erwähnen, dass der Wert auf den Bezugsfall 2030 bezogen ist – absolut übersteigt die Fahrleistung auch im Szenario 2030 die des Analysejahres 2010. Agora Verkehrswende (2019) schätzen die Wirkungen einer ungefähr verdoppelten Lkw-Maut (+17 ct/km) kombiniert mit einer Ausweitung auf das gesamte Straßennetz mit

einem Fahrleistungsrückgang von 13 % ein. Auf Grundlage von Auswertungen zur ersten Phase der Lkw-Maut in Deutschland konnten noch keine Aussagen über modale Verlagerungseffekte gemacht werden, der Rückgang der Anteile der Leer-Kilometer lässt jedoch auf eine Verkehrsvermeidung durch effizientere Planung schließen (vgl. Roth 2009).

- ▶ Da der Lkw-Verkehr zu großen Teilen im übergeordneten Straßennetz stattfindet, ist die Maßnahme für den Klimaschutz von größerer Bedeutung als lokal zur Luftreinhaltung, zumal in vielen Fällen bereits lokale Maßnahmen zur Eindämmung des Lkw-Verkehrs ergriffen wurden.

Der Maßnahmentyp „**Kleinräumigen Lieferverkehr besser organisieren**“ umfasst diverse Maßnahmen im Bereich der City-Logistik, die für Verkehrsfluss, Luftreinhaltung und Klimaschutz auf ähnliche Wirkungen abzielen. Die Maßnahmen können infrastrukturelle, organisatorische oder fahrzeugseitige Komponenten aufweisen, häufig genannt werden folgende Aspekte: Die Güterverteilung über Mikrohub, der Einsatz von Lastenrädern, die Kooperation mehrerer KEP-Dienstleister bei der Endkundenbelieferung und das Einrichten von Paketstationen (vgl. z.B. Prümm et al. 2017). Die Anwendung der Konzepte ist räumlich skalierbar, da die kleinräumige Verteilung von Gütern optimiert werden soll, stellen entsprechende Liefergebiete die Wirkungsbereiche dar. Nach einer Auswertung von Gilbert und Schäfer (2021) macht der Wirtschaftsverkehr um die 16 % bis 20 % des gesamten innerstädtischen Verkehrs aus, davon wiederum entfallen nur etwa 5 % auf KEP-Dienstleistungen und rund 20 % bis 25 % auf herkömmliche Warenlieferung. Auch wenn die Zahlen auf punktuellen Beobachtungen beruhen und somit keinen Anspruch auf Repräsentativität haben, helfen die Größenordnungen der betroffenen Verkehre bei einer Einschätzung zur Wirksamkeit des Maßnahmentyps. Die Wirkungen können folgendermaßen zusammengefasst werden.

- ▶ Primäres Ziel ist es den Lieferverkehr mit konventionellen Lieferfahrzeugen zu reduzieren. Der Anteil dieser Verkehre an der Gesamtfahrleistung ist so gering, dass auch eine spürbare Senkung der Fahrleistung keine auslastungsbedingte Wirkung auf den Verkehrsfluss zeigen würde. Maßnahmen, die diesem Typ zugeordnet werden können, (Paketstationen, Mikrohub, Cargo-Tram und Crowd Cargo Logistics) wird durch den wissenschaftlichen Beirat beim Bundesminister für Verkehr und digitale Infrastruktur (2021) im Bereich der Emissionsminderungen und bei der Minderung des Kfz-Verkehrs ein nachvollziehbarer Beitrag zugeschrieben. Die Einschätzung, dass die Wirksamkeit mit Blick auf die Emissionen des Verkehrs im Gesamten gering sein werden, bestätigt sich durch die Größenordnung der betroffenen Verkehre.
- ▶ Im Verkehrsraum haltende Lieferfahrzeuge können Hindernisse für den fließenden Verkehr darstellen. Wird der Einsatz dieser Fahrzeuge reduziert oder die Belieferung beispielsweise auf Paketstationen verlagert, kann sich dies positiv auf den Verkehrsfluss auswirken. Um die Wirksamkeit zu quantifizieren, muss die Anzahl der eingesparten Haltevorgänge abgeschätzt werden. Auf Grundlage von Baier et al. (2003) können damit die Wirkungen auf die Verkehrsqualität eingeordnet werden.
- ▶ Durch den Rückgang der Fahrleistung und die Abnahme der Behinderungen des Verkehrsflusses entstehen positive Effekte für die Luftreinhaltung und den Klimaschutz. Diese sind auch bei voller Ausschöpfung des bestehenden Optimierungspotenzials gering, da nur ein kleiner Teil des Gesamtverkehrs adressiert wird und die zu transportierende Gütermenge unverändert bleibt.

Der großräumige Güterverkehr und der kleinräumige Lieferverkehr unterscheiden sich mit Blick auf die Möglichkeiten der Erhebung und die Modellierungsansätze deutlich. Die Datenlage zum großräumigen Güterverkehr ist gut, in der Fläche wirkende Maßnahmen können mit Güterverkehrsmodellen auf ihre Wirksamkeit hin untersucht werden. Der kleinräumige Lieferverkehr ist dagegen komplexer abzubilden und insbesondere hinsichtlich der Wirksamkeit auf Fahrleistungsänderungen und Emissionen schwerer zu bewerten. Hier fehlen verlässliche Abschätzungen, die eine Übertragung oder Hochrechnung der Ergebnisse zulassen.

3.2.11 Maßnahmen zur generellen Beeinflussung des Fahrverhaltens und des Geschwindigkeitsniveaus

Der Verkehrsfluss ergibt sich in Summe aus dem Fahrverhalten der einzelnen Fahrer*innen. Maßnahmen dieser Kategorie zielen direkt auf eine Veränderung dieses Fahrverhaltens ab. Sie weisen keinen spezifischen räumlichen Bezug auf oder wirken im Falle der Anpassung der Regelgeschwindigkeiten auf Bundesebene. Die vier dieser Kategorie zugeordneten Maßnahmentypen sind in Tabelle 65 aufgelistet.

Tabelle 65: Maßnahmen zur generellen Beeinflussung des Fahrverhaltens und des Geschwindigkeitsniveaus

| Maßnahmentyp | Effekte am primären Wirkungsort | | | | | | | ...im gesamten Wirkungsbereich | | | | |
|---|---------------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------------|
| | Verstetigter Verkehr durch... | | | | Sonstige verkehrliche Effekte | | | Verkehrliche Effekte | | | | |
| | weniger Hindernisse | verändertes Fahrverhalten | erhöhte Kapazität (Angebot) | reduzierte MIV-Fahrleistung | reduzierte MIV-Fahrleistung | niedrigere Emissionsfaktoren | verringert Emissionen ÖSPV | verringerte Luftschadstoffbelastung | verstetigter Verkehr generell | reduzierte MIV-Fahrleistung | niedrigere Emissionsfaktoren | verringerte Treibhausgasemissionen |
| Fahrtraining für Privatpersonen oder Unternehmen fördern oder für ÖPNV-Fahrer*innen/städtische Mitarbeiter*innen anbieten | | + | | | | + | + | → | | | | → |
| (Hoch-)automatisiertes und autonomes Fahren ermöglichen | | + | | - | - | | +/- | ? | | | | ? |
| Regelgeschwindigkeit innerorts reduzieren | | + | - | + | + | +/- | | ↑↓ | | | | ↑↓ |
| Regelgeschwindigkeit außerorts und auf Autobahnen reduzieren | | + | + | + | + | + | | ↑ | | | | ↑ |

Die erste Möglichkeit das Fahrverhalten direkt zu beeinflussen, besteht darin, durch **Fahrtraining** oder vergleichbare Maßnahmen zusätzliches Wissen zu vermitteln und Bewusstsein zu schaffen. Dies kann durch Angebote für unterschiedliche Personengruppen erfolgen. Fahrtrainings für Privatpersonen können finanziell oder anderweitig gefördert werden, ebenso können die Mitarbeiter*innen von Unternehmen als Zielgruppe angesprochen werden, indem mit den jeweiligen Unternehmen beispielsweise im Rahmen eines betrieblichen Mobilitätsmanagements Vereinbarungen geschlossen werden. In Luftreinhaltungsplänen werden

immer wieder Fahrtrainings für städtische Mitarbeiter*innen und/oder Fahrer*innen des ÖPNV als Maßnahme genannt. Damit wird nur ein kleiner Teil des Gesamtverkehrs adressiert. Die Maßnahme kann durch Bordcomputer, die ein optimiertes Fahrverhalten vorgeben, unterstützt werden. Erwartbare Wirkungen sind:

- ▶ Weniger starke Brems- und Beschleunigungsvorgänge treten auf (vgl. DVR 2009). Diese Veränderung des Fahrverhaltens wirkt auch auf den Verkehrsfluss. Es tritt eine Verstetigung ein, Verkehrszusammenbrüche werden unwahrscheinlicher.
- ▶ Die Gangwahl wird mit Blick auf eine Minimierung des Energieverbrauchs und der Emissionen optimiert. Unnötige Verbraucher werden abgeschaltet, unnötiger Ballast vermieden. Dadurch verändern sich die spezifischen Schadstoffemissionen, es hat jedoch keine direkte Wirkung auf die Trajektorie des Fahrzeugs und damit auf den Verkehrsfluss.
- ▶ Die Effekte der Maßnahmen auf die Luftschadstoff- und Treibhausgasemissionen sind nachvollziehbar und können über Annahmen über den mittleren Effekt je geschulter Person abgeschätzt werden. Der DVR (2009) wertete eine große Zahl von Evaluationen aus. Ein Vergleich zwischen den Verbräuchen mit und ohne Fahrtraining führt in der Regel zu Angaben erreichter Einsparungen zwischen 10 % und 20 %. Diese Werte können als maximales Potenzial interpretiert werden, da sie nicht berücksichtigen, wie sich das veränderte Fahrverhalten in den Alltag der Teilnehmenden übertragen lässt. Bei Vorher-Nachher- bzw. Vergleichsuntersuchungen der Kraftstoffverbräuche in Unternehmensfuhrparks wurden mittelfristig Rückgänge zwischen rund 4 % und 6 % festgestellt. Diese Größenordnung bestätigen Van Mierlo et al. (2004) mit einer Hochrechnung unterschiedlicher Anpassungen im Fahrverhalten für die Region Flandern in Belgien. Andrieu und Pierre (2012) weisen darauf hin, dass sich der Effekt einfacher Spritspartipps kaum von dem eines umfangreichen Fahrtrainings unterscheidet. Dies legt nahe, dass auch durch eine generelle Verankerung eines Bewusstseins für eine emissionsreduzierte Fahrweise in der Bevölkerung eine Wirkung erzielt werden könnte. Inwiefern und mit welchen Aufwänden dies erreicht werden kann, ist jedoch unklar. Bei den in kommunalen Planwerken vorgeschlagenen Maßnahmen sind die Anteile der geschulten Personen an der Gesamtzahl der Fahrer*innen im MIV gering. Es ist insgesamt nicht davon auszugehen, dass damit eine wahrnehmbare Wirkung entfaltet werden kann.
- ▶ Neben den Energieeinsparungen und der Emissionsminderung ist die Verkehrssicherheit für die Durchführung von Maßnahmen zur Beeinflussung des individuellen Fahrverhaltens ein gleichermaßen wichtiger Gesichtspunkt. Auch hier können mittelfristige positive Wirkungen gezeigt werden (vgl. DVR 2009).

Eine der Hoffnungen, die mit hochautomatisiertem bzw. autonomem Fahren verbunden ist, ist ein positiver Effekt auf den Verkehrsfluss. Aus diesem Gesichtspunkt heraus können Maßnahmen, die zur **Ermöglichung von hochautomatisiertem oder autonomem Fahren** beitragen als Beitrag zur Luftreinhaltung und zum Klimaschutz gewertet werden. Entsprechend werden Fördermaßnahmen in diesem Bereich auf kommunaler Ebene, (insbesondere in Green City Plänen) aber auch auf Landesebene in Strategiepapieren dargestellt. In aller Regel werden Forschungsvorhaben finanziell oder durch die Bereitstellung von Erprobungsflächen unterstützt. Da derzeit nicht absehbar ist, wann und unter welchen Rahmenbedingungen autonome Fahrzeuge einen relevanten Anteil am Verkehr haben werden, ist eine Abschätzung der Effekte mit vielen Unsicherheiten verbunden. Grundsätzliche erwartbare Wirkungen sind:

- ▶ Ab einem gewissen Durchdringungsgrad werden vollautomatisierte oder autonome Fahrzeuge aufgrund ihres vorausschauenden Fahrverhaltens zu einem gleichmäßigeren Verkehrsfluss beitragen. Dies liegt in erster Linie an den erfassten Daten, die unter den Fahrzeugen ausgetauscht werden, sowie an der Möglichkeit nahezu ohne Zeitversatz kooperatives Verhalten zu realisieren (vgl. u.a. Friedrich 2015). Daneben ist von Bedeutung, dass eine passivere Fahrweise sicherer ist, die transportierten Personen starke Brems- oder Beschleunigungsvorgänge negativ bewerten werden und psychologische Faktoren wie Stress oder Spaß am Fahren keinen Einfluss haben. Die FGSV (2020) weist darauf hin, dass die Verbesserungen des Verkehrsflusses überschaubar sein werden, solange Mischverkehr mit konventionell geführten Fahrzeugen besteht.
- ▶ Aus denselben Gründen (Kommunikation, Kooperation, Reaktionszeit, ...) können autonome Fahrzeuge deutlich geringere Zeitlücken realisieren, wodurch die Kapazität einer Verkehrsanlage steigt. Friedrich (2015) geht von einem Steigerungspotenzial von 40 % im Stadtverkehr und 80 % auf Autobahnen aus. Auch in anderen Studien werden deutliche Kapazitätszugewinne prognostiziert (vgl. Narayanan et al. 2020). Damit steigt auch die Qualität des Verkehrsablaufs und der Verkehrsfluss wird verbessert.
- ▶ Es liegt der Schluss nahe, dass durch autonomes Fahren die Fahrleistung zunehmen wird. Die Hauptgründe sind Leerfahrten und eine veränderte Fahrtzeitwahrnehmung, da während der Fahrt anderen Tätigkeiten nachgegangen werden kann. Da eine Zunahme der Fahrleistung bei vielen derzeit gültigen verkehrspolitischen Zielen kontraproduktiv wirkt, können Maßnahmen unternommen werden, diesen Effekt einzudämmen. Insbesondere der Einsatz autonomer Fahrzeuge im ÖV und Ridesharing-Angebote sind als Maßnahmen zu nennen, deren wirtschaftliche Umsetzung ebenfalls erst durch die Marktreife autonomer Fahrzeuge möglich werden. Insofern besteht hinsichtlich der Wirkung auf die Fahrleistung und damit auch auf die Streckenauslastung abhängig von den in den jeweiligen Studien getroffenen Annahmen ein geteiltes Bild (vgl. u.a. Krail 2020, Narayanan et al. 2020, FGSV 2020).
- ▶ Die Wirkungen für die Emissionen des öffentlichen Verkehrs sind damit nicht abzuschätzen, da unklar ist inwieweit autonome Fahrzeuge – in bestimmten Gebieten vielleicht exklusiv – als Ergänzung des öffentlichen Verkehrs in das Verkehrssystem integriert werden.
- ▶ Da die Verfügbarkeit autonomer Fahrzeuge sich auf die die Mobilität in ihrer Gesamtheit auswirken und auch andere Lebensbereiche stark beeinflussen wird, ist es nur bedingt zulässig Maßnahmen dieses Typs auf ihre Bedeutung hinsichtlich des Verkehrsflusses zu reduzieren. Verkehrssicherheitsaspekte, die Gestaltung von Straßenräumen und die Existenz unterschiedlicher Wirtschaftsbereiche sind nur einige Punkte, die es zu berücksichtigen gilt.
- ▶ Die Bedeutung einer tatsächlichen Verfügbarkeit autonomer Fahrzeuge kann nicht hoch genug eingeschätzt werden. In Summe wird überwiegend davon ausgegangen, dass durch autonome Fahrzeuge, trotz evtl. verursachtem Mehrverkehr und all den damit einhergehenden negativen Wirkungen, in Summe ein positiver Effekt auf Energieverbrauch und verursachte Emissionen entsteht (vgl. u.a. Krail 2020, Narayanan et al. 2020). Daraus aber eine Aussage über die Wirksamkeit der unter diesem Maßnahmentyp zusammengefassten Fördermaßnahmen abzuleiten wäre fahrlässig, da zum einen unklar ist, inwiefern die Maßnahmen zu einer Beschleunigung der Verbreitung

autonomer Fahrzeuge beitragen werden und zum andern keine verlässliche Prognose besteht, in welchen Zeiträumen diese generell realisiert werden kann.

Das **Reduzieren der Regelgeschwindigkeit im Innerortsbereich** ist eine in Deutschland vieldiskutierte Maßnahme. Generell lässt sich im städtischen Raum eine Entwicklung hin zu niedrigeren Regelgeschwindigkeiten beobachten. Dennoch fehlt gegenwärtig eine rechtliche Grundlage, welche den Kommunen eine flächendeckende Anordnung von Tempo 30 ermöglichen würde. Ein generelles Absenken der Regelgeschwindigkeit kann im benachbarten Ausland beobachtet werden, so etwa in Paris seit dem Sommer 2021, wo mit wenigen Ausnahmen flächendeckend Tempo 30 angeordnet wurde. Die Maßnahme ist nicht ausschließlich durch ein Aufstellen von Schildern zu realisieren, das Absenken der Geschwindigkeiten muss durch bauliche Eingriffe und Kontrollen unterstützt werden. Darüber hinaus ist mit weiteren planerischen Konsequenzen zu rechnen (s.u.). Die Wirkungen von Maßnahmen dieses Typs lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- ▶ Da auf ein weniger hohes Geschwindigkeitsniveau beschleunigt und davon abgebremst werden kann, trägt die Maßnahme zu einer Verstetigung des Verkehrs bei. Dieser Effekt kann jedoch untergraben oder ganz aufgehoben werden, wenn die Rahmenbedingungen (z.B. LSA-Koordination) nicht an die gültige zulässige Höchstgeschwindigkeit angepasst sind.
- ▶ In innerstädtischen Gebieten sind die Kapazitäten vor allem durch die Leistungsfähigkeit der Knotenpunkte bestimmt. Zur Wirkung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit auf die Leistungsfähigkeit von Knotenpunkten werden unterschiedliche Ansichten vertreten. In der Theorie lässt sich aufgrund des zunehmenden Einflusses der Fahrzeuglänge auf die Zeitlücke eine Kapazitätsminderung begründen, die sich durch Simulationen, die am Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik durchgeführt wurden, bestätigt. Topp (2014) sieht die Wirkung einer Senkung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h auf 30 km/h als marginal an. Heinrichs et al. (2016) kommen auf ein vergleichbares Ergebnis und weisen darauf hin, dass andere Einflussfaktoren bedeutender sind (z.B. querender Fußverkehr, Park- und Haltevorgänge). Auch die Simulationsergebnisse von Sumpf (2008) zeigen keine verringerte Kapazität bei Tempo 30.
- ▶ Sofern geeignete Alternativrouten vorhanden sind, kann die lokale Verkehrsstärke aufgrund von Routenwahlverlagerungen abnehmen (positive Wirkung durch weniger Fahrzeuge und unter Umständen einer damit einhergehenden Verbesserung des Verkehrszustandes). Der Verlagerungseffekt kann sowohl gewünscht als auch unerwünscht sein, nämlich wenn der Mehrverkehr abseits des Maßnahmenortes in sensiblen Bereichen stattfindet (Verlagerungen ins untergeordnete Netz). Routenwahleffekte werden von Friedrich et al. (2011) anhand des makroskopischen Verkehrsnachfragemodells der Region Stuttgart für eine Geschwindigkeitsbeschränkung von 40 km/h auf Hauptverkehrsstraßen gezeigt. Heinrichs et al. (2016) verweisen auf empirische Untersuchungen aus Erfurt und Berlin, bei denen keine signifikanten Verlagerungseffekte festgestellt wurden.
- ▶ Durch eine Verringerung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit wird der MIV im Mittel langsamer und damit unattraktiver. Bei einer großflächigen Umsetzung der Maßnahme (z.B. Regelgeschwindigkeit von 30 km/h innerorts) würden Nachfrageeffekte eintreten und die Fahrleistung im MIV reduziert. Ritz (2019) untersuchte die Kombination aus einer Geschwindigkeitsbeschränkung von 40 km/h auf Bundes-, Landes- und

Kreisstraßen und von 30 km/h im untergeordneten Netz in der Region Stuttgart. Die Modellergebnisse zeigen eine Verlagerung des Verkehrs in das übergeordnete Netz (Autobahnen +1 %) aber einen deutlichen Rückgang der Fahrleistungen im untergeordneten Netz (Landes- und Kreisstraßen -4 %, sonstige Straßen -8 %). Krajzewicz et al. (2016) berechnen modellbasiert für Braunschweig in Summe einen Rückgang der Pkw-Nutzenden von 2,5 % bei Tempo 30.

- ▶ Für die Gemarkung der Landeshauptstadt Stuttgart ergab sich ein Rückgang der CO₂-Emissionen um 2 %, in der Fläche (Region Stuttgart) gleichen sich die negativen Wirkungen auf den spezifischen Kraftstoffverbrauch und die positiv wirkenden Nachfrageeffekte nahezu aus. Zusätzlich erhöht sich durch die Maßnahme die Attraktivität der Strecke für nichtmotorisierte Verkehrsteilnehmende, da weniger Verkehrslärm entsteht und durch das ähnlichere Geschwindigkeitsniveau die Verkehrssicherheit zunimmt, was die Nachfrageeffekte verstärkt.
- ▶ Wenn der Verkehr im Mittel langsamer wird, entstehen Zeitverluste. Dieser Effekt wird bei einer Veränderung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit innerorts häufig vernachlässigt, da die mittleren Geschwindigkeiten im Innerortsbereich bereits unter 30 km/h liegen. Durch ein Absenken der zulässigen Höchstgeschwindigkeit auf 30 km/h kann die mittlere Geschwindigkeit aber natürlich dennoch über diesen Wert hinaus weiter abnehmen.
- ▶ Durch eine niedrigere Fahrgeschwindigkeit wird das Risiko von Unfällen und die Unfallschwere verringert. Dieser Zusammenhang lässt sich allgemeingültig beobachten (vgl. ITF (Hrsg.) 2018). Auch mit Bezug auf ein Herabsetzen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h auf 30 km/h kommen unterschiedliche Autoren zu positiven Ergebnissen (u.a. Topp 2014, Heinrichs et al. 2016)
- ▶ Maßnahmen dieses Typs können darüber hinaus Auswirkungen auf den Betrieb des öffentlichen Verkehrs haben. Unter Umständen können angenommene Fahrtzeiten nicht mehr eingehalten werden, wodurch eine neue Fahr- und Einsatzplanung und ggf. der Einsatz zusätzlicher Fahrzeuge und Fahrer*innen nötig wird (vgl. Heinrichs et al. 2016 und Senatsverwaltung Umwelt, Verkehr und Klimaschutz Berlin (Hrsg.) 2021). Beides kann im ÖPNV zu einer erheblichen Steigerung der Betriebskosten führen. Sofern diese Steigerung auf den Fahrpreis umgelegt wird, würde dies wiederum zu einem Attraktivitätsverlust des ÖPNV führen. Gleiches gilt für die Steuerung von Kontenpunkten. Im häufig auftretenden Fall koordinierter LSA-Steuerungen, müssen diese aufgrund der veränderten zulässigen Höchstgeschwindigkeiten angepasst werden, was einen erheblichen Aufwand für die zuständige Verwaltung und hohe Kosten bedeuten kann.
- ▶ In einer Vielzahl von Untersuchungen wurden unter Verwendung unterschiedlicher Methoden (Messungen im Realbetrieb, Labormessungen, Simulationen) uneindeutige Ergebnisse hinsichtlich der Wirkung auf Kraftstoffverbrauch und spezifischen Emissionsfaktoren ermittelt. Toenges-Schuller et al. (2012) weisen in ihrer umfangreichen Studie einen leichten Rückgang der NO_x-Emissionen und leichte Zunahmen bei antriebsbedingten PM-Emissionen und Kraftstoffverbrauch aus. Auch Kleinebrahm und Steven (2011) schlussfolgern aus Messfahrten und PHEM-Simulationen, dass durch eine Verringerung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h auf 40 km/h oder 30 km/h kein signifikanter Beitrag zur Luftreinhaltung erwartet werden kann. In einer aktuellen empirischen Untersuchung in Berlin (Senatsverwaltung Umwelt,

Verkehr und Klimaschutz Berlin (Hrsg.) 2021) wurde bei vier von fünf Versuchsstrecken ein Rückgang der NO₂-Emissionen in Höhe von 2,2 bis 3,8 µg/m³ und bei einer Versuchsstrecke ein Anstieg um 2,2 µg/m³ ermittelt (CO₂ wurde nicht gemessen).

- ▶ Nach der Version 4.1 des HBEFA (INFRAS AG 2019) liegen die spezifischen Treibhausgasemissionen für Hauptverkehrsstraßen mit Tempo 30 generell höher als mit Tempo 50 (knapp 3 % im flüssigen Verkehr und 9 % im gesättigten Verkehr). Die Flottenzusammensetzung ist dabei jedoch entscheidend. Da die Motorkennfelder und die Abgasnachbehandlung bei Verbrennungsmotoren auf häufig gefahrene Lastzustände ausgelegt sind, kann zumindest die Hypothese formuliert werden, dass bei zunehmender Elektrifizierung der Fahrzeugflotte ein zunehmend positiver Effekt auftritt.
- ▶ Selbst bei einer flächendeckenden Umsetzung der Maßnahmen sind die zu erwartenden Wirkung im Bereich des Klimaschutzes gering. Ritz (2019) berechnet für die Gemarkung der Landeshauptstadt Stuttgart einen Rückgang der CO₂-Emissionen um 2 %, in der Fläche (Region Stuttgart) gleichen sich die negativen Wirkungen auf den spezifischen Kraftstoffverbrauch und die positiv wirkenden Nachfrageeffekte nahezu aus. Auch der Wissenschaftliche Dienst des Deutschen Bundestages (2019) kommt abschließend zu keinem eindeutigen Ergebnis hinsichtlich der Wirkungen auf die Luftschadstoffemissionen.

Für das **Anordnen von Geschwindigkeitsbeschränkungen im Außerortsbereich und auf Autobahnen** gelten die für den Innerortsbereich genannten rechtlichen Einschränkungen gleichermaßen. Insbesondere Geschwindigkeitsbeschränkungen auf Autobahnen wurden in der Vergangenheit immer wieder im Zusammenhang mit unterschiedlichen verkehrspolitischen Zielen als Maßnahme diskutiert. Deutschland ist das einzige Land in der EU, in der keine allgemeine Geschwindigkeitsbeschränkung auf Autobahnen gilt. Im Jahr 2015 war auf rund 70 % der Gesamtlänge der deutschen Autobahn kein Tempolimit vorgeschrieben (Kollmus et al. 2017) Im Vergleich zu flächendeckenden Maßnahmen im Innerortsbereich, bei denen der Betrieb des öffentlichen Verkehrs und die Verkehrssteuerung an veränderte Geschwindigkeitsänderungen angepasst werden müssten, ist die Maßnahme im Außerortsbereich vergleichsweise einfach und kostengünstig umzusetzen. Die Maßnahme lässt folgende Effekte erwarten:

- ▶ Da auf ein weniger hohes Geschwindigkeitsniveau beschleunigt und davon abgebremst werden muss, trägt die Maßnahme zu einer Verstetigung des Verkehrs bei. Da die Höchstgeschwindigkeit auf Autobahnen für Lkw auf 80 km/h beschränkt ist, trägt ein Herabsetzen der zulässigen Höchstgeschwindigkeiten für Pkw zusätzlich zu einer Harmonisierung der Fahrgeschwindigkeiten bei.
- ▶ Wie bereits bei den dynamischen Tempolimits in Kapitel 3.2.2 beschrieben, sinkt durch eine geringere zulässige Höchstgeschwindigkeit die Wahrscheinlichkeit eines Verkehrszusammenbruchs (vgl. Schick 2003).
- ▶ Sofern geeignete Alternativrouten vorhanden sind, kann die lokale Verkehrsstärke aufgrund von Routenwahlverlagerungen abnehmen (positive Wirkung durch weniger Fahrzeuge und unter Umständen einer damit einhergehenden Verbesserung des Verkehrszustandes). Betrifft die Maßnahme Autobahnen, ist dieser Effekt in der Regel nicht gewünscht, da Verlagerungen in das untergeordnete Netz Belastungen sensiblerer Gebiete mit sich bringen. Gohlisch und Malow (1999) weisen Verlagerungseffekte von Autobahnen in das untergeordnete Netz zwar zurück, da sie davon ausgehen, dass die

Reisezeitvorteile auf der Autobahn dennoch überwiegen. Der Aussage legen sie jedoch keine Modellrechnung zugrunde.

- ▶ Durch eine Verringerung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit wird der MIV im Mittel langsamer und damit unattraktiver. Bei einer großflächigen Umsetzung der Maßnahme (z.B. Beschränkung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit auf allen Autobahnen) würden Nachfrageeffekte eintreten und die Fahrleistung im MIV reduziert. Weder die im vorherigen Stichpunkt angeführten Routenwahleffekte noch die Effekte auf die Verkehrsnachfrage von Tempolimits im Außerortsbereich und auf Autobahnen wurden bisher genauer betrachtet und quantifiziert.
- ▶ Wenn der Verkehr im Mittel langsamer wird, entstehen Zeitverluste. Schrader (2020) weist auf diesen Effekt hin und quantifiziert ihn durch damit verbundene volkswirtschaftliche Kosten. Unter der Annahme eines Zeitwertsatzes von rund 26 €/h und CO₂-Emissionskosten von 25 €/t berechnet er basierend auf den Annahmen und Ergebnissen von Lange et al. (2020) durchwegs negative volkswirtschaftliche Effekte von generellen Tempolimits auf Autobahnen.
- ▶ Durch eine niedrigere Fahrgeschwindigkeit wird das Risiko von Unfällen und die Unfallschwere verringert. Dieser Zusammenhang lässt sich allgemeingültig beobachten (vgl. u.a. ITF (Hrsg.) 2018). Schlag et al. (2018) kommen in ihrer Review sowohl durch die Bewertung modellgestützter Untersuchungen als auch von Vorher-Nachher-Vergleichen zu dem Ergebnis, dass ein Tempolimit von 130 km/h auf Autobahnen positiv auf die Verkehrssicherheit wirken würde. Im Grundsatz wird diese Tendenz durch die BAST (2018) in einer auf das Papier von Schlag et al. (2018) durch das BMVi angeforderten Stellungnahme bestätigt.
- ▶ Mit zunehmender Geschwindigkeit nehmen die spezifischen Emissionen überproportional zu. Umso positiver wirkt sich ein Absenken der zulässigen Höchstgeschwindigkeit bei einem hohem Ausgangsniveau aus. Dies gilt insbesondere für den Ausstoß von Luftschadstoffen durch Verbrennungsmotoren, aber auch für den Energieverbrauch und den Ausstoß von Treibhausgasen. Nach HBEFA 4.1 (INFRAS AG 2019) liegen die CO₂-Emissionen im flüssigen Verkehr bei Tempo 120 rund 21 % und bei Tempo 100 rund 33 % niedriger als auf Autobahnstrecken ohne Geschwindigkeitsbeschränkung. Die spezifischen NO_x- und PM-Emissionen sind auf Autobahnen bei Tempo 100 gegenüber keinem Tempolimit um rund 60 % reduziert.
- ▶ Luftschadstoffbelastungen können durch diesen Maßnahmentyp deutlich gesenkt werden. Die lokale Wirkung kann hoch sein, jedoch liegen die Strecken in vielen Fällen nicht in sensiblen Gebieten, weshalb die Maßnahme vereinzelt lokal und in der Fläche nützlich sein kann, für viele lokale Probleme aber keine Lösung darstellen wird.
- ▶ Um Maßnahmen dieses Typs mit Blick auf den Klimaschutz wirksam zu gestalten, muss eine möglichst flächendeckende Umsetzung erfolgen. Ein Ausrollen der Maßnahme auf Grundlage von streckenbezogenen Einzelfallentscheidungen scheint nicht zielführend und ist aufgrund der Gesetzeslage auch nicht einfach möglich. Vielmehr wäre dazu die Anpassung der Regelgeschwindigkeiten durch die Bundesgesetzgebung geeignet. Mit Blick auf die Umweltwirkungen eines Tempolimits auf Autobahnen wird immer wieder auf die Untersuchung von Gohlisch und Malow (1999) verwiesen, die für den Pkw-Verkehr im Jahr 1996 eine Minderung der CO₂-Emissionen von 2 % durch Tempo 120 und 3 % durch Tempo 100 auf Autobahnen (bezogen auf die Emissionen des gesamten deutschen Straßenverkehrs) ermittelten. Die Zahlen sind möglicherweise aufgrund

veränderter Fahrleistungsanteile und Entwicklungen im Bereich der Fahrzeugtechnologie heute nur noch bedingt aussagekräftig. Interessanterweise kommen Lange et al. (2020) mit aktuelleren Zahlen (Fahrleistungsdaten aus dem Jahr 2016) zu Werten in einer vergleichbaren Größenordnung. Bezogen auf die in der deutschen Klimaberichterstattung ausgewiesenen CO₂-Emissionen des Straßenverkehrs für das Jahr 2016 werden folgende Einsparungen durch ein generelles Tempolimit auf Autobahnen angegeben: -3,4 % durch Tempo 100, -1,6 % durch Tempo 120 und -1,2 % durch Tempo 130.

Für Maßnahmen dieser Kategorie kann kein einheitliches Vorgehen zur Ermittlung der Wirksamkeit benannt werden. Fahrtraining und andere bewusstseinsbildende Maßnahmen können nur über ein Anpassen der Verhaltensparameter in Verkehrsflussmodellen abgebildet werden. Die Verhaltensparameter können aus Beobachtungen abgeleitet werden, jedoch sind Annahmen hinsichtlich der Stabilität des veränderten Verhaltens etc. nötig. Die Ansätze zur Ermittlung der Wirkungen autonomer Fahrzeuge sind ebenfalls immer mit starken Annahmen verbunden. Je nach Perspektive der Untersuchung wurden bereits sowohl makroskopische und mikroskopische Flussmodelle als auch makroskopische und mikroskopische Nachfragemodelle eingesetzt. Um eine konsistente Aussage über die Wirkungen auf den Verkehrsfluss unter Berücksichtigung der auslastungsbedingten Effekte machen zu können, sind sowohl die Effekte auf Ebene des Verkehrsflusses als auch auf Ebene der Verkehrsnachfrage zu berücksichtigen. Dasselbe gilt für die Untersuchung großflächig ausgelegter Anpassungen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit.

3.3 Quantifizierung der Umwelteffekte ausgewählter Maßnahmen

Im Rahmen der Studie wurden ausgewählte Maßnahmen modellhaft abgebildet, um die Wirkungen im Bereich Luftreinhaltung und Klimaschutz zu quantifizieren. Die sieben Maßnahmen sind in Tabelle 66 aufgeführt. Sie gliedern sich in drei Blöcke. Drei Maßnahmen stellen eine herabgesetzte Regelgeschwindigkeit auf den unterschiedlichen Straßentypen (Autobahn, Außerortsbereich und Innerortsbereich dar). Unter dem Block Fahrleistungsminderung sind sehr unterschiedliche Maßnahmen zusammengefasst, die jedoch gemein haben, dass sie keine direkte Wirkung auf den Verkehrsfluss haben, sondern diesen nur indirekt über die Auslastung im Netz und damit über eine Änderung der Verkehrszustände beeinflussen. Drittens wurde die Wirkung einer stadtweiten, für den MIV optimierten Knotenpunktsteuerung untersucht.

Tabelle 66: Untersuchte verkehrliche Maßnahmen

| Regelgeschwindigkeiten | Fahrleistungsminderung | Knotenpunktsteuerung |
|--|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> ▶ Allgemeines Tempolimit auf Autobahnen von 120 km/h ▶ Allgemeines Tempolimit auf Autobahnen von 120 km/h und im Außerortsbereich von 80 km/h ▶ Regelgeschwindigkeit im Innerortsbereich von 30 km/h | <ul style="list-style-type: none"> ▶ Erhöhung des durchschnittlichen Besetzungsgrades ▶ Reduzierung des Parksuchverkehrs ▶ Fahrleistungsabhängige Pkw-Maut von 6 ct/km | <ul style="list-style-type: none"> ▶ Optimierung des MIV-Verkehrsflusses an LSA-Knotenpunkten im Innerortsbereich |

Im Mittelpunkt des Forschungsprojekts stand die Wirkung eines veränderten Verkehrsflusses (bzw. veränderter Verkehrszustände, siehe Kapitel 1.1) auf die Schadstoffemissionen. Der Verkehrszustand steht jedoch immer in Wechselwirkung mit der Verkehrsnachfrage: Einerseits wirkt sich die Menge der Fahrzeuge im Verkehrsnetz über die Auslastung auf den Verkehrszustand aus, andererseits wirkt die Regelung des Verkehrs (durch Geschwindigkeitsbeschränkungen, Knotenpunktsteuerung etc.) in aller Regel nicht nur auf den Verkehrszustand, sondern ebenfalls auf die Reisezeiten und damit auch auf die Verkehrsnachfrage. Wird durch eine Maßnahme, deren primäres Ziel eine Minderung der Emissionen durch eine Veränderung der Verkehrszustände ist, die Reisezeit gesenkt, ist von einer Zunahme der Nachfrage auszugehen, es ergibt sich also ein Rebound-Effekt. Dagegen verstärkt sich die Wirkung bei Maßnahmen, die eine Senkung der spezifischen Emissionen aufgrund der veränderten Verkehrszustände bezwecken, wenn die Reisezeit gleichzeitig zunimmt (z.B. Tempolimits auf Autobahnen). Ein wichtiges Ziel der Untersuchung war es, beide Aspekte der Maßnahmenwirkung zu betrachten, um so ein in sich geschlossenes Bild der Gesamtwirkung der Maßnahmen zu erhalten. Um die Effektstärken der beiden Aspekte sichtbar zu machen, wurde eine schrittweise Berechnungsmethodik angewandt, die in Kapitel 3.3.1.1 beschrieben wird. Die Nachfragewirkungen wurden mit Hilfe eines deutschlandweiten sowie mit drei regionalen Verkehrsnachfragemodellen ermittelt. Die Ergebnisgrößen der Modelle im Bezugsfall wurden bereits für die Zuweisung der HBEFA-Fahrleistungsanteile (Kapitel 3) genutzt. Da die Modelle nun für die Maßnahmenmodellierung genutzt werden, wird in Kapitel 3.3.1.2 die grundlegende Funktionsweise eines Verkehrsnachfragemodells beschrieben und in Kapitel 3.3.1.3 noch einmal genauer auf die verwendeten Verkehrsmodelle eingegangen.

Für die Zuordnung der Verkehrszustände und die darauf basierende Emissionsberechnung wurde ebenfalls die bereits in Kapitel 3 genutzten FCD verwendet. Die Methode zur Abbildung der Maßnahmenwirkungen ist in Kapitel 3.3.1.4 erläutert. Im Anschluss an dieses allgemeine Vorgehen wird auf die einzelnen Maßnahmen eingegangen (Kapitel 3.3.2 bis Kapitel 3.3.7).

3.3.1 Methodische Umsetzung

3.3.1.1 Schrittweise Bilanzierungsmethodik

Die unterschiedlichen Wirkungsweisen der Maßnahmen wurden einzeln modellhaft abgebildet, wobei ein schrittweises Vorgehen gewählt wurde und zum Teil unterschiedliche Eingangsdaten verwendet wurden. Dabei baute die jeweilige Berechnung immer auf dem vorhergehenden Schritt auf, um so final die gesamte Maßnahmenwirkung in sich geschlossen als Ergebnisgröße zu erhalten. Nach jedem Schritt wurden die Emissionen neu berechnet, um die Veränderung gegenüber dem vorhergehenden Stand quantifizieren zu können. Der Ablauf ist in Tabelle 67 zusammengefasst dargestellt. Bei den einzelnen Maßnahmen wurde immer nur ein Teil der fünf von rechts nach links in Tabelle 67 aufgetragenen Berechnungsschritte durchgeführt.

Tabelle 67: Ablauf der schrittweisen Bilanzierungsmethodik

| Eingangsgröße | HBEFA-Streckentyp-änderung | LSA-Emissionsminderung | + Routenwahleffekte | + Nachfrageeffekte | + Änderung Verkehrszustände |
|--|----------------------------|------------------------------|----------------------------|--|------------------------------|
| HBEFA-Streckentypen (Grundlage: Zuordnung AP1.1) | Änderung Streckentyp | | | | |
| Fahrzeit- und Emissionsminderung an LSA (Grundlage: Mikrosimulation) | | Einfügen Optimierungseffekte | | | |
| Verkehrsstärken (Grundlage: Verkehrsnachfragemodelle) | | | Neuberechnung (Routenwahl) | Neuberechnung (Nachfrage + Routenwahl) | |
| Verkehrszustände (Grundlage: FCD-Daten) | | | | | Neuberechnung (Verschiebung) |
| Wirkungsberechnung Emissionen (Grundlage: HBEFA 4.1) | Neuberechnung | Neuberechnung | Neuberechnung | Neuberechnung | Neuberechnung |

Die einzelnen Berechnungsschritte werden im Folgenden genauer erläutert:

a) HBEFA-Streckentypänderung

Bei Maßnahmen veränderter Regelgeschwindigkeiten. Da die spezifischen Emissionen direkt von der zulässigen Höchstgeschwindigkeit abhängen, wurde für die Emissionsberechnung in einem ersten Schritt der Streckentyp nach HBEFA geändert. Die Verkehrsnachfrage und die Verkehrszustände werden in diesem Schritt noch nicht angepasst.

b) LSA-Emissionsminderung

Bei der Maßnahme der Optimierung der LSA-Steuerung. Die Optimierung der LSA-Steuerung hat primär das Ziel einer Emissionsminderung durch einen Rückgang der Zahl und der Intensität der Halte- und Beschleunigungsvorgänge. Diese Wirkung lässt sich über streckenbezogene HBEFA-Emissionsfaktoren nur bedingt beschreiben, weshalb durch mikroskopische Verkehrsflusssimulation Zu- bzw. Abschläge berechnet wurden, die an den Knotenpunkten aufgrund einer optimierten Steuerung anfallen. Diese Emissionswerte werden in diesem Schritt berücksichtigt, die Verkehrsnachfrage und die Verkehrszustände jedoch noch nicht angepasst.

c) Routenwahleffekte

Bei allen Maßnahmen, die einen Eingriff in das Verkehrsangebot des fließenden Verkehrs darstellen (Regelgeschwindigkeiten, LSA-Optimierung und Pkw-Maut), wurde zunächst die Wirkung auf die Routenwahl ermittelt, um die Verlagerungseffekte getrennt von den Nachfrageeffekten zu prüfen und auszuweisen.

d) Nachfrageeffekte

Bei den Maßnahmen zum Tempolimit auf Autobahnen und im Außerortsbereich wurde das Verkehrsmodell Validate genutzt. Da es sich nicht um ein multimodales Verkehrsnachfragemodell handelt wurden die Nachfrageeffekte hier über einen Elastizitätenansatz abgeschätzt. Bei den Maßnahmen, die mithilfe der regionalen Verkehrsnachfragemodelle untersucht wurden, wurden alle Schritte der Verkehrsnachfragemodellierung neu berechnet (Aktivitäten-, Ziel-, Modus- und Routenwahl). Entsprechend der Umsetzung in den jeweiligen Verkehrsnachfragemodellen wurde dabei die Wirkung der Auslastung auf die Fahrzeiten und damit die Rückkopplung auf die Verkehrsnachfrage berücksichtigt. Bei der Emissionsberechnung wurde in diesem Schritt noch keine Anpassung der Verkehrszustände vorgenommen. Die Maßnahmen „Erhöhung des durchschnittlichen Besetzungsgrades“ und „Reduzierung des Parksuchverkehrs“ stellen dabei Ausnahmen dar. Die Änderungen der Verkehrsnachfrage bzw. der Verkehrsbelastung gehen hier als Setzungen in das Modell ein.

e) Änderung Verkehrszustände

Im letzten Schritt wurden die Änderungen der Verkehrsnachfrage in eine Veränderung der HBEFA-Verkehrszustände übersetzt und damit die auslastungsbedingten Maßnahmenwirkungen auf die Emissionen dargestellt.

Die Bezeichnungen der einzelnen Schritte a) bis e) finden sich auch in den Beschreibungen und Ergebnisdiagrammen zu jeder Maßnahme wieder.

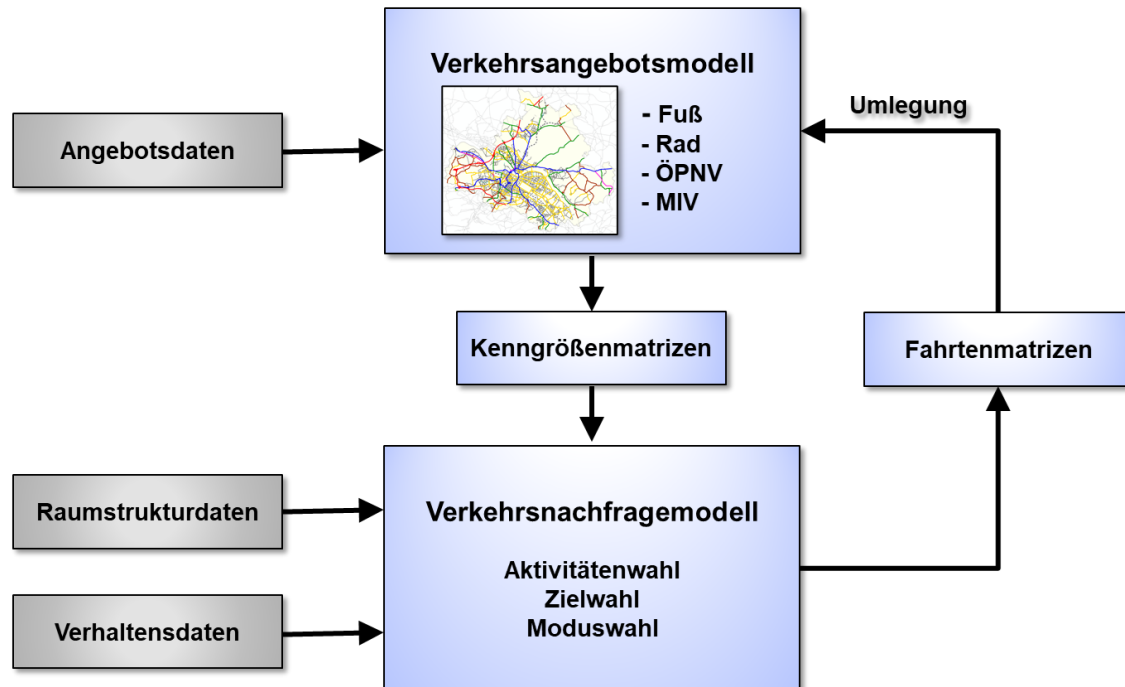
3.3.1.2 Grundlegende Funktionsweise eines Verkehrsnachfragemodells

Personenverkehr ergibt sich aus dem Bedürfnis oder aus der Notwendigkeit der Menschen, an Aktivitäten (zum Beispiel Arbeiten, Bildung, Einkaufen oder Freizeit) teilzunehmen. Ein Verkehrsnachfragemodell ist ein Modell, das diesen Verkehr abbildet, indem es die verkehrlich relevanten Entscheidungen der Bevölkerung in einem definierten Untersuchungsraum rekonstruiert.

Abbildung 45 illustriert die Funktionsweise eines Verkehrsnachfragemodells. Eine Eingangsgröße eines Verkehrsnachfragemodells ist das Verkehrsangebot. Das Verkehrsangebot bildet die Infrastruktur (z.B. Straßen, Knotenpunkte, Schienenstrecken) und betriebliche Belange der einzelnen Verkehrsträger (z.B. Tarifstrukturen, Maut) ab. Um die Interaktion der einzelnen Verkehrsträger möglichst realistisch abzubilden, sind multimodale Modelle, also Modelle, die alle Verkehrsträger berücksichtigen, notwendig. Ist nur ein Verkehrsträger im

Fokus, können auch monomodale Modelle zum Einsatz kommen. Im Verkehrsangebotsmodell werden die Aufwände einer Ortsveränderung durch sogenannte Kenngrößen ausgedrückt. Eine Möglichkeit solche Aufwände für alle Relationen, also von jeder Startverkehrszelle zu jeder Zielverkehrszelle, darzustellen, sind Kenngrößenmatrizen. Diese Kenngrößenmatrizen sind eine grundlegende Eingangsgröße für das Verkehrsnachfragemodell. Weitere Eingangsgrößen sind die Raumstruktur und die Daten zum Verkehrsverhalten im Untersuchungsraum.

Abbildung 45: Funktionsweise eines Verkehrsnachfragemodells



Quelle: eigene Darstellung, PTV Transport Consult GmbH

Das Verkehrsnachfragemodell bildet alle verkehrsrelevanten Entscheidungsprozesse nach, die zu Ortsveränderungen führen. Die Entscheidungen umfassen deshalb zuerst eine Aktivitätenwahl. Anschließend wird die gewählte Aktivität durch eine Zielwahl mit einem Aktivitätenort verknüpft. Entscheidungen zur Verkehrsmittelwahl (Moduswahl) konkretisieren den Ablauf der Ortsveränderung zum Aktivitätenort hinsichtlich des genutzten Verkehrsmittels. Als Ergebnis der Moduswahl ergeben sich Nachfragematrizen (z.B. der Pkw-Fahrten). Diese werden im letzten Modellschritt – der Umlegung – auf das Verkehrsangebot zurückgespielt. Dadurch treten auslastungsabhängige Änderungen in der Angebotsqualität auf, die wiederum die Entscheidungsprozesse Ziel-, Modus- und Routenwahl beeinflussen. Diese Rückkopplung findet so lange statt, bis sich das System aus Angebot und Nachfrage in einem eingeschwungenen Gleichgewicht befindet, d.h. bis eine ausreichende Konvergenz erreicht ist.

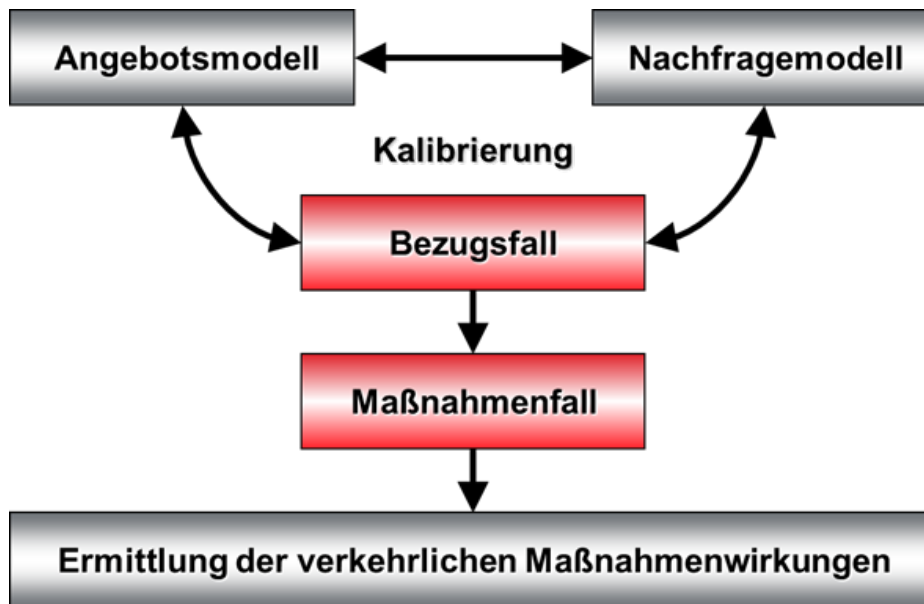
Primäre Ergebnisse von Verkehrsangebots- und Verkehrsnachfragemodell sind:

- ▶ Kenngrößen der Angebotsqualität
- ▶ Kenngrößen der Verkehrsnachfrage (zum Beispiel die Aufteilung der Nachfrage auf die verschiedenen Verkehrsträger (Modal Split))
- ▶ Verkehrsstärken auf Netzelementen und Routen
- ▶ Kenngrößen des Verkehrsaufwands (zum Beispiel Personenkilometer und Fahrzeugkilometer)

Die primären Ergebnisse können als Input für weitere Berechnungen genutzt werden.

Das Zusammenwirken aus Verkehrsangebots- und Verkehrsnachfragemodell wird beim Modellaufbau anhand von Erhebungswerten kalibriert. Der kalibrierte Modellzustand wird als Bezugsfall bezeichnet. Auf diesem Bezugsfall aufbauend können Maßnahmen im Modell implementiert werden. Die Modellzustände, die sich dadurch ergeben, werden Maßnahmenfälle genannt. Aus dem Vergleich von Bezugs- und Maßnahmenfall können die verkehrlichen Wirkungen der Maßnahmen ermittelt werden. Dieser Prozess ist in Abbildung 46 dargestellt.

Abbildung 46: Ermittlung verkehrlicher Maßnahmenwirkungen



Quelle: eigene Darstellung, PTV Transport Consult GmbH

3.3.1.3 Verwendete Verkehrsnachfragemodelle und Untersuchungsräume

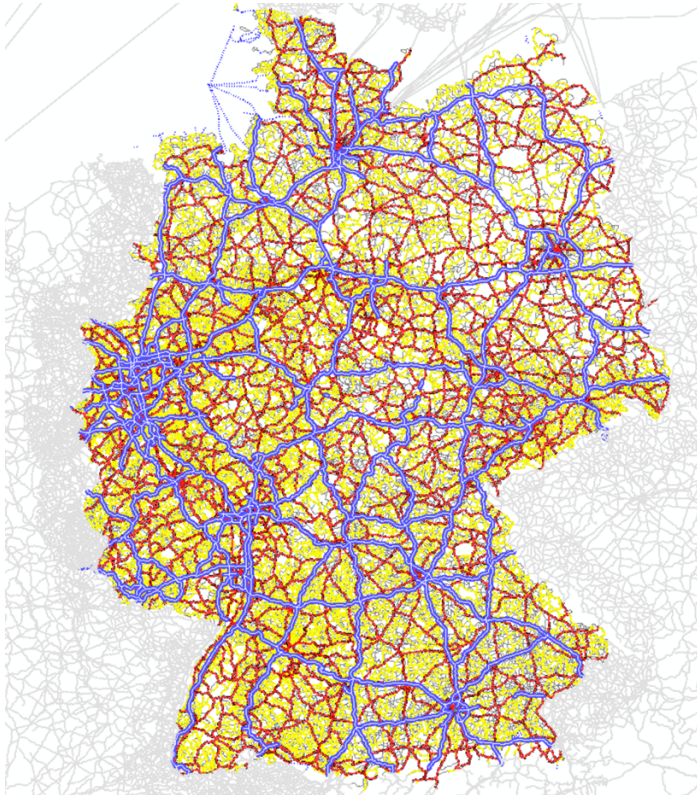
Ziel der vorliegenden Studie ist eine umfassende Bilanzierung der verkehrlichen und emissionsseitigen Wirkungen von Verstetigungsmaßnahmen. Diesbezüglich sollen nicht nur die unmittelbaren Wirkungen der Maßnahmen auf die Routenwahl, sondern auch die Folgewirkungen auf die Verkehrsnachfrage ermittelt werden. Dies erfordert den Einsatz maßnahmensensitiver Verkehrsmodelle, die die Auswirkungen der zu betrachtenden Maßnahmen auf allen Modellebenen quantifizieren können.

Wie im Kapitel 3.3.1.2 bereits dargestellt, wurden im Rahmen der vorliegenden Studie verschiedene Modellgrundlagen genutzt, um die Wirkungen von Verstetigungsmaßnahmen zu bilanzieren. Diese Auswahl der Modelle wurde so getroffen, dass die in den vorliegenden Modellen vorhandenen Eigenschaften und Stärken optimal genutzt werden konnten. Zur Berechnung der Wirkungen von Tempolimits auf Bundesautobahnen und Landesstraßen wurde das deutschlandweite Verkehrsnachfragemodell PTV-Validate genutzt. Für die Quantifizierung der Maßnahmenwirkungen im städtischen und regionalen Kontext standen die Verkehrsmodelle der Städte Stuttgart, Dresden und Magdeburg zur Verfügung. Im Folgenden sind die verwendeten Modellgrundlagen näher beschrieben.

Verkehrsnachfragemodell PTV-Validate

- ▶ Struktur Verkehrsmodell: monomodal (Straßenverkehr)
- ▶ Analysejahr: 2016
- ▶ Verkehrszellen: insgesamt 20.680 Verkehrszellen
- ▶ Planungsraum: Bundesrepublik Deutschland (vgl. Abbildung 47)

Abbildung 47: Räumliche Abgrenzung des Verkehrsnachfragemodells PTV-Validate



Quelle: eigene Darstellung, PTV Transport Consult GmbH

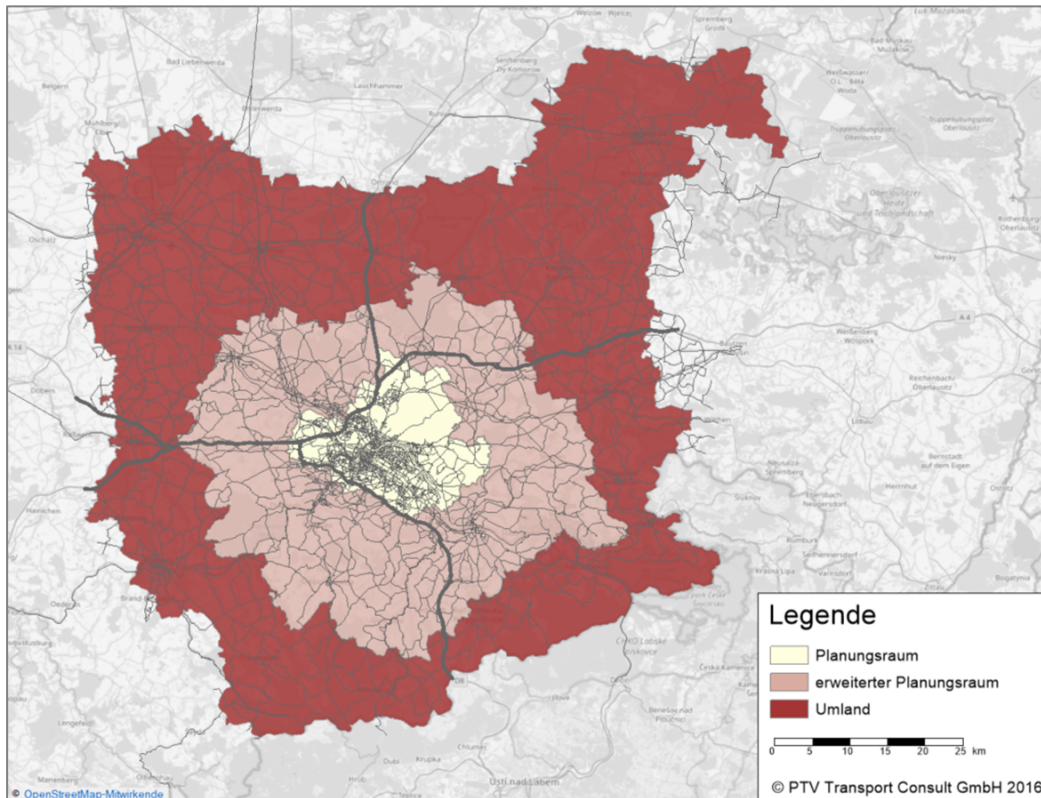
Tabelle 68: Daten zum Planungsraum des Verkehrsnachfragemodells PTV-Validate

| Kenngröße | Modelleigenschaft |
|------------------|--|
| Verkehrszellen | 20.388 |
| Einwohner | ca.82,5 Mio. |
| Straßennetz | ca. 642.000 km modelliert davon ca. 63 % Außerortsstraßen und ca. 37 % Innerortsstraßen |
| Pkw-Fahrleistung | ca. 66 % auf Außerortsstraßen ca. 34 % auf Innerortsstraßen |

Verkehrsnachfragemodell der Region Dresden

- ▶ Struktur Verkehrsmodell: multimodal
- ▶ Analysejahr: 2013
- ▶ Verkehrszellen: insgesamt 949 Verkehrszellen
- ▶ Erweiterter Planungsraum: Stadt Dresden und umliegende Städte und Gemeinden (vgl. Abbildung 48)

Abbildung 48: Räumliche Abgrenzung des Verkehrsnachfragemodells der Region Dresden



Quelle: eigene Darstellung, PTV Transport Consult GmbH

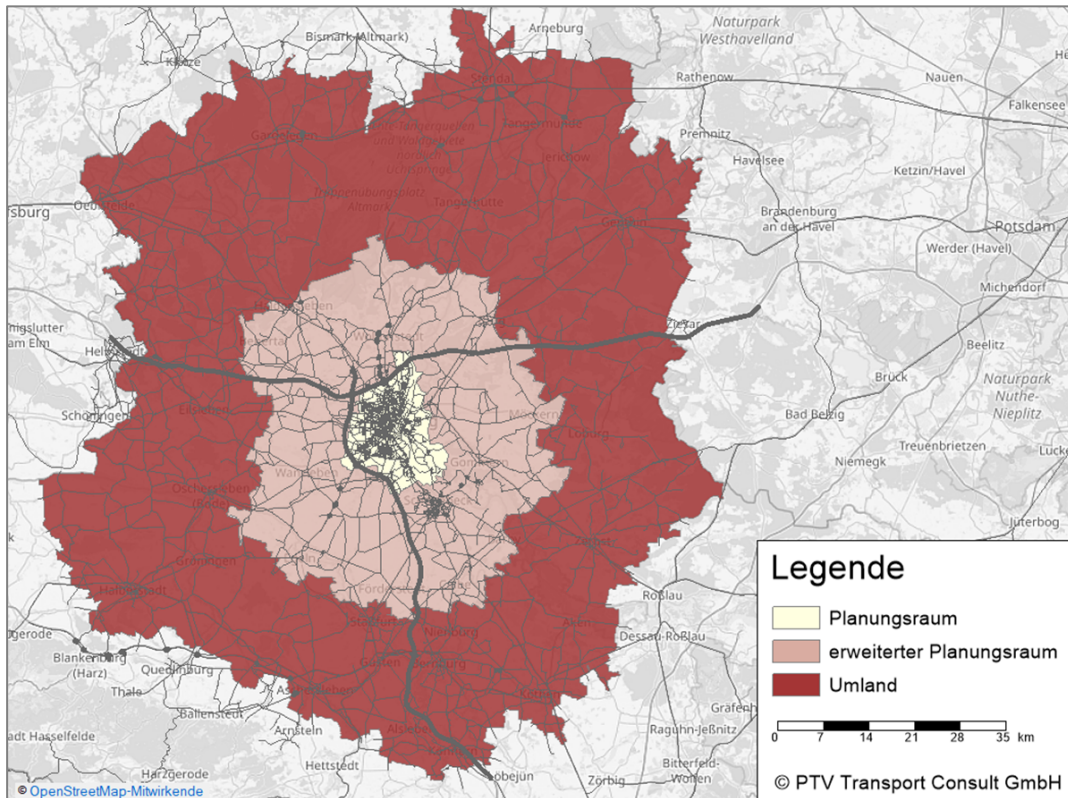
Tabelle 69: Daten zum erweiterten Planungsraum des Verkehrsnachfragemodells der Region Dresden

| Kenngröße | Modelleigenschaft |
|------------------|--|
| Verkehrszellen | 799 |
| Einwohner | ca.908 Tsd. |
| Straßennetz | ca. 6.700 km modelliert davon ca. 47 % Außerortsstraßen und ca. 53 % Innerortsstraßen |
| Pkw-Fahrleistung | ca. 49 % auf Außerortsstraßen ca. 51 % auf Innerortsstraßen |
| Modal Split | Fuß 28,3 % / Rad 9,7 % / ÖV 16,8 % / MIV 45,2 % |

Verkehrsnachfragemodell der Region Magdeburg

- ▶ Struktur Verkehrsmodell: multimodal
- ▶ Analysejahr: 2015
- ▶ Verkehrszellen: insgesamt 750 Verkehrszellen
- ▶ Erweiterter Planungsraum: Stadt Magdeburg und umliegende Städte und Gemeinden (vgl. Abbildung 49)

Abbildung 49: Räumliche Abgrenzung des Verkehrsnachfragemodells der Region Magdeburg



Quelle: eigene Darstellung, PTV Transport Consult GmbH

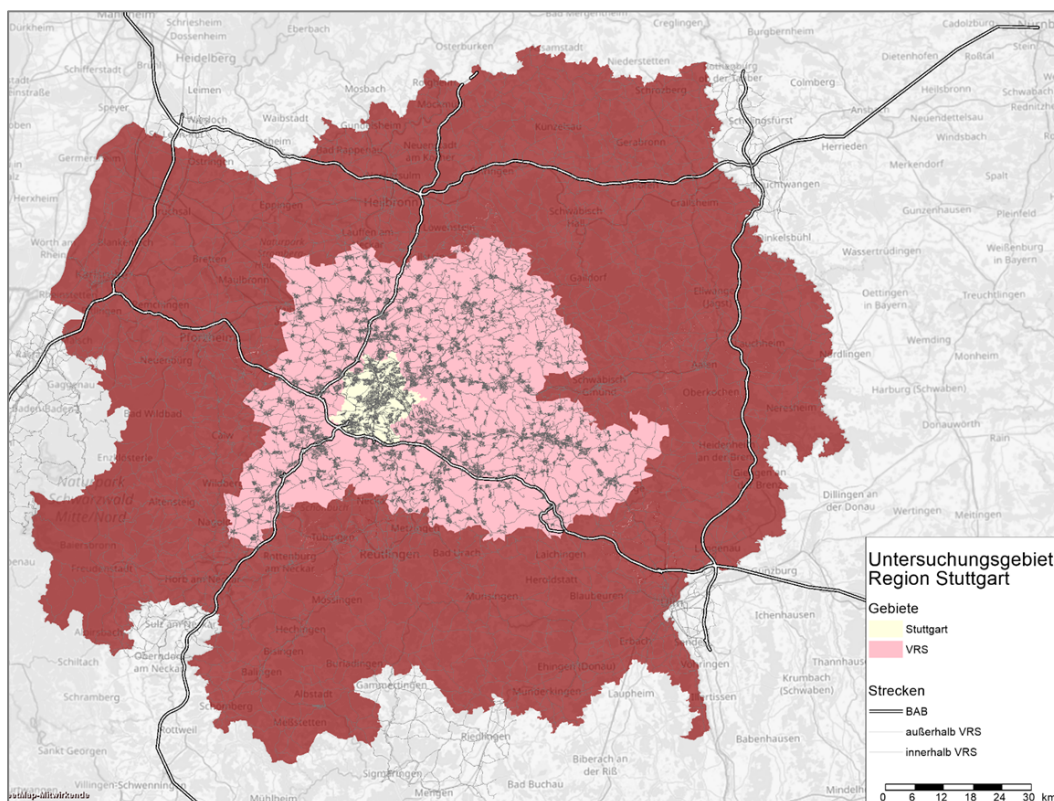
Tabelle 70: Daten zum erweiterten Planungsraum des Verkehrsnachfragemodells der Region Magdeburg

| Kenngröße | Modelleigenschaft |
|------------------|--|
| Verkehrszellen | 503 |
| Einwohner | ca.451 Tsd. |
| Straßennetz | ca. 4.400 km modelliert davon ca. 40 % Außerortsstraßen und ca. 60 % Innerortsstraßen |
| Pkw-Fahrleistung | ca. 61 % auf Außerortsstraßen ca. 39 % auf Innerortsstraßen |
| Modal Split | Fuß 23,6 % / Rad 15,0 % / ÖV 11,0 % / MIV 50,4 % |

Verkehrsnachfragemodell der Region Stuttgart

- ▶ Struktur Verkehrsmodell: multimodal
- ▶ Analysejahr: 2010
- ▶ Verkehrszellen: insgesamt 1.175 Verkehrszellen
- ▶ Planungsraum: Stadt Stuttgart und die Landkreise Ludwigsburg, Böblingen, Esslingen, Göppingen und Rems-Murr (zusammen VRS vgl. Abbildung 50)

Abbildung 50: Räumliche Abgrenzung des Verkehrsnachfragemodells der Region Stuttgart



Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart

Tabelle 71: Daten zum erweiterten Planungsraum des Verkehrsnachfragemodells der Region Magdeburg

| Kenngröße | Modelleigenschaft |
|------------------|---|
| Verkehrszellen | 1.013 |
| Einwohner | ca.3 Mio. |
| Straßennetz | ca. 24.500 km modelliert davon ca. 40 % Außerortsstraßen und ca. 60 % Innerortsstraßen |
| Pkw-Fahrleistung | ca. 74 % auf Außerortsstraßen ca. 26 % auf Innerortsstraßen |
| Modal Split | Fuß 21,4 % / Rad 6,6 % / ÖV 15,4 % / MIV 56,5 % |

3.3.1.4 Wirkungen auf die Verkehrszustände und Emissionsberechnung

Für die Emissionsberechnung werden die Verkehrsstärken aus der Verkehrsnachfragemodellierung mit den HBEFA-Emissionsfaktoren der entsprechenden Verkehrssituationen verrechnet. Dafür wurde die in Kapitel 2.2 beschriebene Zuweisung der HBEFA-Verkehrssituationen genutzt. Diese erfolgte auf Grundlage eines TomTom-Streckennetzes. Für die streckenfeine Bestimmung der Verkehrssituationen wurde FCD verwendet, die für alle Streckenabschnitte der FRC 0 bis 3 in Deutschland und zusätzlich der FRC 4 bis 6 in den Stadtregionen, also den erweiterten Planungsräumen der verwendeten regionalen Verkehrsnachfragemodelle (siehe Kapitel 3.3.1.3), vorlag. Für die Emissionsberechnung muss aus diesem Grund zwischen zwei Maßnahmentypen unterschieden werden.

Die beiden Maßnahmen „Allgemeines Tempolimit auf Autobahnen von 120 km/h“ und „Allgemeines Tempolimit auf Autobahnen von 120 km/h und im Außerortsbereich von 80 km/h“ wurden für das gesamte deutsche Streckennetz berechnet. Die Änderungsraten beziehen sich immer auf den gesamten Straßenverkehr in Deutschland, d.h. es wurde eine Hochrechnung der Ergebnisse entsprechend der Hochrechnungsmethodik zur Bestimmung der Fahrleistungsanteile der HBEFA-Verkehrssituationen (siehe Kapitel 2.2) durchgeführt.

Die weiteren Maßnahmen wurden ausschließlich für eine oder mehrere Stadtregionen berechnet. Die Grundgesamtheit stellte dabei der Verkehr im Streckennetz der FRC 0 bis 6 dar und beschränkte sich weiterhin auf die Fahrzeugkategorien Pkw, LNF und SNF. Dies ist damit begründet, dass die Verkehrsnachfragemodelle für Straßen der FRC 7 (Erschließungsstraßen) sowie für die weiteren Fahrzeugkategorien (Rbus, Lbus und KR/MR) keine aussagekräftigen Daten liefern.

Für die Berechnung wurden die Informationen über die HBEFA-Verkehrssituationen aus dem TomTom-Netz auf die Strecken der Verkehrsnachfragemodelle übertragen. In den Bezugsfällen wurden die Aufteilungen der Verkehrszustände innerhalb eines jeden Streckenabschnitts des TomTom-Netzes aus den in Kapitel 2.2.4 dargestellten Berechnungen festgehalten. Ziel war es, diese auf FCD beruhenden Verkehrszustände in den Maßnahmenfällen aufgrund der veränderten Verkehrsstärken und der damit einhergehenden Änderungen der Auslastungszustände aus den Verkehrsnachfragemodellen anzupassen. Die Methodik ist in Abbildung 51 dargestellt.

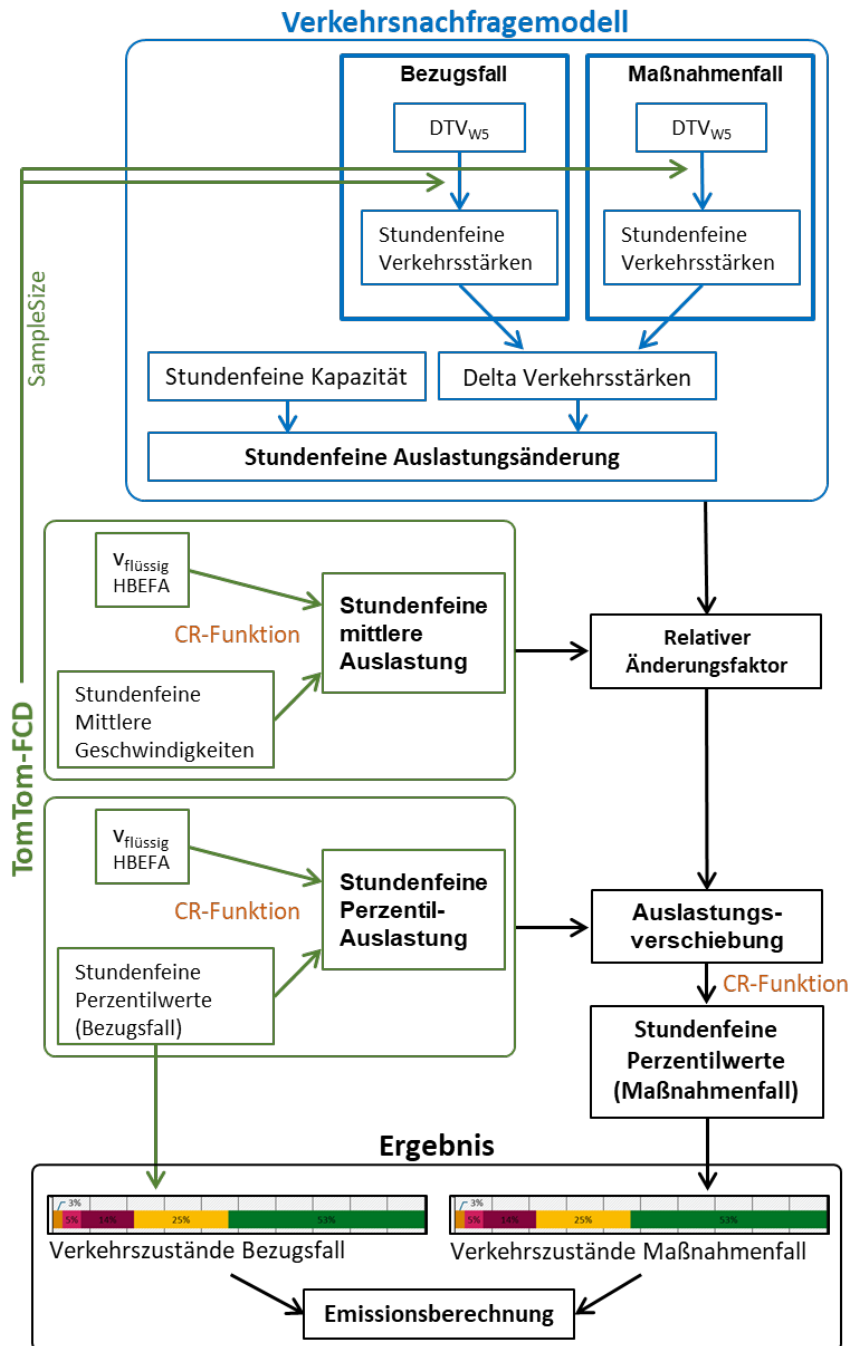
Die Verkehrsnachfragemodelle liefern Tageswerte für Verkehrsstärken. Diese Werte wurden auf Grundlage der FCD auf Stundenwerte umgerechnet. Stundenwerte bzw. stundenfeine Werte bedeuten ebenso wie in Abbildung 51 im Folgenden die Unterteilung in 72 Einzelwerte, nämlich 24 Stundenwerte für drei Tagestypen analog zur zeitlichen Auflösung der FCD. Dieser Schritt wurde für den Bezugsfall und den Maßnahmenfall durchgeführt, womit unter Zuhilfenahme von Stundenkapazitäten die Änderung des Auslastungsgrads berechnet werden konnte.

In einem darauffolgenden Schritt wurde die mittlere stundenfeine Auslastung für den Bezugsfall anhand der FCD berechnet. Dieser Wert stellt die Bezugsgröße für die relative Änderung der Auslastung dar. Als Grundlage wurde die Fahrtzeitänderung bzw. der Geschwindigkeitsverlust zwischen den Mittelwerten der Geschwindigkeiten der FCD und der mittleren Geschwindigkeit im unbelasteten Netz (mittlere Geschwindigkeit nach HBEFA für den Verkehrszustand flüssig) genutzt. Die Auslastung wurde über die Umkehrfunktion der streckentypabhängigen, aus den Verkehrsnachfragemodellen stammenden CR-Funktion berechnet.

Dieser Schritt wurde für die Perzentilwerte der Geschwindigkeiten (5 %-Perzentile, also 20 stundenfeine Werte) wiederholt. Die relative Änderung der Auslastung wurde dann auf jede der perzentilbezogenen Auslastungen angewandt (Auslastungsverschiebung). Auf die neuen

Auslastungswerte wurde die CR-Funktion in ihrer ursprünglichen Wirkrichtung angewandt. Als Ergebnis liefert dieser Rechenschritt die Geschwindigkeitsperzentile im Maßnahmenfall. Aus diesen Werten wurde analog zum Bezugsfall nach der in Kapitel 2.2.4 beschriebenen Methodik die Aufteilung der Fahrleistung auf die HBEFA-Verkehrszustände durchgeführt.

Abbildung 51: Methodik zur Änderung der Verkehrszustände auf Grundlage von FCD



Stundenfein bedeutet eine zeitliche Auflösung entsprechend der FCD (24h-Werte für drei Wochentagstypen).

Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart

Sowohl die in Kapitel 3.3 und Anhang A.6 dargestellten Maßnahmenwirkungen auf die Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen, als auch die Wirkungen auf die Fahrzeiten und die daraus berechneten mittleren Geschwindigkeiten basieren auf den Änderungen der zugewiesenen HBEFA-Verkehrssituationen.

3.3.2 Allgemeines Tempolimit auf Autobahnen von 120 km/h

3.3.2.1 Maßnahmenausgestaltung

Gegenstand der Maßnahme ist die Betrachtung einer flächendeckenden Herabsetzung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit auf allen Bundesautobahnen sowie auf autobahnähnlich ausgebauten Straßen (Kraftfahrstraßen) in Deutschland.

3.3.2.2 Modelltechnische Umsetzung

Für die Bilanzierung dieser Maßnahme wurde das deutschlandweite Verkehrsmodell PTV-Validate eingesetzt. In PTV-Validate ist das vorhandene Straßennetz abgebildet. Grundlage für die Angebotsmodellierung sind Netzdaten, welche auch für Navigationssysteme genutzt werden. Die Daten besitzen eine hohe Qualität und Aktualität und bilden die Strecken des Netzes mit ihren unterschiedlichen Kapazitäten und Geschwindigkeiten ab. Anhand der Typisierung und Parametrisierung des Netzmodells können die relevanten Strecken mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von über 120 km/h selektiert werden. Entsprechend der Maßnahmendefinition wurde die zulässige Höchstgeschwindigkeit für die so ermittelten Strecken auf 120 km/h reduziert. Bei der Verkehrsnachfrageberechnung wird (anders als bei der finalen Ermittlung der Netzgeschwindigkeiten, siehe dazu Kapitel 3.3.1.4) im Maßnahmenfall unterstellt, dass es keine systematischen Überschreitungen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit gibt und sich die Verkehrsteilnehmer StVO-konform verhalten.

Die Quantifizierung der Maßnahmenwirkungen erfolgte in zwei Schritten. Im ersten Schritt wurden die Routenwahleffekte berechnet. Dazu wurde die Verkehrsnachfrage des Bezugsfalls auf das angepasste Netzmodell umgelegt, um die Verkehrsstärken aufgrund der geänderten Routenwahl neu zu berechnen. Im zweiten Schritt wurde betrachtet, welche Änderungen der Verkehrsnachfrage durch die geänderten Reisezeiten eintreten. Dazu wurde ein Elastizitätenmodell aufgesetzt, welches ausgehend von den Reisezeitänderungen zwischen Bezugsfall und Maßnahmenfall die modalen Verlagerungen berechnet. Das Elastizitätenmodell bestimmt aus den Änderungen der Pkw-Reisezeit für jede Relation eine neue Pkw-Nachfrage. Es basiert auf den Annahmen, dass Reisezeitveränderungen einen Effekt auf die Pkw-Nachfrage haben und dass dieser Effekt bei kurzen Fahrten stärker ausgeprägt ist als bei langen Fahrten. Dies resultiert in einer halbglöckenförmigen Elastizitätsfunktion. Zur Schätzung der Funktionsparameter wurden Literaturwerte von Axhausen et al. (2015) und Litman (2022) herangezogen. Hierbei wird allerdings das Verkehrsangebot (Reisezeit, Preis, Bequemlichkeit etc.) der anderen Verkehrsträger vernachlässigt. Die so angepasste Verkehrsnachfragematrix für den Maßnahmenfall wurde erneut auf das Netzmodell des Maßnahmenfalls umgelegt. Als Ergebnis der Verkehrsumlegung liegen die Verkehrsstärken vor, welche sich unter Berücksichtigung der Routenwahl- und Nachfrageeffekte ergeben.

Auf eine Berechnung der Änderungen der HBEFA-Verkehrszustände infolge einer veränderten Auslastung wurde bei dieser Maßnahme verzichtet, da die Bedeutung für die Emissionen als vernachlässigbar gering eingeschätzt wird. Dafür sprechen zwei Gründe. Zum einen führt ein besserer Verkehrszustand in Abhängigkeit der zulässigen Höchstgeschwindigkeit nicht unbedingt zu einer Minderung der Emissionsfaktoren. Damit werden sich die Effekte bei dieser Maßnahme für unterschiedliche Streckentypen gegenseitig zu einem gewissen Teil aufheben. Zum anderen zeigen die Maßnahmen, die zu einem sehr starken Rückgang der Fahrleistung führen (Besetzungsgrad bzw. Pkw-Maut, vgl. Kapitel 3.3.5 bzw. Kapitel 3.3.7), dass die Effekte im Vergleich zur direkten Wirkung der Fahrleistungsminderung gering sind.

Den Bezugsfall stellen die nach der in Kapitel 2.2.3 beschriebenen Methodik hochgerechneten Fahrleistungen dar. In den jeweiligen Maßnahmenfällen mit veränderter Verkehrsnachfrage

wurden die veränderten Verkehrsstärken aus PTV-Validate für die Fahrzeugkategorien „Pkw“, „SNF“ und „LNF“ für alle Strecken, für die sowohl Verkehrsstärken aus PTV-Validate, als auch Verkehrszustände, abgeleitet aus den TomTom-FCD vorlagen, übernommen. Für weitere Strecken sowie die verbleibenden Fahrzeugkategorien „Rbus“, „Lbus“ und „KR/MR“ wurden die Fahrleistungen nicht angepasst.

Berücksichtigung des Effekts von Geschwindigkeitswechselln

Das Handbuch für Emissionsfaktoren (HBEFA) liefert spezifische Emissionsfaktoren je Fahrzeugkilometer, die sich nach Verkehrssituationen unterscheiden (siehe Kapitel 2.1). Um die Gesamtemissionen eines Fahrzeugs auf einer bestimmten Strecke zu erhalten, wird diese in Teilstrecken mit unterschiedlichen Verkehrssituationen unterteilt. Die Übergänge zwischen den einzelnen Verkehrssituationen spielen dabei keine Rolle. Innerhalb einer Verkehrssituation wird im HBEFA jedoch in vereinfachter Form die Dynamik von typischen Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgängen berücksichtigt.

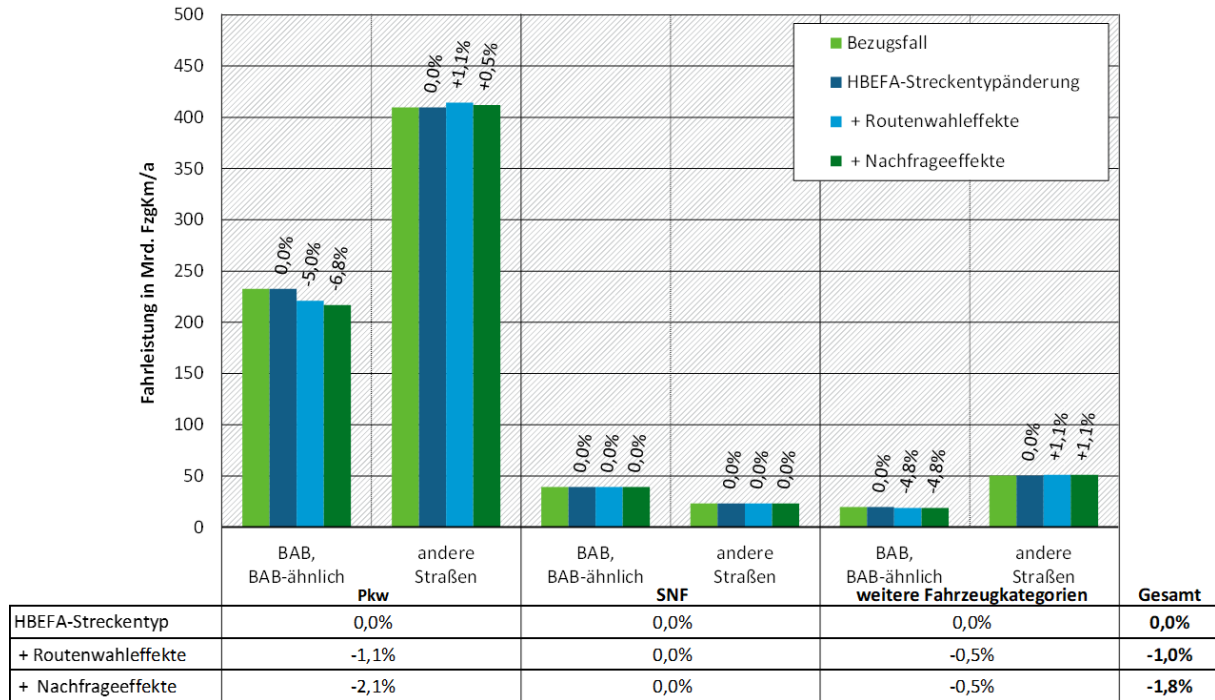
Die Bedeutung der Vereinfachung der abschnittswelsen Zuordnung der Verkehrssituationen bei der Wirkungsberechnung einer reduzierten zulässigen Höchstgeschwindigkeit lässt sich an einem einfachen Beispiel erläutern. Beim Vergleich zweier Strecken des deutschen Autobahnnetzes, auf denen in Summe die gleichen Streckenanteile mit einer Geschwindigkeitsbeschränkung auf 120 km/h bzw. ohne Tempolimit vorliegen, ergeben sich nach dem HBEFA aufgrund der im Modell notwendigen Annahmen und Vereinfachungen bei gleicher Verkehrsnachfrage die gleichen Gesamtemissionen. Dies gilt auch, wenn auf einer der beiden Strecken die zulässige Höchstgeschwindigkeit sehr häufig wechselt, während bei der anderen nur ein Geschwindigkeitsübergang stattfindet. In der Realität entstehen bei einer Fahrt mit häufigen Beschleunigungsvorgängen aber erhöhte Emissionen. Bei einer Reduzierung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit wird das Geschwindigkeitsniveau zwischen Streckenabschnitten mit unterschiedlichen zulässigen Höchstgeschwindigkeiten angeglichen. Die daraus resultierenden Effekte auf die Emissionen können mit dem HBEFA nicht abgebildet werden.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurde die Stärke des eben beschriebenen Effekts überschlägig für ein Tempolimit auf Autobahnen von 120 km/h abgeschätzt. Dafür wurden für die beiden am häufigsten auftretenden Geschwindigkeitswechsel auf Autobahnen, nämlich 100 km/h bzw. 130 km/h auf freie Geschwindigkeitswahl mikroskopisch der Verkehrsfluss simuliert, untersucht wurde jeweils ausschließlich dichter bzw. flüssiger Verkehr. Daraus wurden mittlere Mehremissionen je Pkw-Überfahrt bei einem solche Geschwindigkeitswechsel abgeleitet (z.B. 100 km/h auf freie Geschwindigkeit bei flüssigem Verkehr: Pro Pkw im Mittel 172 g CO₂ und 0,75 g NO_x). Diese Werte wurden mit den aus den in Kapitel 2.2 ermittelten Belastungen verrechnet. Für die analysierten Fälle ergaben sich Werte von 0,27 Mio. t CO₂ und rund 1.900 t NO_x pro Jahr. Mit Blick auf die Gesamtemissionen ist der Effekt von untergeordneter Bedeutung. Für die Maßnahmenwirkung kann die Größenordnung jedoch als relevant eingestuft werden. Da in der vorgenommenen Abschätzung nur ein Teil der in Realität auftretenden Geschwindigkeitswechsel berücksichtigt wurden, könnte der Aspekt überschlägig eine Erhöhung der Maßnahmenwirkung um 5 % bis 10 % bedeuten. Da es sich ausschließlich um eine überschlägige Abschätzung handelt, wurde dieser Aspekt bei der Quantifizierung der Maßnahmenwirkungen in diesem Forschungsvorhaben generell nicht berücksichtigt.

3.3.2.3 Verkehrliche Wirkungen und Schadstoffbilanzierung

Abbildung 52 und Abbildung 53 zeigen die Maßnahmenwirkungen auf die Fahrleistungen bzw. die CO₂-Emissionen. Die Wirkungen auf die mittleren Fahrzeuggeschwindigkeiten und auf die Schadstoffe PM und NO_x werden im Anhang (A.6.1) in analoger Form abgebildet.

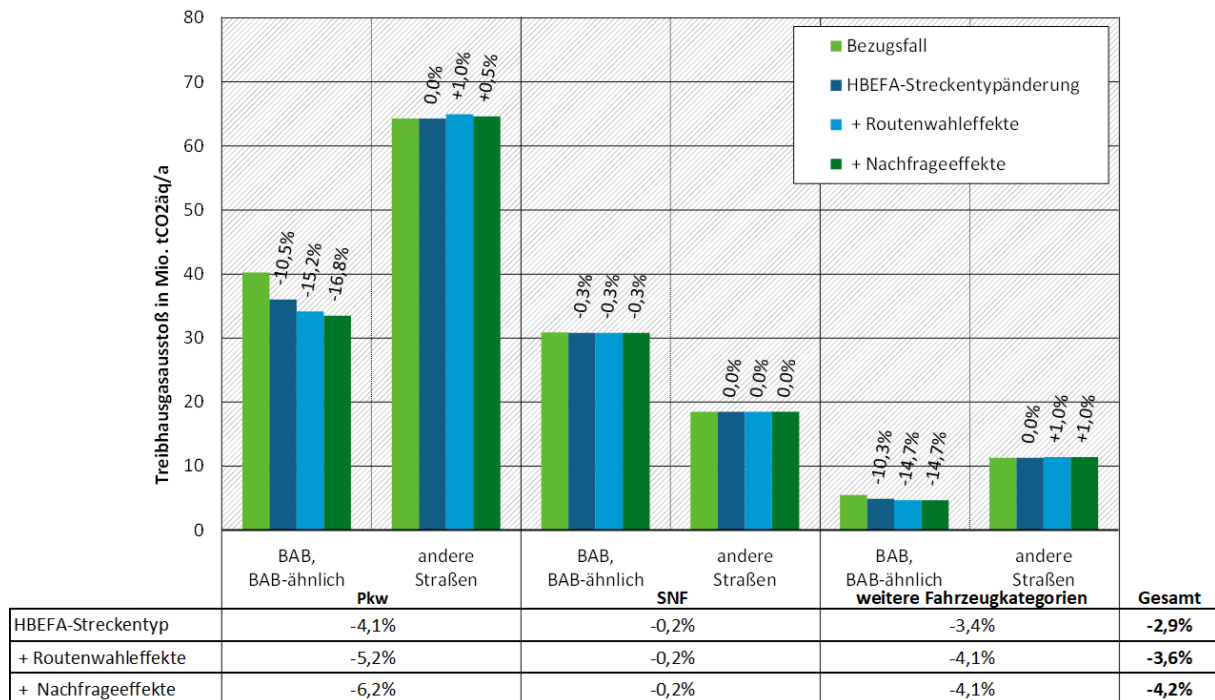
Abbildung 52: Wirkung der Maßnahme „Allgemeines Tempolimit auf Autobahnen von 120 km/h“ auf die Fahrleistung



Unter „weitere Fahrzeugkategorien“ sind alle weiteren HBEFA-Fahrzeugkategorien (LNF, Lbus, Rbus und KR/MR) zusammengefasst.

Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart

Abbildung 53: Wirkung der Maßnahme „Allgemeines Tempolimit auf Autobahnen von 120 km/h“ auf den Treibhausgasausstoß



Unter „weitere Fahrzeugkategorien“ sind alle weiteren HBEFA-Fahrzeugkategorien (LNF, Lbus, Rbus und KR/MR) zusammengefasst.

Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart

Im Folgenden wird auf die einzelnen Wirkungsaspekte eingegangen:

► **HBEFA-Streckentypänderung**

Wie in Kapitel 3.3.1.1 erläutert, ergeben sich durch die Änderung des HBEFA-Streckentyps keine Änderungen an der Fahrleistung. Die spezifischen Emissionsfaktoren verändern sich aufgrund der Änderung der Streckentypen. Alle Strecken mit Tempolimit 130 km/h oder >130 km/h werden auf das Tempolimit 120 km/h herabgesetzt. Die Emissionsfaktoren bei 120 km/h sind geringer als bei 130 km/h oder >130 km/h, womit dieser Wirkungsaspekt der Maßnahme zu einer Reduzierung der gesamten straßenverkehrsbedingten CO₂-Emissionen in Deutschland um 2,9 % (4,1 % des Pkw-Verkehrs) führt. Das durch den Geschwindigkeitseffekt bedingte Einsparpotential liegt damit höher als in vergleichbaren Studien angenommen (siehe untenstehende Infobox) Bezogen auf den Pkw-Verkehr auf Autobahnen ergibt sich ein Rückgang der CO₂-Emissionen um 10,5 %. In Abbildung 53 ist ersichtlich, dass auch bei SNF eine geringfügige Reduzierung der CO₂-Emissionen um 0,3 % berechnet wurde. Dies liegt ebenfalls an den spezifischen Emissionsfaktoren, die, obwohl die zulässige Höchstgeschwindigkeit für SNF sowohl im Bezugs- als auch im Maßnahmenfall bei 80 km/h liegt, im flüssigen Verkehr auf Autobahnen bei Strecken ohne Tempolimit minimal höher sind als bei einem Tempolimit von 120 km/h.

► **Routenwahleffekte**

Es entsteht eine Verlagerung ins untergeordnete Netz, da durch die Reduzierung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit die Autobahn an Schnelligkeit und somit an Attraktivität verliert. Es wird direkter gefahren, da die Nutzung der Autobahn meist mit längeren Umwegen verbunden ist. Die gesamte Fahrleistung über alle Streckentypen und

Fahrzeugkategorien nimmt um 1,0 % ab. Die Abnahme findet vor allem auf Autobahnen statt, auf anderen Straßen nimmt die Fahrleistung von Pkw und LNF um 1,1 % zu. SNF sind von diesem Maßnahmenaspekt nicht betroffen, die Autobahn verliert für sie nicht an Attraktivität. Die zusätzliche Reduzierung der Emissionen gegenüber dem Fall „HBEFA-Streckentypänderung“ kommt hier direkt aus dem Fahrleistungsrückgang. In Summe der Streckentypänderung und der Routenwähländerung gehen die CO₂-Emissionen um 3,7 % (5,2 % beim Pkw-Verkehr) zurück.

► **Nachfrageeffekte**

Zusätzlich zur Verschiebung ins untergeordnete Netz entsteht eine geringe Veränderung des Modal Splits auf Kosten des MIV, was die Fahrleistung zusätzlich reduziert. Die gesamte Reduzierung der Fahrleistung auf allen Streckentypen beträgt 1,8 % (2,1 % beim Pkw-Verkehr). Wie schon bei der Routenwahl hat dieser Wirkungsaspekt für SNF keine Bedeutung. Auf anderen Straßen als Autobahnen überwiegt jedoch der Routenwahleffekt – trotz der Nachfrageeffekte verbleibt hier eine Zunahme des Pkw-Verkehrs um 0,5 %. In vielen Fällen werden diese Verlagerungen in das untergeordnete Netz und damit in sensiblere Gebiete als unerwünscht angesehen werden. Solche Mehrbelastungen sollten überprüft und ggf. lokal Gegenmaßnahmen bzw. generelle netzgestalterische Maßnahmen (wie ein zusätzliches Herabsetzen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit im Außerortsbereich, vgl. Kapitel 3.3.3) ergriffen werden. Entsprechend der Änderung der Fahrleistung verändern sich die Emissionen aufgrund dieses Wirkungsaspekts.

In Tabelle 72 sind die Ergebnisse der Wirkungsberechnung unter Berücksichtigung aller Wirkungsaspekte zusammengefasst.

Tabelle 72: Zusammenfassung Wirkungen der Maßnahme „Allgemeines Tempolimit auf Autobahnen von 120 km/h“

| Kenngroße | Pkw | SNF | Weitere FzKat | Alle FzKat |
|--|----------------|---------------|---------------|---------------|
| Fahrleistung | -2,1 % | 0,0 % | -0,5 % | -1,8 % |
| flüssig | +0,7 % | +0,1 % | +0,6 % | +0,6 % |
| dicht | -0,3 % | 0,0 % | -0,3 % | -0,3 % |
| gesättigt | -1,7 % | -0,2 % | -1,1 % | -1,4 % |
| Stop&Go | +0,6 % | 0,0 % | +0,7 % | +0,6 % |
| Stop&Go II | +2,1 % | +0,1 % | +1,3 % | +1,9 % |
| Fahrtzeit | +1,0 % | +0,5 % | +1,4 % | +1,0 % |
| Geschwindigkeit | -3,1 % | -0,5 % | -1,9 % | -2,8 % |
| Fahrzeit in Stop&Go-Verkehrszuständen | -0,6 % | 0,0 % | -3,4 % | -0,4 % |
| Anteil an Gesamtfahrtzeit | -1,6 % | -0,5 % | -4,7 % | -1,4 % |
| CO₂-Emissionen | -6,2 % | -0,2 % | -4,1 % | -4,2 % |
| je Fahrzeugkilometer | -4,1 % | -0,2 % | -3,6 % | -3,8 % |
| NO_x-Emissionen | -13,5 % | +0,4 % | -8,0 % | -9,6 % |
| je Fahrzeugkilometer | -11,7 % | +0,4 % | -7,5 % | -10,3 % |
| PM-Emissionen | -12,8 % | +0,1 % | -4,0 % | -6,6 % |
| je Fahrzeugkilometer | -10,9 % | +0,1 % | -3,5 % | -9,3 % |

Unter „weitere FzKat“ sind alle weiteren HBEFA-Fahrzeugkategorien (LNF, Lbus, Rbus und KR/MR) zusammengefasst.

In Summe wird die Fahrleistung im gesamten Netz um ca. 1,8 % reduziert. Die CO₂-Emissionen nehmen um ca. 4,2 % ab, die NO_x- und PM-Emissionen mit -9,6 % bzw. -6,6 % sogar noch

deutlicher. Diese Rückgänge finden jedoch hauptsächlich an den direkt von der Maßnahme betroffenen Autobahnabschnitten statt. Aufgrund von Verkehrsverlagerungen kann es lokal auch in sensiblen Gebieten zu Mehrbelastungen kommen. Den positiven Effekten im Bereich des Klimaschutzes und der Luftreinhaltung steht eine Fahrzeiterhöhung von rund 1 % bezogen auf den gesamten Verkehr im deutschen Straßennetz gegenüber.

Einordnung der Ergebnisse zur CO₂-Minderung

In der UBA-Studie „Klimaschutz durch Tempolimit“ (Lange et al. 2020) wurde ebenfalls ein generelles Tempolimit von 120 km/h auf Autobahnen untersucht. Das Ergebnis: Ein Minderungspotential von 2,6 Mio. t CO₂ jährlich. Im Vergleich dazu ist das in der vorliegenden Studie berechnete Einsparpotential von 4,2 % der Emissionen des Straßenverkehrs deutlich höher. Die prozentuale Einsparung entspricht etwa einem Rückgang von 6,7 Mio. t CO₂ pro Jahr bezogen auf den Ausgangswert der UBA-Studie aus dem Jahr 2020 (157,7 Mio. t CO₂ im Jahr 2018).

Der erste, offensichtliche Grund für den Unterschied ist die Berücksichtigung der Routenwahl- und Nachfrageeffekte in der vorliegenden Studie, auf die rund ein Drittel des Einsparpotentials zurückzuführen ist. Dennoch verbleibt ein Unterschied von rund 2,1 Mio. t CO₂ bei einer Gegenüberstellung der Emissionsminderungen durch das veränderte Fahrverhalten bei Pkw und LNF (die bereits benannten 2,6 Mio. t CO₂ pro Jahr nach Lange et al. (2020) gegenüber 4,7 Mio. t CO₂ pro Jahr in der vorliegenden Studie). Der Unterschied ist primär in der Methodik der Herleitung der Emissionsfaktoren begründet. Nach der bei Lange et. al (2020) verwendeten Methodik ergeben sich für Strecken ohne Tempolimit niedrigere, im Maßnahmenfall bei einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 120 km/h jedoch höhere Emissionsfaktoren, als die im Rahmen der vorliegenden Arbeit angesetzten HBEFA-Werte.

3.3.3 Allgemeines Tempolimit auf Autobahnen von 120 km/h und im Außerortsbereich von 80 km/h

3.3.3.1 Maßnahmenausgestaltung

Diese Maßnahme baut auf der Maßnahme „Allgemeines Tempolimit auf Autobahnen von 120 km/h“ auf. Zusätzlich zu den bereits in dieser Maßnahme berücksichtigten Tempolimits auf Bundesautobahnen und autobahnähnlich ausgebauten Straßen (Kraftfahrstraßen) wird hier auf allen übrigen Außerortsstraßen ein Tempolimit von maximal 80 km/h eingeführt.

3.3.3.2 Modelltechnische Umsetzung

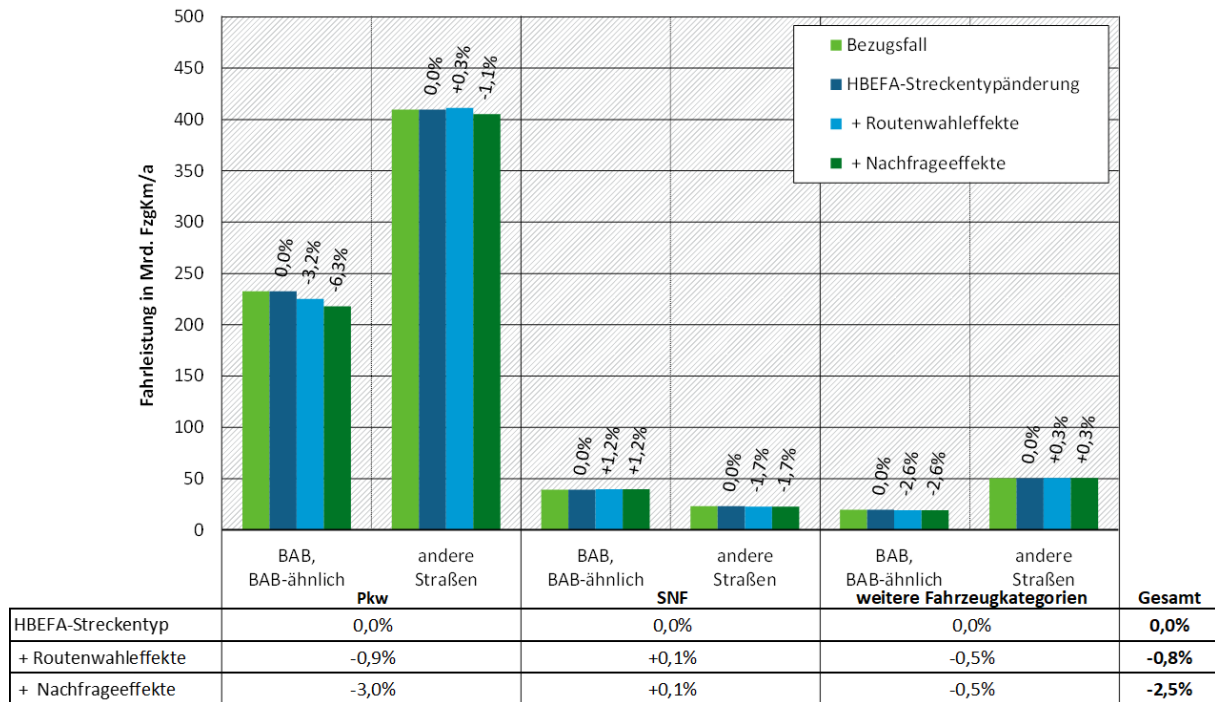
Die Vorgehensweise der Modellierung folgt dem in Kapitel 3.3.2.2 beschriebenen Vorgehen. Zunächst wurden jene Strecken selektiert und angepasst, deren zulässige Höchstgeschwindigkeit auf 120 km/h bzw. 80 km/h zu begrenzen ist. Auch hier wird bei der Verkehrsnachfrageberechnung im Maßnahmenfall unterstellt, dass es keine systematischen Überschreitungen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit gibt und sich die Verkehrsteilnehmer StVO-konform verhalten.

Entsprechend werden in einem ersten Schritt die Verkehrsbelastungen unter Berücksichtigung der Routenwahleffekte berechnet, in dem die Verkehrsnachfrage des Bezugsfalls auf das Netzmodell des Maßnahmenfalls umgelegt wird. Daran anschließend werden in einem zweiten Schritt die aus der geänderten Reisezeit resultierenden modalen Verlagerungen ermittelt und die Verkehrsstärken unter Beachtung der Routenwahl- und Nachfrageeffekte neu berechnet.

3.3.3.3 Verkehrliche Wirkungen und Schadstoffbilanzierung

Abbildung 54 und Abbildung 55 zeigen die Maßnahmenwirkungen auf die Fahrleistungen bzw. die CO₂-Emissionen. Die Wirkungen auf die mittleren Fahrzeuggeschwindigkeiten und auf die Schadstoffe PM und NO_x werden im Anhang (A.6.2) in analoger Form abgebildet.

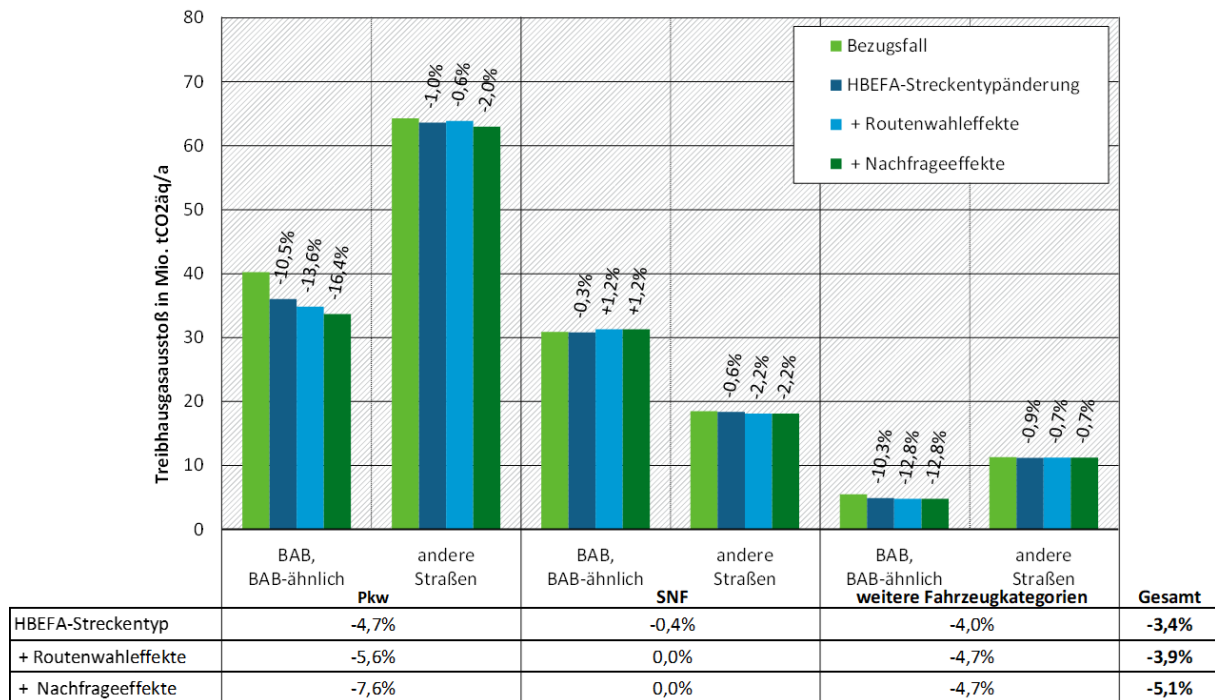
Abbildung 54: Wirkung der Maßnahme „Allgemeines Tempolimit auf Autobahnen von 120 km/h und im Außerortsbereich von 80 km/h“ auf die Fahrleistung



Unter „weitere Fahrzeugkategorien“ sind alle weiteren HBEFA-Fahrzeugkategorien (LNF, Lbus, Rbus und KR/MR) zusammengefasst.

Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart

Abbildung 55: Wirkung der Maßnahme „Allgemeines Tempolimit auf Autobahnen von 120 km/h und im Außerortsbereich von 80 km/h“ auf den Treibhausgasausstoß



Unter „weitere Fahrzeugkategorien“ sind alle weiteren HBEFA-Fahrzeugkategorien (LNF, Lbus, Rbus und KR/MR) zusammengefasst.

Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart

Im Folgenden wird auf die einzelnen Wirkungsaspekte eingegangen:

► **HBEFA-Streckentypänderung**

In diesem Schritt ergeben sich keine Änderungen der Fahrleistung. Die Emissionsminderung auf Autobahnen und autobahn-ähnlichen Strecken ist identisch mit den Ergebnissen der vorherigen Maßnahme (Pkw -10,5 %). Zusätzlich dazu reduzieren sich die CO₂-Emissionen aufgrund des Tempolimits außerorts von 80 km/h, nämlich für den Pkw-Verkehr um 1,0 %. Hier fällt der Effekt also deutlich geringer aus als auf der Autobahn. Bei SNF tritt – wie bereits bei der vorherigen Maßnahme beschrieben – eine Minderung der CO₂-Emissionen auf der Autobahn von 0,3 % auf. Zusätzlich gehen die CO₂-Emissionen von SNF auf anderen Straßen aufgrund des Tempolimits außerorts um 0,6 % zurück, da auch hier unterschiedliche spezifische Emissionsfaktoren vorliegen. In Summe über alle Straßen und Fahrzeugkategorien entsteht ein Rückgang der CO₂-Emissionen aufgrund der HBEFA-Streckentypänderung von 3,4 % (Pkw 4,7 %).

► **Routenwahleffekte**

Der Effekt der Routenwahl ist schwächer als bei einer Anpassung des Tempolimits ausschließlich auf Autobahnen. Bei dieser Maßnahme sind auch viele der potentiellen Ausweichstrecken des Autobahn-Verkehrs betroffen. Da hier ebenfalls eine reduzierte zulässige Höchstgeschwindigkeit vorliegt, wird häufiger die ursprüngliche Routenwahl über die Autobahn beibehalten. Der Effekt der Verlagerung ins untergeordnete Netz ist zwar immer noch vorhanden, allerdings ist er nur noch sehr gering ausgeprägt (0,3 % mehr Fahrleistung auf „andere Straßen“ im Vergleich zu 1,0 % bei einem ausschließlichen Tempolimit auf Autobahnen, siehe Kapitel 3.3.2). Von der Geschwindigkeitsreduzierung außerorts auf 80 km/h sind auch SNF betroffen, die im Ist-Zustand häufig höhere

Geschwindigkeiten fahren, was im Bezugsfall in den verwendeten Modellen berücksichtigt ist. Im Maßnahmenfall wird angenommen, dass durch die einheitliche zulässige Höchstgeschwindigkeit für Pkw und Lkw bei beiden Fahrzeugkategorien die gleiche Geschwindigkeit gewählt wird, die im Maßnahmenfall die zulässige Höchstgeschwindigkeit ist (siehe Kapitel 3.3.3.2). Damit ergeben sich bei SNF Verlagerungen auf die Autobahn (+1,2 %). Da die Verlagerungseffekte in Summe geringer ausfallen als bei der vorherigen Maßnahme, nimmt in diesem Berechnungsschritt die Gesamtfahrleistung nur um 0,8 % (Pkw 0,9 %) ab. Ebenso wie in der vorherigen Maßnahme kommt hier die zusätzliche Reduzierung der CO₂-Emissionen direkt durch die gesenkte Fahrleistung zustande. Durch die Erhöhung der Fahrleistung auf der Autobahn erhöhen sich hier auch die CO₂-Emissionen bei den SNF, während sie im untergeordneten Netz sinken. In diesem Berechnungsschritt sinken die Emissionen um 0,4 % (Pkw 0,9 %) und in Summe mit der Anpassung der HBEFA-Streckentypenergie gibt sich eine Abnahme der CO₂-Emissionen um 3,9 % (Pkw 5,6 %).

► **Nachfrageeffekte**

Der Effekt der Fahrleistungsänderung aufgrund von Nachfrageeffekten ist hier stärker ausgeprägt als in der vorherigen Maßnahme, da die Fahrzeitzuwächse im MIV aufgrund der zusätzlichen Geschwindigkeitsbegrenzung außerorts stärker ausfallen. Die Änderung des Modal Splits führt auch auf „anderen Straßen“ zu einer Reduzierung der Fahrleistung. Lokal muss im untergeordneten Netz voraussichtlich aber auch bei dieser Maßnahme mit Mehrverkehr gerechnet werden. Dies wird allerdings an anderen Stellen im Netz ausgeglichen und in Summe geht die Pkw-Fahrleistung auch auf „anderen Straßen“ um 1,1 % zurück. Auf das gesamte Netz bezogen führt die Maßnahme zu einer Reduzierung der Fahrleistung von 2,5 % (Pkw 3,0 %). Aufgrund der deutlicheren Nachfrageeffekte und der damit verbundenen starken Reduzierung der Fahrleistung sinken hier die CO₂-Emissionen insgesamt nochmals deutlicher als bei der vorhergehenden Maßnahme (Gesamtverkehr -5,1 %, Pkw-Verkehr -7,6 %).

In Tabelle 73 sind die Ergebnisse der Wirkungsberechnung unter Berücksichtigung aller Wirkungsaspekte zusammengefasst.

Tabelle 73: Zusammenfassung Wirkungen der Maßnahme „Allgemeines Tempolimit auf Autobahnen von 120 km/h und im Außerortsbereich von 80 km/h“

| Kenngröße | Pkw | SNF | Weitere FzKat | Alle FzKat |
|--|----------------|---------------|---------------|----------------|
| Fahrleistung | -3,0 % | +0,1 % | -0,5 % | -2,5 % |
| flüssig | +0,2 % | -0,6 % | +0,5 % | +0,1 % |
| dicht | 0,0 % | +0,2 % | -0,3 % | 0,0 % |
| gesättigt | -0,8 % | +0,8 % | -0,8 % | -0,5 % |
| Stop&Go | +1,0 % | +0,3 % | +0,2 % | +0,9 % |
| Stop&Go II | +2,4 % | -0,4 % | +0,9 % | +2,1 % |
| Fahrtzeit | +3,8 % | +2,3 % | +3,5 % | +3,7 % |
| Geschwindigkeit | -6,6 % | -2,1 % | -3,9 % | -6,0 % |
| Fahrzeit in Stop&Go-Verkehrszuständen | -0,3 % | +1,1 % | -2,2 % | -0,1 % |
| Anteil an Gesamtfahrtzeit | -4,0 % | -1,1 % | -5,5 % | -3,6 % |
| CO₂-Emissionen | -7,6 % | 0,0 % | -4,7 % | -5,1 % |
| je Fahrzeugkilometer | -4,7 % | -0,1 % | -4,1 % | -4,3 % |
| NO_x-Emissionen | -16,2 % | +1,7 % | -9,2 % | -11,1 % |
| je Fahrzeugkilometer | -13,6 % | +1,6 % | -8,7 % | -11,9 % |
| PM-Emissionen | -14,6 % | +1,1 % | -4,5 % | -7,3 % |
| je Fahrzeugkilometer | -12,0 % | +1,0 % | -4,0 % | -10,2 % |

Unter „weitere FzKat“ sind alle weiteren HBEFA-Fahrzeugkategorien (LNF, Lbus, Rbus und KR/MR) zusammengefasst.

In Summe entsteht ein Rückgang der Fahrzeugkilometer im deutschen Straßennetz um 2,5 % der sich zu Teilen aus einer veränderten, direkteren Routenwahl, zu Teilen aus modalen Verlagerungen und Zielwahleffekten ergibt. Der Rückgang findet auf Autobahnen und im untergeordneten Netz gleichermaßen statt, bei SNF entsteht sogar eine Verlagerung des Verkehrs auf die Autobahn, was ein gewünschter Effekt sein dürfte. Aufgrund der gesenkten Geschwindigkeiten ergeben sich sowohl auf den betroffenen Autobahnen als auch den betroffenen Außerortsstrecken günstigere spezifische Emissionsfaktoren. Die CO₂-Emissionen des Straßenverkehrs in Deutschland nehmen in Summe um 5,1 % ab, die Einsparungen bei NO_x und PM sind deutlich höher. Im Vergleich zu einem ausschließlichen Tempolimit von 120 km/h (Kapitel 3.3.2) ist das Einsparpotential also um 0,9 % erhöht. Bezogen auf die Gesamtemissionen des Straßenverkehrs (vgl. Infobox in Kapitel 3.3.2.3) sind dies rund 1,4 Mio. t CO₂ pro Jahr. Klöckner und Lange (2022) weisen ein Einsparpotential von 1.1 Mio. t CO₂ pro Jahr ausschließlich durch ein Tempolimit von 80 km/h auf Außerortsstraßen aus. Unter Berücksichtigung, dass bei Klöckner und Lange (2022) keine Routenwahl- und Nachfrageeffekte berücksichtigt sind, sind die Ergebnisse in ihrer Größenordnung gut vergleichbar. Den potentiellen Emissionsminderungen gilt es gegenüberzustellen, dass die Fahrzeit verglichen mit den Effekten aus der vorhergehenden Maßnahme eines reinen Tempolimits auf Autobahnen stärker zunimmt und sich ein Rückgang der realisierten Netzgeschwindigkeit von 6 % einstellt.

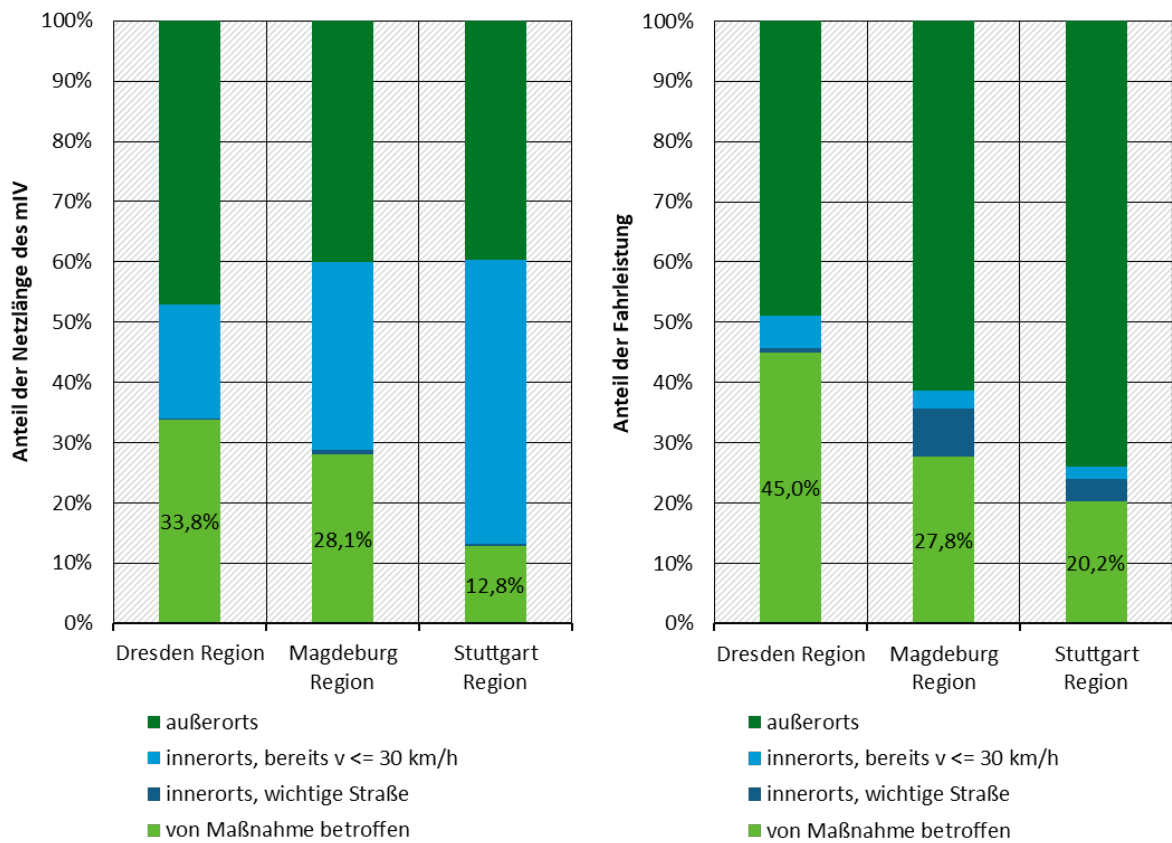
3.3.4 Regelgeschwindigkeit im Innerortsbereich von 30 km/h

3.3.4.1 Maßnahmenausgestaltung

Die Maßnahme „Regelgeschwindigkeit im Innerortsbereich von 30 km/h“ bildet die flächendeckende Einführung einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 30 km/h auf allen Innerortsstraßen ab. Von der Herabsetzung der Regelgeschwindigkeit sind alle Innerortsstraßen ausgenommen, welche planfrei ausgebaut und zweibahnig sind. Die Netzlängen- und

Fahrleistungsanteile, die in den jeweiligen Untersuchungsgebieten betroffen sind bzw. von der Maßnahme ausgenommen wurden, sind in Abbildung 56 dargestellt.

Abbildung 56: Von Maßnahme „Regelgeschwindigkeit im Innerortsbereich von 30 km/h“ betroffene Netzlängen- und Fahrleistungsanteile



Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart

Unterschiede zum UBA-Forschungsvorhaben „Umweltwirkungen von Tempo 30“

Parallel zum vorliegenden Projekt wurden in einem weiteren Forschungsprojekt des Umweltbundesamtes (FKZ 3720 15 108 1 „Aktiv mobil: Tempo 30 als innerörtliche Regelgeschwindigkeit“, Bearb.: Eggers, S.; Heinrichs, E; Klein, T.) die Wirkungen einer reduzierten zulässigen Höchstgeschwindigkeit im Innerortsbereich untersucht. Dabei wurden auch weitere Wirkungsaspekte der Maßnahme (z.B. Lärm und Verkehrssicherheit) untersucht.

In den Grundzügen wurde die Emissionsberechnung für Treibhausgase und Luftschadstoffe auf vergleichbare Weise durchgeführt (Berücksichtigung der Nachfrageeffekte durch den Einsatz makroskopischer Verkehrsnachfragemodelle, Emissionsberechnung mithilfe des HBEFA). Dennoch zeigen sich zwischen den Ergebnissen aus beiden Forschungsvorhaben klare Unterschiede. Bei „Umweltwirkungen von Tempo 30“ heben sich die Wirkungen der veränderten Verkehrsnachfrage und der verschlechterten Emissionsfaktoren in etwa auf, während in diesem Projekt die Verkehrsnachfrageeffekte überwiegen, wodurch sich für alle untersuchten Stadtregionen eine positive Emissionsbilanz einstellt. Da die in den jeweiligen Forschungsberichten dargestellten Ergebnisse aufgrund unterschiedlicher Bilanzgrenzen nicht eindeutig vergleichbar sind, wurde eine gesonderte Auswertung vorgenommen. Die Ergebnisse sowie eine ausführlichere Fassung der folgenden Erläuterung können Anhang A.7 entnommen werden.

In der Methodik bestehen die wichtigsten Unterschiede darin, dass im vorliegenden Forschungsvorhaben davon ausgegangen wird, dass sich durch Tempo 30 die Kapazität im Straßennetz für den MIV reduziert, die ÖPNV-Reisegeschwindigkeiten jedoch nicht angepasst wurden (siehe Kapitel 3.3.4.2), bei „Umweltwirkungen von Tempo 30“ wurde jeweils entgegengesetzt verfahren. Um die Bedeutung dieser Aspekte zu beurteilen, fehlt derzeit die wissenschaftliche Grundlage. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die Unterschiede in den Ergebnissen größtenteils durch eine unterschiedliche Ausgestaltung der modellierten Maßnahmen zu begründen sind. Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Umweltwirkungen von Tempo 30“ wurde angenommen, dass ausschließlich auf dem Gebiet der beispielhaft untersuchten Kommunen das Tempolimit abgesenkt wird. Es handelt sich also um eine kommunale Maßnahme, das Straßennetz im Umland der Kommunen ist nicht von der Maßnahme betroffen. Dagegen wurde in diesem Forschungsvorhaben die Annahme einer reduzierten Regelgeschwindigkeit für ganz Deutschland getroffen. Aus diesem Grund wurde in den Modellen die zulässige Geschwindigkeit auf allen Straßen, die den beschriebenen Kriterien entsprachen, reduziert, also im gesamten Modellraum und nicht ausschließlich in der zentralen Kommune des Untersuchungsraums. Es zeigt sich, dass die Nachfrageeffekte bei einer solchen Maßnahmenausgestaltung stärker ausgeprägt sind.

3.3.4.2 Modelltechnische Umsetzung

Die Bilanzierung dieser Maßnahme erfolgte in den Verkehrsnachfragemodellen der Regionen Stuttgart, Dresden und Magdeburg identisch. Ausgehend von der obenstehenden Definition der Maßnahme wurden alle Strecken identifiziert und angepasst, deren Geschwindigkeit auf 30 km/h reduziert werden soll. Weiterhin wurden im Zusammenhang mit der Anpassung der Geschwindigkeit auch die Kapazitäten der betroffenen Strecken um 10 % (bei Herabsetzung von 50 km/h auf 30 km/h) bzw. 6 % (bei Herabsetzung von 40 km/h auf 30 km/h) reduziert. Diese Reduzierung repräsentiert die zu erwartende Kapazitätsminderung im Abfluss an Knotenpunkten aufgrund niedrigerer Räumgeschwindigkeiten. Unberücksichtigt bleiben die in Realität zu erwartenden Auswirkungen auf den öffentlichen Personenverkehr.

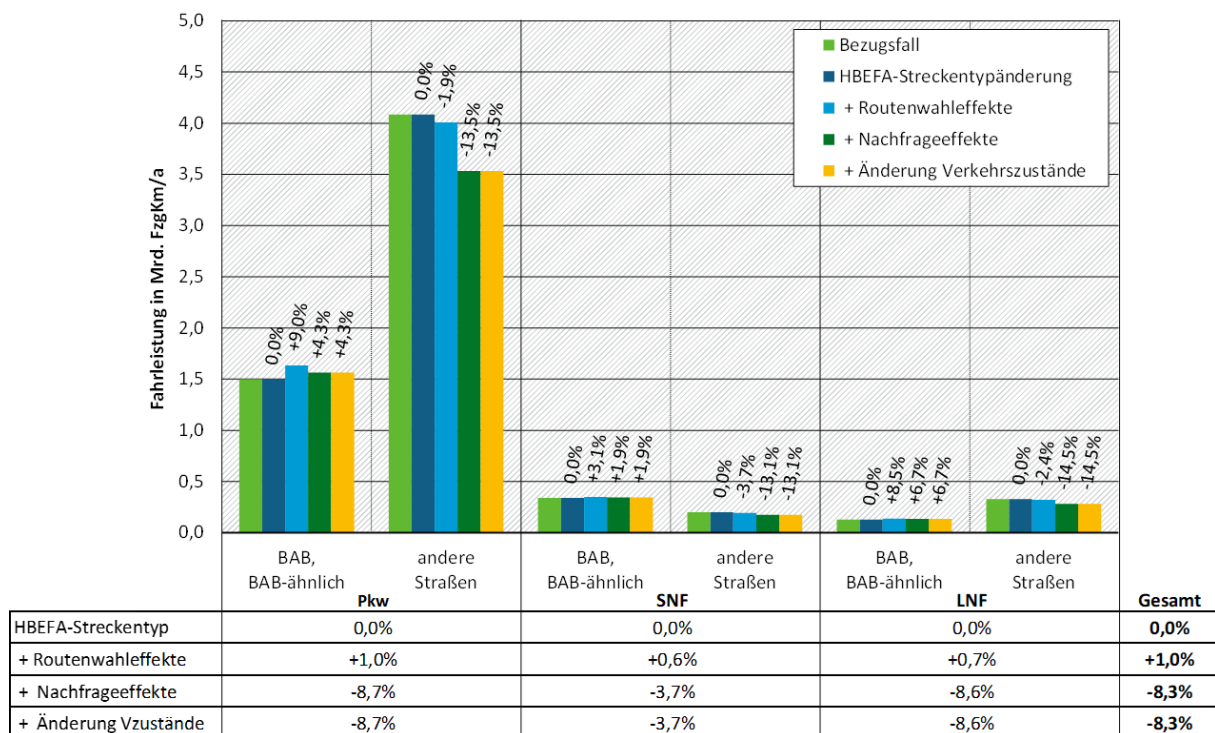
Bei dieser Maßnahme wurden vier der in Kapitel 3.3.1.1 benannten Rechenschritte durchgeführt. Zunächst wurde der HBEFA-Streckentyp angepasst. Die Ermittlung der

Verkehrsstärken im Straßennetz erfolgt auch bei dieser Maßnahme in zwei Schritten. Im ersten Schritt wurden die Routenwahleffekte berücksichtigt, in dem die Verkehrsnachfrage des Bezugsfalls auf die angepassten Netzmodelle des Maßnahmenfalls umgelegt wurde. Im zweiten Schritt wurde die Verkehrsnachfrage unter Berücksichtigung der Reisezeiten des Maßnahmenfalls neu berechnet und umgelegt. Aus der Änderung der Reisezeitstrukturen resultieren sowohl Änderungen der modalen Wahl als auch der Zielwahl. Im Ergebnis der vollständigen Berechnung der jeweiligen Maßnahmenfälle liegen in den Verkehrsmodellen die Verkehrsstärken im Straßenverkehr unter Berücksichtigung der Routenwahl- und Nachfrageeffekte vor. Zuletzt wurden die Wirkungen der veränderten Verkehrsstärken in eine Anpassung der HBEFA-Verkehrszustände für die Emissionsberechnung übersetzt.

3.3.4.3 Verkehrliche Wirkungen und Schadstoffbilanzierung

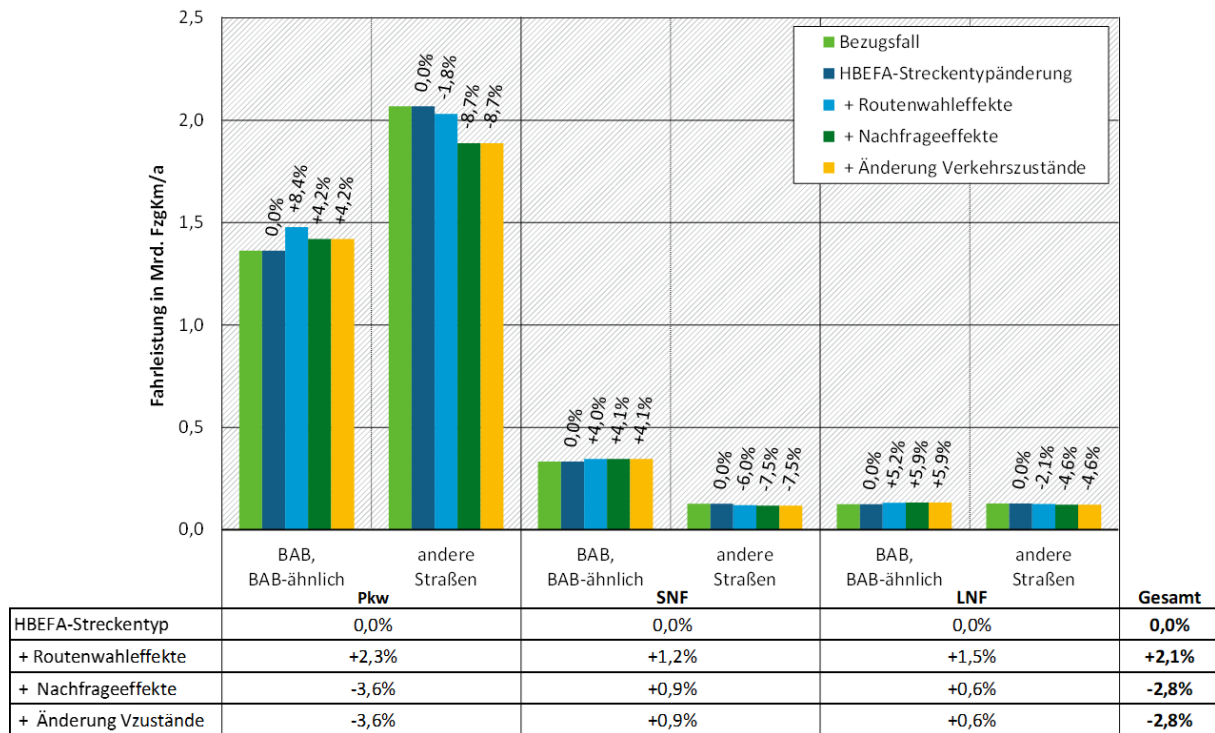
Die verkehrlichen Wirkungen dieser Maßnahme und die Wirkungen auf den Treibhausgasausstoß werden in Abbildung 57 bis Abbildung 62 getrennt für die drei Stadtregionen dargestellt. Die Abbildungen zu den Schadstoffen PM und NO_x werden im Anhang (A.6.3) abgebildet.

Abbildung 57: Wirkung der Maßnahme „Regelgeschwindigkeit im Innerortsbereich von 30 km/h“ auf die Fahrleistung für die Stadtregion Dresden



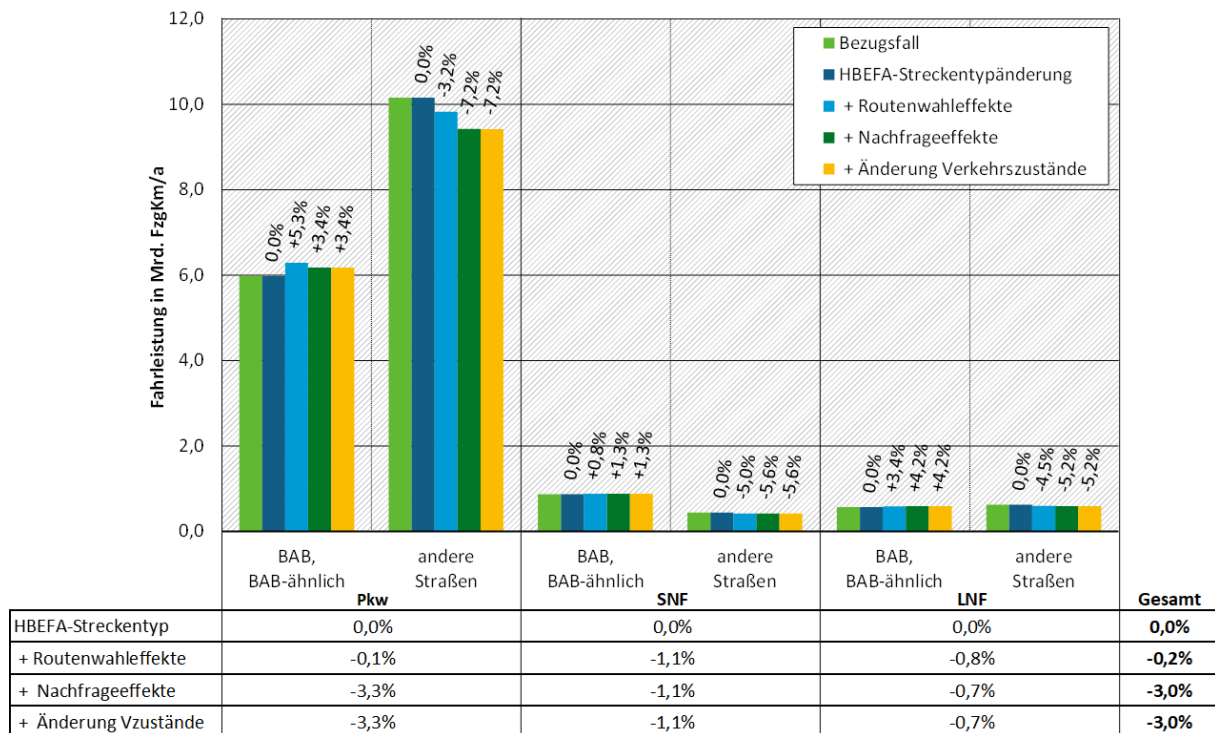
Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart

Abbildung 58: Wirkung der Maßnahme „Regelgeschwindigkeit im Innerortsbereich von 30 km/h“ auf die Fahrleistung für die Stadtregion Magdeburg



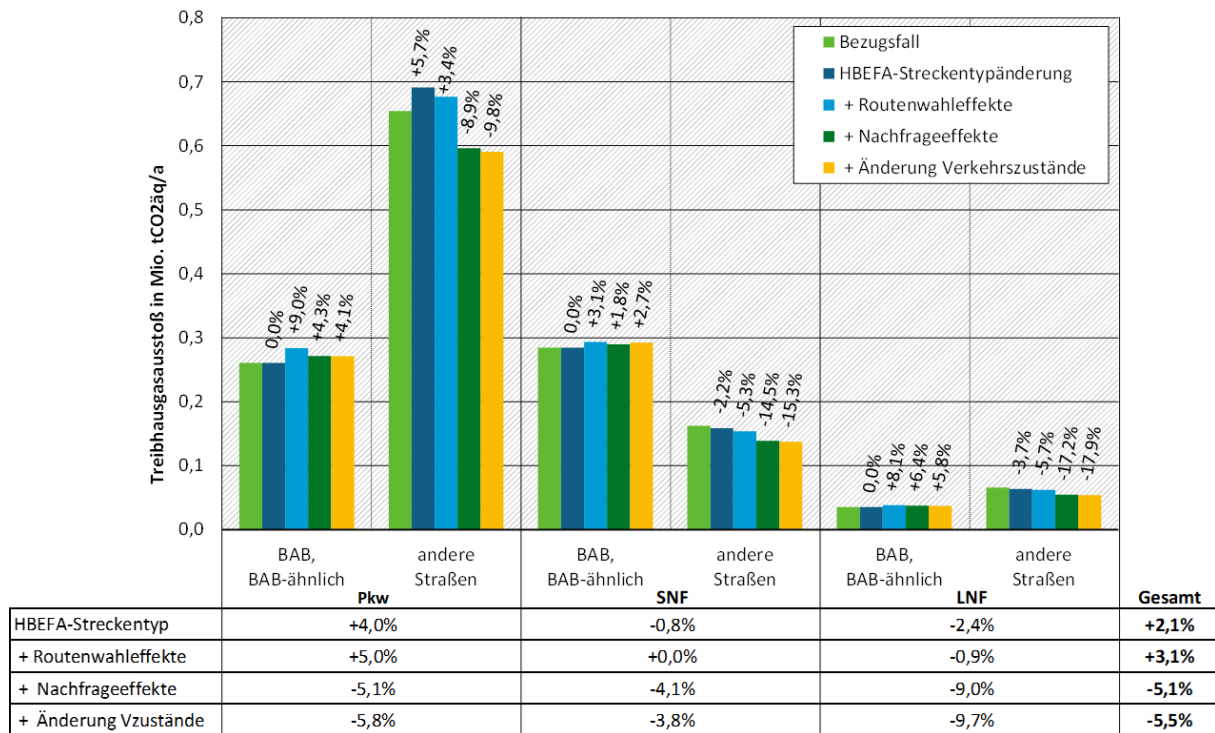
Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart

Abbildung 59: Wirkung der Maßnahme „Regelgeschwindigkeit im Innerortsbereich von 30 km/h“ auf die Fahrleistung für die Stadtregion Stuttgart



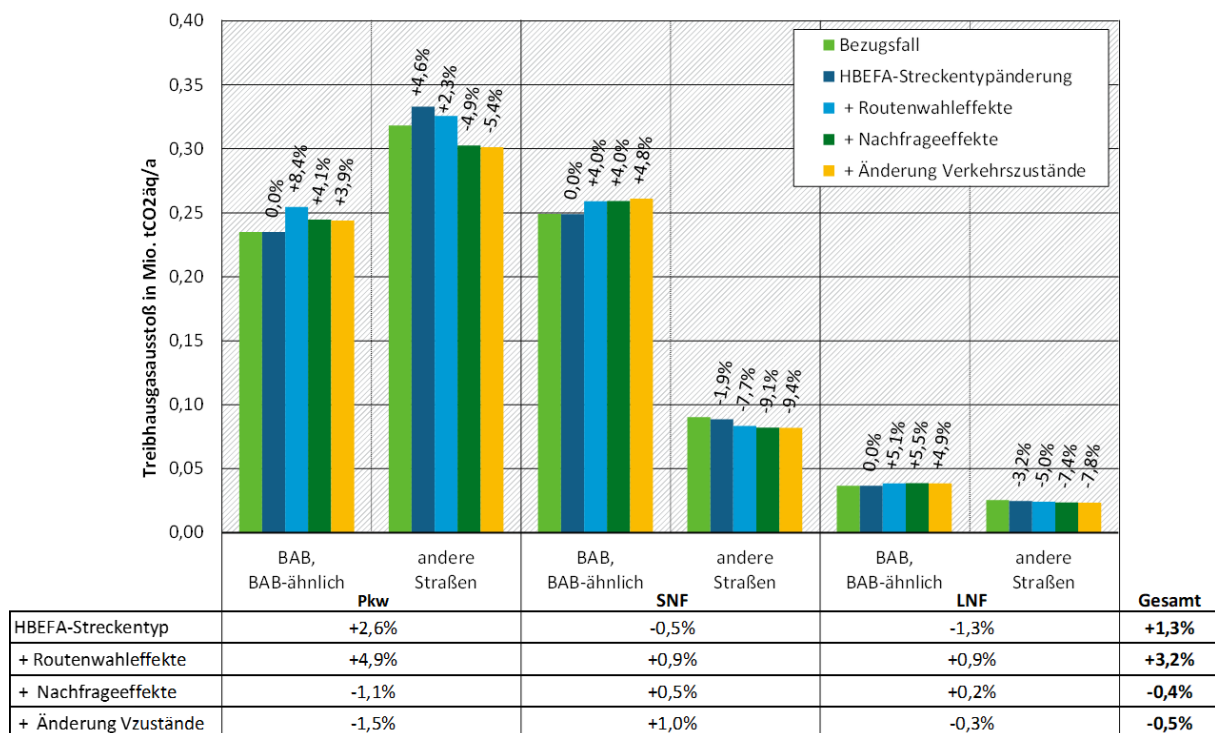
Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart

Abbildung 60: Wirkung der Maßnahme „Regelgeschwindigkeit im Innerortsbereich von 30 km/h“ auf den Treibhausgasausstoß für die Stadtregion Dresden



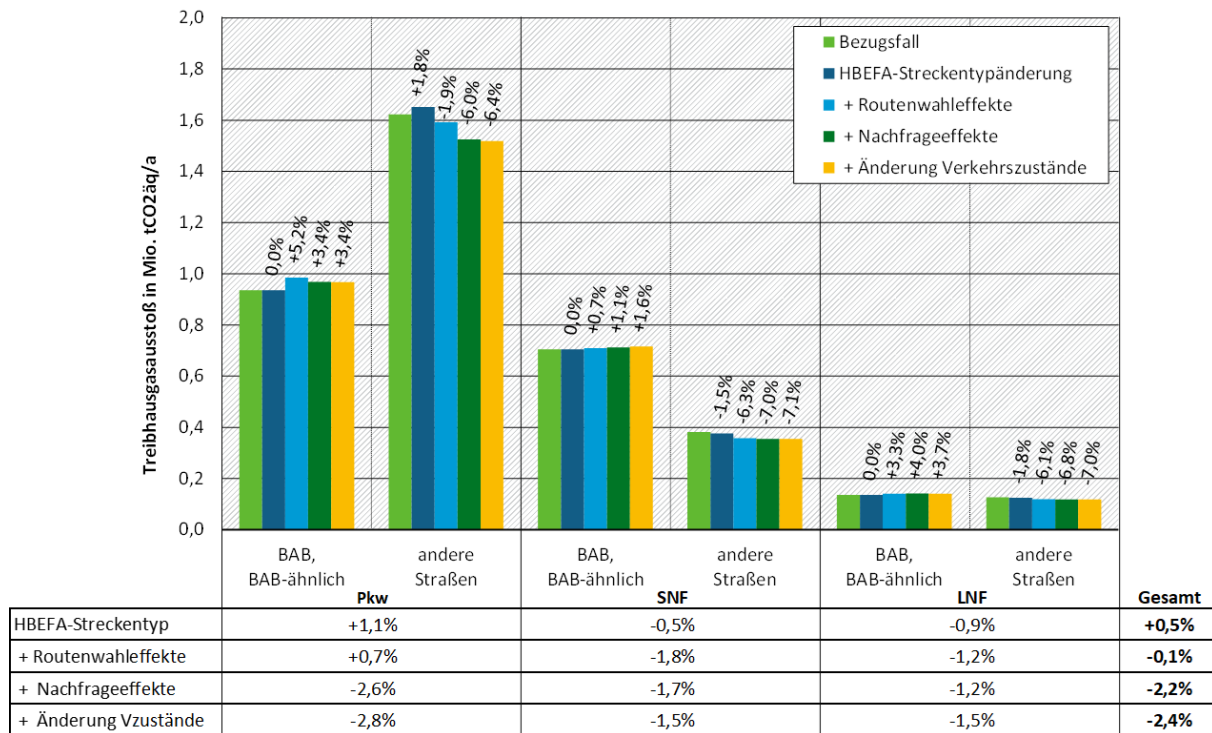
Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart

Abbildung 61: Wirkung der Maßnahme „Regelgeschwindigkeit im Innerortsbereich von 30 km/h“ auf den Treibhausgasausstoß für die Stadtregion Magdeburg



Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart

Abbildung 62: Wirkung der Maßnahme „Regelgeschwindigkeit im Innerortsbereich von 30 km/h“ auf den Treibhausgasausstoß für die Stadtregion Stuttgart



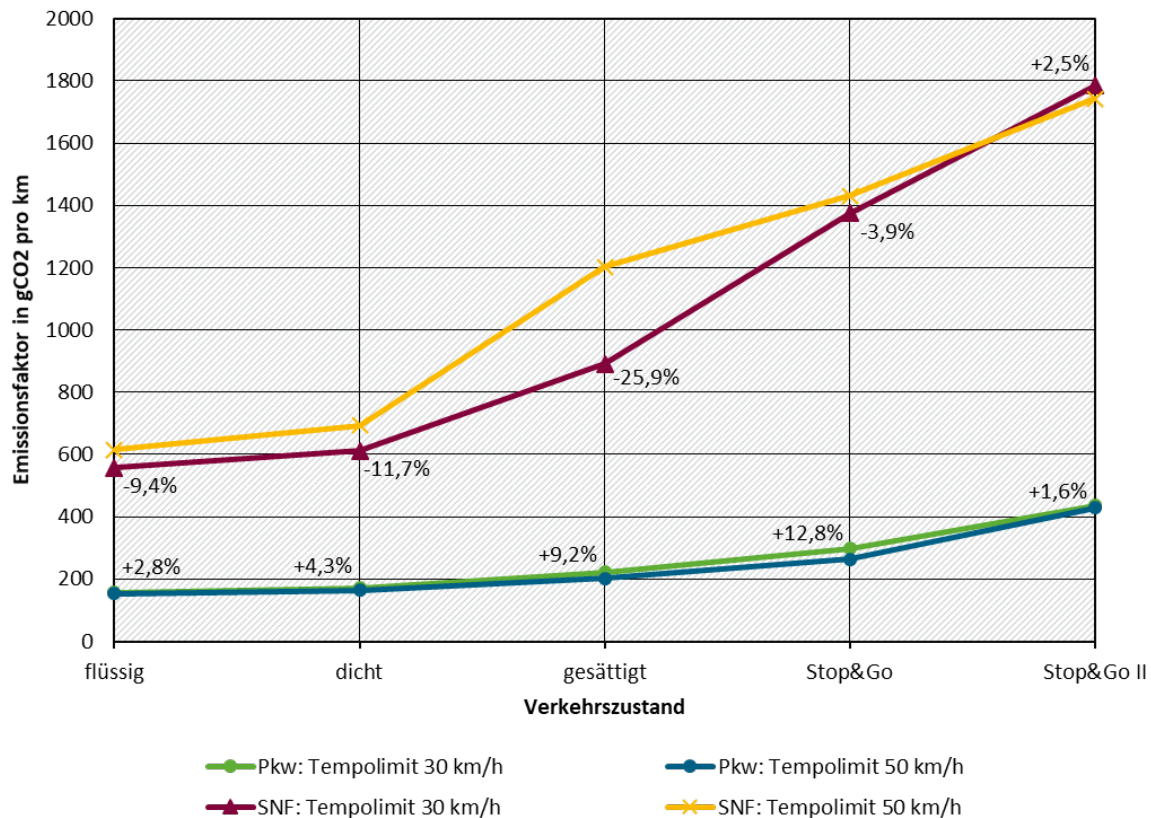
Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart

Im Folgenden wird auf die einzelnen Wirkungsaspekte eingegangen:

► **HBEFA-Streckentypänderung**

Die Änderung des HBEFA-Streckentyps hat keine Auswirkung auf die Fahrleistung. Die CO₂-Emissionen nehmen aufgrund der geänderten Streckentypen für den Pkw zu, für LNF und SNF gehen die Emissionen zurück. Dies liegt daran, dass für Streckentypen, die von dieser Maßnahme am häufigsten betroffen sind (Hauptverkehrsstraßen und Sammelstraßen im Gebietstyp Agglomeration) die spezifischen Emissionsfaktoren für Pkw bei einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 30 km/h höher sind als bei einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h. Abbildung 63 stellt die Emissionsfaktoren für Pkw und SNF aufgetrennt nach Verkehrszuständen gegenüber. Es ist zu berücksichtigen, dass diese Zusammenhänge nur für den Schadstoff CO₂-Gültigkeit haben. Beispielsweise wirkt die Maßnahme aufgrund deutlicher Zunahmen der Emissionsfaktoren bei den NO_x-Emissionen der SNF genau gegenteilig.

Abbildung 63: CO₂-Emissionsfaktoren auf Hauptverkehrsstraßen (Agglomeration) bei Tempo 30 und Tempo 50 (Flotte für Deutschland, Jahr 2020)



Prozentzahlen stellen die Wirkungen der Änderung von Tempo 50 auf Tempo 30 dar.

Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart, Datengrundlage: HBEFA 4.1

► **Routenwahleffekte**

In allen drei Stadtregionen lässt sich eine deutliche Zunahme (Größenordnung 5 % bis 10 %) des Verkehrs auf Autobahnen erkennen. Im weiteren Netz ergeben sich leichte Rückgänge der Fahrleistung wobei auch hier innerhalb des Netzes starke Verlagerungen auftreten (Rückgang der Verkehrsstärken auf den betroffenen Strecken, Zunahme auf nicht betroffenen Strecken). Zum einen wird der Verkehr auf Strecken, die aufgrund ihrer verkehrlichen Bedeutung von der Maßnahme ausgenommen sind, gebündelt, was als gewünschter Effekt angesehen werden kann. Zum anderen werden in kleinerem Ausmaß Alternativrouten im untergeordneten Netz gewählt. Diese Verlagerungen sind aller Regel nach nicht erwünscht. Solche Effekte gilt es bei der Realisierung der Maßnahme durch begleitende netzgestalterische Maßnahmen zu reduzieren. Insgesamt ergibt sich in Dresden und Magdeburg eine Zunahme der Fahrleistungen, da umwegigere Routen gewählt werden. In Stuttgart wirkt diesem Effekt eine Verlagerung des Verkehrs aus dem bilanzierten Raum hinaus entgegen, was in Summe zu einem leichten Rückgang der berechneten Fahrleistung führt. Die CO₂-Emissionen ändern sich nahezu proportional zur Änderung der Fahrleistung.

► **Nachfrageeffekte**

In allen Stadtregionen geht die Fahrleistung aufgrund der Maßnahme im Untersuchungsraum zurück. Im Vergleich zu Magdeburg (-2,8 %) und Stuttgart (-3,0 %) nimmt die Fahrleistung in der Region Dresden mit -8,3 % infolge der Maßnahme stark ab. Dies liegt zum einen an der Stadtstruktur sowie dem guten Verkehrsmittelalternativen.

Zum anderen sind vergleichsweise viele Strecken, die im Bezugsfall einen vergleichsweise hohen Anteil der Gesamtfahrleistung aufnehmen, von der Maßnahme betroffen (vgl. Abbildung 56). Hinsichtlich der CO₂-Emissionen wirkt der Schritt wiederum proportional zu den Veränderungen der Fahrleistungen.

► **Änderung Verkehrszustände**

Die Änderung der HBEFA-Verkehrszustände aufgrund veränderter Auslastungen hat modelltechnisch keinen Einfluss auf die Fahrleistung. Die Wirkung auf die Emissionen ist im Vergleich zur Wirkung des Fahrleistungsrückgangs und der Anpassung des Fahrverhaltens aufgrund der veränderten zulässigen Höchstgeschwindigkeiten, gering.

In Tabelle 74 bis Tabelle 76 sind die Ergebnisse der Wirkungsberechnung unter Berücksichtigung aller Wirkungsaspekte zusammengefasst.

Tabelle 74: Zusammenfassung der Wirkungen der Maßnahme „Regelgeschwindigkeit im Innerortsbereich von 30 km/h“ für die Stadtregion Dresden

| Kenngröße | Pkw | SNF | LNF | Zusammen |
|--|----------------|---------------|----------------|---------------|
| Fahrleistung | -8,7 % | -3,7 % | -8,6 % | -8,3 % |
| flüssig | -1,4 % | -3,6 % | -2,0 % | -1,7 % |
| dicht | -1,3 % | -3,4 % | -1,3 % | -1,4 % |
| gesättigt | +7,9 % | +8,5 % | +9,2 % | +8,4 % |
| Stop&Go | -6,8 % | +3,0 % | -5,0 % | -5,9 % |
| Stop&Go II | -14,9 % | -11,8 % | -12,9 % | -14,8 % |
| Fahrtzeit | +8,0 % | +7,1 % | +8,8 % | +8,0 % |
| Geschwindigkeit | -15,5 % | -10,0 % | -16,0 % | -15,0 % |
| Fahrzeit in Stop&Go-Verkehrszuständen | -10,2 % | -0,7 % | -7,9 % | -9,5 % |
| Anteil an Gesamtfahrtzeit | -16,9 % | -7,3 % | -15,4 % | -16,2 % |
| CO₂-Emissionen | -5,8 % | -3,8 % | -9,7 % | -5,5 % |
| je Fahrzeugkilometer | +3,2 % | -0,2 % | -1,2 % | +2,6 % |
| NO_x-Emissionen | -7,1 % | +2,8 % | -11,2 % | -5,0 % |
| je Fahrzeugkilometer | +1,8 % | +6,7 % | -2,8 % | +1,9 % |
| PM-Emissionen | -3,1 % | +3,3 % | -3,8 % | -1,3 % |
| je Fahrzeugkilometer | +6,2 % | +7,2 % | +5,2 % | +6,2 % |

Tabelle 75: Zusammenfassung der Wirkungen der Maßnahme „Regelgeschwindigkeit im Innerortsbereich von 30 km/h“ für die Stadtregion Magdeburg

| Kenngröße | Pkw | SNF | LNF | Zusammen |
|--|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Fahrleistung | -3,6 % | +0,9 % | +0,6 % | -2,8 % |
| flüssig | -1,2 % | -2,4 % | -1,4 % | -1,4 % |
| dicht | -1,4 % | -3,1 % | -1,9 % | -1,6 % |
| gesättigt | +8,4 % | +6,9 % | +7,5 % | +8,5 % |
| Stop&Go | -6,4 % | +7,3 % | -3,7 % | -5,2 % |
| Stop&Go II | -11,9 % | -11,3 % | -9,6 % | -12,1 % |
| Fahrtzeit | +10,1 % | +7,0 % | +14,9 % | +10,1 % |
| Geschwindigkeit | -12,4 % | -5,8 % | -12,4 % | -11,7 % |
| Fahrzeit in Stop&Go-Verkehrszuständen | -2,9 % | -19,1 % | +3,5 % | -2,1 % |
| Anteil an Gesamtfahrtzeit | -11,9 % | -24,4 % | -9,9 % | -11,1 % |
| CO₂-Emissionen | -1,5 % | +1,0 % | -0,3 % | -0,5 % |
| je Fahrzeugkilometer | +2,2 % | +0,1 % | -0,9 % | +1,7 % |
| NO_x-Emissionen | -2,2 % | +5,4 % | -0,9 % | +0,1 % |
| je Fahrzeugkilometer | +1,4 % | +4,5 % | -1,5 % | +1,6 % |
| PM-Emissionen | +0,6 % | +4,4 % | +3,1 % | +2,4 % |
| je Fahrzeugkilometer | +4,3 % | +3,5 % | +2,5 % | +4,1 % |

Tabelle 76: Zusammenfassung der Wirkungen der Maßnahme „Regelgeschwindigkeit im Innerortsbereich von 30 km/h“ für die Stadtregion Stuttgart

| Kenngröße | Pkw | SNF | LNF | Zusammen |
|--|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Fahrleistung | -3,3 % | -1,1 % | -0,7 % | -3,0 % |
| flüssig | +0,1 % | -0,8 % | -0,4 % | 0,0 % |
| dicht | -1,2 % | -2,0 % | -1,3 % | -1,2 % |
| gesättigt | +3,4 % | +5,8 % | +4,9 % | +3,8 % |
| Stop&Go | -1,8 % | +1,5 % | +0,1 % | -1,5 % |
| Stop&Go II | -8,5 % | -6,2 % | -6,3 % | -8,3 % |
| Fahrtzeit | +3,2 % | +2,7 % | +5,2 % | +3,3 % |
| Geschwindigkeit | -6,3 % | -3,6 % | -5,7 % | -6,0 % |
| Fahrzeit in Stop&Go-Verkehrszuständen | -3,6 % | +0,5 % | +0,7 % | -3,2 % |
| Anteil an Gesamtfahrtzeit | -6,6 % | -2,1 % | -4,3 % | -6,2 % |
| CO₂-Emissionen | -2,8 % | -1,5 % | -1,5 % | -2,4 % |
| je Fahrzeugkilometer | +0,5 % | -0,4 % | -0,7 % | +0,3 % |
| NO_x-Emissionen | -3,7 % | +0,7 % | -2,1 % | -2,5 % |
| je Fahrzeugkilometer | -0,4 % | +1,8 % | -1,4 % | -0,3 % |
| PM-Emissionen | -1,6 % | +1,2 % | +0,1 % | -0,5 % |
| je Fahrzeugkilometer | +1,8 % | +2,3 % | +0,9 % | +1,7 % |

In Summe bewirkt die Maßnahme in den einzelnen Modellräumen sehr unterschiedliche Fahrleistungsrückgänge, von 2,8 % in der Region Magdeburg, über 3,0 % in der Region Stuttgart bis 8,3 % in der Region Dresden. Die Gründe für die unterschiedlichen Effektstärken

(Stadtstruktur, Angebotsalternativen, betroffene Netzanteile) wurden bereits benannt. Als erklärende Größe kann auch die Änderung der Netzgeschwindigkeit betrachtet werden, die in der Region Dresden durch die Maßnahme um 15 %, in Magdeburg um 11 % und in Stuttgart nur um 6 % zurückgeht. Der geringe Rückgang in Stuttgart ist damit zu begründen, dass hier bereits ein großer Teil des betroffenen Netzes vor der Maßnahme eine Geschwindigkeitsbeschränkung von 40 km/h aufwies. Dass in Magdeburg im Vergleich zu Stuttgart ein geringerer Fahrleistungsrückgang trotz höherer Geschwindigkeitseinbußen für den MIV erreicht wird, lässt auf mangelnde Verkehrsmittelalternativen schließen.

Die zunächst wenig intuitive Veränderung der Verkehrszustandsanteile, die jedoch in allen drei Stadtregionen einem vergleichbaren Muster folgt (Zunahme des gesättigten Verkehrs bei gleichzeitiger Abnahme des flüssigen und dichten Verkehrs sowie der Stop&Go-Verkehrszustände), ist durch eine Kombination aus Verlagerungs- und Auslastungseffekten zu erklären. Die mit Abstand größte Zunahme der Nachfrage entsteht auf Autobahnstrecken. Auf diesen ist bereits im Analysefall ein überproportional hoher Anteil des gesättigten Verkehrs auszumachen (siehe Abbildung 18). Da dort im Analysefall der größte Teil des Verkehrs einem dichten Verkehrszustand zugeordnet ist, wechselt ein verhältnismäßig großer Anteil dieses Verkehrs durch die Zunahme der Belastungen zusätzlich infolge der Maßnahme in den gesättigten Verkehr.

Hinsichtlich der Emissionseffekte wirkt die Maßnahme bei NO_x in einer vergleichbaren Größenordnung wie bei CO_2 , für das die jeweiligen Einflussfaktoren bereits beschrieben wurden. Bei NO_x und CO_2 wirkt die Änderung der HBEFA-Streckentypen für die einzelnen Fahrzeugkategorien auf die Emissionsfaktoren in unterschiedliche Richtungen, hat also teils positive und teils negative Effekte. Die Emissionsfaktoren für Feinstaub nehmen dagegen bei allen Fahrzeugkategorien durchwegs aufgrund der Maßnahme zu, was zu einer schlechteren Gesamtwirkung führt. In der Region Dresden und Stuttgart überwiegen auch hier der Effekt des Fahrleistungsrückganges und die PM-Emissionen nehmen in Summe ab. In Magdeburg überwiegt an dieser Stelle dagegen die nachteilige Wirkung auf die Emissionsfaktoren und die Berechnungsergebnisse weisen auf eine Zunahme der Feinstaub-Emissionen um 2,4 % hin.

3.3.5 Erhöhung des durchschnittlichen Besetzungsgrads

3.3.5.1 Maßnahmenausgestaltung

Die Maßnahme „Erhöhung des durchschnittlichen Besetzungsgrads“ betrachtet die Einführung von Instrumenten zur Förderung von Fahrgemeinschaften. Ziel der Maßnahme ist eine Erhöhung des Pkw-Besetzungsgrades auf 2,0 Personen pro Pkw.

3.3.5.2 Modelltechnische Umsetzung

Eine Bilanzierung der verkehrlichen Wirkungen erfolgte für diese Maßnahme ausschließlich im Verkehrsnachfragemodell der Region Dresden. Die Erhöhung des Besetzungsgrades erfolgt als Setzung, d.h. es sind keine Maßnahmen im Angebotsmodell hinterlegt. Mit der Maßnahme wird überprüft, welche Folgen eine solche Erhöhung für die Auslastung des Streckennetzes und den Verkehrsfluss hat, nicht jedoch, wie diese Erhöhung erreicht werden kann. Aus diesem Grund wird die Annahme getroffen, dass die gesamte Zunahme der Mitfahrenden aus Pkw-Selbstfahrenden gespeist wird. Die Modal-Split-Anteile von ÖV, Radverkehr und Fußverkehr ändern sich dadurch nicht. Da sich die Wirkungen dieser Maßnahme direkt auf die Nachfrage beziehen und keine Anpassungen am Angebotsmodell erfolgen, ist hier nur eine gemeinsame Bilanzierung von Routenwahl- und Nachfrageeffekten möglich.

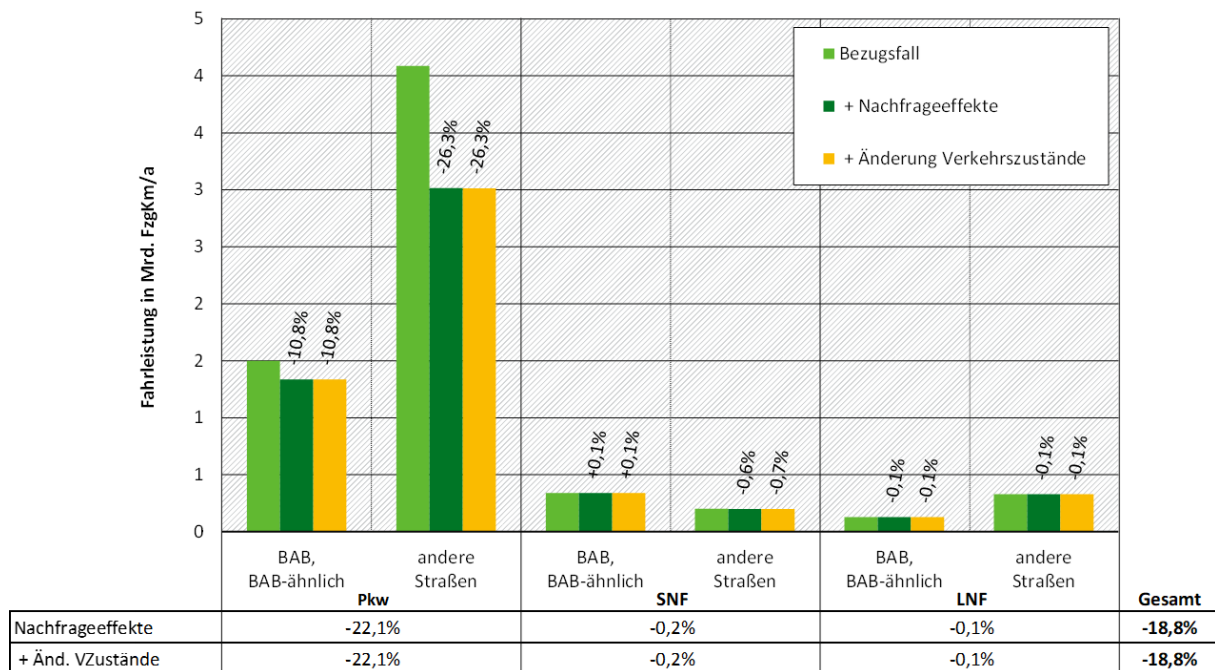
Eine Besonderheit des Verkehrsmodells der Region Dresden ist, dass die Berechnung der Verkehrsnachfrage hier differenziert nach Aktivitäten für Personenwege erfolgt. Eine Umrechnung in Fahrzeugwege erfolgt durch Division der Personenwege durch den durchschnittlichen Pkw-Besetzungsgrad. Dabei wird berücksichtigt, dass der Besetzungsgrad in Abhängigkeit von der durchgeführten Aktivität variiert. So beträgt der durchschnittliche Besetzungsgrad in Dresden über alle Aktivitäten betrachtet ca. 1,35 Personen pro Pkw, währenddessen er z. B. bei Wegen von und zur Arbeit bei knapp 1,1 Personen pro Pkw und bei Wegen von und zur Schule bei über 2,0 liegt.

Ausgehend von den Besetzungsgraden des Bezugsfalls erfolgte eine nach Aktivitäten differenzierte Anpassung der Besetzungsgrade auf durchschnittlich 2,0 Personen pro Pkw. Aufgrund der höheren Besetzungsgrade ergeben sich bei identischer Wegeanzahl pro Person und Tag niedrigere Verkehrsstärken im Kfz-Verkehr. Die Verkehrsstärken im Straßenverkehr wurden für den Maßnahmenfall ermittelt, in dem die mit dem neuen Besetzungsgrad berechnete Pkw-Nachfrage umgelegt wurde.

3.3.5.3 Verkehrliche Wirkungen und Schadstoffbilanzierung

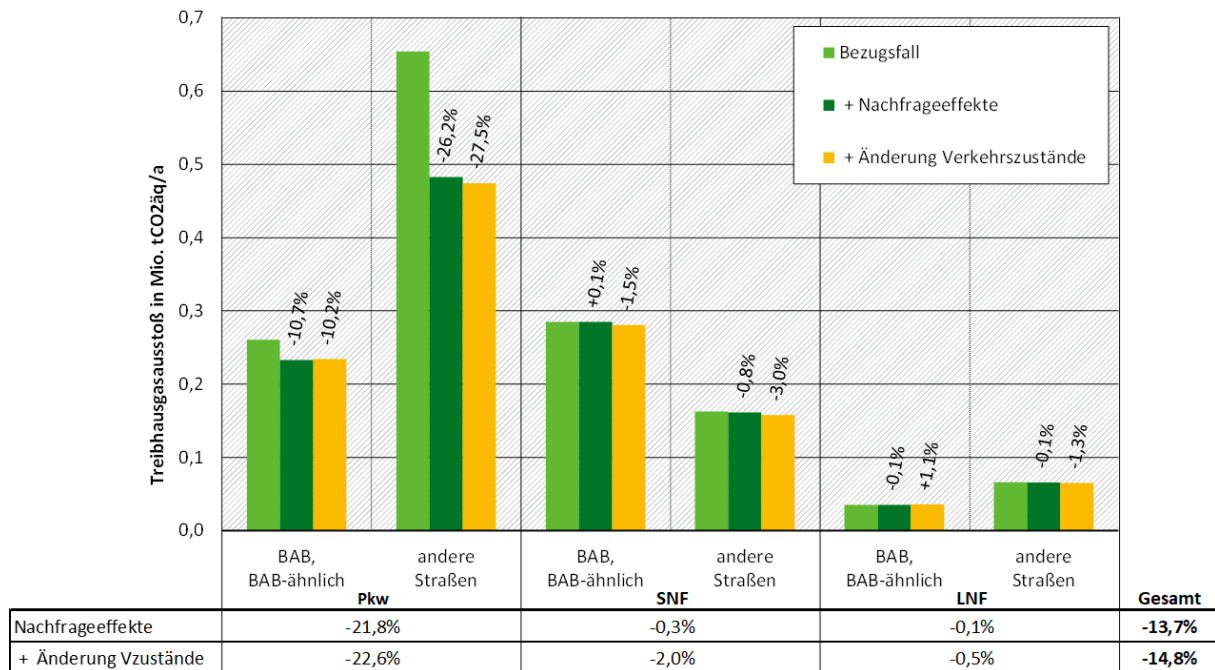
Die verkehrlichen Wirkungen dieser Maßnahme und die Wirkungen auf den Treibhausgasausstoß werden in Abbildung 64 und Abbildung 65 dargestellt. Die Abbildungen zu den Schadstoffen PM und NO_x können in Anhang (A.6.4) nachgeschlagen werden.

Abbildung 64: Wirkung der Maßnahme „Erhöhung des durchschnittlichen Besetzungsgrads“ auf die Fahrleistung



Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart

Abbildung 65: Wirkung der Maßnahme „Erhöhung des durchschnittlichen Besetzungsgrads“ auf den Treibhausgasausstoß



Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart

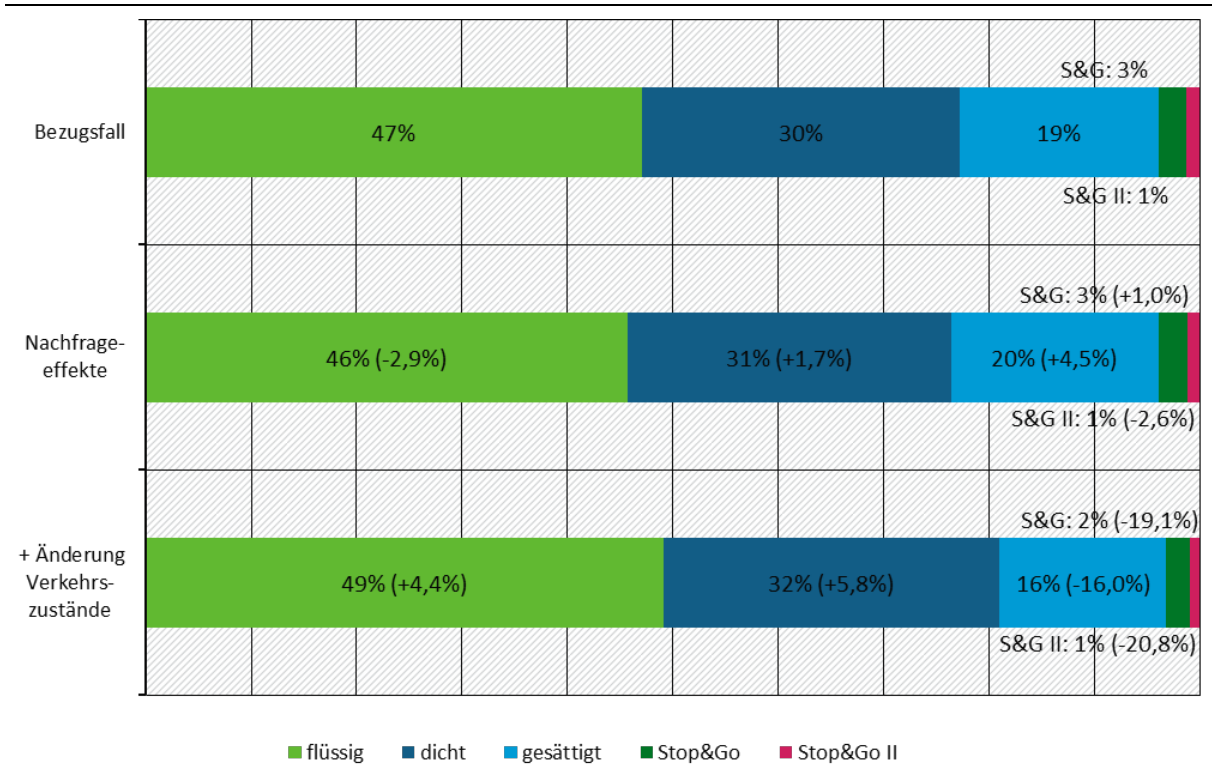
► **Nachfrageeffekte**

Durch die Maßnahme ist ein Fahrleistungsrückgang von 18,8 % (Pkw 22,1 %) zu verzeichnen. Durch eine Erhöhung des mittleren Pkw-Besetzungsgrades von 1,35 auf 2,0 wird theoretisch ein Fahrleistungsrückgang von 32,5 % erreicht. Der modellierte Rückgang fällt geringer aus, da externe Verkehre in die Anpassung nicht eingeschlossen wurden, sondern lediglich der Verkehr, der im Verkehrsnachfragemodell erzeugt wird. Innerhalb der einzelnen Fahrzeugkategorien und Streckenklassen ist der Rückgang der CO₂-Emissionen mit Blick auf die jeweilige Größenordnung mit denen der Fahrleistung vergleichbar. Der geringere Rückgang der Gesamtemissionen (13,7 %) ist darin begründet, dass ein deutlich größerer Anteil der Emissionen auf SNF entfällt, auf die die Maßnahme nur minimal durch auslastungsbedingte Routenwahleffekte eine Wirkung hat.

► **Änderung Verkehrszustände**

In diesem Schritt wird die Wirkung der Fahrleistungsänderungen aufgrund der Nachfrageeffekte auf die HBEFA-Verkehrszustände abgebildet. In Abbildung 66 ist ersichtlich, dass die Anteile der Verkehrszustände Stop&Go und Stop&Go II um circa 20 % zurück gehen, während die Zustände flüssig und dicht zunehmen. Der Verkehrsfluss verbessert sich durch die Maßnahme also wahrnehmbar. Gleichzeitig haben diese Verbesserungen auf die Emissionen nur eine geringe Wirkung. Wie auch bei der Maßnahme „Regelgeschwindigkeit im Innerortsbereich von 30 km/h“ liegt die Wirkung der Änderung der Verkehrszustände für den von der Maßnahme betroffenen Pkw-Verkehr in einer Größenordnung von rund 5 % der Wirkung der Nachfrageeffekte. Da die Fahrleistung der SNF und LNF nur geringfügig zurückgeht, da diese Fahrzeugkategorien nicht direkt von der Maßnahme betroffen sind, ist das Wirkungsverhältnis hier deutlich höher. In Summe nehmen die Emissionen durch den Effekt noch einmal um 1,1 % ab, was einem Anteil am Gesamteffekt von 7,5 % entspricht (1,1 % von 14,8 %).

Abbildung 66: Fahrleistung je Verkehrszustand der Maßnahme „Erhöhung des durchschnittlichen Besetzungsgrads“



Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart

In Tabelle 77 sind die Ergebnisse der Wirkungsberechnung unter Berücksichtigung aller Wirkungsaspekte zusammengefasst. Da die Änderungen nur auf die beiden Wirkungsaspekte „Nachfrageeffekte“ und „Änderung Verkehrszustände“ zurückzuführen sind, sind die dargestellten Änderungen obenstehend weitestgehend erläutert. Aufgrund der veränderten Fahrleistung und der damit einhergehenden Abnahme der Auslastung nimmt die Geschwindigkeit des MIV in Summe um 7,1 % zu. Die Emissionsminderung ist beim Pkw-Verkehr größtenteils durch die Fahrleistungsänderung begründet, sie verhält sich für alle Luftschadstoffe nahezu proportional. Die Zunahme der Emissionsfaktoren bei NO_x und PM kommen durch eine relative Verschiebung der Fahrleistungsanteile auf die Autobahn zustande. Die Emissionsfaktoren der SNF profitieren durch die Verbesserung des Verkehrsflusses deutlich, hier sind die Emissionsminderungen durch die Auslastungseffekte geprägt. Bei den LNF ist dieser Effekt geringer, der Emissionsfaktor für NO_x weist hier sogar eine positive Änderungsrate auf. Die Fahrzeuge der in der Untersuchung aufgenommenen Fahrzeugkategorien erfahren im Mittel einen Rückgang bei den CO₂-Emissionsfaktoren aber eine leichte Zunahme bei den NO_x- und PM-Emissionen, der durch den anteilig größeren Pkw-Verkehr im Autobahnnetz begründet ist.

Tabelle 77: Zusammenfassung der Wirkungen der Maßnahme „Erhöhung des durchschnittlichen Besetzungsgrads“

| Kenngröße | Pkw | SNF | LNF | Zusammen |
|--|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Fahrleistung | -22,1 % | -0,2 % | -0,1 % | -18,8 % |
| flüssig | +4,6 % | +6,2 % | +7,1 % | +4,4 % |
| dicht | +5,6 % | +6,6 % | +3,3 % | +5,8 % |
| gesättigt | -17,4 % | -13,4 % | -19,5 % | -16,0 % |
| Stop&Go | -19,2 % | -18,1 % | -18,7 % | -19,1 % |
| Stop&Go II | -20,9 % | -18,0 % | -16,8 % | -20,8 % |
| Fahrtzeit | -27,6 % | -3,9 % | -4,7 % | -24,2 % |
| Geschwindigkeit | +7,6 % | +3,8 % | +4,9 % | +7,0 % |
| Fahrzeit in Stop&Go-Verkehrszuständen | -38,1 % | -18,2 % | -17,7 % | -35,3 % |
| Anteil an Gesamtfahrtzeit | -14,4 % | -14,9 % | -13,6 % | -14,7 % |
| CO₂-Emissionen | -22,6 % | -2,0 % | -0,5 % | -14,8 % |
| je Fahrzeugkilometer | -0,6 % | -1,8 % | -0,4 % | -0,7 % |
| NO_x-Emissionen | -21,2 % | -4,1 % | +0,1 % | -14,1 % |
| je Fahrzeugkilometer | +1,2 % | -3,9 % | +0,2 % | +0,6 % |
| PM-Emissionen | -21,2 % | -2,6 % | -0,4 % | -11,6 % |
| je Fahrzeugkilometer | +1,2 % | -2,4 % | -0,3 % | +0,7 % |

3.3.6 Reduzierung des Parksuchverkehrs

3.3.6.1 Maßnahmenausgestaltung

Die Maßnahme „Reduzierung des Parksuchverkehrs“ betrachtet die Einführung von Instrumenten zur Verkehrslenkung und -information. Ziel der Maßnahme ist eine Reduzierung des Parksuchverkehrs.

In der Praxis müsste für eine solche Maßnahme der komplette Parkraum bewirtschaftet werden und die Verkehrsteilnehmenden müssten über aktuelle Informationen zu verfügbaren Parkständen verfügen und diese ggf. auch reservieren können. Mögliche Maßnahmen im Bezug zum ruhenden Verkehr werden in Kapitel 3.2.8 vorgestellt.

Bei der Maßnahmenausgestaltung wird der Effekt von privaten Stellplätzen sowie Rückkopplungseffekte auf die Pkw-Nachfrage, z.B. durch verlängerte Zu- und Abgangsfußwege zum Pkw, nicht berücksichtigt.

3.3.6.2 Modelltechnische Umsetzung

Eine Bilanzierung der verkehrlichen Wirkungen erfolgte für diese Maßnahme ausschließlich im Verkehrsnachfragemodell der Region Dresden. Da sich die Wirkungen der Maßnahme direkt auf die Nachfrage beziehen und keine Anpassungen am Angebotsmodell erfolgen, ist hier nur eine gemeinsame Bilanzierung von Routenwahl- und Nachfrageeffekten möglich.

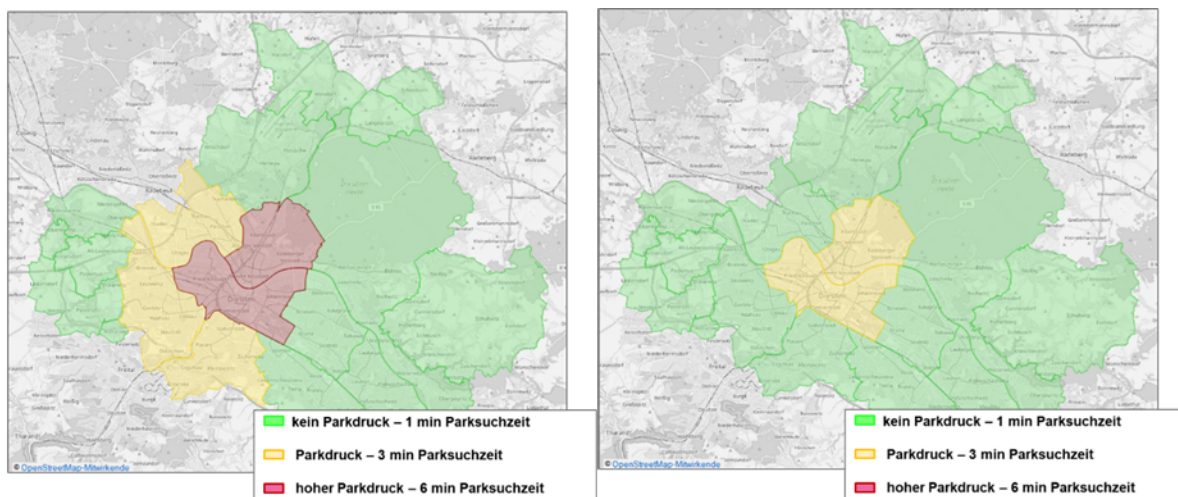
Die modellierte Maßnahme ist eine Wirkungsabschätzung, die auf Annahmen zur Parksuchzeit und zur Parksuchgeschwindigkeit beruht. Auf Grundlage einer Literaturrecherche wurden typische Wertebereiche für Parksuchzeiten und Parksuchgeschwindigkeiten angenommen. Für die Parksuchzeit wurden stark streuende Werte ermittelt. In der Folge wurden zwei Szenarien erstellt, die in Kombination eine Bandbreite der Maßnahmenwirkung abbilden:

- ▶ Optimistische Annahme: Parksuchgeschwindigkeit hoch (im Mittel 25 km/h nach Boltze et al. (1994))
- ▶ Konservative Annahme: Parksuchgeschwindigkeit niedrig (im Mittel 8 km/h nach Kipke (1993))

Für Parksuchzeit wurden folgende Werte angesetzt (basierend auf Wertebereichen aus Rikus et al. (2015) und FGSV (2009)):

- ▶ Gebiete mit hohem Parksuchdruck (im Mittel 6 min Parksuchzeit)
- ▶ Gebiete mit mittlerem Parksuchdruck (im Mittel 3 min Parksuchzeit)
- ▶ Gebiete mit niedrigem bzw. ohne Parksuchdruck (im Mittel 1 min Parksuchzeit)

Abbildung 67: Parkdruck und Parksuchzeit im Bezugsfall (links) und im Maßnahmenfall (rechts)



Quelle: eigene Darstellung, PTV Transport Consult GmbH

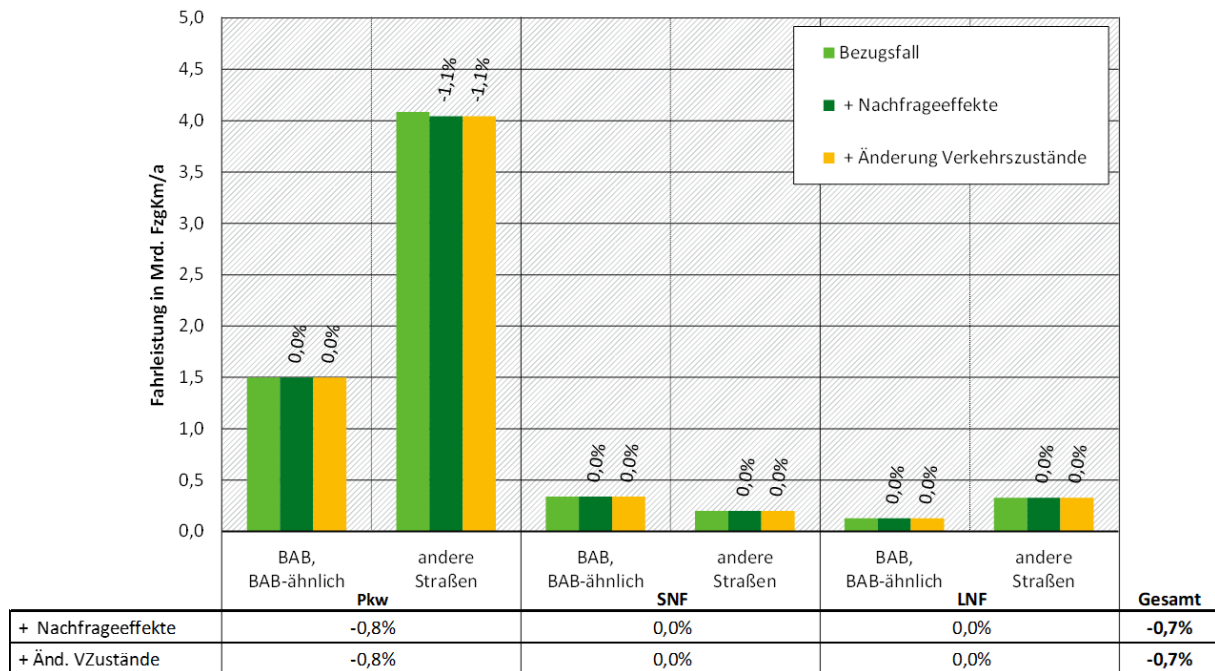
Abbildung 67 (links) zeigt, wie die Stadtbezirke der Stadt Dresden in Parksuchdruckgebiete (hoch/mittel/niedrig) des Bezugsfalls eingeteilt wurden. Anschließend wurde eine Parksuchverkehrsleistung aus der Parksuchzeit, der Parksuchgeschwindigkeit und dem Zielverkehr der jeweiligen Verkehrszellen berechnet.

Im Maßnahmenfall wurden die Gebiete mit hohem und mittlerem Parkdruck um eine Parksuchdruck-Kategorie verbessert (hoch auf mittel, mittel auf niedrig; siehe Abbildung 67 rechts). Abschließend wurde die eingesparte Fahrleistung ermittelt und auf die Verkehrsstärke des Parksuchverkehrs übertragen.

3.3.6.3 Verkehrliche Wirkungen und Schadstoffbilanzierung

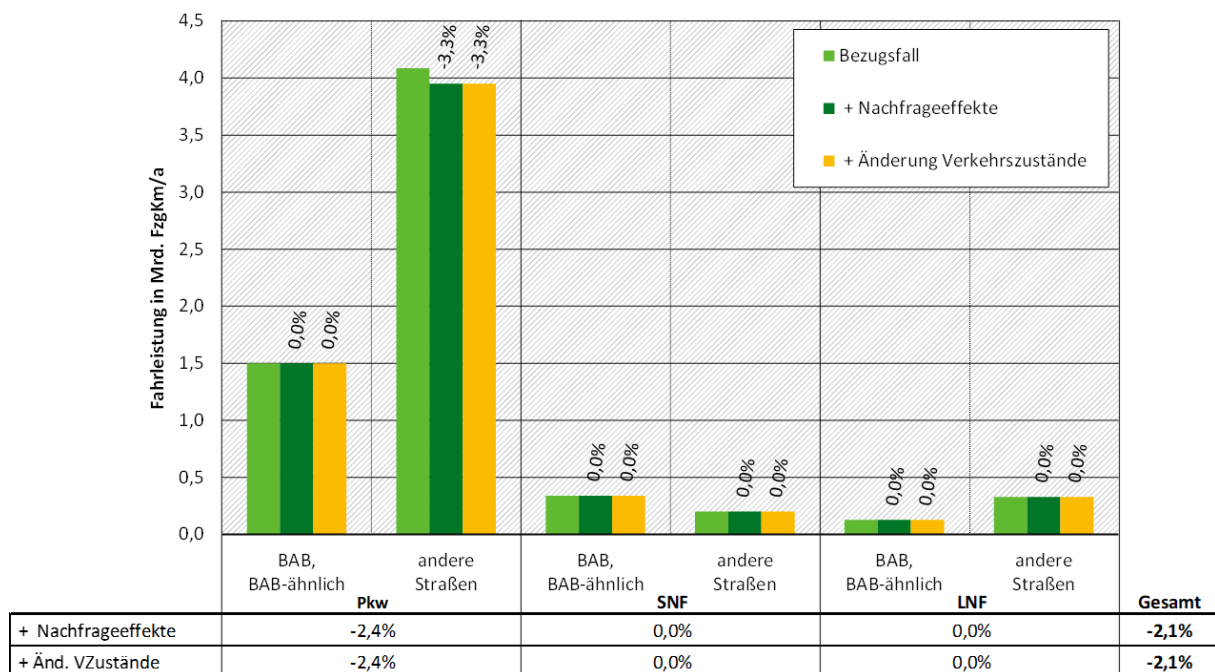
Die verkehrlichen Wirkungen dieser Maßnahme und die Wirkungen auf den Treibhausgasausstoß werden für die beiden Szenarien (optimistische bzw. konservative Annahme zur Parksuchgeschwindigkeit) in Abbildung 68 bis Abbildung 71 dargestellt. Die Abbildungen zu den Schadstoffen PM und NO_x können in Anhang (A.6.5) nachgeschlagen werden.

Abbildung 68: Wirkung der Maßnahme „Reduzierung des Parksuchverkehrs – konservative Annahme“ auf die Fahrleistung



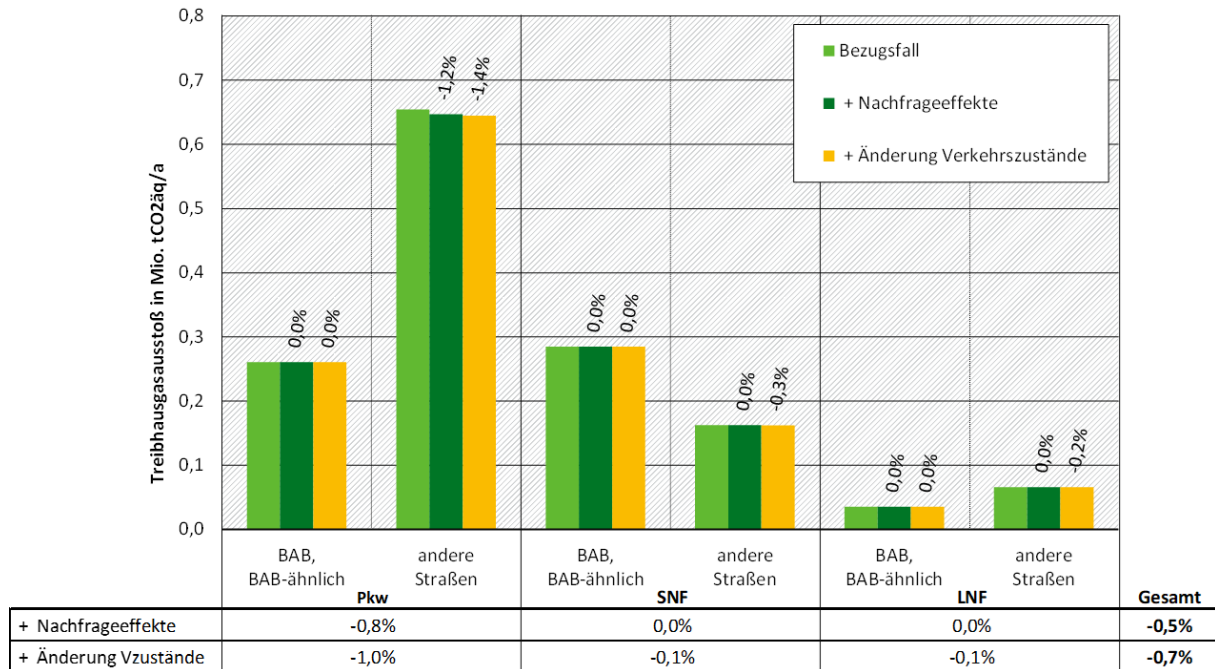
Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart

Abbildung 69: Wirkung der Maßnahme „Reduzierung des Parksuchverkehrs – optimistische Annahme“ auf die Fahrleistung



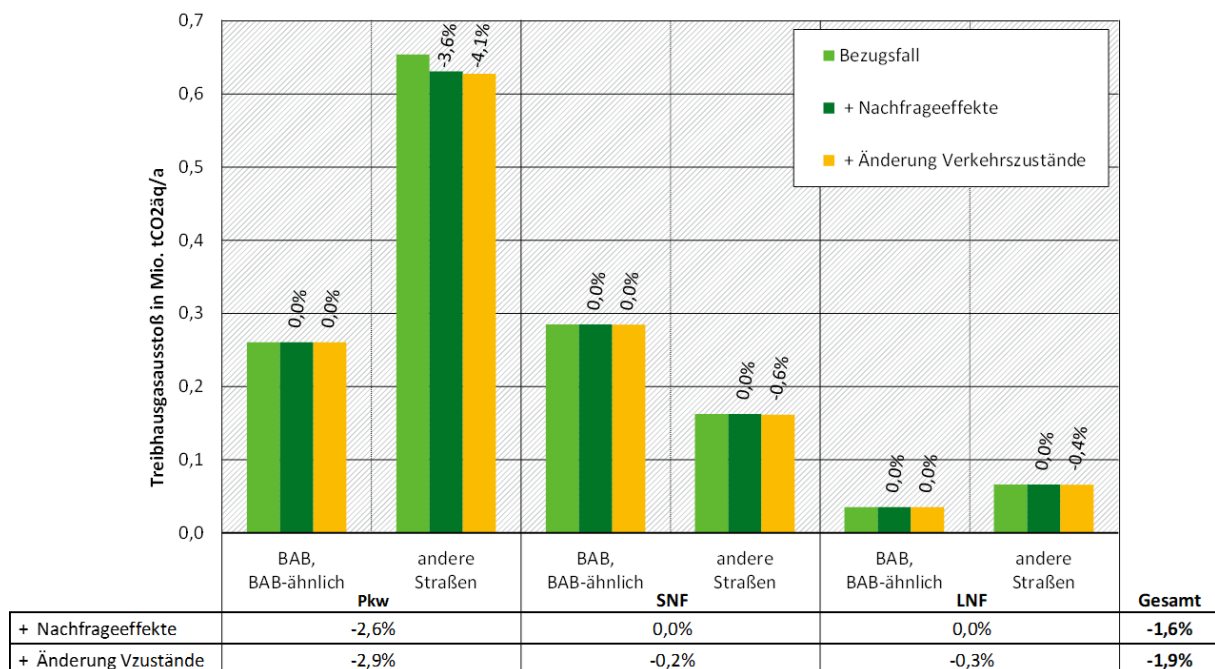
Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart

Abbildung 70: Wirkung der Maßnahme „Reduzierung des Parksuchverkehrs – konservative Annahme“ auf den Treibhausgasausstoß



Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart

Abbildung 71: Wirkung der Maßnahme „Reduzierung des Parksuchverkehrs – optimistische Annahme“ auf den Treibhausgasausstoß



Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart

► **Nachfrageeffekte**

Die Maßnahme wirkt nur auf den Pkw-Verkehr. Unter der konservativen Annahme nimmt die Fahrleistung im Untersuchungsraum der Region Dresden um 0,8 % ab, bei der optimistischen Annahme zur Parksuchgeschwindigkeit um 2,4 %. Die Änderungen finden im untergeordneten Streckennetz statt, Autobahnen und autobahnähnliche Straßen sind aufgrund der modelltechnischen Umsetzung nicht davon betroffen. Die Wirkungen auf die CO₂-Emissionen sind mit -0,8 % bzw. -2,6 % in einer gleichen Größenordnung bzw. leicht erhöht gegenüber der Fahrleistungsrückgänge, was dadurch begründet ist, dass die Fahrleistung auf Strecken, auf denen tendenziell höhere Emissionsfaktoren vorliegen (Innenstadtbereich mit schlechteren Verkehrszuständen), überproportional abnehmen.

► **Änderung Verkehrszustände**

Im Gegensatz zu den vorhergehenden Maßnahmen hat die Änderung der Verkehrszustände bei dieser Maßnahme einen höheren Anteil an der Gesamtwirkung. Dies liegt daran, dass insbesondere der Parksuchverkehr, also Verkehre mit langsamen Geschwindigkeiten vermieden werden. Bei einer angenommenen Parksuchgeschwindigkeit von 8 km/h gehen die CO₂-Emissionen des Pkw-Verkehrs um zusätzliche 0,2 % zurück, was einen Anteil an der Gesamtwirkung von rund 20 % bedeutet. Bei einer Parksuchgeschwindigkeit von 25 km/h bedeutet der zusätzliche Rückgang der Emissionen um 0,3 % im Pkw-Verkehr einen Anteil an der Gesamtwirkung von 12 %. Da die Maßnahme bei den Fahrzeugkategorien SNF und LNF modelltechnisch ausschließlich durch den Rückgang der Pkw-Fahrleistung auf die Verkehrszustände ist der Anteil der Verbesserung des Verkehrsflusses im bei Betrachtung des gesamten Straßenverkehrs sogar noch höher.

In Tabelle 78 und Tabelle 79 sind die Ergebnisse der Wirkungsberechnung unter Berücksichtigung aller Wirkungsaspekte zusammengefasst.

Tabelle 78: Zusammenfassung der Wirkungen der Maßnahme „Reduzierung des Parksuchverkehrs – konservative Annahme“

| Kenngröße | Pkw | SNF | LNF | Zusammen |
|--|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Fahrleistung | -0,8 % | 0,0 % | 0,0 % | -0,7 % |
| flüssig | +0,1 % | +0,1 % | +0,2 % | +0,1 % |
| dicht | +0,9 % | +0,4 % | +0,7 % | +0,9 % |
| gesättigt | -0,6 % | -0,3 % | -0,8 % | -0,5 % |
| Stop&Go | -5,1 % | -2,8 % | -3,9 % | -4,8 % |
| Stop&Go II | -6,2 % | -4,2 % | -3,9 % | -5,9 % |
| Fahrtzeit | -2,0 % | -0,4 % | -0,7 % | -1,8 % |
| Geschwindigkeit | +1,2 % | +0,4 % | +0,8 % | +1,1 % |
| Fahrzeit in Stop&Go-Verkehrszuständen | -6,6 % | -3,6 % | -4,1 % | -6,2 % |
| Anteil an Gesamtfahrtzeit | -4,7 % | -3,2 % | -3,4 % | -4,5 % |
| CO₂-Emissionen | -1,0 % | -0,1 % | -0,1 % | -0,7 % |
| je Fahrzeugkilometer | -0,3 % | -0,1 % | -0,1 % | -0,2 % |
| NO_x-Emissionen | -0,9 % | -0,4 % | -0,1 % | -0,7 % |
| je Fahrzeugkilometer | -0,1 % | -0,4 % | -0,1 % | -0,1 % |
| PM-Emissionen | -0,9 % | -0,3 % | -0,2 % | -0,6 % |
| je Fahrzeugkilometer | -0,1 % | -0,3 % | -0,2 % | -0,2 % |

Tabelle 79: Zusammenfassung der Wirkungen der Maßnahme „Reduzierung des Parksuchverkehrs – optimistische Annahme“

| Kenngröße | Pkw | SNF | LNF | Zusammen |
|--|----------------|---------------|---------------|----------------|
| Fahrleistung | -2,4 % | 0,0 % | 0,0 % | -2,1 % |
| flüssig | +0,3 % | +0,6 % | +0,9 % | +0,3 % |
| dicht | +1,2 % | +0,3 % | +0,6 % | +1,1 % |
| gesättigt | -0,6 % | -0,5 % | -1,6 % | -0,5 % |
| Stop&Go | -9,2 % | -4,1 % | -6,7 % | -8,6 % |
| Stop&Go II | -12,4 % | -6,6 % | -7,0 % | -11,7 % |
| Fahrtzeit | -5,0 % | -0,7 % | -1,4 % | -4,4 % |
| Geschwindigkeit | +2,7 % | +0,7 % | +1,4 % | +2,5 % |
| Fahrzeit in Stop&Go-Verkehrszuständen | -13,6 % | -5,6 % | -7,1 % | -12,6 % |
| Anteil an Gesamtfahrtzeit | -9,0 % | -4,9 % | -5,8 % | -8,5 % |
| CO₂-Emissionen | -2,9 % | -0,2 % | -0,3 % | -1,9 % |
| je Fahrzeugkilometer | -0,5 % | -0,2 % | -0,3 % | -0,5 % |
| NO_x-Emissionen | -2,5 % | -0,6 % | -0,2 % | -1,7 % |
| je Fahrzeugkilometer | -0,1 % | -0,6 % | -0,2 % | -0,1 % |
| PM-Emissionen | -2,6 % | -0,5 % | -0,3 % | -1,5 % |
| je Fahrzeugkilometer | -0,2 % | -0,5 % | -0,3 % | -0,2 % |

Da die Änderungen nur auf die beiden Wirkungsaspekte „Nachfrageeffekte“ und „Änderung Verkehrszustände“ zurückzuführen sind, sind die dargestellten Änderungen obenstehend weitestgehend erläutert. Bezogen auf den Gesamtverkehr ist der Rückgang der Emissionen bei allen Luftschadstoffen in vergleichbarer Größenordnung mit dem Fahrleistungsrückgang. Für die beiden Szenarien liegen die Werte zwischen -0,6 % oder -0,7 % (konservative Annahme) und -1,5 % und -1,9 % (optimistische Annahme). Die Gründe für den Rückgang sind bei den Emissionen jedoch unterschiedlich zu denen der Fahrleistung. Die Fahrleistung speist sich ausschließlich aus der Wirkung auf den Pkw-Verkehr. Die spezifischen Emissionen gehen dagegen auch bei LNF und SNF zurück, da sich auch für diese Fahrzeugkategorien der Verkehrsfluss verbessert. Alle Fahrzeugkategorien zusammengenommen, stellt sich ein leichter Rückgang der Emissionsfaktoren ein.

3.3.7 Fahrleistungsabhängige Pkw-Maut von 6 ct/km

3.3.7.1 Maßnahmenausgestaltung

Mit dieser Maßnahme wird die Wirkung der Einführung einer Pkw-Maut von 6 Cent pro Fahrzeugkilometer untersucht. Es wird angenommen, dass die Mautgebühr deutschlandweit auf allen Straßen gleichermaßen gilt. Die Maut ist je Fahrzeugkilometer für die Fahrzeugkategorien Pkw und LNF zu entrichten.

In der Praxis fehlen für die Einführung eines solchen Mautsystems derzeit sowohl technisch als auch rechtlich die Grundlagen. Das benötigte Gebührenerfassungssystem sollte bundesweit, besser europaweit angelegt sein, um einen Flickenteppich unterschiedlicher Ansätze zu vermeiden. Um, wie in dieser Maßnahme angenommen, das gesamte Straßennetz in die Bepreisung einzubeziehen, wäre ein satellitengestütztes System die naheliegendste Umsetzungsmöglichkeit, z.B. über den bereits geplanten European Electronic Toll Service (EETS). Eine satellitengestützte Erfassung der Fahrzeuge hat den Vorteil einer hohen Flexibilität

bei der Ausgestaltung der Nutzungsgebühren, könnte also optimal genutzt werden, um die Lenkungsfunction einer fahrleistungsbezogenen Bepreisung des Verkehrs zur Erhöhung des volkswirtschaftlichen Gesamtnutzens einzusetzen. Da dieser Aspekt hier nicht im Vordergrund steht, wurde auf eine differenzierte Ausgestaltung der Mautsätze verzichtet und der pauschale Wert von 6 ct/km gewählt.

3.3.7.2 Modelltechnische Umsetzung

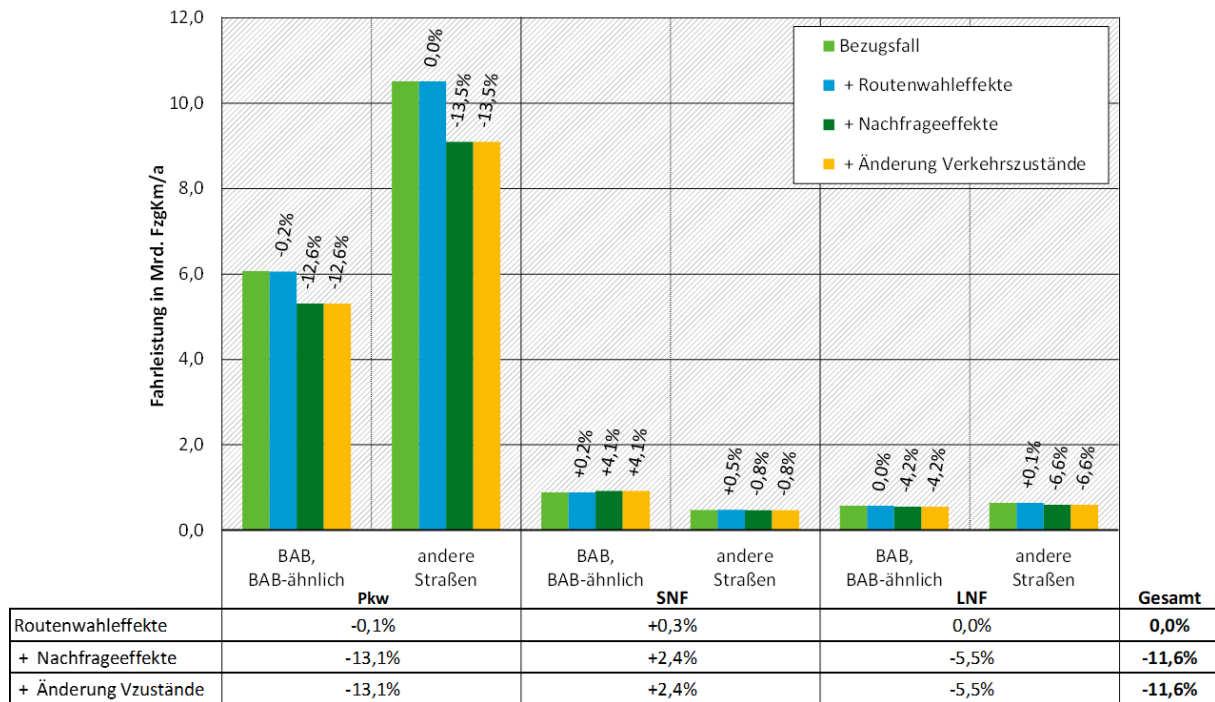
Die Bilanzierung der verkehrlichen Wirkungen erfolgte für diese Maßnahme ausschließlich im Verkehrsnachfragemodell der Region Stuttgart. In dem Modell ist sowohl für die Ziel- und Moduswahl als auch die Routenwahl eine entfernungsabhängige Kostenkomponente in den Verkehrswiderstand integriert, weshalb die zusätzlichen fahrleistungsabhängigen Kosten einfach abgebildet werden konnten.

In dem Modell wirken diese zusätzlichen Kosten bei der Ziel- und Moduswahl ausschließlich auf die Verkehre innerhalb der Region Stuttgart. Aufgrund des territorialen Bilanzierungsansatzes aller Verkehre auf der Gebietsfläche der Region spielen auch Quell- und Ziel- sowie Durchgangsverkehre eine wichtige Rolle. Da mit der Maßnahme die Wirkung einer deutschlandweiten Bepreisung durch eine Maut untersucht werden sollte, wurden diese Verkehre, die als statische externe Matrizen in das Verkehrsmodell eingehen, über einen Elastizitätenansatz angepasst. Zu diesem Zweck wurde ein luftlinienentfernungsabhängiges Pivot-Point-Modell entwickelt, das die entfernungsabhängigen Zeitkostensätze von Axhausen et al. (2015) nutzt. Das Modell wurde auf Grundlage von Fahrleistungsanteilen je Entfernungsklasse nach MiD (Infras et al. 2018) so kalibriert, dass über alle Entfernungsklassen eine fahrleistungsbezogene Preiselastizität von -0,3 für den Pkw-Verkehr erreicht wurde. Dieses Modell wurde dann auf die externen Matrizen des Verkehrsnachfragemodells angewandt.

3.3.7.3 Verkehrliche Wirkungen und Schadstoffbilanzierung

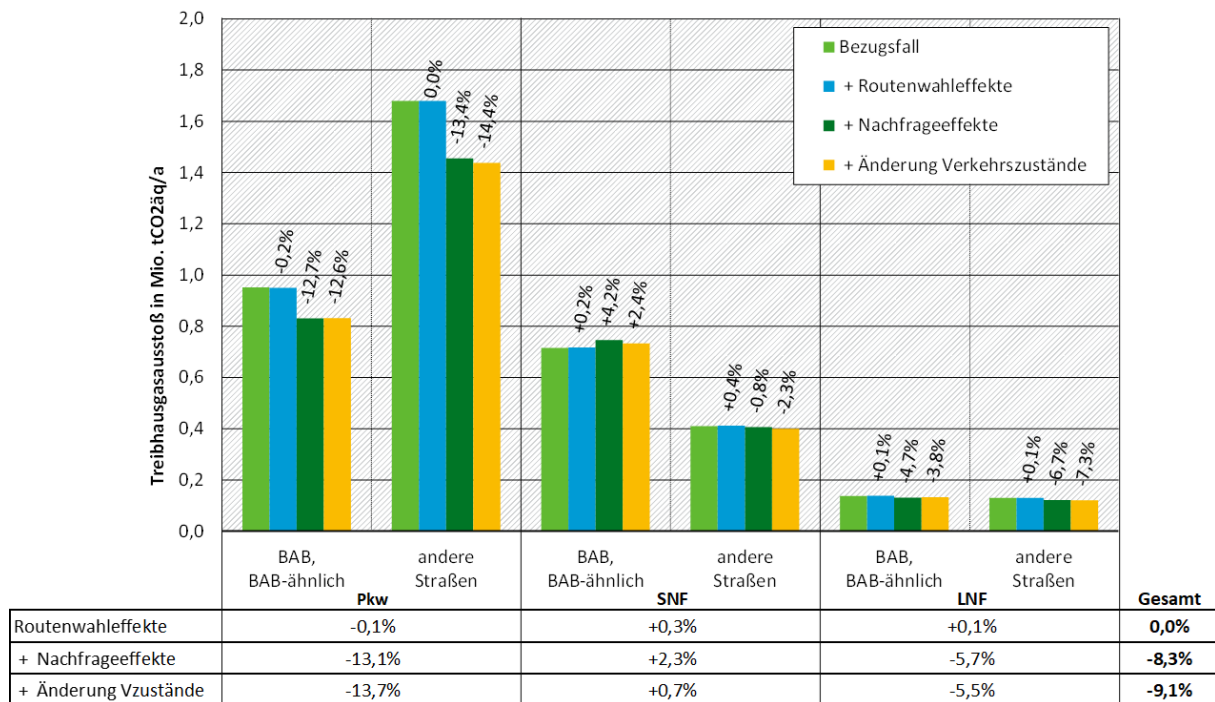
Abbildung 72 und Abbildung 73 zeigen die Maßnahmenwirkungen auf die Fahrleistungen bzw. die CO₂-Emissionen. Die Wirkungen auf die mittleren Fahrzeuggeschwindigkeiten und auf die Schadstoffe PM und NO_x werden im Anhang (A.6.6) in analoger Form abgebildet.

Abbildung 72: Wirkung der Maßnahme „Fahrleistungsabhängige Pkw-Maut von 6 ct/km“ auf die Fahrleistung



Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart

Abbildung 73: Wirkung der Maßnahme „Fahrleistungsabhängige Pkw-Maut von 6 ct/km“ auf den Treibhausgasausstoß



Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart

Im Folgenden wird auf die einzelnen Wirkungsaspekte eingegangen:

► **Routenwahleffekte**

Der Einfluss auf die Fahrleistung ist gering, da die Höhe der fahrleistungsabhängigen Maut auf allen Stecken gleich ist. Dadurch, dass die Maßnahme kaum Auswirkungen auf die Routenwahl hat, entstehen auch nur sehr geringe Änderungen der CO₂-Emissionen.

► **Nachfrageeffekte**

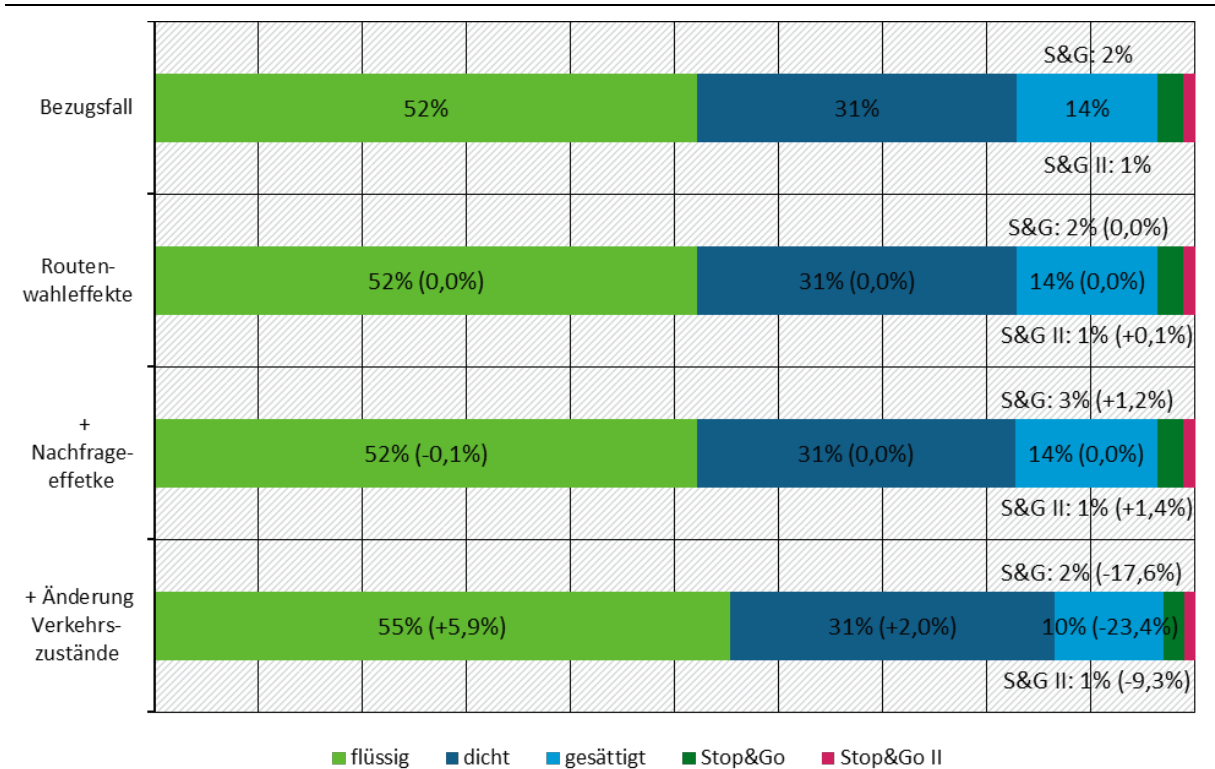
Im Pkw-Verkehr geht die Fahrleistung auf Autobahnen und anderen Straßen gleichermaßen deutlich zurück. Bei LNF ist der Rückgang ebenfalls wahrnehmbar, da bei Wirtschaftsverkehren die Preissensitivität jedoch geringer als im privaten Personenverkehr ist, ist die Wirkung auf die Fahrleistung im Vergleich zum Pkw-Verkehr weniger stark. Die Fahrleistung der SNF, die von der Maßnahme nicht direkt betroffen sind, nimmt im Untersuchungsgebiet zu. Die Zunahme findet auf den Autobahnen statt, im übrigen Streckennetz gibt es einen leichten Fahrleistungsrückgang. Dieser Effekt resultiert aus dem Rückgang der Auslastung auf den stark befahrenen Autobahnabschnitten um Stuttgart. Die Zunahme des SNF-Verkehrs resultiert daraus, dass Routen über diese Streckenabschnitte für Durchgangsverkehre im Vergleich zu Alternativrouten, die außerhalb des bilanzierten Gebietes liegen (z.B. A6), Zeitvorteile erlangen.

Da die Nachfrageeffekte gleichmäßig im Netz verteilt sind, sind die Änderungen der CO₂-Emissionen für die einzelnen Fahrzeugkategorien nahezu identisch zu den Änderungen der Fahrleistungen. Die Gesamtwirkung auf die Emissionen ist aufgrund der höheren Anteile der SNF, bei denen die Maßnahme im Untersuchungsraum kontraproduktiv wirkt, im Vergleich zu den Fahrleistungsänderungen, geringer.

► **Änderung Verkehrszustände**

Ebenso wie bei der Maßnahme „Erhöhung des Besetzungsgrades“ verändern sich aufgrund des deutlichen Fahrleistungsrückgangs die Verkehrszustände wahrnehmbar. Die Wirkung wird in Abbildung 74 dargestellt. Stop&Go-Verkehre und gesättigter Verkehr nehmen anteilig stark ab. Im Vergleich zum Fahrleistungsrückgang selbst führt dies jedoch auch nur zu einem leichten Rückgang der CO₂-Emissionen. Beim Pkw-Verkehr macht der Anteil der Verbesserung der Verkehrszustände an den eingesparten Gesamtemissionen nur zwischen 4 % und 5 % aus. Da die SNF nur indirekt betroffen sind und die Verkehrszunahme im Untersuchungsraum hier sogar zu einer Steigerung der Emissionen führt, ist der Anteil am Emissionsrückgang über alle Fahrzeugkategorien mit rund 9 % auch bei dieser Maßnahme höher (Erhöhung des Rückgangs auf 9,1 % gegenüber dem vorherigen Schritt von 8,3 %).

Abbildung 74: Fahrleistung je Verkehrszustand der Maßnahme „Fahrleistungsabhängige Pkw-Maut von 6 ct/km“



Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart

In Tabelle 80 sind die Ergebnisse der Wirkungsberechnung unter Berücksichtigung aller Wirkungsaspekte zusammengefasst. Die Geschwindigkeit im Netz nimmt aufgrund der geringeren Auslastungen in Summe um 3,4 % zu. Die Emissionsrückgänge sind bei den Fahrzeugkategorien Pkw und LNF für alle betrachteten Luftschadstoffe in einer vergleichbaren Größenordnung. Die Rückgänge werden durch die Minderung der Fahrleistung bestimmt, die spezifischen Emissionsfaktoren nehmen aufgrund der Auslastungseffekte nur in begrenztem Maß in einem Wertebereich unter 1 % ab. Bei den SNF sind die Effekte weniger eindeutig. Während die CO₂-Emissionen zunehmen, gehen die Emissionen von NO_x und PM aufgrund stärker sinkender Emissionsfaktoren absolut zurück.

Tabelle 80: Zusammenfassung der Wirkungen der Maßnahme „Fahrleistungsabhängige Pkw-Maut von 6 ct/km“

| Kenngroße | Pkw | SNF | LNF | Zusammen |
|--|----------------|----------------|---------------|----------------|
| Fahrleistung | -13,1 % | +2,4 % | -5,5 % | -11,6 % |
| flüssig | +6,2 % | +5,2 % | +0,4 % | +5,9 % |
| dicht | +1,5 % | +5,5 % | -0,4 % | +2,0 % |
| gesättigt | -24,0 % | -20,4 % | -0,8 % | -23,4 % |
| Stop&Go | -17,4 % | -18,8 % | +0,6 % | -17,6 % |
| Stop&Go II | -8,5 % | -13,6 % | +1,2 % | -9,3 % |
| Fahrtzeit | -15,9 % | -1,5 % | -5,5 % | -14,5 % |
| Geschwindigkeit | +3,2 % | +4,0 % | +0,1 % | +3,1 % |
| Fahrzeit in Stop&Go-Verkehrszuständen | -23,7 % | -14,4 % | -4,6 % | -22,9 % |
| Anteil an Gesamtfahrtzeit | -9,3 % | -13 % | +1,0 % | -9,9 % |
| CO₂-Emissionen | -13,7 % | +0,7 % | -5,7 % | -9,1 % |
| je Fahrzeugkilometer | -0,7 % | -1,7 % | -0,2 % | -0,7 % |
| NO_x-Emissionen | -13,6 % | -1,8 % | -5,8 % | -9,9 % |
| je Fahrzeugkilometer | -0,5 % | -4,1 % | -0,4 % | -0,8 % |
| PM-Emissionen | -13,5 % | -0,1 % | -5,8 % | -8,4 % |
| je Fahrzeugkilometer | -0,5 % | -2,4 % | -0,3 % | -0,6 % |

3.3.8 Optimierung des MIV-Verkehrsflusses an LSA-Knotenpunkten im Innerortsbereich

3.3.8.1 Maßnahmenausgestaltung

Der Maßnahme „Optimierung des MIV-Verkehrsflusses an LSA-Knotenpunkten im Innerortsbereich“ liegt die Annahme zugrunde, dass an den vorhandenen Lichtsignalanlagen ein bislang nicht genutztes Optimierungspotenzial vorhanden ist, welches durch eine bessere Koordinierung der Anlagen ausgeschöpft werden kann. In Hinblick auf die modelltechnische Umsetzung der Maßnahme wird diese Annahme hier so interpretiert, dass das Ziel der Maßnahme in einer Reduzierung der Haltevorgänge und einer Verkürzung der Wartezeiten für den Kfz-Verkehr besteht. Unberücksichtigt bleiben dabei die in der Realität zu erwartenden negativen Auswirkungen auf den öffentlichen Personenverkehr sowie den Fuß- und Radverkehr.

3.3.8.2 Modelltechnische Umsetzung

Um diese Maßnahme zu modellieren, wurde zunächst ermittelt, wie groß das mögliche Verbesserungspotenzial für den Kfz-Verkehr ist. Dazu wurden drei Streckenzüge in Dresden ausgewählt, im Zuge derer mehrere koordinierte Lichtsignalanlagen vorhanden sind. Für diese Streckenzüge wurden mikroskopische Simulationsmodelle aufgebaut, anhand derer die Qualität der vorhandenen Steuerungen überprüft und Verbesserungsmöglichkeiten für den Kfz-Verkehr betrachtet werden konnten. Die erforderlichen Grundlagen für die Simulationsmodelle wurden in Form von Lage- und Signalzeitenplänen durch das Straßen- und Tiefbauamt der Stadt Dresden bereitgestellt. Weiterhin wurde in diesem Zusammenhang auch ein Expertengespräch geführt. Ziel war zu ermitteln, wie das vorhandene Verbesserungspotenzial von den Experten vor Ort eingeschätzt wird und in welchem Umfang die dargestellte Annahme eines nicht erschlossenen Optimierungspotenzials bestätigt wird. Das Experteninterview ergab, dass das Optimierungspotenzial als gering angesehen wird. Ein Großteil der Anlagen ist bereits jetzt für

den Kfz-Verkehr optimiert. Dabei ist zu beachten, dass häufig auch andere Optimierungsziele bzw. Erfordernisse, wie die Priorisierung des ÖPNV sowie die Sicherheit und Qualität des nicht motorisierten Verkehrs, einer weiteren Verbesserung des Verkehrsablaufs im Kfz-Verkehr entgegenstehen. Diese Aussagen wurden durch die mikroskopischen Simulationen weitgehend bestätigt.

Die mikroskopischen Verkehrsflusssimulationen wurde für die drei konkreten Streckenzüge der Coventrystraße, der Meißner Landstraße und der Karcherallee in Dresden innerhalb der Simulationssoftware VISSIM aufgebaut. Durch Mehrfachsimulationen wurden verkehrliche und emissionstechnische Indikatoren ermitteln, wobei die verkehrlichen Indikatoren direkt aus den Verkehrsflusssimulationen stammen und die emissionstechnischen Indikatoren aus PHEM-Berechnungen der aus VISSIM stammenden Fahrzeugtrajektorien anhand der Fahrzeugprotokolle ermittelt wurden. In Tabelle 81, Tabelle 82 und Tabelle 83 werden die emissionstechnischen Einsparungspotenziale der drei konkreten Streckenzüge für beide Fahrtrichtungen gezeigt, welche durch die Optimierung des MIV-Verkehrsflusses an LSA-Knotenpunkten erzielt werden können. In der Karcherallee liegt das Einsparungspotenzial von CO₂, NO_x und PM im Bereich von 3,3 % bis 6,2 %. In der Coventrystraße lässt sich ein geringeres Einsparungspotenzial ermitteln, welches im Bereich von 1,2 % bis 3,7 % liegt. Auch die absoluten Emissionswerte sind für die Coventrystraße am geringsten. In der Meißner Landstraße konnten simulationstechnisch Emissionseinsparungen zwischen 0,4 % und 4,8 % ermittelt werden.

Tabelle 81: Emissionstechnische PHEM-Berechnungsergebnisse der Karcherallee

| Schadstoff | Routen | Emissionsfaktoren in g/km | | | Rel. Abweichung |
|-----------------|---|---------------------------|-----------|-----------|-----------------|
| | | Status Quo | Optimiert | Differenz | |
| CO ₂ | Reicker Straße - Bertolt- Brecht- Allee | 272,73 | 262,01 | 10,72 | 3,9 % |
| CO ₂ | Stübelallee - Reicker Straße | 262,69 | 248,19 | 14,50 | 5,5 % |
| NO _x | Reicker Straße - Bertolt- Brecht- Allee | 0,8151 | 0,7882 | 0,0269 | 3,3 % |
| NO _x | Stübelallee - Reicker Straße | 0,7489 | 0,7212 | 0,0278 | 3,7 % |
| PM | Reicker Straße - Bertolt- Brecht- Allee | 0,0069 | 0,0065 | 0,0004 | 6,2 % |
| PM | Stübelallee - Reicker Straße | 0,0078 | 0,0074 | 0,0004 | 5,2 % |

Tabelle 82: Emissionstechnische PHEM-Berechnungsergebnisse der Coventrystraße

| Schadstoff | Routen | Emissionsfaktoren in g/km | | | Rel. Abweichung |
|-----------------|-------------------------------------|---------------------------|-----------|-----------|-----------------|
| | | Status Quo | Optimiert | Differenz | |
| CO ₂ | Kesselsdorferstraße - Bramschtunnel | 215,98 | 212,69 | 3,29 | 1,5 % |
| CO ₂ | Bramschtunnel - Kesselsdorferstraße | 223,12 | 219,37 | 3,75 | 1,7 % |
| NO _x | Kesselsdorferstraße - Bramschtunnel | 0,5149 | 0,5062 | 0,009 | 1,7 % |
| NO _x | Bramschtunnel - Kesselsdorferstraße | 0,5575 | 0,5368 | 0,021 | 3,7 % |
| PM | Kesselsdorferstraße - Bramschtunnel | 0,0054 | 0,0052 | 0,0001 | 2,7 % |
| PM | Bramschtunnel - Kesselsdorferstraße | 0,0056 | 0,0055 | 0,0001 | 1,2 % |

Tabelle 83: Emissionstechnische PHEM-Berechnungsergebnisse der Meißner Landstraße

| Schadstoff | Routen | Emissionsfaktoren in g/km | | | Rel. Abweichung |
|-----------------|--------------------------------------|---------------------------|-----------|-----------|-----------------|
| | | Status Quo | Optimiert | Differenz | |
| CO ₂ | Meißner Landstraße - Warthaer Straße | 271,17 | 262,45 | 8,72 | 3,2% |
| CO ₂ | Warthaer Straße - Meißner Landstraße | 282,14 | 271,12 | 11,03 | 3,9% |
| NO _x | Meißner Landstraße - Warthaer Straße | 0,7218 | 0,6958 | 0,0259 | 3,6% |
| NO _x | Warthaer Straße - Meißner Landstraße | 0,7824 | 0,7445 | 0,0379 | 4,8% |
| PM | Meißner Landstraße - Warthaer Straße | 0,0064 | 0,0064 | 0,0000 | 0,4% |
| PM | Warthaer Straße - Meißner Landstraße | 0,0067 | 0,0064 | 0,0003 | 4,5% |

Aus den gezeigten Emissionseinsparungspotenziale der drei konkreten Dresdner Streckenzüge wurden mittlere Einsparpotenziale für je eine Überfahrt eines LSA-Knotens abgeleitet. Die Werte sind zwischen Pkw/LNF und SNF unterschieden und in Tabelle 84 wiedergegeben. Diese Einsparpotenziale werden in den weiteren makroskopischen Betrachtungen als LSA-Emissionszuschläge an den Knotenpunkten mit LSA berücksichtigt.

Tabelle 84: Einsparpotenziale für eine Überfahrt eines durchschnittlichen LSA-Knotens

| Schadstoff | Emissionen in g | |
|-----------------|-----------------|----------|
| | Pkw / LNF | SNF |
| CO ₂ | 2,01 | 36,46 |
| NO _x | 0,0032 | 0,1439 |
| PM | 0,000032 | 0,001300 |

Seitens der verkehrlichen Verbesserungsindikatoren wurde für die betrachteten Lichtsignalanlagen lediglich eine geringe Verbesserungsmöglichkeit von rund 5 s der Reisezeit bzw. Verlustzeiteinsparung je LSA-Knotenpunkt ermittelt. Unberücksichtigt bleiben dabei die

ggf. negativen Folgewirkungen für den ÖPNV sowie den nicht motorisierten Verkehr. Weiterhin konnte auf der Grundlage der vorliegenden Informationen nicht abgeschätzt werden, ob die festgestellte Einsparung auf alle Lichtsignalanlagen in Dresden übertragen werden kann. Da keine praktische Ableitung des in Dresden vorhandenen Optimierungspotenzials möglich war, wurde festgelegt, eine Spannweitenbetrachtung durchzuführen. Diese sollte einen fiktiven Maßnahmenfall, mit netzweiter Optimierung aller LSA-Steuerungen für den Kfz-Verkehr abbilden und ihm einem ebenfalls fiktiven, nicht optimierten Bezugsfall gegenüberstellen.

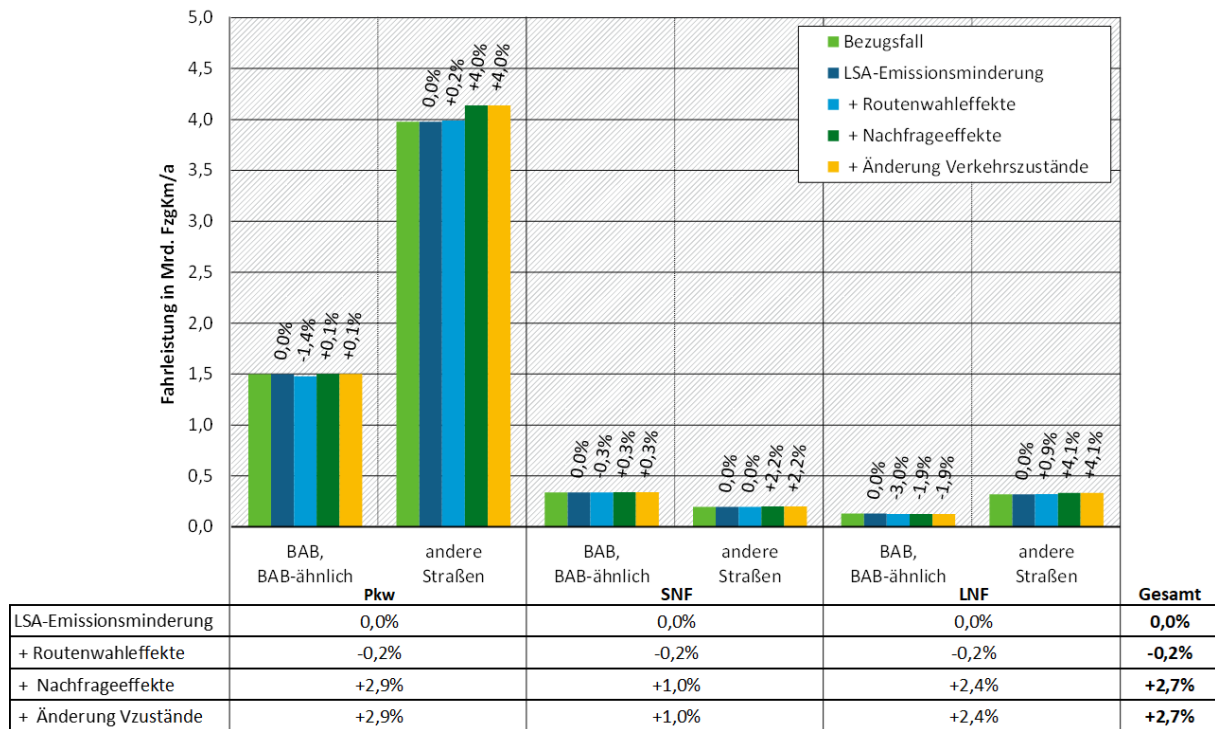
Für den optimierten Maßnahmenfall wurde festgelegt, dass im Vergleich zum vorliegenden Analysemodell der Region Dresden an allen Lichtsignalanlagen eine Reduzierung der Verlustzeiten um 5 s möglich ist. Der nicht optimierte Bezugsfall berücksichtigt, dass die Verlustzeiten an den Lichtsignalanlagen im Vergleich zum optimierten Maßnahmenfall 15 s höher sind. Dies entspricht in der Praxis in etwa dem Unterschied einer Qualitätsstufe des Verkehrsablaufs.

Mittels des Verkehrsnachfragemodells der Region Dresden wurde zunächst der fiktive Bezugsfall hergestellt. Dazu wurde unter Berücksichtigung des angepassten Angebotsmodells für den Kfz-Verkehr ein vollständiger Modelldurchlauf berechnet. Ausgehend vom neu berechneten Bezugsfall wurde in einem ersten Schritt die alleinige Wirkung der im Maßnahmenfall unterstellten Angebotsänderungen auf die Routenwahl berechnet. Im Anschluss wurde in einem zweiten Schritt ein vollständiger Modelldurchlauf für den Maßnahmenfall durchgeführt und die Auswirkungen der Routenwahl- und Nachfrageeffekte ermittelt.

3.3.8.3 Verkehrliche Wirkungen und Schadstoffbilanzierung

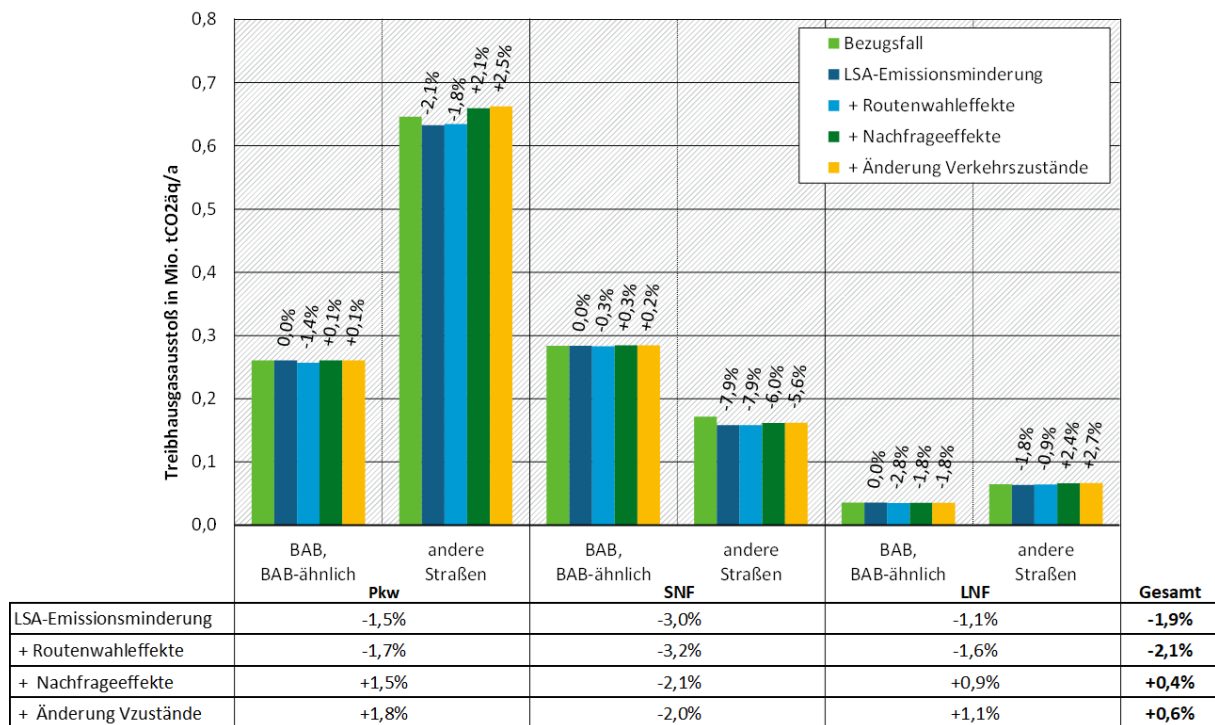
Abbildung 75 zeigen die Maßnahmenwirkungen auf die Fahrleistungen bzw. die CO₂-Emissionen. Die Wirkungen auf die mittleren Fahrzeuggeschwindigkeiten und auf die Schadstoffe PM und NO_x werden im Anhang (A.6.7) in analoger Form abgebildet.

Abbildung 75: Wirkung der Maßnahme „Optimierung des MIV-Verkehrsflusses an LSA-Knotenpunkten im Innerortsbereich“ auf die Fahrleistung



Quelle: eigene Abbildung, ISV Universität Stuttgart

Abbildung 76: Wirkung der Maßnahme „Optimierung des MIV-Verkehrsflusses an LSA-Knotenpunkten im Innerortsbereich“ auf den Treibhausgasausstoß



Quelle: eigene Abbildung, ISV Universität Stuttgart

Im Folgenden wird auf die einzelnen Wirkungsaspekte eingegangen:

► **LSA-Emissionsminderung**

Durch die Berücksichtigung der LSA-Emissionszuschläge, welche sich auf den Ergebnissen der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation stützen, kommt es in diesem Modellierungsschritt noch nicht zu einer Änderung der Fahrleistung. Durch die Optimierung des MIV-Verkehrsflusses können CO₂-Emissionen im einstelligen Prozentbereich eingespart werden. Das größte Einsparungspotenzial liegt hierbei bei den SNF, da diese bei einer Reduktion der Anfahrvorgänge an den Haltelinien der Lichtsignalanlagen um 3,0 % weniger CO₂ Emissionen aufweisen. Für Pkw liegt dieses Einsparungspotenzial bei 1,5 %, für LNF bei 1,1 %.

► **Routenwahleffekte**

Die Verlagerungen durch Routenwahleffekte ist in Punkto der Fahrleistung nur marginal und liegt bei einer Reduktion von 0,2 % der Fahrleistung von Pkw, SNF und LNF. Durch die Verflüssigung auf den signalisierten Streckenzügen, werden geringfügige Effekte der Fahrleistung bei der Routenwahl erzielt. Die Routenwahleffekte begründen sich auf der Reduktion der Fahrleistung auf dem BAB und BAB-ähnlichen Streckensegmenten. Diese geringfügigen Effekte lassen sich auch in den Ergebnissen der CO₂-Emissionen erkennen. In Kombination der LSA-Emissionsminderung und der Routenwahleffekte lassen sich beim Pkw 1,7 % der CO₂-Emissionen einsparen. Aufgrund der höheren Einsparungen bei SNF ergibt sich in Summe über alle Fahrzeugkategorien ein Einsparpotenzial von 2,1 %.

► **Nachfrageeffekte**

Die Modellierung der Nachfrageeffekte zeigt, dass bei dieser Maßnahme mit einem deutlichen Rebound-Effekt gerechnet werden muss. Die Pkw-Nachfrage nimmt um 2,9 % zu, bei LNF erhöht sich die Fahrleistung um 2,4 % und bei SNF um 1,0 %. Die Fahrleistungszunahmen sind hier auf den urbanen Streckensegmenten erkennbar. Durch diese merkliche Zunahme der Fahrleistungen wird auch die Bilanz der CO₂-Emissionen gedreht. Die zuvor beschriebene Reduktion der CO₂-Emissionen durch die LSA-Emissionsminderungen und die Routenwahleffekte, wird durch die erhöhte Fahrleistung subsummiert und die CO₂-Emissionen des Pkw-Verkehrs weist nun eine Zunahme von +1,5 % auf. Auch bei den LNF ist ein ähnliches Resultat erkennbar (+0,9 %). Lediglich die Bilanz bei den SNF zeigt weiterhin eine Reduktion der CO₂-Emissionen (-2,1 %).

► **Änderung Verkehrszustände**

Da die Fahrleistung aufgrund des Rebound-Effekts in Summe zunimmt, erhöhen sich auslastungsbedingt auch die Auslastungen, was zu schlechteren Verkehrszuständen führt. Der negative Effekt der Maßnahme wird noch einmal leicht erhöht, die CO₂-Emissionen steigen in Summe über alle Fahrzeugkategorien um 0,6 % an.

In Tabelle 85 sind die Ergebnisse der Wirkungsberechnung unter Berücksichtigung aller Wirkungsaspekte zusammengefasst. Bezüglich der dargestellten Werten gilt, dass diese – im Gegensatz zu den bisher beschriebenen Maßnahmen, bei denen die HBEFA-Verkehrszustände und die daraus abgeleiteten Kenngrößen direkt mit der in Kapitel 3.3.1.4 beschriebenen Methode berechnet werden konnten – ausschließlich eine Schätzung darstellen, die auf den Fahrzeiteinsparungen an den Knotenpunkten beruht. Die Anteile der Verkehrszustände wurden dafür so verändert, dass die neue Gesamtfahrzeit sowie die modellbasiert ermittelte Gesamtreiseweite eingehalten werden. Dazu wurden die Anteile der Stop&-Go-Verkehre um rund 30 % und der Anteil des gesättigten Verkehrs um rund 10 % gesenkt und der flüssige und dichte Verkehr anteilig gleichermaßen erhöht, um die Fahrleistung in Summe zu reproduzieren.

Tabelle 85: Zusammenfassung der Wirkungen der Maßnahme „Optimierung des MIV-Verkehrsflusses an LSA-Knotenpunkten im Innerortsbereich“

| Kenngröße | Pkw | SNF | LNF | Zusammen |
|--|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Fahrleistung | +2,9 % | +1,0 % | +2,4 % | +2,7 % |
| flüssig | +4,6 % | +5,9 % | +5,4 % | +4,9 % |
| dicht | +4,1 % | +6,1 % | -4,0 % | +4,2 % |
| gesättigt | -10,3 % | -8,8 % | -10,4 % | -10,0 % |
| Stop&Go | -30,4 % | -33,5 % | +30,6 % | -30,6 % |
| Stop&Go II | -29,2 % | -31,0 % | +28,7 % | -29,1 % |
| Fahrzeit | -1,7 % | -4,3 % | -2,8 % | -2,0 % |
| Geschwindigkeit | +4,7 % | +5,5 % | +5,4 % | +4,8 % |
| Fahrzeit in Stop&Go-Verkehrszuständen | -27,1 % | -31,9 % | +27,6 % | -27,4 % |
| Anteil an Gesamtfahrzeit | -25,8 % | -28,9 % | -25,5 % | -25,9 % |
| CO₂-Emissionen | +1,8 % | -2,0 % | +1,1 % | +0,6 % |
| je Fahrzeugkilometer | -1,1 % | -2,9 % | -1,3 % | -1,2 % |
| NO_x-Emissionen | +1,9 % | -3,7 % | +1,2 % | +0,3 % |
| je Fahrzeugkilometer | -1,0 % | -4,7 % | -1,2 % | -1,3 % |
| PM-Emissionen | +1,9 % | -2,3 % | +1,9 % | +0,6 % |
| je Fahrzeugkilometer | -1,0 % | -3,3 % | -0,5 % | -1,1 % |

Anmerkung: Die Änderungen der Verkehrszustandsanteile, die Fahrzeiten sowie die Fahrzeiten im Stop&Go-Verkehr sind auf Grundlage der HBEFA-Verkehrszustände im Bezugsfall sowie der Minderung der Fahrzeiten an den Knotenpunkten abgeschätzt.

Die unter den beschriebenen Annahmen berechneten Änderungen zeigen, dass die Fahrzeit aufgrund der Maßnahme in Summe leicht abnimmt. Die Netzgeschwindigkeit erhöht sich für den MIV um rund 5 %. Der Anteil des Verkehrs in Stop&Go-Verkehrszuständen nimmt aufgrund der Maßnahme deutlich ab, da die im hypothetischen Bezugsfall sehr hohen Wartezeiten an den LSA-gesteuerten Knotenpunkten stark gemindert werden. Die Emissionswirkung ist bei NO_x und PM mit der bereits beschriebenen Wirkung auf den Ausstoß von CO₂ vergleichbar. Unter Betrachtung aller modellierten Fahrzeugkategorien gehen die spezifischen Emissionsfaktoren zwar um etwas über 1 % zurück, dieser Effekt wird aber durch die Zunahme der Fahrleistung – also den Rebound-Effekt – vollkommen absorbiert, was insgesamt sogar zu einer leichten Zunahme bei den Gesamtemissionen führt.

3.4 Handlungsempfehlungen zu Verstetigungsmaßnahmen

3.4.1 Verkehrliche Maßnahmen und deren Wirkung auf den Verkehrsfluss

Verkehrsplanerische und -politische Maßnahmen werden häufig mit dem Ziel der Verstetigung des Verkehrs begründet. Im Folgenden werden die Erkenntnisse zu diesem Maßnahmenziel, die aus dieser Arbeit entstanden sind, zusammengefasst und daraus Handlungsempfehlungen abgeleitet. Dabei ist es zunächst wichtig, den Begriff der Verstetigung, das Ziel der Verstetigung und die Maßnahmenwirkung der Verstetigung einzuordnen:

- ▶ Unter einer Verstetigung des Verkehrs wird das Erreichen eines gleichmäßigeren Verkehrsflusses verstanden, also weniger Beschleunigungs- und Abbremsvorgänge.
- ▶ Wesentliches Ziel einer Verstetigung ist eine Verringerung der Emissionsfaktoren (Luftschadstoff- bzw. Treibhausgasausstoß je Fahrzeugkilometer). Weitere Ziele einer Verstetigung sind die Reduzierung von Verkehrszusammenbrüchen und die Verbesserung der Verkehrssicherheit.
- ▶ Da viele verkehrliche Maßnahmen einen Einfluss auf den Verkehrsfluss haben (beispielsweise über die Änderung der Auslastung einer Strecke bzw. eines Knotenpunktes oder über die Änderung des Fahrverhaltens durch ordnungspolitische Maßnahmen wie Geschwindigkeitsbeschränkungen) ist die Abgrenzung oft schwierig. Als klassische Maßnahmen der Verstetigung gelten verkehrstechnische Maßnahmen, die die Geschwindigkeit oder die Kapazität beeinflussen. Da Verstetigungseffekte auch bei anderen Maßnahmen auftreten können, wurden in dieser Arbeit alle Maßnahmen, die solche Effekte vermuten lassen, in die Betrachtung aufgenommen.

Nebenwirkung von Verstetigungsmaßnahmen: Zunahme der mittleren Geschwindigkeit

Die Aussage, dass eine Verstetigung des Verkehrs immer zu niedrigeren Emissionen führt, gilt nur bei einer vergleichbaren mittleren Geschwindigkeit. Eine Maßnahme zur Verstetigung des Verkehrsflusses, die gleichzeitig zu einer Änderung der mittleren Geschwindigkeit führt, ist nicht zwangsläufig mit einem Emissionsrückgang verbunden. Dies hat zwei Gründe:

- 1) Eine höhere Fahrgeschwindigkeit führt zu einer geringeren Reisezeit. Dadurch wird das betroffene Verkehrsmittel attraktiver und die Nachfrage für dieses Verkehrsmittels steigt. Der durch die Verstetigung erzielten Minderung der spezifischen Emissionsfaktoren steht dann eine Zunahme der Fahrleistung gegenüber. Bei Verstetigungsmaßnahmen wird dieser Effekt als Rebound-Effekt bezeichnet.
- 2) Eine veränderte Fahrgeschwindigkeit führt zu veränderten Emissionsfaktoren. Insbesondere bei sehr hohen Geschwindigkeiten nimmt der Verbrauch und damit die Emissionsfaktoren überproportional zu. Eine geringere Auslastung auf einer Autobahn ohne Geschwindigkeitsbeschränkung führt zwar zu einem besseren Verkehrsfluss, jedoch nimmt auch die mittlere Geschwindigkeit zu, da die Verkehrsteilnehmenden schneller fahren können. Dadurch steigen die Emissionsfaktoren im Mittel an. Auch geringere mittlere Geschwindigkeiten können zu einem höheren Verbrauch führen. Das ist der Fall, wenn die Fahrzeuge nicht im optimalen Lastbereich des Motors fahren können.

Für die Wirkungen verkehrlicher Maßnahmen im Bereich des Klimaschutzes und der Luftreinhaltung sind also zwei Größen ausschlaggebend: Fahrleistung und Emissionsfaktoren. Durch multiplikative Verknüpfung der beiden Größen ergeben sich die Gesamtemissionen.

Im Rahmen der Arbeit wurde eine möglichst vollständige Sammlung verkehrlicher Maßnahmen erstellt, die sich auf den Verkehrsfluss auswirken. Diese Maßnahmen wurden nach ihren primären Wirkmechanismen kategorisiert und qualitativ hinsichtlich der Wirkungen auf die beiden Einflussgrößen Fahrleistung und Emissionsfaktoren bewertet. Für die Bewertung der Wirksamkeit von Maßnahmen zur Emissionsminderung muss zwischen den Feldern Klimaschutz und Luftreinhaltung unterschieden werden. Luftreinhaltungsmaßnahmen zielen auf eine Verbesserung der lokalen Luftqualität ab. Zur Minderung der Luftschadstoffbelastungen an Hotspots kann eine Zunahme der Belastungen in wenig belasteten bzw. weniger sensiblen Gebieten in Kauf genommen werden. Da der Ausstoß von Treibhausgasen global wirkt, ist im Bereich des Klimaschutzes immer die Gesamtbilanz einer Maßnahme zu betrachten. Deutlich wird dies am Beispiel einer Umgehungsstraße. Diese kann ein sensibles Gebiet, etwa einen Ortskern, deutlich entlasten und damit einen hohen Beitrag zur Luftreinhaltung leisten. Führt diese aber zu einer höheren Umwegigkeit und einer besseren Erreichbarkeit für den MIV, wird sich die Fahrleistung im MIV erhöhen, was zu einer Zunahme der Treibhausgasemissionen führt.

Im Sinne einer Handlungsempfehlung werden die Maßnahmenkategorien mit einer Einschätzung zu den Wirkungen kurz zusammengefasst:

- ▶ **Maßnahmen zur Reduzierung von Störungen auf der freien Strecke**
Bei Maßnahmen dieser Kategorie steht das Ziel im Vordergrund, den Einfluss störender Fahrzeuge (Lieferfahrzeuge in zweiter Reihe, ungünstig geparkte Fahrzeuge oder Ein- und Ausparkvorgänge, Müllabfuhr) oder störender Straßenraumelemente (Baustellen, Entschleunigungselemente, Haltestellen ohne Busbuchten) zu reduzieren. Dadurch wird der Verkehrsfluss verbessert, ein verstetigender Effekt kann eintreten. Lokal können solche Maßnahmen nachvollziehbar zur Luftreinhaltung beitragen. Permanente Umbaumaßnahmen zur Verbesserung des Verkehrsflusses können lokal mehr Verkehr verursachen und damit kontraproduktiv wirken. Um einen relevanten Beitrag zum Klimaschutz zu leisten sind die Maßnahmen zu kleinräumig und zu wenig wirksam.
- ▶ **Maßnahmen zur Steigerung der Kapazität des MIV auf einzelnen Strecken**
Eine Steigerung der Kapazität auf einzelnen Strecken oder Streckenzügen kann durch einen Streckenausbau mit zusätzlichen Fahrstreifen oder durch eine verkehrsabhängige Anpassung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit erreicht werden. Beide Maßnahmen führen zu einer Verbesserung des Verkehrsflusses, die Maßnahmen unterscheiden sich aber hinsichtlich der absoluten Emissionswirkungen. Eine permanente Erhöhung der Kapazität kann zu Mehrverkehr führen und ist damit hinsichtlich der Wirkung in den Bereichen Luftreinhaltung und Klimaschutz nicht eindeutig zu bewerten. Eine dynamische Steuerung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit, die nur bei hohen Auslastungsgraden geschaltet wird, hat nur geringe Auswirkung auf die mittlere Geschwindigkeit. Deshalb wird der Einfluss auf die Verkehrsnachfrage gering sein. Die Harmonisierung des Verkehrsflusses und die Reduzierung der Zusammenbruchswahrscheinlichkeit reduzieren die Emissionen in geringem Umfang.
- ▶ **Maßnahmen zur lokalen Beeinflussung des Fahrverhaltens und des Geschwindigkeitsniveaus**
Unter dieser Maßnahmenkategorie sind verkehrstechnische und ordnungsrechtliche Maßnahmen zusammengefasst, die ebenfalls direkt auf den Verkehrsfluss wirken, jedoch nicht auf die Beseitigung von Störungen oder auf die Beseitigung von Kapazitätsengpässen abzielen (Überholverbote oder Geschwindigkeitshinweise bzw. -beschränkungen). Da die Voraussetzungen für eine Anwendung solcher Maßnahmen nur in Ausnahmen vorliegen, ist die Wirkung auf die Emissionen als vernachlässigbar gering

einestufen. Eine Ausnahme stellt die Änderung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit dar. Die Wirkung einer großräumigen Umsetzung der Maßnahme wird weiter unten beschrieben. Aber auch lokal kann die Maßnahme die Fahrweise in einem Ausmaß beeinflussen, dass die Änderungen der Schadstoffemissionen für die Luftreinhaltung relevant sind. Dabei ist aber nicht sichergestellt, dass ein positiver Effekt auftritt, die Studienlage ist hier uneindeutig.

► **Maßnahmen zur Priorisierung des Umweltverbundes an Strecken**

In dieser Kategorie sind alle infrastrukturellen Maßnahmen zusammengefasst, die im Bereich der freien Strecke die Priorität des MIV herabsetzen und dabei in den allermeisten Fällen den Verkehrsteilnehmenden des Umweltverbunds (Fuß, Fahrrad, ÖV) zusätzliche Rechte einräumen (z.B. verkehrsberuhigte Bereiche, Fußgängerüberwege, Fahrradstraßen, Flächenumwidmung zu Busfahrstreifen oder Fahrradwegen). Eine pauschale Bewertung der Wirkungen der Maßnahmen dieser Kategorie ist schwierig, da der Maßstab der verkehrlichen Bedeutung und die Rahmenbedingung, in die eine solche Maßnahme eingebettet ist, stark variieren können. Insgesamt sind die Maßnahmen im Bereich der Luftreinhaltung kritisch zu betrachten, da – zumindest am Maßnahmenort selbst – der Verkehrsfluss des MIV verschlechtert werden kann. Die Wirkungen sind im Einzelfall zu prüfen. Die globale Wirkung von Einzelmaßnahmen dieser Kategorie abzuschätzen ist schwer. Auch wenn die Wirkungen von Einzelmaßnahmen in der Regel gering sein werden, sind eine Menge von Maßnahmen dieser Art ein wesentlicher Bestandteil der Umweltverbundförderung. Eine Menge von Maßnahmen kann somit zur Treibhausgasemissionsminderung beitragen.

► **Maßnahmen zur Optimierung des MIV-Verkehrsflusses an Knotenpunkten**

An plangleichen Knotenpunkten kreuzen sich Verkehrsströme. Das führt zwangsläufig zu Störungen im Verkehrsfluss. Durch die Ausgestaltung der Knotenpunktform, der Knotenpunktsteuerung und der Koordinierung benachbarter Knotenpunkte kann die Intensität und Häufigkeit der nötigen Brems- und Beschleunigungsvorgänge beeinflusst werden. In der Praxis sind die Möglichkeiten einer Verkehrsflussoptimierung an Knotenpunkten allerdings durch lokale Randbedingungen (verfügbare Flächen, Knotenpunktabstände, Anforderungen des ÖPNV) begrenzt. Untersuchungen einzelner Knotenpunktsteuerungen zeigen, dass die Emissionen lokal reduziert werden können. Sofern dieser Effekt aber nicht von einer Kapazitätserhöhung entkoppelt werden kann, können verminderte Zeitverluste zu einer erhöhten Nachfrage im MIV führen. Dieser Effekt ist in den analysierten Untersuchungen häufig nicht berücksichtigt, weshalb eine einfache Hochrechnung der ausgewiesenen Emissionsminderungen im Bereich des Klimaschutzes nicht zulässig ist.

► **Maßnahmen zur Bevorrechtigung von ÖV, Rad- und Fußverkehr an Knotenpunkten**

Ebenso wie auf der freien Strecke ist an Knotenpunkten eine Abwägung über die Priorisierung der unterschiedlichen Verkehrsteilnehmenden zu treffen. Eine Bevorrechtigung für ÖV, Fahrrad und Fußverkehr ist aus strategischer Sicht zwar gewünscht, um die Attraktivität dieser Verkehrsmittel zu erhöhen. Sie steht aber in Widerspruch zu einer Optimierung des Verkehrsflusses im MIV. Lokal können an einem Knotenpunkt, an dem eine entsprechende Priorisierung realisiert wurde, die Emissionen zunehmen, die Maßnahmen sind im Einzelfall zu prüfen. Die Wirkung einer konsequenten Umweltverbund-Bevorrechtigung in Abwägung zu einer Optimierung des MIV-Verkehrsflusses auf die verursachten Gesamtemissionen ist unklar. Eine Untersuchung würde das Zusammenführen von Detailplanungen der Knotenpunktsteuerung mit einer kleinteiligen Verkehrsnachfragemodellierung, die auch den Rad- und Fußverkehr

ausreichend genau abbildet, erfordern. Die Erfahrungen der vergangenen Jahrzehnte zeugen allerdings, dass umfassende Beschleunigungsmaßnahmen im ÖV notwendig für einen effizienten Betriebsablauf sind.

► **Maßnahmen zur Reduzierung der MIV-Fahrleistung in einem definierten Gebiet**

Die Fahrleistung in einem bestimmten Gebiet kann reduziert werden, indem entweder die Routenwahl beeinflusst wird (durch Information wie Lkw-Leitsysteme, gezielte Netzgestaltung einschließlich Durchfahrtsverbote oder den Ausbau von Entlastungsstrecken wie Ortsumfahrungen) oder auf die Ziel- und Moduswahl eingewirkt wird. Eine Routenwahlbeeinflussung zielt in der Regel auf Durchgangsverkehre ab, eine Beeinflussung der Ziel- und Moduswahl auch auf Quell- und Ziel- und Binnenverkehre im Maßnahmenraum. Alle Maßnahmen dieser Kategorie weisen eine verhältnismäßig hohe Wirksamkeit für die Luftreinhaltung im Maßnahmenraum auf. Der Rückgang der Emissionen resultiert größtenteils aus dem Rückgang der Fahrleistung und weniger aus der mit der geminderten Auslastung einhergehenden Verbesserung des Verkehrsflusses (siehe Ergebnisse zu „Maßnahmen zur Minderung der Fahrleistung“ unter Kapitel 3.4.2). Die für den Klimaschutz relevante Gesamtbilanz der Emissionen kann dagegen für Maßnahmen, die primär auf eine veränderte Routenwahl sowohl positiv als auch negativ ausfallen, je nachdem, ob dadurch große Umwege und mehr Verkehr in schlechteren Verkehrszuständen provoziert werden oder nicht. Maßnahmen, die die Fahrleistung in Summe mindern – etwa durch eine veränderte Moduswahl bei einer City-Maut bei einem gut ausgebauten ÖPNV-Angebot – haben auch für den Klimaschutz eine positive Wirkung.

► **Maßnahmen zur Reduzierung des Parksuchverkehrs**

Den Parksuchverkehr zu reduzieren, ist ein weithin akzeptiertes Ziel, da dieser an sich keinen Nutzen hat. Im Gegensatz zu vielen anderen Maßnahmen handelt es sich damit weniger um eine Abwägung als um eine Optimierung, womit sich die Frage stellt, bis zu welchem Grad unter welchem Ressourcenaufwand eine solche Optimierung möglich ist. Eine Verknappung des Parkraums muss nicht zwangsläufig zu einer Zunahme des Parksuchverkehrs führen, dies kann aber nicht ausgeschlossen werden. Die Wirkung liegt hier vielmehr auf der Steuerung der Verkehrsnachfrage mit dem Ziel, den MIV unattraktiver zu machen und die Fahrleistung dadurch zu reduzieren. Bessere Information über verfügbare Parkplätze (Leitsysteme) oder eine bessere Verfügbarkeit generell (Ausbau von z.B. Parkhäusern) vermindern zwar den Parksuchverkehr, können aber gleichermaßen zu Mehrverkehr führen. Maßnahmen, die beim Parksuchverkehr ansetzen, können in der Regel so ausgestaltet werden, dass lokal Emissionen abnehmen, da weniger MIV (generell oder Parksuchverkehr) stattfinden wird. Die Gesamtbilanz ist nur dann positiv, wenn ein Rückgang der Gesamtfahrleistung erreicht wird. Bei einer Verknappung des Parkraums wird allgemein von einem solchen Effekt ausgegangen. Bei Parkleitsystemen ist eine fundierte und verallgemeinerbare Einschätzung der Wirkung auf Grundlage der bestehenden Studienlage nicht möglich.

► **Maßnahmen zur Minderung der MIV-Fahrleistung im Personenverkehr ohne Bezug zur Straßeninfrastruktur**

Unter dieser Kategorie werden alle Maßnahmen zusammengefasst, die eine Minderung der MIV-Fahrleistung zum Ziel haben, ohne in die Straßeninfrastruktur einzugreifen. Sie können klassisch zwischen Push- (primär monetäre Maßnahmen) und Pull-Maßnahmen (Förderung des Umweltverbands sowie eines höheren Pkw-Besetzungsgrades) sowie wissens- und bewusstseinsbildende Maßnahmen unterschieden werden. Da alle Maßnahmen auf eine generelle Minderung der MIV-Fahrleistung abzielen, ist immer ein positives Ergebnis für die Gesamtemissions-Bilanz zu erwarten. Da die Maßnahmen

großräumig wirken, sind Maßnahmen dieser Kategorie für eine gezielte lokale Minderung der Luftschadstoffemissionen in stark betroffenen Bereichen weniger gut geeignet – die Wirkungen sind zwar in aller Regel positiv, die Wirksamkeit im Vergleich zur Wirksamkeit im Bereich des Klimaschutzes jedoch reduziert. Maßnahmen, die eine Verbesserung des Angebots für den ÖV, Rad- und Fußverkehr bewirken, sowie Maßnahmen, die zu einer Verteuerung des Pkw-Verkehrs führen, können in ihrer Wirksamkeit gut quantifiziert werden. Die Wirksamkeit von Verkehrsangeboten und -dienstleistungen, die weniger etabliert sind und nur einen verhältnismäßig kleinen Teil der Nachfrage bedienen (Mitfahrbänke, Carsharing-Angebote, Bike+Ride, ...) sind dagegen noch schwer zu ermitteln. Dazu kommt, dass die Angebote so vielfältig sind, dass eine pauschale Aussage auch bei einer Skalierung kaum möglich ist.

► **Maßnahmen zur Minderung der MIV-Fahrleistung im Güterverkehr ohne Bezug zur Straßeninfrastruktur**

Maßnahmen, die gezielt auf die Minderung des Lkw-Verkehrs abzielen, ohne dabei direkten Bezug zur Straßeninfrastruktur aufzuweisen, können in kleinräumige (City-Logistik) und großräumige Maßnahmen (Attraktivierung der Schiene, Entwicklung von Verteilzentren, ...) unterschieden werden. Auch hier ist die räumliche Zielgerichtetheit gering, da ganze Wege und Transportketten beeinflusst werden. Aus diesem Grund ist die Wirksamkeit im Bereich des Klimaschutzes höher als auf dem Feld der Luftreinhaltung. Aufgrund der deutlich höheren Emissionsanteile des Fernverkehrs, können Maßnahmen in diesem Bereich mit Blick auf die verursachten Emissionen eine höhere Wirkung haben als Maßnahmen, die auf eine Optimierung der Letzten Meile abzielen.

► **Maßnahmen zur generellen Beeinflussung des Fahrverhaltens und des Geschwindigkeitsniveaus**

Maßnahmen dieser Kategorie zielen auf eine veränderte Fahrweise ab. Die hier zusammengefassten Maßnahmen sind sehr unterschiedlicher Natur, es können zwei Gruppen unterschieden werden. Auf der einen Seite steht die direkte Beeinflussung des Fahrverhaltens (Fahrtraining bzw. fahrzeugseitige Unterstützung mit zunehmender Automatisierung des Fahrbetriebs), auf der anderen Seite stehen Änderungen des ordnungspolitischen Rahmens (generell auf Bundesebene insbesondere durch die vorgeschriebenen Regelgeschwindigkeiten repräsentiert). Die einzelnen Maßnahmen unterscheiden sich in ihrer Wirkungsweise und Wirksamkeit deutlich. Die positiven Effekte von Fahrtraining können im Einzelnen zwar wahrnehmbar und messbar sein, die fehlende Dauerhaftigkeit und Skalierbarkeit legen es jedoch nahe, diese Effekte nicht zu überbewerten. Interessanterweise werden in Planwerken zum Klimaschutz und zur Luftreinhaltung immer wieder Maßnahmen zur Förderung automatisierter und autonomer Fahrzeuge genannt. Die Wirkung solcher Maßnahmen ist unklar, negative Effekte können nicht ausgeschlossen werden. Bei der Änderung der zulässigen Höchstgeschwindigkeiten kann zwischen Maßnahmen im Innerortsbereich und Maßnahmen im Außerortsbereich, insbesondere auf Autobahnen, unterschieden werden. Bezüglich einer Minderung der Regelgeschwindigkeiten im Innerortsbereich sind die Ergebnisse uneindeutig, es können sowohl positive als auch negative Effekt im Bereich der verursachten Emissionen auftreten. Dies ist darin begründet, dass die Wirkung der langsameren Fahrweise auf die Emissionsfaktoren in unterschiedlichen Studien teils positiv, teils negativ ausfällt. Im Handbuch für Emissionsfaktoren (HBEFA 4.1) sind die CO₂-Emissionsfaktoren bei Tempo 30 in der Regel höher als bei einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h. Im Außerortsbereich und insbesondere auf Autobahnen ist die Situation dagegen eindeutig: Eine Anpassung und Reduktion der

zulässigen Höchstgeschwindigkeit würde zu einer Minderung der Emissionen in einer relevanten Größenordnung führen.

3.4.2 Wirkungen und Aspekte der Umsetzung ausgewählter Maßnahmen

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden sieben Maßnahmen – teilweise für unterschiedliche Untersuchungsräume bzw. in unterschiedlicher Ausprägung – quantitativ untersucht. Die Untersuchung der einzelnen Maßnahmen sind dahingehend gleich aufgebaut, als dass die Routenwahl- und Nachfrageeffekte unter Zuhilfenahme von Verkehrsnachfragemodellen abgeschätzt wurden. Die Emissionsfaktoren basieren auf dem HBEFA in der Version 4.1. Die Wirkungen sind in Tabelle 86 zusammengefasst. Hinsichtlich der Wirkungsweise können diese in vier Gruppen zusammengefasst werden. Die folgende Auflistung stellt die Gruppen vor und benennt die zugeordneten Maßnahmen sowie deren Kurztitel, wie sie auch in Tabelle 86 Verwendung finden:

- ▶ **Herabsetzen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit außerorts**
Als Vertreter dieser Gruppe wurden zwei Maßnahmen untersucht, nämlich ein deutschlandweites Tempolimit von maximal 120 km/h auf Autobahnen (T120 BAB) und ein deutschlandweites Tempolimit von maximal 120 km/h auf Autobahnen kombiniert mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit im Außerortsbereich von maximal 80 km/h (T120 BAB, T80 AO).
- ▶ **Herabsetzen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit innerorts**
In dieser Gruppe wurde eine Maßnahme betrachtet, bei der eine deutschlandweit ungesetzte Regelgeschwindigkeit von 30 km/h im Innerortsbereich angenommen wird. Ausgewählte überregionale Verbindungsstraßen im Innerortsbereich (meist Bundesstraßen mit mehreren Fahrstreifen) wurden ausgenommen. Die Maßnahme wurde für drei Stadtregionen Dresden (T30 – Dresden), Magdeburg (T30 – Magdeburg) und Stuttgart (T30 – Stuttgart) untersucht.
- ▶ **Minderung der Pkw-Fahrleistung**
In diesem Bereich wurden unterschiedliche Annahmen modelliert, die zu einer Minderung der Pkw-Fahrleistung führen und damit auslastungsbedingt auch auf den Verkehrsfluss wirken. Den getroffenen Annahmen kann unterschiedlich konkret eine verkehrsplanerische Maßnahme zugeordnet werden. In einem Fall wurde in der Region Dresden ein erhöhter Besetzungsgrad von im Mittel 2,0 angenommen (Besetzungsgrad). Konkrete verkehrsplanerische bzw. -politische Maßnahmen, um dieses Ziel zu erreichen, wurden dabei nicht betrachtet. Ebenfalls für die Region Dresden wurden zwei Szenarien eines reduzierten Parksuchverkehrs (PSV – konservativ, PSV – optimistisch) untersucht. Auch hier ist keine konkrete Maßnahme zugeordnet, es wurde jedoch in den Annahmen darauf geachtet, in einem planerisch oder technologisch plausiblen Bereich zu liegen. Am konkretesten ist die Maßnahme einer fahrweitenbezogenen Pkw-Maut von 6 Cent/km, die für die Region Stuttgart untersucht wurde (Pkw-Maut).
- ▶ **Verkehrstechnische Verstetigungsmaßnahmen**
Als verkehrstechnische Maßnahme zur Verstetigung des Verkehrs auf innerörtlichen Hauptverkehrsstraßen wurde die Maßnahme einer flächendeckenden LSA-Optimierung im Innerortsbereich (LSA-Steuerung) untersucht.

Tabelle 86: Zusammenfassung der Modellierungsergebnisse

| Maßnahme | Fahrleistung | Geschwindigkeit | CO ₂ | | NO _x | | PM | |
|--------------------|--------------|-----------------|-----------------|---------|-----------------|---------|-----------------|---------|
| | | | Emissionsfaktor | Gesamt | Emissionsfaktor | Gesamt | Emissionsfaktor | Gesamt |
| T120 BAB | -1,8 % | -2,8 % | -3,8 % | -4,2 % | -10,3 % | -9,6 % | -9,3 % | -6,6 % |
| T120 BAB, T80 AO | -2,5 % | -6,0 % | -4,3 % | -5,1 % | -11,9 % | -11,1 % | -10,2 % | -7,3 % |
| T30 – Dresden | -8,3 % | -15,0 % | +2,6 % | -5,5 % | +1,9 % | -5,0 % | +6,2 % | -1,3 % |
| T30 – Magdeburg | -2,8 % | -11,7 % | +1,7 % | -0,5 % | +1,6 % | +0,1 % | +4,1 % | +2,4 % |
| T30 – Stuttgart | -3,0 % | -6,0 % | +0,3 % | -2,4 % | -0,3 % | -2,5 % | +1,7 % | -0,5 % |
| Besetzungsgrad | -18,8 % | +7,0 % | -0,7 % | -14,8 % | +0,6 % | -14,1 % | +0,7 % | -11,6 % |
| PSV – konservativ | -0,7 % | +1,1 % | -0,2 % | -0,7 % | -0,1 % | -0,7 % | -0,2 % | -0,6 % |
| PSV – optimistisch | -2,1 % | +2,5 % | -0,5 % | -1,9 % | -0,1 % | -1,7 % | -0,2 % | -1,5 % |
| Pkw-Maut | -11,6 % | +3,1 % | -0,7 % | -9,1 % | -0,8 % | -9,9 % | -0,6 % | -8,4 % |
| LSA-Steuerung | +2,7 % | +4,8 % | -1,2 % | +0,6 % | -1,3 % | +0,3 % | -1,1 % | +0,6 % |

Anmerkungen:

- Alle Wirkungen beziehen sich auf den Gesamtverkehr im jeweiligen Untersuchungsraum. Bei den Maßnahmen T120 BAB und T120 BAB, T80 AO umfasst dieser ganz Deutschland und alle HBEFA-Fahrzeugkategorien, bei den weiteren Maßnahmen jeweils ausgewählte Stadtregionen und die Fahrzeugkategorien Pkw, SNF, LNF.
- Die Wirkungen auf Geschwindigkeit und Emissionsfaktoren sind auf das Einzelfahrzeug bezogen. Da diese Wirkungen sowie die Wirkung auf die Fahrleistung für die einzelnen Fahrzeugkategorien unterschiedlich groß ausfallen, kann die Wirkung auf die Gesamtemissionen nicht direkt aus den angegebenen Werten berechnet werden.
- Die spezifischen Emissionsfaktoren basieren auf dem HBEFA 4.1. Für PM sind ausschließlich die Abgas-Emissionen berücksichtigt. Wie der Vergleich mit anderen Projektergebnissen zeigt (siehe Maßnahmengruppe „Herabsetzen der zulässigen Geschwindigkeit innerorts“), können die Wirkungen bei einer Berücksichtigung von Aufwirbelung, Abrieb etc. anders ausfallen.
- Die Fahrleistung und die Emissionsfaktoren sind grün eingefärbt, wenn sie die gewünschte Wirkrichtung haben, also abnehmen.

Wie sich in Tabelle 86 an den Einfärbungen der Kenngrößen, bei denen ein positiver Effekt durch die einzelnen Maßnahmen entsteht, erkennen lässt, wirken die Maßnahmen einer Gruppe jeweils ähnlich. Im Weiteren werden die Wirkung der Maßnahmen auf die Fahrleistung und die mittlere Fahrgeschwindigkeit im Netz sowie auf die Luftschadstoff- und Treibhausgasemissionen beschrieben. Die Ausführungen werden durch Informationen zu weiteren Maßnahmenwirkungen und Hinweisen zur Maßnahmenumsetzung ergänzt. Diese wurden zu den Maßnahmen T30, Pkw-Maut und LSA-Steuerung im Rahmen eines Workshops mit Vertreterinnen und Vertretern von Kommunen und Planungsbüros gesammelt und diskutiert.

Das **Herabsetzen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit außerorts** wirkt sowohl auf die Fahrleistung als auch auf die Emissionsfaktoren von CO₂, NO_x und PM durchwegs mindernd. Der Fahrleistungsrückgang ist dadurch bedingt, dass die mittlere Geschwindigkeit abnimmt, wodurch die Attraktivität des MIV sinkt. Das führt einerseits zu kürzeren Reiseweiten und andererseits zu modalen Verlagerungen. Obwohl die Geschwindigkeit durch ein zusätzliches Herabsetzen der Außerorts-Regelgeschwindigkeit auf 80 km/h deutlicher sinkt (6,0 % Rückgang

anstatt 2,8 %), fällt der zusätzliche Fahrleistungsrückgang vergleichsweise geringer aus (2,5 % anstatt 1,8 %). Dieser Effekt erklärt sich dadurch, dass Wege auf Landstraßen kürzere Wegelängen haben und sich in geringerem Umfang auf den ÖV verlagern lassen. Abgesehen von der Gesamtwirkung unterscheiden sich die Maßnahmen T120 BAB und T120 BAB, T80 AO bei den Routenwahleffekten deutlich. Wird die zulässige Höchstgeschwindigkeit ausschließlich auf Autobahnen reduziert, führt dies zu Ausweichverkehren, die in Summe auf anderen Straßen eine Zunahme der Belastungen bedeutet. Dieser Effekt ist in aller Regel unerwünscht, da er einer Bündelung des Verkehrs entgegenwirkt und diesen in sensiblere Bereiche (Ortsdurchfahrten etc.) drängt. Dieser Effekt ist bei einer zusätzlichen Senkung der Geschwindigkeiten im Außerortsbereich weniger stark ausgeprägt, in Summe nimmt die Fahrleistung auch im Nicht-Autobahn-Netz ab. An vereinzelt Stellen im Netz muss dennoch mit Mehrbelastungen gerechnet werden. Da auch die Emissionsfaktoren durchwegs zurückgehen, stellt sich auch bei den gesamten verursachten Emissionen durchwegs eine Abnahme ein. Die CO₂-Emissionen nehmen um 4,2 % (T120 BAB) bzw. 5,1 % (T120 BAB, T80 AO) bezogen auf den gesamten Straßenverkehr in Deutschland ab. Damit liegen die berechneten Einsparungen höher als die Ergebnisse bisheriger Studien (z.B. Lange et al. 2020). Dies liegt neben methodischen Unterschieden primär an der Berücksichtigung der Routenwahl- und Nachfrageeffekte. Die Berechnungsergebnisse stellen dennoch eine konservative Abschätzung dar, da beispielsweise die Wirkung weniger starker und weniger häufigerer Geschwindigkeitswechsel im Übergangsbereich zwischen zwei zulässigen Höchstgeschwindigkeiten (z.B. Beschleunigung von 120 km/h auf freie Geschwindigkeitswahl) durch die angewandte Methodik nicht berücksichtigt wurde. Im Rahmen des Forschungsvorhabens konnte nur eine überschlägige Abschätzung durchgeführt werden, die auf eine Erhöhung der ausgewiesenen Effekte um eine Größenordnung von 5 % bis 10 % hindeuten. Weitere Untersuchungen des Fahrverhaltens an entsprechenden Stellen im Netz könnten einen zusätzlichen Beitrag zur Ermittlung der Wirkungen von verschärften Tempolimits sowie generell zur Ermittlung der Emissionen des Straßenverkehrs in Deutschland leisten.

Das **Herabsetzen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit innerorts** bewirkt bei den einzelnen Kenngrößen einen gegenläufigen Effekt. Da die mittlere Fahrgeschwindigkeit des MIV durch die Maßnahme reduziert wird, sinkt die Fahrleistung. Die Höhe des Rückgangs unterscheidet sich zwischen den untersuchten Stadtregionen stark. In der Stadtregion Dresden ist ein großer Anteil des Streckennetzes von der Maßnahme betroffen, weshalb die MIV-Geschwindigkeit stark abnimmt. Zusätzlich bietet der gut ausgebaute öffentliche Verkehr eine attraktive Alternative, weshalb die Fahrleistung ebenfalls stark zurückgeht. In der Region Magdeburg ist der Rückgang der Geschwindigkeit zwar ebenfalls hoch, aufgrund der Nachfrage- und Angebotsstruktur ist der Umstieg auf Alternativen jedoch schwieriger und die Wirkung auf die Fahrleistung damit deutlich geringer. In der Region Stuttgart liegt der Sonderfall vor, dass bereits im Bezugsfall im Stadtgebiet Stuttgart auf vielen Hauptverkehrsstraßen Tempo 40 angeordnet war. Damit fallen die Geschwindigkeitsminderungen vergleichsweise gering aus. Im Verhältnis dazu ist der berechnete Fahrleistungsrückgang hoch, was unter anderem wiederum auf den gut ausgebauten ÖPNV zurückzuführen ist. Die Ergebnisse zeigen also, dass eine pauschale Aussage über die Wirksamkeit der Maßnahme für unterschiedliche Gebiete kaum möglich ist. Die Emissionsfaktoren weisen in dem allermeisten Fällen positive Änderungsraten auf, nehmen also zu. Dies ist damit begründet, dass die Emissionsfaktoren nach HBEFA auf Strecken mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 30 km/h in vielen Fällen höher sind als bei 50 km/h. Eine verkehrszustand- und antriebsartspezifische Analyse der HBEFA-Werte und einem Abgleich mit Ergebnissen unterschiedlicher Untersuchungen (z.B. Senatsverwaltung Umwelt, Verkehr und Klimaschutz Berlin (Hrsg.) 2021) legt eine kritische Überprüfung dieser Werte nahe – insbesondere, da die HBEFA-Werte für viele Untersuchungen dieser

verkehrspolitisch brisanten Maßnahmen als Grundlage dienen. In Summe ergibt sich für die Regionen Dresden und Stuttgart bei allen betrachteten Schadstoffen ein Rückgang. In Magdeburg stellt sich für CO₂ ein leichter Rückgang, bei PM und NO_x eine leichte Zunahme ein. Die Rückgänge der Fahrleistung überwiegen die Zunahmen der Emissionsfaktoren also größtenteils. Dabei sind mehrere wichtige Hinweise und Einschränkungen zu nennen:

- ▶ Im Punkt der positiven Gesamtwirkung bei den Emissionen unterscheiden sich die Ergebnisse von denen eines parallel durchgeführten Forschungsprojektes des Umweltbundesamtes (FKZ 3720 15 108 1 „Aktiv mobil: Tempo 30 als innerörtliche Regelgeschwindigkeit“, Bearb.: Eggers, S.; Heinrichs, E; Klein, T. | Ergebnisvergleich siehe Anhang A7). Darin wurde ebenfalls die Wirkung in drei Modellkommunen untersucht, jedoch mit einer Beschränkung der Maßnahmenumsetzung auf die jeweiligen Gemeindegebiete (im Gegensatz zu dem hier beschriebenen Forschungsprojekt, in dem die Annahme einer deutschlandweiten Anpassung der Regelgeschwindigkeiten galt). Der Vergleich zeigt, dass bei einer lokalen Umsetzung durch einzelne Kommunen der Widerstand bei Quell- und Zielverkehren weniger stark ansteigt, was unter anderem dazu führt, dass sich geringere Fahrleistungsrückgänge einstellen. Die Verschlechterung der Emissionsfaktoren dominiert in diesen Fällen, in Summe ergibt sich eine Zunahme der Emissionen. Der ausführliche Vergleich der Ergebnisse legt nahe, dass eine flächendeckende Änderung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit im Innerortsbereich zur Emissionsminderung zielführender wäre.
- ▶ Hinsichtlich der Umsetzbarkeit wurden im Workshop dagegen Bedenken gegenüber einer einheitlichen Einführung (z.B. deutschlandweit zu einem bestimmten Stichtag) geäußert, da der Aufwand zur Anpassung an eine solche Umstellung enorm sein dürfte. Von kommunaler Seite würde eine Umkehr der Nachweispflicht mit einer zeitlichen Übergangsfrist begrüßt. Aber mindestens die Schaffung der derzeit fehlenden rechtlichen Grundlage, die es den Kommunen ermöglicht, Tempo 30 ohne ortsbezogene Begründungen einzuführen, wäre wünschenswert. Problematisch ist der derzeit wachsende „Flickenteppich“ aus räumlich zum Teil direkt aneinandergrenzenden, teilweise zeitlich versetzt gültigen Geschwindigkeitsbeschränkungen, die aus unterschiedlichen Gründen (Lärmschutz, Schule, ...) erlassen wurden.
- ▶ Die durch die Maßnahme induzierten notwendigen Anpassungen der LSA-Steuerungen und der ÖPNV-Fahrpläne wurden als voraussichtlich sehr aufwändig angesehen, wobei eine pauschale Abschätzung der Aufwände im Rahmen des Workshops schwerfiel. Die Kapazitäten der Kommunen und von Planungsbüros würde für eine Umstellung in allen deutschen Kommunen in einer kurzen Zeitspanne aller Wahrscheinlichkeit nach nicht ausreichen (insbesondere bei der LSA-Steuerung werden Probleme gesehen, da die zulässige Höchstgeschwindigkeit auf die Räum- und Zwischenzeiten wirkt, die nur durch externe Dienstleister angepasst werden können). Vereinzelt liefen zum Zeitpunkt des Workshops in den Kommunen bereits Vorhaben, die Aufwände auf Ebene der Fachabteilungen genauer zu überprüfen.
- ▶ Inwiefern die Maßnahme sich aufgrund der Wirkungen auf den ÖPNV auf dessen Attraktivität auswirkt und welche Auswirkungen auf die Kapazität der innerörtlichen Straßennetze bestehen, ist nicht abschließend geklärt und bedarf weiterer wissenschaftlicher Grundlagen. Die Ergebnisse sind für die Detailplanung der Maßnahme von großer Bedeutung. Erkenntnisse werden von einem laufenden BAST-Forschungsvorhaben (77.0523: Nachweis der Auswirkungen von Tempo 30 auf die LSA-Steuerung und Kapazität) erwartet.

- ▶ Über die Notwendigkeit begleitender straßenraumgestalterischer Maßnahmen und Kontrollen herrschte Uneinigkeit unter den Workshopteilnehmenden. Da die Hauptverkehrsstraßen entwurfstechnisch auf Tempo 50 ausgelegt sind, könne diese Geschwindigkeit dort auch realisiert werden, ein einfaches Aufstellen von Schildern würde wenig verändern. Dem widerspricht eine Untersuchung aus Berlin (Heinrichs et al. 2016), in der gezeigt wurde, dass die gefahrenen Geschwindigkeiten auch an Stellen, an denen keine baulichen Maßnahmen und keine Geschwindigkeitskontrollen durchgeführt wurden, sofort wahrnehmbar abnahmen. Anschließend nahmen die Geschwindigkeiten über einen längeren Zeitraum (bis 3 Jahre) weiterhin langsam ab, was auch hier auf eine längerfristige Anpassung des Verhaltens hindeutet.
- ▶ Während die veränderten Emissionsfaktoren bei Einführung der Maßnahme sofort Wirkung zeigen würden, stellen sich die Veränderungen der Verkehrsnachfrage und damit die Rückgänge der Fahrleistung erst über einen längeren Zeitraum ein. Dies ist bei der Einführung und Evaluation der Maßnahme zu berücksichtigen. Eine sich unter Umständen einstellende kurzfristige Zunahme der Emissionen müsste ausgehalten werden.

Wie beschrieben, wurden unterschiedliche Annahmen bzw. Maßnahmen zur **Minderung der Pkw-Fahrleistung** modelliert, anhand derer die Wirkung der Auslastung auf den Verkehrsfluss untersucht wurde. Die Höhe der Fahrleistungseinsparung ist bei der Maßnahme „Besetzungsgrad“ durch die Annahme eines mittleren Besetzungsgrades von 2 Personen pro Fahrzeug gewissermaßen gesetzt. Der berechnete Rückgang der Fahrleistung um knapp 12 % bei einer Pkw-Maut von 6 ct/km kann durch die Größenordnung der Elastizitäten, die zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Fahrleistung und Pkw-Nutzungskosten verbreitet genutzt werden, als plausibel bestätigt werden. Das berechnete Einsparpotenzial durch eine Minderung des Parksuchverkehrs erscheint im Vergleich zu den Ergebnissen von Rikus et al. (2015) hoch. Wie auch bei der Maßnahme „Besetzungsgrad“ ist der Wert als Potenzial anzusehen, von dem erst gezeigt werden muss, dass dieses technologisch auch wirklich gehoben werden kann. Vor diesem Hintergrund soll weniger die Fahrleistungsminderung und mehr die Wirkung auf den Verkehrsfluss und die Emissionen als zentrales Ergebnis analysiert werden. Bei den Maßnahmen „Besetzungsgrad“ und „Pkw-Maut“ ist der Rückgang der Fahrleistung auf allen Straßentypen homogen verteilt. Die realisierten mittleren Geschwindigkeiten ändern sich aufgrund der hohen Rückgänge der Fahrleistung deutlich. Die Geschwindigkeitsänderungen liegen bei rund einem Drittel der Fahrleistungsänderungen. Dagegen sind die aufgrund der veränderten Verkehrszustände erreichten Emissionsänderung sehr gering. Die Änderungen der spezifischen Emissionsfaktoren liegen zwischen -1 % und 0 %, Ausnahmen stellen die Werte für PM und NO_x bei der Maßnahme „Besetzungsgrad“ dar, die in einem leicht positiven Bereich liegen. Die Wirkungszusammenhänge zwischen Fahrleistungsrückgang und Geschwindigkeit bzw. Emissionen sind bei der Maßnahme „PSV“ grundsätzlich besser, da der Fahrleistungsrückgang hier besonders langsame und „schädliche“ Verkehre betrifft. Für die Abschätzung der Wirkung einer verringerten Fahrleistung auf die Emissionsfaktoren lassen sich (stark pauschalisiert) folgende Zusammenhänge ableiten:

- ▶ Bei einer gleichmäßigen Minderung der Fahrleistung auf Strecken außerhalb des Autobahnnetzes führt ein Prozent Fahrleistungsminderung zu rund 0,08 Prozent Rückgang bei den spezifischen Emissionen des Pkw-Verkehrs und rund 0,06 Prozent bei den spezifischen Emissionen von LNF (CO₂, NO_x und PM gleichermaßen). Bei SNF liegt der Rückgang im Mittel etwas höher, ist jedoch sowohl zwischen den Maßnahmen als auch den einzelnen Luftschadstoffen weniger einheitlich.

(100 % umfasst die Gesamtfahrleistung auf allen Straßen im jeweiligen Untersuchungsraum, ausgenommen des Autobahnnetzes.)

- ▶ Wird der Parksuchverkehr reduziert, werden Verkehre mit besonders hohen Emissionsfaktoren vermieden. Die positive Wirkung je eingespartem Fahrzeugkilometer liegt etwa doppelt so hoch wie bei einer gleichmäßigen Minderung der Fahrleistung über alle Strecken, also z.B. 0,16 % Emissionsfaktorrückgang bei Pkw für 1 % Fahrleistungsrückgang.
(100 % umfasst die Gesamtfahrleistung auf allen Straßen im jeweiligen Untersuchungsraum, ausgenommen des Autobahnnetzes.)
- ▶ Auf Autobahnen nehmen die Emissionen für Pkw und LNF durch eine Verbesserung der Verkehrszustände aufgrund von Fahrleistungsrückgängen bei den untersuchten Maßnahmen grundsätzlich zu, da der flüssige Verkehrszustand hier höhere Emissionsfaktoren aufweist. Der SNF-Verkehr verzeichnet dagegen einen deutlichen Rückgang bei den spezifischen Emissionsfaktoren.

Bei der Diskussion der Pkw-Maut im Workshop stand vor allem die genaue Ausgestaltung und die Möglichkeiten einer Einführung einer Maut im Vordergrund. Bemängelt wurde auch hier der fehlende rechtliche Spielraum auf kommunaler Ebene. Auch wurden andere, verwandte Bepreisungsinstrumente wie Low-Emission-Zones, deren Befahrung mit konventionellen Fahrzeugen mit Kosten verbunden wäre, oder Parkraum-Management genannt. Die Vorteile hinsichtlich der Möglichkeiten der Verkehrslenkung durch eine großräumige, fahrweitenbezogene Bepreisung wurden jedoch allgemein anerkannt.

Aus der Gruppe der **verkehrstechnischen Verstetigungsmaßnahmen** wurde die am häufigsten in Luftreinhalteplänen und Green City Plänen genannte Maßnahmenart untersucht, nämlich eine Optimierung des Verkehrsflusses des MIV durch eine Anpassung der LSA-Steuerungen im Innerortsbereich. Die Potenzialabschätzung wurde auf Grundlage mehrerer Streckenzüge in der Stadt Dresden durchgeführt. Bei der durchgeführten Simulation zeigte sich, dass die Steuerung bereits auf einen möglichst guten Verkehrsfluss ausgerichtet war. Aus diesem Grund wurde ein fiktiver, schlechter Zustand als Ausgangslage gewählt, um die Wirkungen der Maßnahme greifbar zu machen. Die in Tabelle 86 gezeigten Ergebnisse stellen also das Potenzial einer gut koordinierten gegenüber einer nicht koordinierten Steuerung dar. Im Rahmen des Workshops wurde dieser Punkt diskutiert – aus kommunaler Perspektive wurde darauf hingewiesen, dass die allermeisten LSA-Steuerungen genau wie in der Landeshauptstadt Dresden bereits eine gewisse Optimierung erfahren haben und deshalb das reale Potenzial geringer sein dürfte. Die angenommenen möglichen Einsparungen von 10 Sekunden Fahrzeit je Knotenüberfahrt sind hoch. Zusätzlich wurde darauf hingewiesen, dass eine Koordinierung nur bei nicht-überlasteten Verkehrszuständen wirken kann. Deshalb kann die Maßnahme in vielen Fällen überhaupt nur durch eine Kombination mit einer Pfortnerung bzw. Zuflussdosierung wirksam sein. Auch wurde darauf hingewiesen, dass die Maßnahme – entgegen der weitläufigen Meinung, eine einmalige Anpassung der Steuerung würde zu einer dauerhaften Verbesserung führen – mit verhältnismäßig hohen laufenden Kosten und Personalaufwänden verbunden wäre. Diese sind mitzudenken.

Im Gegensatz zu vielen bisherigen Untersuchungen wurde der Rebound-Effekt bei der Berechnung berücksichtigt. Dieser ergibt sich bei dieser Klasse von Maßnahmen dadurch, dass die Geschwindigkeit des MIV im Mittel steigt, wodurch die Fahrleistung in aller Regel zunehmen dürfte. Durch die Anwendung des fiktiven Optimierungspotenzials auf alle LSA in der Region Dresden, nahm die mittlere Geschwindigkeit um knapp 5 % zu, was zu einem Fahrleistungszuwachs von 2,7 % führte. Da die spezifischen Emissionsfaktoren für CO₂, NO_x und

PM gleichermaßen nur um ca. 1,2 % zurückgingen (auf das gesamte Netz bezogen, nicht ausschließlich in den betroffenen Knotenpunktbereichen), nahmen die Gesamtemissionen bei allen drei Stoffen durch die Maßnahme zu, der Rebound-Effekt überwog also die primären Einsparziele. Da die Rahmenbedingungen bei verkehrstechnischen Maßnahmen immer hochgradig individuell sind, ist eine pauschale Übertragung dieser Ergebnisse kaum zulässig. Sie zeigen aber, dass eine individuelle Prüfung der Maßnahmenwirkungen in diesem Bereich von besonderer Wichtigkeit ist und dass dabei die Rebound-Effekte zu berücksichtigen sind.

4 Quellenverzeichnis

- Adler, S.; Bellmann, E.; Brandmeyer, P.; Domke, J.F.; Fellemann, A. et al. (2016): Klimaschutzplan 2050 der deutschen Zivilgesellschaft. Koordination: Klima-Allianz Deutschland.
- Agora Verkehrswende (2018a): Klimaschutz im Verkehr: Maßnahmen zur Erreichung des Sektorziels 2030.
- Agora Verkehrswende (2018b): Umparken – den öffentlichen Raum gerechter verteilen. Zahlen und Fakten zum Parkraummanagement.
- Agora Verkehrswende (2019): Neue Wege in die Verkehrswende. Impulse für Kommunikationskampagnen zum Behaviour Change, 2. Auflage.
- Ahrens, G.-A.; Becker, U.; Böhmer, T.; Richter, F.; Wittwer, R. (2013): Potentiale des Radverkehrs für den Klimaschutz. TEXTE 19/2013. Herausgeber: Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau.
- Allekotte, M.; Biermann, K.; Heidt, C.; Colson, M.; Knörr, W. (2020): Aktualisierung der Modelle TREMOD/TREMOD-MM für die Emissionsberichterstattung 2020 (Berichtsperiode 1990-2018) – Berichtsteil „TREMOD“. TEXTE 116/2020. Herausgeber: Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau.
- Andrieu, C.; Pierre, G.S.; (2012): Comparing effects of eco-driving training and simple advices on driving behavior. In: Procedia – social and Behavioral Science, 54(2012). S. 211-220.
- Ansbacher P.; Giglmaier, S.; Zapf, K.; Petersen, S.; Dietz, J. et al. (2019): Klimaschutzteilkonzept „Nachhaltige Mobilität“ für den Landkreis Vulkaneifel.
- Axhausen, K.W.; Ehreke, I.; Glemser, A.; Hess, S.; Jödden, C.; Nagel, K.; Sauer, A.; Weis, C. (2015): Ermittlung von Bewertungsansätzen für Reisezeiten und Zuverlässigkeit auf der Basis eines Modells für modelle Verlagerungen im nicht-gewerblichen und gewerblichen Personenverkehr für die Bundesverkehrswegeplanung. Schlussbericht: FE-Projekt-Nr. 96.996/2011.
- Baier, M.M.; Kathmann, T.; Baier, R.; Schäfer, K.H. (2003): Verkehrsqualität auf Streckenabschnitten von Hauptverkehrsstraßen. BASt-Bericht V 108.
- Baier, R.; Engelen, K. (2015): Straßenumgestaltungen nach dem sogenannten „Shared Space“-Gedanken – empirische Befunde aus Deutschland und der Schweiz. In: Straßenverkehrstechnik, 5.2015. S. 317-322.
- BASt (Bundesanstalt für Straßenwesen) (2018): Stellungnahme zur DVR-Faktensammlung „Wirkung eines Tempolimits von 130 km/h auf Autobahnen“
- BASt (Bundesanstalt für Straßenwesen) (2021): MARLIS -Maßnahmen zur Reinhaltung der Luft in Bezug auf Immissionen an Straßen. MARLIS-Webanwendung Version 4.2. Online: https://www.bast.de/BASt_2017/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v3-MARLIS/MARLIS.html (07.03.2021).
- BASt (Bundesanstalt für Straßenwesen) (2022): Automatische Zählstellen auf Autobahnen und Bundesstraßen. Online: <https://www.bast.de/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v2-verkehrszaehlung/Stundenwerte.html?nn=1817946> (22.02.2022).
- Bauer, U.; Hertel, M.; Hanke, S. (2016): Parkraumbewirtschaftung – Nutzen und Effekte. Herausgeber: Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg. Bearbeitung durch Deutsches Institut für Urbanistik gGmbH (Difu).
- Baum, H.; Geißler, T.; Schneider, J. (2005): Pkw-Maut für Deutschland? Eine kritische Analyse. In Zeitschrift für Verkehrswissenschaft, 76(2). S. 91-133.
- Bäumer, M.; Hautzinger, H.; Pfeiffer, M.; Stock, W.; Lenz, B.; Kuhnimhof, T.; Köhler, K. (2017): Fahrleistungserhebung 2014 – Inlandsfahrleistung und Unfallrisiko, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Reihe V: Verkehrstechnik (291).

- Benz, T.; Kesenheimer, G. (2009): CO₂-Einsparung durch Verflüssigung des Verkehrsablaufs – Abschätzung staubedingter CO₂-Emissionen und von Reduktionspotentialen durch Verbesserung des Verkehrsablaufs. FAT-Schriftenreihe 225.
- Beyer, F. (2009): Koordinierung von Lichtsignalanlagen auf innerstädtischen Radrouten in Wien anhand der Bedürfnisse der Radfahrer. Diplomarbeit an der Technischen Universität Dresden.
- BMU – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2016): Klimaschutzplan 2050 – Klimapolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung.
- BMU – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2019): Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050.
- Böhnke, B. (2005): Modellierung von Parkraumnachfrage und Parkraummanagement-Maßnahmen in einem makroskopischen Verkehrsmodell. Dissertation am Institut für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik der Universität Stuttgart.
- Boltze, M.; Puzicha, J.; Axhausen, K.; Polak, J. (1994): "Parkverhalten und Wirksamkeit des Parkleitsystems in Frankfurt am Main"; Straßenverkehrstechnik, Heft 1, Seiten 29 - 34; 1994
- Boltze, M.; Kohoutek, S.; Krüger, P. (2011): Entwicklung von Strategien zur Luftreinhaltung für die Stadt Offenbach am Main. Konferenzbeitrag zur Heureka 2011.
- Boulter, P. G.; McCrea, I. (2007): ARTEMIS: Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems – Final Report. TRL Published Report PPR350.
- Bracher, T. (2016): Fahrrad- und Fußverkehr: Strukturen und Potentiale. In: Schwedes, O.; Canzler, W.; Knie, A. (Hrsg.), Handbuch Verkehrspolitik. DOI: 10.1007/978-3-658-04693-4_14. Springer VS, Wiesbaden.
- Brilon, W.; Wietholt, T.; Wu, N. (2007): Kriterien für die Einsatzbereiche von Grünen Wellen und verkehrabhängigen Steuerungen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Verkehrstechnik Heft V 163. Bericht zum Forschungsprojekt FE 77.477/2004. Bergisch Gladbach.
- Bundesverband CarSharing e.V. (Hrsg.) (2016): Wirkungen verschiedener CarSharing-Varianten auf Verkehr und Mobilitätsverhalten. CarSharing fact sheet Nr. 3. Berlin.
- Bürgerschaft der Freien und Hansestadt Hamburg (2019): Mitteilung des Senats an die Bürgerschaft - Erste Fortschreibung des Hamburger Klimaplanes und Gesetz zur Änderung der Verfassung, zum Neuerlass des Hamburgischen Klimaschutzgesetzes sowie zur Anpassung weiterer Vorschriften. Drucksache 21/19200.
- Busch, F.; Grošanić, S.; Dinkel, A.; Schieferstein, A.; Stadler, M. (2009): Begleitforschung und Ergänzung des Merkblatts 'Ermittlung der Wirksamkeit von Verkehrsbeeinflussungsanlagen'. Endbericht zu FE 03.0425/2007/IGB im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen. München.
- Chen, Y.; Ardila-Gomez, A.; Frame, G. (2017): Achieving energy savings by intelligent transportation systems investments in the context of smart cities. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 54, 381-396.
- Cookson, G.; Pishue, B. (2017): Die Folgen der Parkplatzproblematik in den Vereinigten Staaten, Großbritannien und Deutschland. Inrix Research.
- Dahmen, B. (2019): Kopplung makroskopischer Wirtschaftsverkehrsmodelle mit System Dynamics. Modellierung der Auswirkungen von Umweltzonen auf Fahrzeugflotten. DOI 10.1007/978-3-658-27548-8. Springer Vieweg. Düsseldorf.
- Dallmeyer, J. (2014): Simulation des Straßenverkehrs in der Großstadt – Das Mit- und Gegeneinander verschiedener Verkehrsteilnehmertypen. DOI 10.1007/978-3-658-05207-2. Springer Vieweg. Wiesbaden.

- Destatis – Statistische Ämter des Bundes und der Länder (2015): Zensus 2011 – Einwohnerzahl je Hektar. Ergebnisse des Zensus am 0. Mai 2011 pro ha, Version 1; 23.04.2015. Online: www.zensus2011.de/SharedDocs/Aktuelles/Ergebnisse/DemografischeGrunddaten.html?nn=3065474 (02.09.2019).
- Diegmann, V.; Pfäfflin, F.; Wursthorn, H. (2014): Bestandsaufnahme und Wirksamkeit von Maßnahmen zur Luftreinhaltung. TEXTE 26/2014. Herausgeber: Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau.
- Diegmann, V.; Pfäfflin, F. (2015): Sachverständigengutachten: Auswertung der Wirkung von Umweltzonen auf die Erneuerung der Fahrzeugflotten in deutschen Städten. TEXTE 08/2015. Herausgeber: Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau.
- Diegmann, V.; Wursthorn, H.; Breitenbach, Y.; Düring, I.; Schönharting, J.; Kraus, T.; Klemm, P.; Voigt, R.; Löhner, H. (2020): Dynamisches umweltsensitives Verkehrsmanagement. Bericht zum Forschungsprojekt FE70.0912/2015. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft V 321. ISBN 978-3-95606-481-4. Bergisch Gladbach.
- Dippold, M.; Fellendorf, M.; Lichtblau, G.; Hausberger, S. (2018): Maßnahmen für die Verbesserung der Luftqualität in Graz – Quantifizierung und Beurteilung.
- DLR – Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (2021): Mobilität in Tabellen (MiT 2017). Online: <https://mobilitaet-in-tabellen.dlr.de/mit/> (10.03.2021).
- DStGB – Deutscher Städte- und Gemeindebund (2020): BewohnerParkausweis – Länder können Gebührenrahmen für Bewohnerparkausweise anpassen. Archiv 2020. Online: <https://www.dstgb.de/aktuelles/archiv/archiv-2020/laender-koennen-gebuehrenrahmen-fuer-bewohnerparkausweise-anpassen/> (19.08.2021).
- Dünnebeil, F.; Bauer, H.; Kräck, J.; Schönefeld, T.; Schumann, M. (2017): Klimaschutz-Teilkonzept – Klimafreundliche Mobilität für die Stadt Böblingen. Heidelberg/Dresden.
- DVR – Deutscher Verkehrssicherheitsrat e.V. (2009): Auf den Punkt 3 – Studien „Fahren wie ein Profi – Sicheres Fahren in Beruf und Freizeit“. Ergebnisse und Konsequenzen für die Präventionsparaxis.
- Egeler, C.; Erzinger, F.; Wälti, M.; Blumenstein, A.; Kauffmann, V. et al. (2015): Langsamverkehrsfreundliche Lichtsignalanlagen. Forschungsprojekt SVI 2011/024 auf Antrag der Schweizerischen Vereinigung der Verkehrsingenieure und Verkehrsexperten (SVI).
- Ericsson, E.; Nolinder, E.; Persson, A.; Steven, H. (2019): Work programme 2016 – 2018 for HBEFA Version 4.1. Report of the work carried out for work package 2.
- Fellendorf, M.; Vortisch, P. (2010): Microscopic Traffic Flow Simulator VISSIM. Barceló, J.; Kuwahara, M. (Hrsg.): Fundamentals of Traffic Simulation, Springer, Berlin Heidelberg, S.63 - 93.
- FGSV – Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2009): Richtlinien für integrierte Netzgestaltung – RIN. Ausgabe 2008. FGSV-Verlag, Köln.
- FGSV – Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2015a): Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen HBS, Köln.
- FGSV – Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2015b): Wirkungen von Maßnahmen zur Umweltentlastung – Teil 2 Kreisverkehre. Zwischenstand Stand 22. Februar 2015.
- FGSV – Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2020): Chancen und Risiken des autonomen und vernetzten Fahrens aus der Sicht der Verkehrsplanung. FGSV-Bericht Ausgabe 2020. ISBN 978-3-86446-275-7.
- Friedrich, B. (2015): Verkehrliche Wirkung autonomer Fahrzeuge. In: Maurer, M.; Gerdes, J.; Lenz, B.; Winner, H. (Hrsg.): Autonomes Fahren. DOI: 10.1007/978-3-662-45854-9_16. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg.

Friedrich, M.; Pestel, E.; Heidl, U.; Pillat, J., Schiller, C.; Simon, R. (2019): Anforderungen an städtische Verkehrsnachfragemodelle. FE-Nr. 70.919/2015 des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur.

Friedrich, M.; Wacker, M.; Immisch, K.; Nagel, T. (2011): Untersuchung der Wirksamkeit von Geschwindigkeitsbeschränkungen in Stuttgart auf die verkehrsbedingten Lärm- und Schadstoffbelastungen. Im Auftrag der Landeshauptstadt Stuttgart und des Regierungspräsidiums Stuttgart.

Fromm, H.; Ewald, L.; Frankenhauser, D.; Ensslen, A.; Jochem, P. (2019): A Study on Free-floating Carsharing in Europe – Impacts of car2go and DriveNow on modal shift, vehicle ownership, vehicle kilometers travelled and CO2 emissions in 11 European cities. Working Paper Series in Production and Energy No. 36, KIT (Karlsruher Institut für Technologie).

GDV – Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. (2008): Nachtabschaltung von Lichtsignalanlagen – Sparen auf Kosten der Sicherheit? Unfallforschung kompakt, Nr. 7.

Gemeinde Rudersberg (Hrsg.) (2019): Die Ortsdurchfahrt. Online <https://ortsdurchfahrt-rudersberg.de/> (03.12.2021).

GeoBasis-DE / BKG (2020a): WFS CORINE Land Cover 5 ha, Stand 2018 (wfs_clc5_2018). Online: <https://gdz.bkg.bund.de/index.php/default/wfs-corine-land-cover-5-ha-stand-2018-wfs-clc5-2018.html>.

GeoBasis-DE / BKG (2021): Digitales Geländemodell Gitterweite 5 m – DGM5. Aktualität der Daten räumlich unterschiedlich, siehe Metadaten unter <http://gdz.bkg.bund.de/index.php/default/digitale-geodaten/digitale-gelandemodelle/digitales-gelandemodell-gitterweite-5-m-dgm5.html>.

Gilbert, A.; Schäfer, P.K. (2021): Anteil der KEP-Dienstleister am Stadtverkehr – Empirische Forschung zum Wirtschaftsverkehr und Erkenntnisse aus dem Projekt „Zukunft.de“. In: Internationales Verkehrswesen, 2021/1(73). S. 32-35.

Gohlisch, G.; Malow, M. (1999): Umweltwirkungen von Geschwindigkeitsbeschränkungen. TEXTE 40/99. Herausgeber: Umweltbundesamt. Berlin.

Hampshire, R. C.; Shoup, D. (2018): What Share of Traffic is Cruising for Parking? In: Journal of Transport Economics and Policy, Volume 52, Part 3, S. 184-201.

Hausberger S. (2003): Simulation of Real World Vehicle Exhaust Emissions. VKM-THD Mitteilungen. Heft 82. Verlag der Technischen Universität Graz. ISBN 3-901351-74-4. Graz.

Hautzinger, H.; Mayer, K.; Helms, M.; Kern, C.; Wiesenhütter, M.; Haag, G.; Binder, J. (2004): Analyse von Änderungen des Mobilitätsverhaltens – insbesondere der Pkw-Fahrleistung – als Reaktion auf geänderte Kraftstoffpreise. Schlussbericht zum Forschungsprojekt Nr. 96.0756/2002 des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen. Heilbronn.

Heinitz, F. (2020): Potentiale und Hemmnisse für Pkw-Fahrgemeinschaften in Deutschland. 5. Teilbericht des Forschungsvorhabens FKZ 3717171050. TEXTE 216/2020. Herausgeber: Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau.

Heinrichs, E.; Schneewolf, R.; Stein, A. (2001): Ortsumfahrungen für Kleinstädte? Verkehrstechnische Betrachtung. In: Handbuch der kommunalen Verkehrsplanung. 27. Ergänzungs-Lieferung, 4/01.

Heinrichs, E.; Scherbarth, F.; Sommer, K. (2016): Wirkungen von Tempo 30 an Hauptverkehrsstraßen. Herausgeber: Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau.

Hirschmann, K.; Fellendorf, M. (2010) A toolbox to quantify emission reductions due to signal control. in: TRB 2010 - 89th Annual Meeting (2010), Washington.

Hirschmann K., Zallinger M., Fellendorf M., Hausberger S. (2010) A new method to calculate emissions with simulated traffic conditions, Proceedings of the IEEE Intelligent Transportation Systems conference.

- Hohmann, S.; Giuliani, S.; Wietholt, T. (2013): Verkehrsadaptive Netzsteuerungen – Untersuchung ihrer Einflussmöglichkeiten auf die Emissions- und Immissionsbelastung städtischer Straßennetze. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Verkehrstechnik Heft V 230. Bericht zum Forschungsprojekt: FE 77.0484/2006. Bergisch Gladbach.
- Hülsmann, F.; Wiepking, J.; Zimmer, W.; Sunderer, G., Götz, K. et al. (2018): share – Wissenschaftliche Begleitforschung zu car2go mit batterieelektrischen und konventionellen Fahrzeugen. Forschungsvorhaben gefördert vom BMU, Förderkennzeichen 16EM1013,16EM1014. Bearbeitet durch das Öko-Institut e.V. und ISO – Institut für sozial-ökologische Forschung.
- Infras – Institut für angewandte Sozialwissenschaft, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.v., ITV Research GmbH, infras 360 GmbH (2018): Mobilität in Deutschland – Tabellarische Grundausswertung Deutschland. Bundesweite Fassung Ausgabe Dezember 2018. Eine Studie des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur sowie weiteren regionalen Partnern.
- INFRAS AG (2019): HBEFA Version 4.1 / 10.09.2019. Im Softwareprodukt hinterlegte Informationen.
- ITF (Hrsg.) (2018): Speed and Crash Risk. Herausgeber: International Transport Forum (ITF), OECD.
- IVAS – Ingenieurbüro für Verkehrsanlagen und -systeme (2015): Klimaschutz-Teilkonzept „Klimafreundliche Mobilität – Stralsund steigt um“ – Abschlussbericht.
- Kampmeier, P.; Koch, H.; Konermann, J. (2016): Abschlussbericht – Klimaschutzteilkonzept „Mobilität für das Rheinland“. Erstellt für Nahverkehr Rheinland GmbH.
- Karrer, T.; Bartsch, M.; Genser, A.; Lämmer, S.; Heimgartner, C. (2021): Praxistest in Luzern zeigt: Selbst-Steuerung verbessert die Verkehrsqualität deutlich. In: Straße und Verkehr, 5(2021). S. 10-23. DOI: 10.3929/ethz-b-000485020.
- Katsarov, I. (2014): Neue Formen der Verkehrsberuhigung. Diplomarbeit an der Technischen Universität Wien. Wien.
- Kipke, H. (1993): "Theoretische Überlegungen zum Parksuchverkehr"; Straßenverkehrstechnik, Heft 5, Seiten 246 - 249; 1993
- Kleinebrahm, M.; Steven, H. (2011): Vermessung des Abgasemissionsverhaltens von zwei Pkw und einem Fahrzeug der Transporterklasse im realen Straßenbetrieb in Stuttgart mittels PEMS-Technologie. Abschlussbericht. Herausgeber: LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg. Bearbeitung: TÜV Nord Mobilität GmbH & Co. KG und Datenanalyse und Gutachten.
- Klößner, P.; Lange, M. (2022): Tempolimit auf Straßen außerorts. Kurzpapier Klimaschutzinstrumente im Verkehr. Umweltbundesamt (Hrsg.). Stand 25. März 2022
- Kollmus, B.; Treichel, H.; Quast, F. (2017): Tempolimits auf Bundesautobahnen 2015. Schlussbericht zum Arbeitsprogramm-Projekt F1100.6110020 der Bundesanstalt für Straßenwesen. Bergisch Gladbach.
- Koshy, Z.R.; Arasan, V.T. (2005): Influence of Bus Stops on Flow Characteristics of Mixed Traffic. In: Journal of Transportation Engineering (Vol. 131, Issue 8). DOI: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2005)131:8(640).
- Koska, T.; Jansen, U.; Reutter, O.; Schäfer-Sparenberg, C.; Spitzner, M.; Ulrich, A. (2020): Praxis kommunale Verkehrswende. Ein Leitfaden.
- Kosztra, B.; Büttner, G.; Hazeu, G.; Arnold, S. (2019): Updated CLC illustrated nomenclature guidelines. Service Contract No 3436/RO-Copernicus/EEA.57441 Task 3, D3.1 – Part 1.
- Krail, M. (2020): Automatisiertes und vernetztes Fahren – Ein Beitrag zum Klimaschutz im Verkehr? In: Straßenverkehrstechnik 12.2020. S. 844-850.

Krajewicz, D.; Cyganski, R.; Heinrichs, M.; Erdmann, J. (2016): Benefits of using microscopic models for simulating air quality management measures. Transportation Research Board Annual Meeting, 11.-14. Jan. 2016. Washington, D.C., USA.

Kraschl-Hirschmann K., Zallinger M., Luz R., Fellendorf M., Hausberger S. (2011) A method for emission estimation for microscopic traffic flow", Proceedings of the 2011 IEEE Forum on Integrated and Sustainable Transportation Systems, 2011.

Kutzner, F.; Heuer, C.; Bauer, H.; Dünnebeil, F. (2014): Klimaschutz-Teilkonzept „Klimafreundliche Mobilität“ für die Stadt Ludwigshafen am Rhein. Dezember 2013 mit kleineren Überarbeitungen im Februar 2014. Heidelberg.

Lange, M.; Hendzlik, M.; Schmied, M. (2020): Klimaschutz durch Tempolimit – Wirkung eines generellen Tempolimits auf Bundesautobahnen auf die Treibhausgasemissionen. TEXTE 38/2000. Herausgeber: Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau.

Leihs, D.; Siegl, T.; Hartman, M. (2014): City-Maut. Nutzen und Technologien von Systemen zum Steuern der Zufahrt in Zonen. DOI 10.1007/978-3-658-03786-4. Springer Vieweg, Wiesbaden.

Litman, T. (2022): Understanding Transport Demand and Elasticities. How Prices and Other Factors Affect Travel Behavior. Online verfügbar unter www.vtpi.org/elasticities.pdf, letzter Zugriff am 21.04.2022.

Lobig, A.; Liedtke, G.; Lischke, A.; Wolfermann, A.; Knörr, W. (2016): Verlagerungspotential auf den Schienengüterverkehr in Deutschland. Endbericht des Forschungsvorhabens AZ Z14/SeV/288.3/1179/UI40 im Auftrag des BMVi. Berlin, Heidelberg.

Löhe, U. (2016): Geschwindigkeiten auf Autobahnen in den Jahren 2010 bis 2014, Bergisch Gladbach: Bundesanstalt für Straßenwesen.

Lüßmann, J. (2015): Koordinierung von Lichtsignalanlagen unter Berücksichtigung der Progressionsgeschwindigkeit und Pulkmanagement auf Basis der C2X-Kommunikation zur Reduzierung von CO2 Emissionen. Dissertation an der Technischen Universität München.

Matschke, I. (2007): Einfluss dynamischer Navigation auf das Verkehrsgeschehen in städtischen Straßennetzen. Dissertation an der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover.

Mingardo, G. (2013): Transport and environmental effects of rail-based Park and Ride: evidence from the Netherlands. In: Journal of Transport Geography, 30(2013). S. 7-16.

Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (2015): Klimaschutzplan Nordrhein-Westfalen – Klimaschutz und Klimafolgenanpassung. Düsseldorf.

Nadel, S. (2012): Rebound Effect: Large of Small? White Paper. American Council for an Energy Efficiency Economy, Washington, DC.

Narayanan, S.; Chaniotakis, M.; Antoniou, C. (2020): Shared autonomous vehicle services: A comprehensive review. In: Transportation Research Part C Emerging Technologies, 111(2020). S. 255-293. DOI: 10.1016/j.trc.2019.12.008

Nobis, C.; Kuhnimhof, T. (2018): Mobilität in Deutschland– MiD: Ergebnisbericht.

Notter, B.; Keller, M.; Althaus, H.-J.; Cox, B.; Knörr, W.; Heidt, C. et al. (2019): HBEFA 4.1 - Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs, Version 4.1. Development Report. Im Auftrag der Umweltbundesämter von Deutschland, Österreich und Schweiz sowie weiterer Länder. Federführende Bearbeitung durch INFRAS.

OSM (2020): OpenStreetMap-Karten. Lizenziert unter der Creative Commons Attribution-ShareAlike 2.0 (CC BY-SA 2.0). Online: <https://www.openstreetmap.org/copyright>.

- Otto, T. (2011): Kooperative Verkehrsbeeinflussung und Verkehrssteuerung an signalisierten Knotenpunkten. In: Schriftenreihe Verkehr der Universität Kassel, Heft 21. ISBN: 978-3-89958-190-4. Herausgeber: Institut für Verkehrswesen.
- Peter, L.; Janko, J.; Schick, N.; Waßmuth, V.; Friedrich, M.; Bawidamann, J. (2021) Entwicklung eines aktuellen, Echtzeit-verfügbaren Key Performance Indicator (KPI) Systems für das deutsche Autobahnnetz, BASt-Bericht V 342.
- Pfaffinger, M.; Fuchs, R.A.; Gnädinger, J.; Wulfhorst G. (2016): Klimaschutzteilkonzept Mobilität – Landkreis Neu-Ulm.
- Pfertner M. (2017): Evaluation of Mobility Stations in Würzburg – perceptions, awareness, and effects on travel behavior, car ownership and CO₂ emissions. Master Thesis an der Technischen Universität München.
- Prümm, D.; Kauschke, P.; Peiseler, H. (2017): Aufbruch auf der letzten Meile – Neue Wege für die städtische Logistik. Herausgeber: PricewaterhouseCoopers GmbH Wirtschaftsprüfungsgesellschaft.
- Rabenstein, B. (2015): Öffentliche Fahrradverleihsysteme – Wirkungen und Potentiale. In: Veröffentlichungen aus dem Institut für Straßen und Verkehrswesen der Universität Stuttgart, Heft 54.
- Radke, S. (2019): Verkehr in Zahlen 2019/2020. 48. Jahrgang. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg.). Bearbeitung durch Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Kraftfahrt-Bundesamt.
- Radl, U. (2012): Bewertungsmethodik der Verkehrssteuerung innerstädtischer Hauptverkehrsstraßen. Masterarbeit, Institut für Straßen- und Verkehrswesen, Technische Universität Graz.
- Regierungspräsidium Stuttgart (2018): Luftreinhalteplan für den Regierungsbezirk Stuttgart – Teilplan Landeshauptstadt Stuttgart. 3. Fortschreibung des Luftreinhalteplans zur Minderung der PM10- und NO₂-Belastungen.
- Richter, E.; Seelhorst, K.; Friedrich, M. (2021): Studie zur Integration eines autonomen Ridesharingangebots in den ÖV im peri-urbanen Raum der Region Stuttgart. Im Rahmen des EU-Förderprojektes „Dynaxibility4EC“. Im Auftrag des Verbands Region Stuttgart.
- Riel, J. (2002): Modellierung von Störungen des Verkehrsablaufs durch Ein- und Ausparken am Fahrbahnrand. Dissertationsschrift an der Bergischen Universität Wuppertal.
- Rikus, S.; Hoffmann, S.; Ungureanu, T.; Rommerskirchen, S.; Plesker, M. (2015): Auskunft über verfügbare Parkplätze in Städten. FAT - Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (Hrsg.), FAT-Schriftenreihe 271. Bearbeitung durch Prognos AG.
- RIS Logis.net (2009): Verkehrsuntersuchung in der Gemeinde Bohmte unter besonderer Berücksichtigung der Wirkungen des Shared Space Bereichs. Präsentation vom 11.09.2009. Bohmte.
- Ritz, C. (2019): Modellierung und Wirkungen von Maßnahmen der städtischen Verkehrsplanung. In: Veröffentlichungen aus dem Institut für Straßen und Verkehrswesen der Universität Stuttgart, Heft 57.
- Roth, N. (2009): Wirkungen des Mobility Pricing. In: Schriftenreihe des Instituts für Verkehr Fachgebiet Verkehrsplanung und Verkehrstechnik, Heft V 22. Herausgeber: Technische Universität Darmstadt. Darmstadt.
- Rühl, F. (2018): Das Konzept des Transportmanagements zur Beeinflussung der Güterverkehrsnachfrage im Rahmen der kommunalen Verkehrsplanung. Dissertation. Institut für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik, Technische Universität Darmstadt, Schriftenreihe des Instituts für Verkehr, V37, Darmstadt,
- Santa, C.; Kath, J.; Mathias, P.; Schendzielorz, T. (2014): Potenziale kooperativer Lichtsignalsteuerung zur Steigerung der Verkehrseffizienz und -sicherheit. In: Straßenverkehrstechnik 10.2014. S. 676-683.

- Schäfer, P.K.; Weiser, F.; Wendt, D.H.; Tamm, D. (2021): Umweltmobilitätshub – Potentialanalyse einer Plattform zur Integration von eCarsharing, Fahrgemeinschafts- und Mitbring-Funktionen. Frankfurt am Main.
- Schick, P. (2003): Einfluss von Streckenbeeinflussungsanlagen auf die Kapazität von Autobahnabschnitten sowie die Stabilität des Verkehrsflusses. Dissertationsschrift an der Universität Stuttgart. Veröffentlichungen aus dem Institut für Straßen- und Verkehrswesen, Heft 35.
- Schlag, B.; Lacroix, J.; Müller, D.; Richter, F.; Schuh, K. (2018): Wirkung eines Tempolimits von 130 km/h auf Autobahnen. Faktensammlung. Im Auftrag des DVR-Vorstandsausschusses Verkehrstechnik an den Deutschen Verkehrssicherheitsrat.
- Schrade, J.; Schmaus, M.; Huster, F.; Nöldeke, J.; Erhorn, H. et al. (2017): Masterplan 100 % Klimaschutz der Landeshauptstadt Stuttgart. IBP-Bericht WB 198/2017.
- Schrader, K. (2020): Generelles Tempolimit auf Autobahnen: Hohe volkswirtschaftliche Kosten sind zu berücksichtigen. In: Kiel Policy Brief Nr. 145. Herausgeber: Institut für Weltwirtschaft (IfW).
- Schüler, T.; Friedrich, B.; Rohde, J. (2008): Emissions- und Kraftstoffreduzierung im Stadtverkehr durch innovative Verkehrslenkungsmaßnahmen. Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt, gefördert unter dem Az: 24356 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt.
- Schygulla, M.; Stöcke, H.; Hillesheim, D.; Kern, D.; Wiethoff, T. (2011): Logistik-V'Info – Traffic Information for dynamic transport planning better performance in logistics benefit for environment and infrastructure. Projektbericht des BMWi-Förderprojekts FKZ 19 G 7027.
- Senatsverwaltung Umwelt, Verkehr und Klimaschutz Berlin (Hrsg.) (2021): Untersuchungskonzept zur lufthygienischen und verkehrlichen Wirkung von Tempo 30 mit Verkehrsverstetigung als Maßnahmen des Luftreinhalteplans zur Reduzierung von NO₂. Abschlussbericht
- Stein, T.; Bauer, U. (Hrsg.) (2019): Mobilitätsstationen in der kommunalen Praxis, Erkenntnisse und Erfahrungen aus dem BMU-Forschungsprojekt City2Share und weiteren kommunalen Praxisbeispielen. 2. City2Share-Diskussionspapier. Difu-Sonderveröffentlichung. Berlin.
- Sumpf, J. (2008): Simulationsgestützte Methoden zur Ermittlung der Wirkung partizipativer Maßnahmen auf den lokalen Verkehr. Dissertationsschrift an der Technischen Universität Berlin. Berlin.
- Tennøy, A.; Hagen, O. H. (2020): Reallocation of Road and Street Space in Oslo. Measures for Zero Growth in Urban Traffic. Paris. International Transport Forum Discussion Papers 2020/14.
- TMUEN – Thüringer Ministerium für Umwelt, Energie und Naturschutz (2019): Integrierte Energie- und Klimaschutzstrategie.
- Toenges-Schuller, N.; Schneider, C.; Niederau, A. (2012): Ersteinschätzung der Wirkung von Tempo 30 auf Hauptverkehrsstraßen auf die NO_x- und PM₁₀-Emissionen. Herausgeber: LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg. Bearbeitung: AVISO GmbH.
- TomTom International BV (2020): What are Functional Road Classes (FRC). <https://developer.tomtom.com/traffic-stats/support/faq/what-are-functional-road-classes-frc> (17.10.2020).
- TomTom (2020): TomTom-Streckennetz und Geschwindigkeitsdaten. Netzstand 2016. Geschwindigkeitsdaten 2018. Daten für das Projekt käuflich erworben.
- Topp, H. (2014): Tempo 30 auf Hauptverkehrsstraßen mit Wohnnutzung. In: Straßenverkehrstechnik 1.2014. S. 23-30.
- Trenkwalder L. (2021): Mikro- und makroskopische Emissionsmodellierung von signalisierten Straßenzügen. Masterarbeit an der Technischen Universität Graz, Institut für Straßen- und Verkehrswesen.

- Uhlig, B.; Schenk, M.; Reiter, U. (2018): Simulationen und Modellierung im Rahmen des Aktionsplan Luftreinhaltung in Städten – Maßnahmen und deren Wirkungen zur Reduzierung der NO₂-Immissionen in der Landeshauptstadt Kiel. PTV Group. Karlsruhe, Berlin.
- Waterson, B.J.; Hounsell, N.B.; Chatterjee, K. (2001): Quantifying the potential savings in travel time resulting from parking guidance systems – a simulation case study. In: *Journal of the Operational Research Society*, 52(10). S. 1067-1077. DOI 10.1057/palgrave.jors.2601207.
- Weyland, C. M.; Buck, S.; Vortisch, P. (2022): Potenziale zur Emissionsreduktion durch umweltabhängige Steuerung von Streckenbeeinflussungsanlagen. In: *Straßenverkehrstechnik* 4.2022. DOI: 10.53184/SVT4-2022-1.
- Wiedemann, R. (1974): Simulation des Straßenverkehrsflusses. In: *Schriftenreihe des IfV*, 8, 1974. Institut für Verkehrswesen. Universität Karlsruhe.
- Wissenschaftlicher Beirat beim Bundesminister für Verkehr und digitale Infrastruktur (2021): Perspektiven für den Stadtverkehr der Zukunft. Gutachten 01/2021.
- Wissenschaftlicher Dienst des Deutschen Bundestages (2019): Fahrzeug-Emissionen bei 30 km/h und 50 km/h. Dokumentation WD 8 – 3000 – 102/19.
- Van Mierlo, J.; Maggetto, G.; Van de Burgwal, E.; Gense, R. (2004): Driving style and traffic measures – influence on vehicle emissions and fuel consumption. In: *Proceedings of the Institution on Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 218(2004). S. 43-50. DOI 10.1243/095440704322829155.
- Van Ommeren, J.N.; Wentink, D.; Rietvelt, P. (2011): Empirical evidence on cruising for parking. In: *Transportation Research Part A*, 42(2012). S. 123-130. DOI 10.1016/j.tra.2011.09.011.
- VRR (Verkehrsverbund Rhein-Ruhr AöR) (2022): Fahrplandaten des Verkehrsverbunds der Region Stuttgart. Online: <https://www.opendata-oePNV.de/> (22.02.2022).
- Zallinger, M. (2010): Mikroskopische Simulation der Emissionen von Personenkraftfahrzeugen, Dissertation, Technische Universität Graz, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik.
- Zimmer, W.; Blanck, R.; Bergmann, T.; Mottschall, M.; von Waldenfels, R. et al. (2016): Endbericht Renewbility III – Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors. Im Auftrag des BMU unter dem Förderkennzeichen 2013/S 142-247681.
- Züger, P.; Burch, D. (2000): Verkehrskreisel – Treibstoffverbrauch, Schadstoffemissionen, Durchfahrtszeiten. MAMA-Messprojekt. Emmen.

A Anhang

A.1 DTV-Werte und Korrekturfaktoren für die Hochrechnung der Fahrleistungen der Fahrzeugkategorien „LNF“, „RBus“, „LBus“ und „KR/MR“

Tabelle 87: DTV-Werte und Korrekturfaktoren zur Hochrechnung der Fahrleistungen der Fahrzeugkategorie „LNF“

| Straßenklasse | | DTV aus Nachfragemodellen der Stadtregionen ab FRC 4 | Fahrleistungen mit gesetzten DTV-Werten in Mrd. Fzgkm/a | Korrekturfaktor für bekannte Verkehrsstärken |
|---------------|-----------------|--|---|--|
| Autobahn | | - | 14,5 | 100,1 % |
| Außerorts | Bundesstraße | 118 | 4,8 | 99,9 % |
| | Landesstraße | 150 | 9,2 | 74,5 % |
| | Kreisstraße | 163 | 10,2 | 38,3 % |
| | Sonstige Straße | 12 | 7,2 | 60,3 % |
| Innerorts | Bundesstraße | 250 | 5,4 | 99,8 % |
| | Landesstraße | 216 | 4,9 | 75,5 % |
| | Kreisstraße | 249 | 4,2 | 44,1 % |
| | Sonstige Straße | 25 | 9,9 | 58,3 % |

Tabelle 88: DTV-Werte und Korrekturfaktoren zur Hochrechnung der Fahrleistungen der Fahrzeugkategorie „RBus“

| Straßenklasse | | DTV aus Nachfragemodellen der Stadtregionen ab FRC 4 | Fahrleistungen mit gesetzten DTV-Werten in Mrd. Fzgkm/a | Korrekturfaktor für bekannte Verkehrsstärken |
|---------------|-----------------|--|---|--|
| Autobahn | | - | 0,8 | 100,1 % |
| Außerorts | Bundesstraße | 10 | 0,4 | 99,9 % |
| | Landesstraße | 5 | 0,3 | 74,6 % |
| | Kreisstraße | 4 | 0,2 | 38,3 % |
| | Sonstige Straße | 0 | 0,2 | 83,2 % |
| Innerorts | Bundesstraße | 7 | 0,1 | 99,9 % |
| | Landesstraße | 3 | 0,1 | 75,5 % |
| | Kreisstraße | 4 | 0,1 | 44,1 % |
| | Sonstige Straße | 0 | 0,1 | 62,9 % |

Tabelle 89: DTV-Werte und Korrekturfaktoren zur Hochrechnung der Fahrleistungen der Fahrzeugkategorie „LBus“

| Straßenklasse | | DTV aus Nachfragemodellen der Stadtregionen ab FRC 4 | Fahrleistungen mit gesetzten DTV-Werten in Mrd. Fzgkm/a | Korrekturfaktor für bekannte Verkehrsstärken |
|---------------|-----------------|--|---|--|
| Autobahn | | - | 0,2 | 100,1 % |
| Außerorts | Bundesstraße | 2 | 0,1 | 99,9 % |
| | Landesstraße | 8 | 0,5 | 75,3 % |
| | Kreisstraße | 7 | 0,5 | 39,1 % |
| | Sonstige Straße | 2 | 0,6 | 87,8 % |
| Innerorts | Bundesstraße | 4 | 0,1 | 99,9 % |
| | Landesstraße | 12 | 0,3 | 76,4 % |
| | Kreisstraße | 19 | 0,3 | 44,9 % |
| | Sonstige Straße | 2 | 0,5 | 90,9 % |

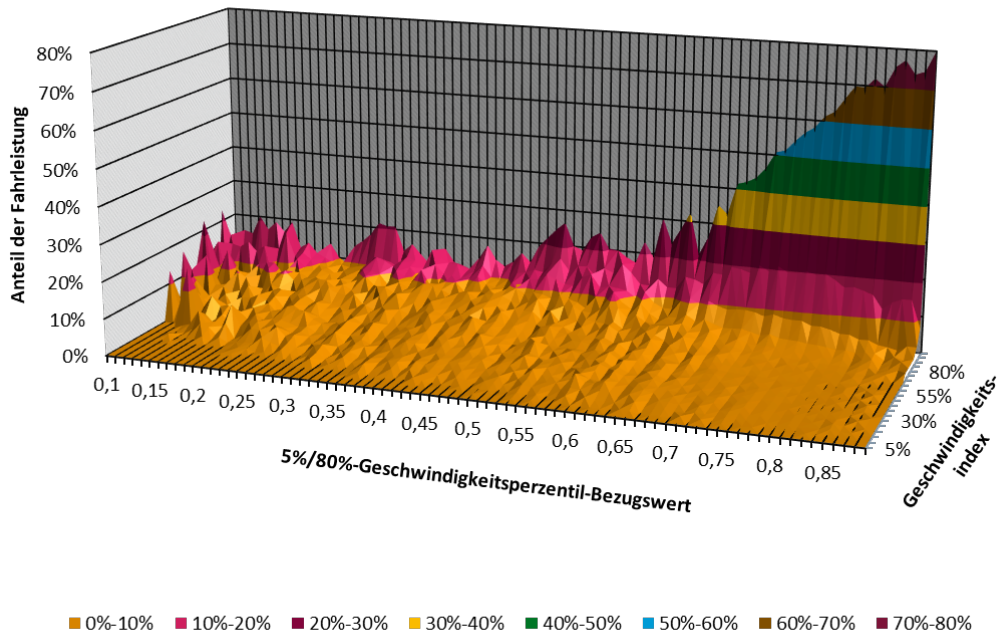
Tabelle 90: DTV-Werte und Korrekturfaktoren zur Hochrechnung der Fahrleistungen der Fahrzeugkategorie „KR/MR“

| Straßenklasse | | DTV aus Nachfragemodellen der Stadtregionen ab FRC 4 | Fahrleistungen mit gesetzten DTV-Werten in Mrd. Fzgkm/a | Korrekturfaktor für bekannte Verkehrsstärken |
|---------------|-----------------|--|---|--|
| Autobahn | | - | 1,4 | 100,1 % |
| Außerorts | Bundesstraße | 33 | 1,3 | 99,9 % |
| | Landesstraße | 61 | 3,6 | 73,8 % |
| | Kreisstraße | 71 | 4,3 | 37,2 % |
| | Sonstige Straße | 3 | 1,8 | 55,9 % |
| Innerorts | Bundesstraße | 37 | 0,8 | 99,8 % |
| | Landesstraße | 85 | 1,9 | 74,9 % |
| | Kreisstraße | 91 | 1,5 | 43,1 % |
| | Sonstige Straße | 17 | 5,1 | 76,0 % |

A.2 Graphen der Aufteilung der langsamsten und schnellsten 5 % der Fahrleistung

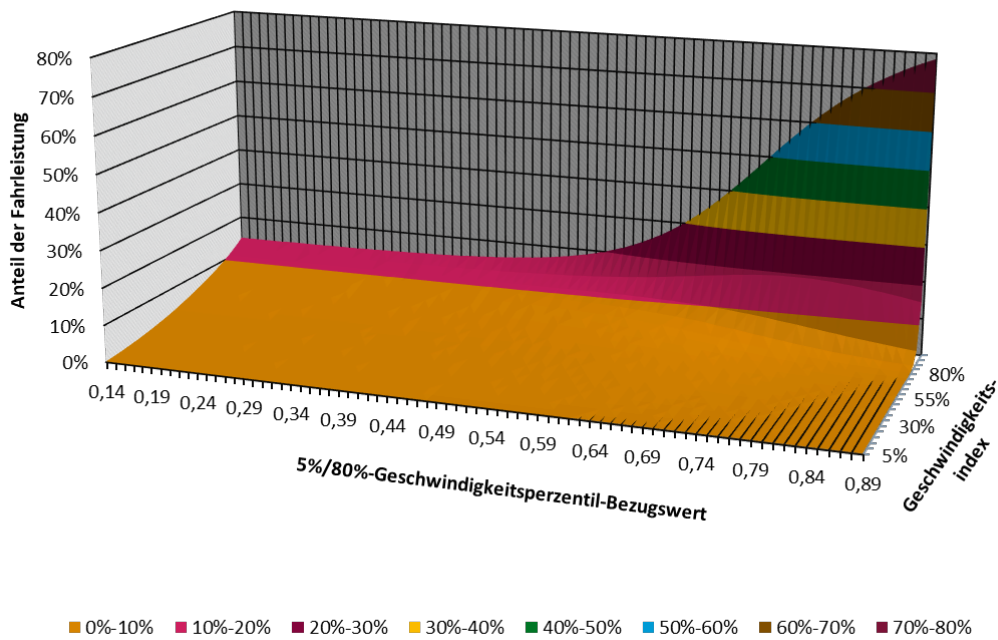
A.2.1 Langsamste 5 % auf Autobahnen und Bundesstraßen

Abbildung 77: Zähldaten der langsamsten 5 % der Fahrzeuge auf Autobahnen und Bundesstraßen



Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart, auf Grundlage von Zählstellendaten aus NRW

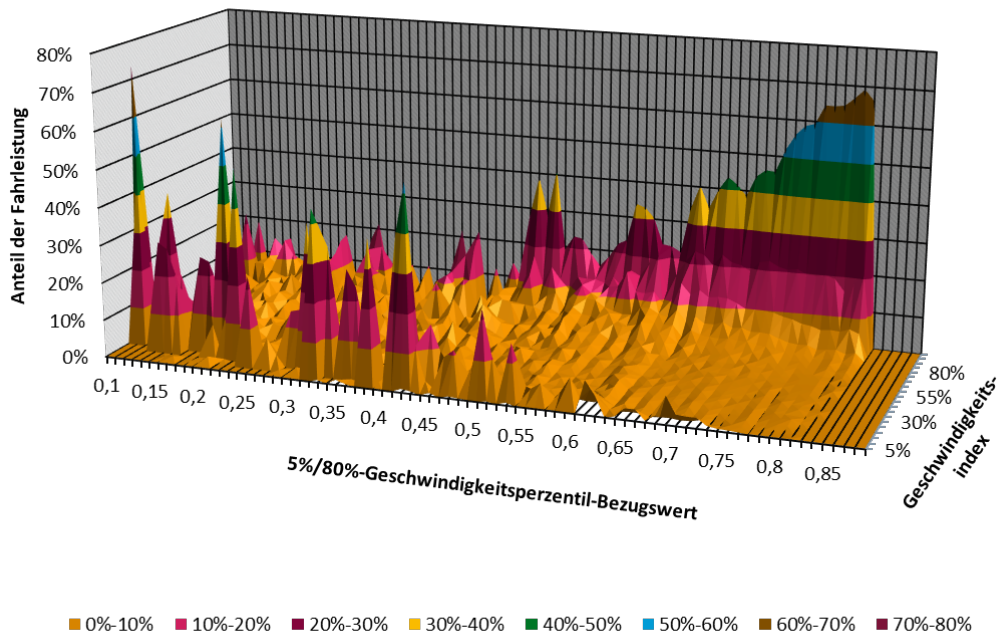
Abbildung 78: Funktionsverlauf für die langsamsten 5 % der Fahrzeuge auf Autobahnen und Bundesstraßen



Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart

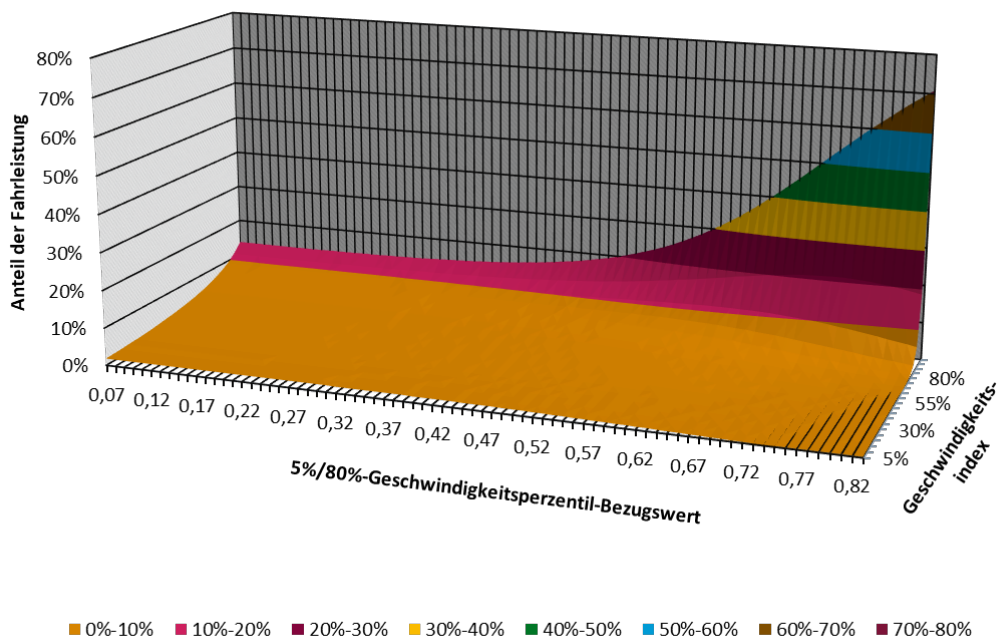
A.2.2 Langsamste 5 % auf sonstigen Straßen

Abbildung 79: Zähldaten der langsamsten 5 % der Fahrzeuge auf sonstigen Straßen



Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart, auf Grundlage von Zählstellendaten aus Düsseldorf

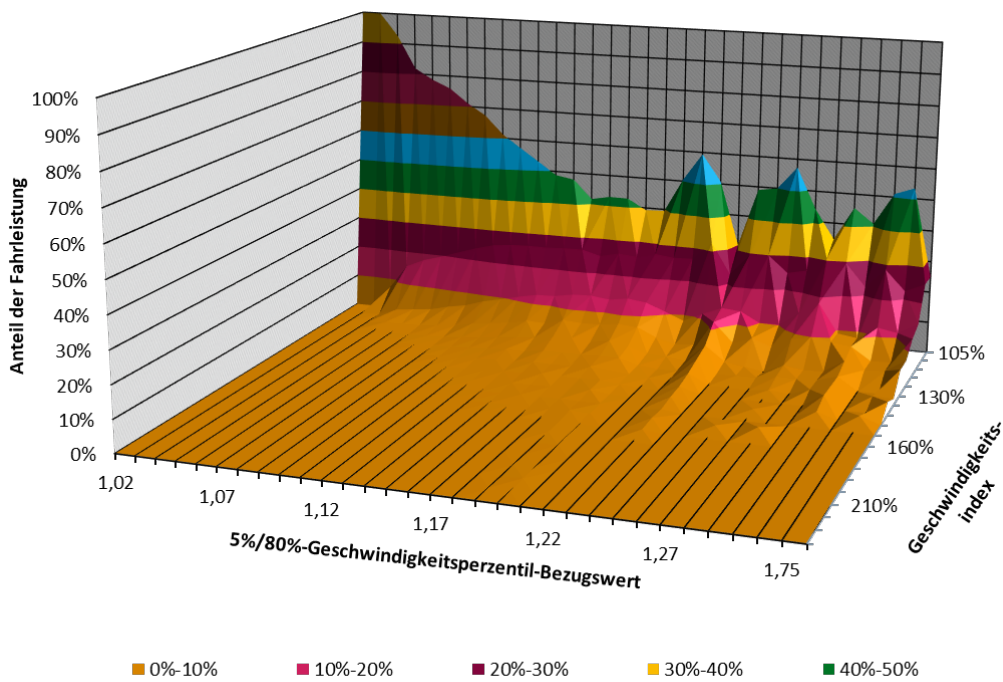
Abbildung 80: Funktionsverlauf für die langsamsten 5 % der Fahrzeuge auf sonstigen Straßen



Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart, auf Grundlage von Zählstellendaten aus Düsseldorf

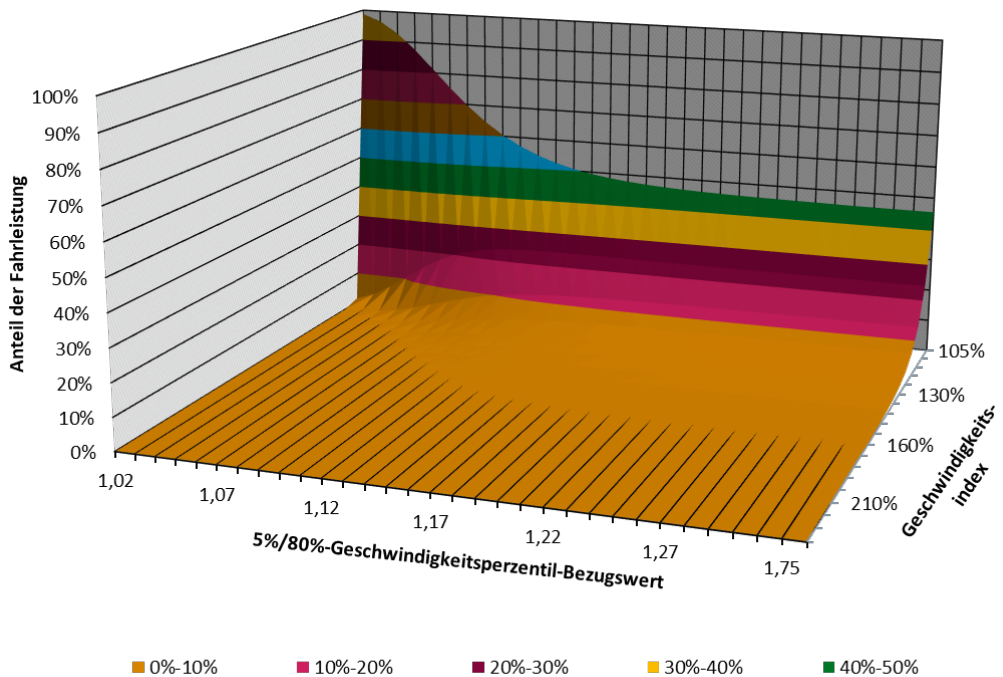
A.2.3 Schnellste 5 % auf Autobahnen und Bundesstraßen

Abbildung 81: Zähldaten der schnellsten 5 % der Fahrzeuge auf Autobahnen und Bundesstraßen



Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart, auf Grundlage von Zählstellendaten aus NRW

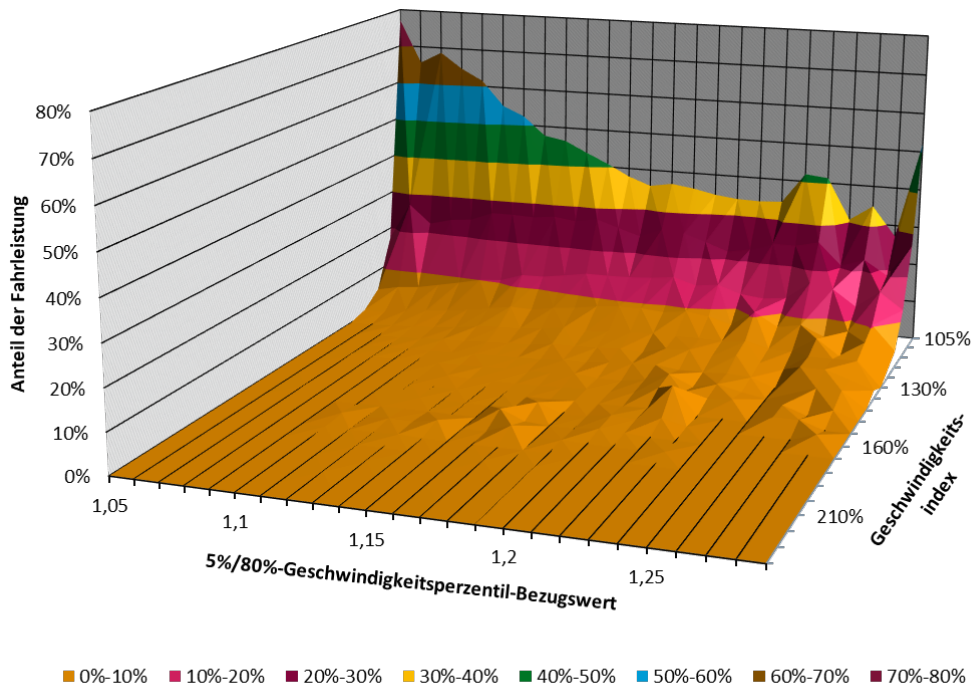
Abbildung 82: Funktionsverlauf für die schnellsten 5 % der Fahrzeuge auf Autobahnen und Bundesstraßen



Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart,

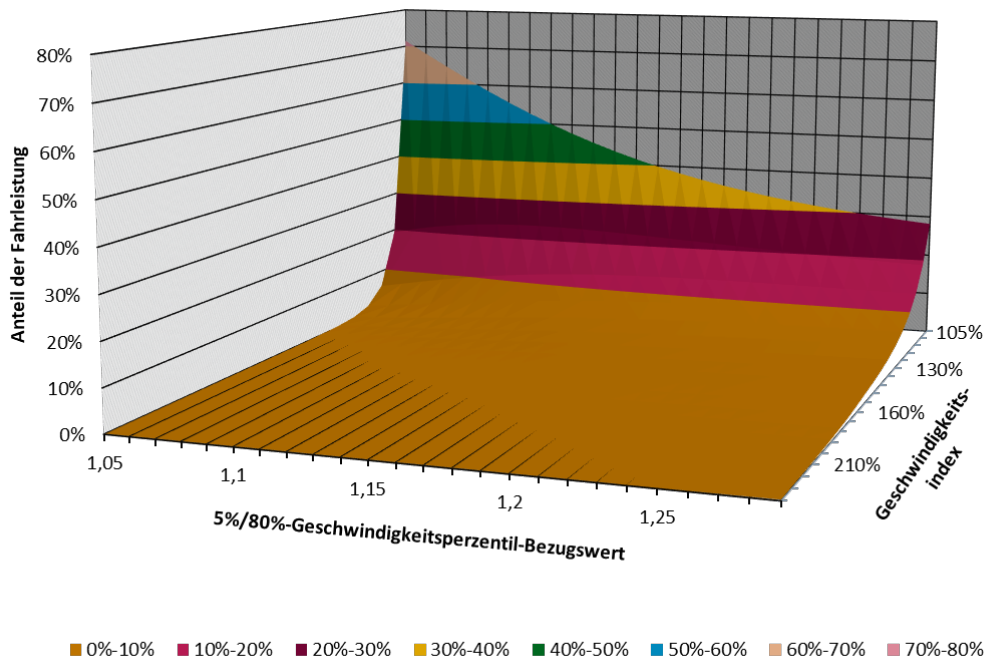
A.2.4 Schnellste 5 % auf sonstigen Straßen

Abbildung 83: Zähldaten der schnellsten 5 % der Fahrzeuge auf sonstigen Straßen



Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart, auf Grundlage von Zählstellendaten aus Düsseldorf

Abbildung 84: Funktionsverlauf für die schnellsten 5 % der Fahrzeuge auf sonstigen Straßen



Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart,

A.3 Fahrleistungsanteile je Verkehrssituation

In der folgenden Tabelle werden die Fahrleistungsanteile differenziert nach Straßenkategorie *k*, Steigungsklasse *stgk*, Verkehrszustand *v* und Fahrzeugkategorie dargestellt.

| k, stgk, v | Pkw | LNF | SNF | Rbus | Lbus | KR |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| La/AB/60 | 0,0689 % | 0,0888 % | 0,0898 % | 0,1270 % | 0,1951 % | 0,0548 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0349 % | 0,0481 % | 0,0445 % | 0,0691 % | 0,1041 % | 0,0302 % |
| dicht | 0,0045 % | 0,0081 % | 0,0055 % | 0,0114 % | 0,0181 % | 0,0044 % |
| gesättigt | 0,0016 % | 0,0024 % | 0,0019 % | 0,0032 % | 0,0049 % | 0,0012 % |
| Stop&Go | 0,0004 % | 0,0007 % | 0,0005 % | 0,0009 % | 0,0013 % | 0,0003 % |
| Stop&Go II | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0001 % | 0,0003 % | 0,0003 % | 0,0001 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0163 % | 0,0154 % | 0,0215 % | 0,0222 % | 0,0366 % | 0,0108 % |
| dicht | 0,0049 % | 0,0037 % | 0,0076 % | 0,0051 % | 0,0099 % | 0,0025 % |
| gesättigt | 0,0011 % | 0,0010 % | 0,0018 % | 0,0013 % | 0,0025 % | 0,0006 % |
| Stop&Go | 0,0003 % | 0,0003 % | 0,0003 % | 0,0003 % | 0,0006 % | 0,0002 % |
| Stop&Go II | 0,0001 % | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0000 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0024 % | 0,0037 % | 0,0030 % | 0,0056 % | 0,0061 % | 0,0018 % |
| dicht | 0,0007 % | 0,0011 % | 0,0008 % | 0,0017 % | 0,0017 % | 0,0005 % |
| gesättigt | 0,0002 % | 0,0004 % | 0,0003 % | 0,0005 % | 0,0006 % | 0,0002 % |
| Stop&Go | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0000 % |
| Stop&Go II | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0010 % | 0,0025 % | 0,0015 % | 0,0037 % | 0,0056 % | 0,0014 % |
| dicht | 0,0003 % | 0,0008 % | 0,0003 % | 0,0011 % | 0,0019 % | 0,0004 % |
| gesättigt | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0001 % | 0,0004 % | 0,0004 % | 0,0001 % |
| Stop&Go | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0000 % |
| Stop&Go II | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % |
| La/AB/80 | 0,3837 % | 0,4905 % | 0,5222 % | 0,6902 % | 0,4351 % | 0,2024 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,1608 % | 0,2098 % | 0,2018 % | 0,3024 % | 0,1463 % | 0,0808 % |
| dicht | 0,0526 % | 0,0799 % | 0,0695 % | 0,1087 % | 0,0847 % | 0,0363 % |
| gesättigt | 0,0159 % | 0,0338 % | 0,0191 % | 0,0424 % | 0,0502 % | 0,0169 % |
| Stop&Go | 0,0028 % | 0,0051 % | 0,0026 % | 0,0063 % | 0,0046 % | 0,0020 % |
| Stop&Go II | 0,0005 % | 0,0008 % | 0,0005 % | 0,0011 % | 0,0005 % | 0,0003 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0714 % | 0,0704 % | 0,1016 % | 0,1029 % | 0,0571 % | 0,0275 % |
| dicht | 0,0208 % | 0,0250 % | 0,0319 % | 0,0339 % | 0,0362 % | 0,0121 % |
| gesättigt | 0,0082 % | 0,0100 % | 0,0131 % | 0,0131 % | 0,0170 % | 0,0053 % |
| Stop&Go | 0,0016 % | 0,0020 % | 0,0022 % | 0,0026 % | 0,0025 % | 0,0008 % |
| Stop&Go II | 0,0002 % | 0,0003 % | 0,0003 % | 0,0005 % | 0,0003 % | 0,0001 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0231 % | 0,0226 % | 0,0312 % | 0,0334 % | 0,0135 % | 0,0082 % |
| dicht | 0,0061 % | 0,0074 % | 0,0089 % | 0,0103 % | 0,0074 % | 0,0031 % |
| gesättigt | 0,0020 % | 0,0029 % | 0,0031 % | 0,0037 % | 0,0040 % | 0,0014 % |
| Stop&Go | 0,0010 % | 0,0008 % | 0,0013 % | 0,0010 % | 0,0009 % | 0,0003 % |
| Stop&Go II | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0002 % | 0,0001 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0097 % | 0,0124 % | 0,0191 % | 0,0179 % | 0,0050 % | 0,0044 % |
| dicht | 0,0053 % | 0,0049 % | 0,0118 % | 0,0069 % | 0,0029 % | 0,0019 % |
| gesättigt | 0,0014 % | 0,0019 % | 0,0037 % | 0,0024 % | 0,0018 % | 0,0008 % |
| Stop&Go | 0,0002 % | 0,0004 % | 0,0003 % | 0,0005 % | 0,0002 % | 0,0001 % |
| Stop&Go II | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % |

| k, stgk, v | Pkw | LNF | SNF | Rbus | Lbus | KR |
|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| La/AB/100 | 1,7411 % | 2,0403 % | 2,6726 % | 2,8513 % | 1,0529 % | 0,7432 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,5496 % | 0,6283 % | 0,7904 % | 0,9035 % | 0,2593 % | 0,2212 % |
| dicht | 0,3287 % | 0,4392 % | 0,5269 % | 0,6093 % | 0,2426 % | 0,1626 % |
| gesättigt | 0,1461 % | 0,2057 % | 0,1977 % | 0,2681 % | 0,1626 % | 0,0831 % |
| Stop&Go | 0,0191 % | 0,0256 % | 0,0237 % | 0,0312 % | 0,0169 % | 0,0090 % |
| Stop&Go II | 0,0019 % | 0,0027 % | 0,0025 % | 0,0033 % | 0,0020 % | 0,0010 % |
| +/- 2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,2569 % | 0,2484 % | 0,3660 % | 0,3578 % | 0,0966 % | 0,0856 % |
| dicht | 0,1432 % | 0,1619 % | 0,2313 % | 0,2251 % | 0,0891 % | 0,0594 % |
| gesättigt | 0,0576 % | 0,0708 % | 0,0830 % | 0,0911 % | 0,0661 % | 0,0302 % |
| Stop&Go | 0,0086 % | 0,0101 % | 0,0107 % | 0,0123 % | 0,0061 % | 0,0034 % |
| Stop&Go II | 0,0010 % | 0,0011 % | 0,0011 % | 0,0014 % | 0,0008 % | 0,0004 % |
| +/- 4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,1008 % | 0,0954 % | 0,1767 % | 0,1372 % | 0,0351 % | 0,0328 % |
| dicht | 0,0462 % | 0,0519 % | 0,1012 % | 0,0733 % | 0,0244 % | 0,0182 % |
| gesättigt | 0,0163 % | 0,0206 % | 0,0360 % | 0,0272 % | 0,0140 % | 0,0078 % |
| Stop&Go | 0,0026 % | 0,0027 % | 0,0050 % | 0,0034 % | 0,0018 % | 0,0010 % |
| Stop&Go II | 0,0002 % | 0,0003 % | 0,0004 % | 0,0003 % | 0,0002 % | 0,0001 % |
| +/- 6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0367 % | 0,0363 % | 0,0649 % | 0,0527 % | 0,0136 % | 0,0127 % |
| dicht | 0,0172 % | 0,0230 % | 0,0364 % | 0,0328 % | 0,0122 % | 0,0086 % |
| gesättigt | 0,0071 % | 0,0141 % | 0,0163 % | 0,0190 % | 0,0083 % | 0,0051 % |
| Stop&Go | 0,0012 % | 0,0018 % | 0,0022 % | 0,0023 % | 0,0011 % | 0,0006 % |
| Stop&Go II | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0002 % | 0,0002 % | 0,0001 % | 0,0001 % |
| La/AB/120 | 3,1524 % | 2,9280 % | 5,6698 % | 4,1436 % | 1,0404 % | 1,0103 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,9028 % | 0,7742 % | 1,4722 % | 1,1254 % | 0,2303 % | 0,2646 % |
| dicht | 0,6858 % | 0,6570 % | 1,1019 % | 0,9300 % | 0,2164 % | 0,2237 % |
| gesättigt | 0,4613 % | 0,5048 % | 1,0002 % | 0,6881 % | 0,2292 % | 0,1771 % |
| Stop&Go | 0,0359 % | 0,0390 % | 0,0516 % | 0,0479 % | 0,0179 % | 0,0132 % |
| Stop&Go II | 0,0034 % | 0,0037 % | 0,0046 % | 0,0044 % | 0,0022 % | 0,0013 % |
| +/- 2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,3381 % | 0,2609 % | 0,6083 % | 0,3822 % | 0,0776 % | 0,0890 % |
| dicht | 0,2575 % | 0,2162 % | 0,4390 % | 0,3068 % | 0,0741 % | 0,0736 % |
| gesättigt | 0,1585 % | 0,1583 % | 0,3500 % | 0,2142 % | 0,0853 % | 0,0590 % |
| Stop&Go | 0,0135 % | 0,0133 % | 0,0194 % | 0,0162 % | 0,0066 % | 0,0046 % |
| Stop&Go II | 0,0011 % | 0,0011 % | 0,0015 % | 0,0013 % | 0,0005 % | 0,0004 % |
| +/- 4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0957 % | 0,0819 % | 0,1927 % | 0,1194 % | 0,0242 % | 0,0283 % |
| dicht | 0,0758 % | 0,0651 % | 0,1456 % | 0,0929 % | 0,0204 % | 0,0221 % |
| gesättigt | 0,0398 % | 0,0393 % | 0,1030 % | 0,0533 % | 0,0147 % | 0,0144 % |
| Stop&Go | 0,0031 % | 0,0029 % | 0,0057 % | 0,0036 % | 0,0011 % | 0,0011 % |
| Stop&Go II | 0,0002 % | 0,0002 % | 0,0004 % | 0,0003 % | 0,0001 % | 0,0001 % |
| +/- 6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0331 % | 0,0435 % | 0,0683 % | 0,0642 % | 0,0130 % | 0,0150 % |
| dicht | 0,0276 % | 0,0368 % | 0,0578 % | 0,0526 % | 0,0131 % | 0,0128 % |
| gesättigt | 0,0173 % | 0,0275 % | 0,0448 % | 0,0376 % | 0,0124 % | 0,0094 % |
| Stop&Go | 0,0014 % | 0,0022 % | 0,0027 % | 0,0027 % | 0,0010 % | 0,0007 % |
| Stop&Go II | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0002 % | 0,0002 % | 0,0001 % | 0,0001 % |

| k, stgk, v | Pkw | LNF | SNF | Rbus | Lbus | KR |
|----------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|-----------------|
| La/AB/130 | 2,7854 % | 2,3697 % | 5,6634 % | 3,3632 % | 0,7987 % | 0,8120 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,4752 % | 0,3577 % | 0,8655 % | 0,5232 % | 0,1070 % | 0,1246 % |
| dicht | 0,6108 % | 0,4979 % | 1,1070 % | 0,7062 % | 0,1605 % | 0,1706 % |
| gesättigt | 0,5721 % | 0,5497 % | 1,2949 % | 0,7678 % | 0,2135 % | 0,1869 % |
| Stop&Go | 0,0304 % | 0,0311 % | 0,0527 % | 0,0399 % | 0,0123 % | 0,0102 % |
| Stop&Go II | 0,0019 % | 0,0019 % | 0,0032 % | 0,0025 % | 0,0008 % | 0,0006 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,2310 % | 0,1619 % | 0,4503 % | 0,2356 % | 0,0483 % | 0,0568 % |
| dicht | 0,2729 % | 0,2167 % | 0,5373 % | 0,3078 % | 0,0684 % | 0,0746 % |
| gesättigt | 0,2605 % | 0,2286 % | 0,6658 % | 0,3205 % | 0,0848 % | 0,0774 % |
| Stop&Go | 0,0147 % | 0,0131 % | 0,0278 % | 0,0166 % | 0,0059 % | 0,0045 % |
| Stop&Go II | 0,0009 % | 0,0008 % | 0,0016 % | 0,0010 % | 0,0003 % | 0,0003 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0724 % | 0,0557 % | 0,1380 % | 0,0806 % | 0,0164 % | 0,0195 % |
| dicht | 0,0920 % | 0,0811 % | 0,1767 % | 0,1157 % | 0,0243 % | 0,0277 % |
| gesättigt | 0,0987 % | 0,0952 % | 0,2413 % | 0,1350 % | 0,0308 % | 0,0317 % |
| Stop&Go | 0,0064 % | 0,0061 % | 0,0136 % | 0,0078 % | 0,0020 % | 0,0020 % |
| Stop&Go II | 0,0003 % | 0,0003 % | 0,0007 % | 0,0004 % | 0,0001 % | 0,0001 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0119 % | 0,0159 % | 0,0214 % | 0,0231 % | 0,0047 % | 0,0055 % |
| dicht | 0,0177 % | 0,0242 % | 0,0309 % | 0,0349 % | 0,0076 % | 0,0083 % |
| gesättigt | 0,0147 % | 0,0297 % | 0,0329 % | 0,0421 % | 0,0104 % | 0,0100 % |
| Stop&Go | 0,0008 % | 0,0019 % | 0,0016 % | 0,0025 % | 0,0007 % | 0,0006 % |
| Stop&Go II | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0000 % | 0,0000 % |
| La/AB/>130 | 18,5745 % | 13,3831 % | 35,0009 % | 18,9551 % | 4,0610 % | 4,5119 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 3,7865 % | 2,4162 % | 6,2719 % | 3,5037 % | 0,7192 % | 0,8456 % |
| dicht | 4,8123 % | 3,3071 % | 8,1237 % | 4,6715 % | 0,9964 % | 1,1255 % |
| gesättigt | 4,0037 % | 3,2542 % | 8,6671 % | 4,5375 % | 1,0177 % | 1,0562 % |
| Stop&Go | 0,1958 % | 0,1597 % | 0,3339 % | 0,2088 % | 0,0522 % | 0,0516 % |
| Stop&Go II | 0,0104 % | 0,0084 % | 0,0171 % | 0,0109 % | 0,0028 % | 0,0027 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 1,4276 % | 0,8934 % | 2,5624 % | 1,2903 % | 0,2654 % | 0,3127 % |
| dicht | 1,7257 % | 1,1417 % | 3,1891 % | 1,6217 % | 0,3407 % | 0,3899 % |
| gesättigt | 1,3983 % | 1,0762 % | 3,3757 % | 1,5149 % | 0,3300 % | 0,3489 % |
| Stop&Go | 0,0700 % | 0,0521 % | 0,1334 % | 0,0688 % | 0,0169 % | 0,0169 % |
| Stop&Go II | 0,0036 % | 0,0027 % | 0,0066 % | 0,0035 % | 0,0008 % | 0,0009 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,2913 % | 0,2113 % | 0,5423 % | 0,3032 % | 0,0629 % | 0,0738 % |
| dicht | 0,3606 % | 0,2696 % | 0,6794 % | 0,3835 % | 0,0797 % | 0,0920 % |
| gesättigt | 0,2983 % | 0,2538 % | 0,7381 % | 0,3606 % | 0,0758 % | 0,0821 % |
| Stop&Go | 0,0163 % | 0,0122 % | 0,0343 % | 0,0163 % | 0,0040 % | 0,0040 % |
| Stop&Go II | 0,0008 % | 0,0006 % | 0,0016 % | 0,0008 % | 0,0002 % | 0,0002 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0423 % | 0,0800 % | 0,0752 % | 0,1151 % | 0,0238 % | 0,0280 % |
| dicht | 0,0622 % | 0,1163 % | 0,1075 % | 0,1651 % | 0,0345 % | 0,0397 % |
| gesättigt | 0,0648 % | 0,1206 % | 0,1340 % | 0,1695 % | 0,0360 % | 0,0390 % |
| Stop&Go | 0,0038 % | 0,0067 % | 0,0075 % | 0,0087 % | 0,0021 % | 0,0021 % |
| Stop&Go II | 0,0002 % | 0,0003 % | 0,0003 % | 0,0004 % | 0,0001 % | 0,0001 % |

| k, stgk, v | Pkw | LNF | SNF | Rbus | Lbus | KR |
|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| La/FStr/50 | 0,0289 % | 0,0472 % | 0,0249 % | 0,0841 % | 0,1070 % | 0,0428 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0079 % | 0,0118 % | 0,0068 % | 0,0240 % | 0,0159 % | 0,0108 % |
| dicht | 0,0013 % | 0,0033 % | 0,0007 % | 0,0059 % | 0,0060 % | 0,0030 % |
| gesättigt | 0,0006 % | 0,0021 % | 0,0003 % | 0,0036 % | 0,0039 % | 0,0018 % |
| Stop&Go | 0,0002 % | 0,0007 % | 0,0001 % | 0,0012 % | 0,0013 % | 0,0006 % |
| Stop&Go II | 0,0001 % | 0,0005 % | 0,0001 % | 0,0008 % | 0,0011 % | 0,0005 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0082 % | 0,0089 % | 0,0079 % | 0,0163 % | 0,0195 % | 0,0085 % |
| dicht | 0,0011 % | 0,0021 % | 0,0008 % | 0,0035 % | 0,0054 % | 0,0018 % |
| gesättigt | 0,0005 % | 0,0017 % | 0,0004 % | 0,0027 % | 0,0046 % | 0,0014 % |
| Stop&Go | 0,0003 % | 0,0007 % | 0,0002 % | 0,0011 % | 0,0018 % | 0,0006 % |
| Stop&Go II | 0,0002 % | 0,0005 % | 0,0001 % | 0,0008 % | 0,0014 % | 0,0004 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0040 % | 0,0045 % | 0,0038 % | 0,0077 % | 0,0120 % | 0,0041 % |
| dicht | 0,0008 % | 0,0016 % | 0,0006 % | 0,0022 % | 0,0049 % | 0,0016 % |
| gesättigt | 0,0002 % | 0,0007 % | 0,0002 % | 0,0010 % | 0,0020 % | 0,0007 % |
| Stop&Go | 0,0001 % | 0,0003 % | 0,0001 % | 0,0004 % | 0,0008 % | 0,0002 % |
| Stop&Go II | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0001 % | 0,0003 % | 0,0005 % | 0,0002 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0024 % | 0,0058 % | 0,0022 % | 0,0095 % | 0,0188 % | 0,0049 % |
| dicht | 0,0004 % | 0,0012 % | 0,0004 % | 0,0019 % | 0,0042 % | 0,0010 % |
| gesättigt | 0,0002 % | 0,0005 % | 0,0001 % | 0,0008 % | 0,0018 % | 0,0004 % |
| Stop&Go | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0001 % | 0,0003 % | 0,0006 % | 0,0001 % |
| Stop&Go II | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0000 % | 0,0002 % | 0,0002 % | 0,0001 % |
| La/FStr/60 | 0,0777 % | 0,0901 % | 0,0714 % | 0,1593 % | 0,1979 % | 0,0849 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0365 % | 0,0366 % | 0,0342 % | 0,0673 % | 0,0714 % | 0,0350 % |
| dicht | 0,0073 % | 0,0096 % | 0,0067 % | 0,0181 % | 0,0181 % | 0,0085 % |
| gesättigt | 0,0018 % | 0,0032 % | 0,0015 % | 0,0057 % | 0,0064 % | 0,0028 % |
| Stop&Go | 0,0006 % | 0,0011 % | 0,0004 % | 0,0019 % | 0,0024 % | 0,0011 % |
| Stop&Go II | 0,0004 % | 0,0006 % | 0,0002 % | 0,0010 % | 0,0012 % | 0,0005 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0150 % | 0,0149 % | 0,0137 % | 0,0256 % | 0,0394 % | 0,0135 % |
| dicht | 0,0050 % | 0,0058 % | 0,0053 % | 0,0090 % | 0,0159 % | 0,0056 % |
| gesättigt | 0,0011 % | 0,0021 % | 0,0011 % | 0,0032 % | 0,0055 % | 0,0020 % |
| Stop&Go | 0,0003 % | 0,0006 % | 0,0003 % | 0,0009 % | 0,0015 % | 0,0006 % |
| Stop&Go II | 0,0001 % | 0,0003 % | 0,0001 % | 0,0005 % | 0,0008 % | 0,0003 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0038 % | 0,0044 % | 0,0021 % | 0,0082 % | 0,0089 % | 0,0039 % |
| dicht | 0,0014 % | 0,0017 % | 0,0008 % | 0,0030 % | 0,0034 % | 0,0015 % |
| gesättigt | 0,0004 % | 0,0007 % | 0,0002 % | 0,0011 % | 0,0013 % | 0,0006 % |
| Stop&Go | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0000 % | 0,0003 % | 0,0004 % | 0,0002 % |
| Stop&Go II | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0001 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0027 % | 0,0059 % | 0,0034 % | 0,0093 % | 0,0153 % | 0,0067 % |
| dicht | 0,0008 % | 0,0018 % | 0,0011 % | 0,0031 % | 0,0047 % | 0,0015 % |
| gesättigt | 0,0002 % | 0,0004 % | 0,0002 % | 0,0007 % | 0,0008 % | 0,0003 % |
| Stop&Go | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0002 % | 0,0001 % |
| Stop&Go II | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0000 % |

| k, stgk, v | Pkw | LNF | SNF | Rbus | Lbus | KR |
|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| La/FStr/70 | 0,1580 % | 0,1756 % | 0,1771 % | 0,3320 % | 0,2744 % | 0,1681 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0667 % | 0,0599 % | 0,0819 % | 0,1176 % | 0,0839 % | 0,0574 % |
| dicht | 0,0192 % | 0,0215 % | 0,0210 % | 0,0412 % | 0,0310 % | 0,0196 % |
| gesättigt | 0,0064 % | 0,0105 % | 0,0065 % | 0,0193 % | 0,0164 % | 0,0094 % |
| Stop&Go | 0,0019 % | 0,0030 % | 0,0017 % | 0,0054 % | 0,0046 % | 0,0026 % |
| Stop&Go II | 0,0007 % | 0,0012 % | 0,0005 % | 0,0022 % | 0,0018 % | 0,0012 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0262 % | 0,0242 % | 0,0257 % | 0,0501 % | 0,0296 % | 0,0252 % |
| dicht | 0,0107 % | 0,0138 % | 0,0120 % | 0,0236 % | 0,0265 % | 0,0134 % |
| gesättigt | 0,0053 % | 0,0113 % | 0,0057 % | 0,0177 % | 0,0272 % | 0,0102 % |
| Stop&Go | 0,0010 % | 0,0033 % | 0,0008 % | 0,0053 % | 0,0076 % | 0,0028 % |
| Stop&Go II | 0,0004 % | 0,0013 % | 0,0003 % | 0,0021 % | 0,0030 % | 0,0012 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0099 % | 0,0080 % | 0,0109 % | 0,0163 % | 0,0121 % | 0,0079 % |
| dicht | 0,0031 % | 0,0039 % | 0,0038 % | 0,0068 % | 0,0077 % | 0,0036 % |
| gesättigt | 0,0012 % | 0,0032 % | 0,0012 % | 0,0049 % | 0,0081 % | 0,0027 % |
| Stop&Go | 0,0002 % | 0,0011 % | 0,0002 % | 0,0016 % | 0,0029 % | 0,0009 % |
| Stop&Go II | 0,0001 % | 0,0004 % | 0,0001 % | 0,0007 % | 0,0012 % | 0,0004 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0031 % | 0,0045 % | 0,0029 % | 0,0088 % | 0,0045 % | 0,0053 % |
| dicht | 0,0012 % | 0,0025 % | 0,0012 % | 0,0047 % | 0,0032 % | 0,0027 % |
| gesättigt | 0,0005 % | 0,0016 % | 0,0006 % | 0,0028 % | 0,0026 % | 0,0014 % |
| Stop&Go | 0,0001 % | 0,0004 % | 0,0001 % | 0,0006 % | 0,0005 % | 0,0003 % |
| Stop&Go II | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0000 % | 0,0002 % | 0,0001 % | 0,0001 % |
| La/FStr/80 | 0,2696 % | 0,2252 % | 0,3173 % | 0,4276 % | 0,3488 % | 0,2098 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,1109 % | 0,0868 % | 0,1366 % | 0,1679 % | 0,1189 % | 0,0852 % |
| dicht | 0,0346 % | 0,0327 % | 0,0461 % | 0,0590 % | 0,0505 % | 0,0296 % |
| gesättigt | 0,0088 % | 0,0094 % | 0,0112 % | 0,0166 % | 0,0167 % | 0,0078 % |
| Stop&Go | 0,0016 % | 0,0017 % | 0,0016 % | 0,0029 % | 0,0028 % | 0,0013 % |
| Stop&Go II | 0,0003 % | 0,0004 % | 0,0002 % | 0,0007 % | 0,0006 % | 0,0003 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0541 % | 0,0394 % | 0,0605 % | 0,0788 % | 0,0610 % | 0,0376 % |
| dicht | 0,0187 % | 0,0163 % | 0,0238 % | 0,0295 % | 0,0312 % | 0,0141 % |
| gesättigt | 0,0065 % | 0,0063 % | 0,0073 % | 0,0101 % | 0,0154 % | 0,0051 % |
| Stop&Go | 0,0007 % | 0,0008 % | 0,0008 % | 0,0014 % | 0,0019 % | 0,0006 % |
| Stop&Go II | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0001 % | 0,0003 % | 0,0004 % | 0,0001 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0162 % | 0,0121 % | 0,0144 % | 0,0249 % | 0,0170 % | 0,0113 % |
| dicht | 0,0059 % | 0,0058 % | 0,0059 % | 0,0100 % | 0,0123 % | 0,0049 % |
| gesättigt | 0,0014 % | 0,0016 % | 0,0015 % | 0,0025 % | 0,0039 % | 0,0013 % |
| Stop&Go | 0,0002 % | 0,0002 % | 0,0002 % | 0,0003 % | 0,0004 % | 0,0001 % |
| Stop&Go II | 0,0001 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0000 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0066 % | 0,0069 % | 0,0050 % | 0,0142 % | 0,0084 % | 0,0064 % |
| dicht | 0,0023 % | 0,0035 % | 0,0017 % | 0,0065 % | 0,0055 % | 0,0031 % |
| gesättigt | 0,0005 % | 0,0009 % | 0,0004 % | 0,0015 % | 0,0018 % | 0,0007 % |
| Stop&Go | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0002 % | 0,0001 % |
| Stop&Go II | 0,0001 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0000 % |

| k, stgk, v | Pkw | LNF | SNF | Rbus | Lbus | KR |
|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| La/FStr/100 | 1,5555 % | 0,9924 % | 1,8387 % | 1,7628 % | 1,1818 % | 1,0489 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,6233 % | 0,3210 % | 0,6796 % | 0,6205 % | 0,2644 % | 0,3534 % |
| dicht | 0,2835 % | 0,2034 % | 0,4104 % | 0,3553 % | 0,2558 % | 0,2024 % |
| gesättigt | 0,0773 % | 0,0839 % | 0,1156 % | 0,1300 % | 0,1469 % | 0,0794 % |
| Stop&Go | 0,0064 % | 0,0075 % | 0,0076 % | 0,0120 % | 0,0121 % | 0,0069 % |
| Stop&Go II | 0,0010 % | 0,0011 % | 0,0009 % | 0,0017 % | 0,0017 % | 0,0009 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,2465 % | 0,1214 % | 0,2527 % | 0,2300 % | 0,1059 % | 0,1392 % |
| dicht | 0,1168 % | 0,0799 % | 0,1473 % | 0,1359 % | 0,1088 % | 0,0828 % |
| gesättigt | 0,0441 % | 0,0484 % | 0,0559 % | 0,0667 % | 0,1054 % | 0,0486 % |
| Stop&Go | 0,0035 % | 0,0053 % | 0,0037 % | 0,0074 % | 0,0109 % | 0,0051 % |
| Stop&Go II | 0,0005 % | 0,0009 % | 0,0005 % | 0,0012 % | 0,0021 % | 0,0009 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0691 % | 0,0330 % | 0,0719 % | 0,0626 % | 0,0258 % | 0,0379 % |
| dicht | 0,0292 % | 0,0202 % | 0,0358 % | 0,0349 % | 0,0253 % | 0,0210 % |
| gesättigt | 0,0102 % | 0,0143 % | 0,0123 % | 0,0193 % | 0,0325 % | 0,0139 % |
| Stop&Go | 0,0009 % | 0,0020 % | 0,0009 % | 0,0025 % | 0,0049 % | 0,0019 % |
| Stop&Go II | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0001 % | 0,0003 % | 0,0004 % | 0,0002 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0245 % | 0,0184 % | 0,0229 % | 0,0348 % | 0,0181 % | 0,0213 % |
| dicht | 0,0128 % | 0,0160 % | 0,0141 % | 0,0266 % | 0,0246 % | 0,0172 % |
| gesättigt | 0,0051 % | 0,0139 % | 0,0059 % | 0,0186 % | 0,0323 % | 0,0142 % |
| Stop&Go | 0,0005 % | 0,0015 % | 0,0005 % | 0,0019 % | 0,0036 % | 0,0015 % |
| Stop&Go II | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0002 % | 0,0002 % |
| La/FStr/120 | 0,7218 % | 0,3070 % | 0,7482 % | 0,6316 % | 0,2278 % | 0,2944 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,2267 % | 0,0876 % | 0,2327 % | 0,1846 % | 0,0537 % | 0,0882 % |
| dicht | 0,1911 % | 0,0819 % | 0,1940 % | 0,1678 % | 0,0596 % | 0,0797 % |
| gesättigt | 0,0846 % | 0,0445 % | 0,1128 % | 0,0890 % | 0,0390 % | 0,0382 % |
| Stop&Go | 0,0049 % | 0,0026 % | 0,0046 % | 0,0053 % | 0,0025 % | 0,0021 % |
| Stop&Go II | 0,0005 % | 0,0003 % | 0,0005 % | 0,0006 % | 0,0005 % | 0,0002 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0711 % | 0,0246 % | 0,0661 % | 0,0525 % | 0,0137 % | 0,0249 % |
| dicht | 0,0638 % | 0,0248 % | 0,0578 % | 0,0520 % | 0,0157 % | 0,0244 % |
| gesättigt | 0,0343 % | 0,0176 % | 0,0375 % | 0,0332 % | 0,0215 % | 0,0153 % |
| Stop&Go | 0,0020 % | 0,0012 % | 0,0016 % | 0,0021 % | 0,0024 % | 0,0010 % |
| Stop&Go II | 0,0002 % | 0,0004 % | 0,0002 % | 0,0005 % | 0,0010 % | 0,0003 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0155 % | 0,0062 % | 0,0144 % | 0,0133 % | 0,0035 % | 0,0062 % |
| dicht | 0,0131 % | 0,0060 % | 0,0122 % | 0,0126 % | 0,0038 % | 0,0059 % |
| gesättigt | 0,0059 % | 0,0030 % | 0,0066 % | 0,0060 % | 0,0025 % | 0,0025 % |
| Stop&Go | 0,0003 % | 0,0001 % | 0,0003 % | 0,0003 % | 0,0001 % | 0,0001 % |
| Stop&Go II | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0035 % | 0,0022 % | 0,0027 % | 0,0046 % | 0,0018 % | 0,0021 % |
| dicht | 0,0031 % | 0,0020 % | 0,0026 % | 0,0042 % | 0,0021 % | 0,0019 % |
| gesättigt | 0,0013 % | 0,0016 % | 0,0015 % | 0,0028 % | 0,0037 % | 0,0013 % |
| Stop&Go | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0004 % | 0,0001 % |
| Stop&Go II | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % |

| k, stgk, v | Pkw | LNF | SNF | Rbus | Lbus | KR |
|------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| La/FStr/130 | 0,0559 % | 0,0286 % | 0,0555 % | 0,0583 % | 0,0298 % | 0,0264 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0072 % | 0,0031 % | 0,0068 % | 0,0071 % | 0,0015 % | 0,0031 % |
| dicht | 0,0116 % | 0,0059 % | 0,0117 % | 0,0132 % | 0,0031 % | 0,0057 % |
| gesättigt | 0,0075 % | 0,0061 % | 0,0086 % | 0,0118 % | 0,0077 % | 0,0053 % |
| Stop&Go | 0,0005 % | 0,0013 % | 0,0005 % | 0,0017 % | 0,0033 % | 0,0010 % |
| Stop&Go II | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0001 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0068 % | 0,0019 % | 0,0047 % | 0,0043 % | 0,0009 % | 0,0018 % |
| dicht | 0,0114 % | 0,0034 % | 0,0096 % | 0,0078 % | 0,0016 % | 0,0033 % |
| gesättigt | 0,0062 % | 0,0032 % | 0,0069 % | 0,0062 % | 0,0042 % | 0,0028 % |
| Stop&Go | 0,0005 % | 0,0011 % | 0,0005 % | 0,0014 % | 0,0030 % | 0,0009 % |
| Stop&Go II | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0001 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0006 % | 0,0002 % | 0,0006 % | 0,0005 % | 0,0001 % | 0,0002 % |
| dicht | 0,0012 % | 0,0004 % | 0,0013 % | 0,0010 % | 0,0002 % | 0,0004 % |
| gesättigt | 0,0009 % | 0,0006 % | 0,0011 % | 0,0011 % | 0,0008 % | 0,0005 % |
| Stop&Go | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0001 % |
| Stop&Go II | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0003 % | 0,0001 % | 0,0004 % | 0,0002 % | 0,0001 % | 0,0001 % |
| dicht | 0,0006 % | 0,0003 % | 0,0011 % | 0,0006 % | 0,0005 % | 0,0003 % |
| gesättigt | 0,0005 % | 0,0007 % | 0,0014 % | 0,0012 % | 0,0023 % | 0,0006 % |
| Stop&Go | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0000 % |
| Stop&Go II | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % |
| La/FStr/>130 | 0,2982 % | 0,1046 % | 0,3874 % | 0,2060 % | 0,0862 % | 0,1046 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0548 % | 0,0145 % | 0,0693 % | 0,0306 % | 0,0085 % | 0,0152 % |
| dicht | 0,0845 % | 0,0255 % | 0,1034 % | 0,0528 % | 0,0155 % | 0,0258 % |
| gesättigt | 0,0664 % | 0,0292 % | 0,0963 % | 0,0557 % | 0,0287 % | 0,0272 % |
| Stop&Go | 0,0028 % | 0,0014 % | 0,0037 % | 0,0026 % | 0,0016 % | 0,0013 % |
| Stop&Go II | 0,0002 % | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0001 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0209 % | 0,0053 % | 0,0258 % | 0,0111 % | 0,0030 % | 0,0057 % |
| dicht | 0,0285 % | 0,0085 % | 0,0334 % | 0,0174 % | 0,0050 % | 0,0088 % |
| gesättigt | 0,0254 % | 0,0127 % | 0,0356 % | 0,0222 % | 0,0157 % | 0,0130 % |
| Stop&Go | 0,0012 % | 0,0010 % | 0,0015 % | 0,0015 % | 0,0017 % | 0,0011 % |
| Stop&Go II | 0,0001 % | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0025 % | 0,0009 % | 0,0035 % | 0,0017 % | 0,0005 % | 0,0010 % |
| dicht | 0,0040 % | 0,0015 % | 0,0050 % | 0,0029 % | 0,0008 % | 0,0016 % |
| gesättigt | 0,0034 % | 0,0015 % | 0,0056 % | 0,0026 % | 0,0017 % | 0,0014 % |
| Stop&Go | 0,0002 % | 0,0001 % | 0,0004 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0001 % |
| Stop&Go II | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0010 % | 0,0005 % | 0,0011 % | 0,0010 % | 0,0004 % | 0,0005 % |
| dicht | 0,0013 % | 0,0009 % | 0,0013 % | 0,0017 % | 0,0009 % | 0,0009 % |
| gesättigt | 0,0009 % | 0,0010 % | 0,0011 % | 0,0018 % | 0,0018 % | 0,0009 % |
| Stop&Go | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0001 % |
| Stop&Go II | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % |

| k, stgk, v | Pkw | LNF | SNF | Rbus | Lbus | KR |
|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| La/HVS/30 | 0,1103 % | 0,1667 % | 0,0561 % | 0,1892 % | 0,3488 % | 0,1892 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0542 % | 0,0753 % | 0,0252 % | 0,0884 % | 0,1606 % | 0,0847 % |
| dicht | 0,0033 % | 0,0066 % | 0,0015 % | 0,0077 % | 0,0167 % | 0,0066 % |
| gesättigt | 0,0011 % | 0,0024 % | 0,0004 % | 0,0028 % | 0,0065 % | 0,0023 % |
| Stop&Go | 0,0006 % | 0,0011 % | 0,0002 % | 0,0013 % | 0,0030 % | 0,0011 % |
| Stop&Go II | 0,0005 % | 0,0010 % | 0,0002 % | 0,0012 % | 0,0027 % | 0,0010 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0271 % | 0,0406 % | 0,0188 % | 0,0463 % | 0,0822 % | 0,0469 % |
| dicht | 0,0016 % | 0,0031 % | 0,0007 % | 0,0036 % | 0,0071 % | 0,0033 % |
| gesättigt | 0,0005 % | 0,0011 % | 0,0003 % | 0,0012 % | 0,0026 % | 0,0011 % |
| Stop&Go | 0,0002 % | 0,0005 % | 0,0001 % | 0,0005 % | 0,0011 % | 0,0005 % |
| Stop&Go II | 0,0002 % | 0,0004 % | 0,0001 % | 0,0004 % | 0,0010 % | 0,0004 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0102 % | 0,0148 % | 0,0045 % | 0,0161 % | 0,0281 % | 0,0176 % |
| dicht | 0,0008 % | 0,0015 % | 0,0003 % | 0,0017 % | 0,0033 % | 0,0017 % |
| gesättigt | 0,0002 % | 0,0005 % | 0,0001 % | 0,0005 % | 0,0012 % | 0,0006 % |
| Stop&Go | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0000 % | 0,0002 % | 0,0005 % | 0,0002 % |
| Stop&Go II | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0000 % | 0,0002 % | 0,0004 % | 0,0002 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0089 % | 0,0153 % | 0,0033 % | 0,0151 % | 0,0276 % | 0,0188 % |
| dicht | 0,0006 % | 0,0014 % | 0,0002 % | 0,0013 % | 0,0029 % | 0,0016 % |
| gesättigt | 0,0002 % | 0,0004 % | 0,0001 % | 0,0004 % | 0,0009 % | 0,0004 % |
| Stop&Go | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0003 % | 0,0001 % |
| Stop&Go II | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0001 % |
| La/HVS/40 | 0,0286 % | 0,0364 % | 0,0222 % | 0,0486 % | 0,0847 % | 0,0379 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0093 % | 0,0110 % | 0,0075 % | 0,0148 % | 0,0234 % | 0,0118 % |
| dicht | 0,0004 % | 0,0009 % | 0,0003 % | 0,0012 % | 0,0024 % | 0,0009 % |
| gesättigt | 0,0002 % | 0,0005 % | 0,0001 % | 0,0006 % | 0,0013 % | 0,0004 % |
| Stop&Go | 0,0001 % | 0,0003 % | 0,0001 % | 0,0004 % | 0,0007 % | 0,0002 % |
| Stop&Go II | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0001 % | 0,0003 % | 0,0008 % | 0,0002 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0104 % | 0,0107 % | 0,0091 % | 0,0139 % | 0,0275 % | 0,0113 % |
| dicht | 0,0005 % | 0,0009 % | 0,0004 % | 0,0012 % | 0,0027 % | 0,0009 % |
| gesättigt | 0,0002 % | 0,0006 % | 0,0002 % | 0,0007 % | 0,0018 % | 0,0005 % |
| Stop&Go | 0,0001 % | 0,0003 % | 0,0001 % | 0,0004 % | 0,0010 % | 0,0003 % |
| Stop&Go II | 0,0001 % | 0,0004 % | 0,0001 % | 0,0005 % | 0,0012 % | 0,0004 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0035 % | 0,0052 % | 0,0027 % | 0,0070 % | 0,0119 % | 0,0055 % |
| dicht | 0,0002 % | 0,0005 % | 0,0001 % | 0,0006 % | 0,0012 % | 0,0005 % |
| gesättigt | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0001 % | 0,0003 % | 0,0005 % | 0,0002 % |
| Stop&Go | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0000 % | 0,0002 % | 0,0003 % | 0,0001 % |
| Stop&Go II | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0001 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0030 % | 0,0039 % | 0,0013 % | 0,0057 % | 0,0068 % | 0,0042 % |
| dicht | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0000 % | 0,0004 % | 0,0005 % | 0,0002 % |
| gesättigt | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0000 % | 0,0002 % | 0,0003 % | 0,0001 % |
| Stop&Go | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0001 % |
| Stop&Go II | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0000 % |

| k, stgk, v | Pkw | LNF | SNF | Rbus | Lbus | KR |
|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| La/HVS/50 | 2,6110 % | 4,2127 % | 1,1661 % | 4,7416 % | 6,0928 % | 5,0840 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 1,2144 % | 1,8065 % | 0,5367 % | 2,0726 % | 2,5789 % | 2,1871 % |
| dicht | 0,1571 % | 0,2890 % | 0,0649 % | 0,3334 % | 0,4734 % | 0,3267 % |
| gesättigt | 0,0477 % | 0,1008 % | 0,0192 % | 0,1163 % | 0,1758 % | 0,1106 % |
| Stop&Go | 0,0173 % | 0,0319 % | 0,0070 % | 0,0376 % | 0,0572 % | 0,0341 % |
| Stop&Go II | 0,0109 % | 0,0240 % | 0,0046 % | 0,0281 % | 0,0449 % | 0,0254 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,6184 % | 0,9690 % | 0,2893 % | 1,0883 % | 1,3100 % | 1,1941 % |
| dicht | 0,0847 % | 0,1674 % | 0,0410 % | 0,1839 % | 0,2641 % | 0,1954 % |
| gesättigt | 0,0249 % | 0,0602 % | 0,0123 % | 0,0662 % | 0,1017 % | 0,0681 % |
| Stop&Go | 0,0088 % | 0,0184 % | 0,0045 % | 0,0208 % | 0,0317 % | 0,0205 % |
| Stop&Go II | 0,0057 % | 0,0143 % | 0,0028 % | 0,0161 % | 0,0266 % | 0,0156 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,2116 % | 0,3344 % | 0,0942 % | 0,3644 % | 0,4432 % | 0,4179 % |
| dicht | 0,0295 % | 0,0587 % | 0,0126 % | 0,0621 % | 0,0902 % | 0,0700 % |
| gesättigt | 0,0078 % | 0,0194 % | 0,0035 % | 0,0204 % | 0,0328 % | 0,0224 % |
| Stop&Go | 0,0026 % | 0,0055 % | 0,0012 % | 0,0060 % | 0,0097 % | 0,0061 % |
| Stop&Go II | 0,0017 % | 0,0038 % | 0,0009 % | 0,0043 % | 0,0070 % | 0,0042 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,1393 % | 0,2431 % | 0,0593 % | 0,2534 % | 0,3395 % | 0,3068 % |
| dicht | 0,0211 % | 0,0466 % | 0,0088 % | 0,0474 % | 0,0717 % | 0,0565 % |
| gesättigt | 0,0051 % | 0,0138 % | 0,0023 % | 0,0143 % | 0,0239 % | 0,0158 % |
| Stop&Go | 0,0015 % | 0,0037 % | 0,0007 % | 0,0039 % | 0,0066 % | 0,0041 % |
| Stop&Go II | 0,0009 % | 0,0022 % | 0,0004 % | 0,0024 % | 0,0039 % | 0,0024 % |
| La/HVS/60 | 0,7053 % | 0,8943 % | 0,3823 % | 1,1590 % | 1,4579 % | 1,0077 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,2933 % | 0,3273 % | 0,1613 % | 0,4248 % | 0,5163 % | 0,3749 % |
| dicht | 0,0563 % | 0,0808 % | 0,0333 % | 0,1032 % | 0,1413 % | 0,0873 % |
| gesättigt | 0,0181 % | 0,0329 % | 0,0103 % | 0,0420 % | 0,0592 % | 0,0348 % |
| Stop&Go | 0,0063 % | 0,0098 % | 0,0034 % | 0,0127 % | 0,0172 % | 0,0103 % |
| Stop&Go II | 0,0031 % | 0,0059 % | 0,0016 % | 0,0076 % | 0,0102 % | 0,0063 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,1596 % | 0,1837 % | 0,0862 % | 0,2430 % | 0,2710 % | 0,2135 % |
| dicht | 0,0334 % | 0,0524 % | 0,0201 % | 0,0672 % | 0,0970 % | 0,0561 % |
| gesättigt | 0,0101 % | 0,0228 % | 0,0063 % | 0,0294 % | 0,0459 % | 0,0232 % |
| Stop&Go | 0,0034 % | 0,0068 % | 0,0019 % | 0,0088 % | 0,0139 % | 0,0068 % |
| Stop&Go II | 0,0018 % | 0,0048 % | 0,0010 % | 0,0061 % | 0,0110 % | 0,0047 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0610 % | 0,0717 % | 0,0293 % | 0,0944 % | 0,1045 % | 0,0835 % |
| dicht | 0,0112 % | 0,0183 % | 0,0056 % | 0,0236 % | 0,0343 % | 0,0194 % |
| gesättigt | 0,0028 % | 0,0062 % | 0,0015 % | 0,0078 % | 0,0122 % | 0,0063 % |
| Stop&Go | 0,0008 % | 0,0016 % | 0,0004 % | 0,0020 % | 0,0031 % | 0,0017 % |
| Stop&Go II | 0,0005 % | 0,0011 % | 0,0002 % | 0,0013 % | 0,0023 % | 0,0011 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0347 % | 0,0497 % | 0,0158 % | 0,0619 % | 0,0825 % | 0,0581 % |
| dicht | 0,0065 % | 0,0121 % | 0,0028 % | 0,0151 % | 0,0218 % | 0,0134 % |
| gesättigt | 0,0016 % | 0,0041 % | 0,0008 % | 0,0052 % | 0,0087 % | 0,0042 % |
| Stop&Go | 0,0005 % | 0,0015 % | 0,0002 % | 0,0019 % | 0,0036 % | 0,0014 % |
| Stop&Go II | 0,0002 % | 0,0008 % | 0,0001 % | 0,0010 % | 0,0019 % | 0,0008 % |

| k, stgk, v | Pkw | LNF | SNF | Rbus | Lbus | KR |
|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| La/HVS/70 | 5,2989 % | 5,7421 % | 3,3977 % | 7,7351 % | 7,2815 % | 6,6026 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 2,4407 % | 2,2859 % | 1,5332 % | 3,0979 % | 2,5810 % | 2,7093 % |
| dicht | 0,5529 % | 0,6723 % | 0,3571 % | 0,8916 % | 0,8810 % | 0,7424 % |
| gesättigt | 0,1679 % | 0,2830 % | 0,1178 % | 0,3798 % | 0,4188 % | 0,2984 % |
| Stop&Go | 0,0496 % | 0,0771 % | 0,0338 % | 0,1072 % | 0,1087 % | 0,0805 % |
| Stop&Go II | 0,0180 % | 0,0346 % | 0,0119 % | 0,0479 % | 0,0499 % | 0,0364 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 1,0490 % | 1,0122 % | 0,6737 % | 1,4045 % | 1,1808 % | 1,2026 % |
| dicht | 0,2806 % | 0,3666 % | 0,2071 % | 0,4830 % | 0,5661 % | 0,3988 % |
| gesättigt | 0,0939 % | 0,1920 % | 0,0787 % | 0,2518 % | 0,3607 % | 0,1944 % |
| Stop&Go | 0,0236 % | 0,0499 % | 0,0183 % | 0,0670 % | 0,0887 % | 0,0506 % |
| Stop&Go II | 0,0093 % | 0,0219 % | 0,0068 % | 0,0295 % | 0,0395 % | 0,0223 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,2969 % | 0,2892 % | 0,1737 % | 0,3926 % | 0,3389 % | 0,3468 % |
| dicht | 0,0794 % | 0,1069 % | 0,0469 % | 0,1380 % | 0,1618 % | 0,1180 % |
| gesättigt | 0,0260 % | 0,0545 % | 0,0182 % | 0,0693 % | 0,1050 % | 0,0554 % |
| Stop&Go | 0,0059 % | 0,0127 % | 0,0041 % | 0,0163 % | 0,0220 % | 0,0131 % |
| Stop&Go II | 0,0022 % | 0,0052 % | 0,0015 % | 0,0066 % | 0,0095 % | 0,0052 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,1449 % | 0,1760 % | 0,0806 % | 0,2232 % | 0,2242 % | 0,2133 % |
| dicht | 0,0417 % | 0,0683 % | 0,0235 % | 0,0849 % | 0,0945 % | 0,0788 % |
| gesättigt | 0,0129 % | 0,0268 % | 0,0085 % | 0,0349 % | 0,0394 % | 0,0290 % |
| Stop&Go | 0,0026 % | 0,0053 % | 0,0017 % | 0,0070 % | 0,0082 % | 0,0055 % |
| Stop&Go II | 0,0008 % | 0,0018 % | 0,0006 % | 0,0024 % | 0,0028 % | 0,0019 % |
| La/HVS/80 | 1,6027 % | 1,3266 % | 1,0656 % | 1,8152 % | 1,7247 % | 1,5111 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,7399 % | 0,5345 % | 0,4770 % | 0,7176 % | 0,6793 % | 0,6361 % |
| dicht | 0,2250 % | 0,2007 % | 0,1545 % | 0,2682 % | 0,2637 % | 0,2191 % |
| gesättigt | 0,0358 % | 0,0498 % | 0,0241 % | 0,0629 % | 0,0825 % | 0,0521 % |
| Stop&Go | 0,0064 % | 0,0089 % | 0,0039 % | 0,0113 % | 0,0151 % | 0,0090 % |
| Stop&Go II | 0,0019 % | 0,0028 % | 0,0011 % | 0,0034 % | 0,0050 % | 0,0028 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,2923 % | 0,2265 % | 0,1948 % | 0,3256 % | 0,2613 % | 0,2645 % |
| dicht | 0,0964 % | 0,0910 % | 0,0731 % | 0,1297 % | 0,1184 % | 0,0959 % |
| gesättigt | 0,0196 % | 0,0318 % | 0,0156 % | 0,0415 % | 0,0614 % | 0,0309 % |
| Stop&Go | 0,0029 % | 0,0054 % | 0,0018 % | 0,0071 % | 0,0101 % | 0,0052 % |
| Stop&Go II | 0,0009 % | 0,0016 % | 0,0005 % | 0,0021 % | 0,0032 % | 0,0015 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0878 % | 0,0701 % | 0,0586 % | 0,1034 % | 0,0772 % | 0,0814 % |
| dicht | 0,0277 % | 0,0287 % | 0,0202 % | 0,0410 % | 0,0367 % | 0,0302 % |
| gesättigt | 0,0057 % | 0,0102 % | 0,0041 % | 0,0135 % | 0,0196 % | 0,0098 % |
| Stop&Go | 0,0008 % | 0,0015 % | 0,0005 % | 0,0021 % | 0,0027 % | 0,0014 % |
| Stop&Go II | 0,0002 % | 0,0004 % | 0,0001 % | 0,0005 % | 0,0007 % | 0,0004 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0416 % | 0,0393 % | 0,0239 % | 0,0539 % | 0,0521 % | 0,0458 % |
| dicht | 0,0140 % | 0,0176 % | 0,0093 % | 0,0236 % | 0,0259 % | 0,0189 % |
| gesättigt | 0,0033 % | 0,0051 % | 0,0022 % | 0,0066 % | 0,0087 % | 0,0053 % |
| Stop&Go | 0,0005 % | 0,0006 % | 0,0002 % | 0,0008 % | 0,0009 % | 0,0006 % |
| Stop&Go II | 0,0002 % | 0,0002 % | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0003 % | 0,0002 % |

| k, stgk, v | Pkw | LNF | SNF | Rbus | Lbus | KR |
|--------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| La/HVS/100 | 17,6522 % | 11,1928 % | 11,8026 % | 13,0763 % | 12,5135 % | 13,9247 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 4,8345 % | 2,2220 % | 3,3163 % | 2,7331 % | 2,2870 % | 2,8851 % |
| dicht | 4,6130 % | 2,7845 % | 3,3247 % | 3,3841 % | 2,9413 % | 3,3558 % |
| gesättigt | 1,0029 % | 1,0470 % | 0,6579 % | 1,1847 % | 1,2886 % | 1,2261 % |
| Stop&Go | 0,0694 % | 0,1027 % | 0,0452 % | 0,1089 % | 0,1474 % | 0,1203 % |
| Stop&Go II | 0,0200 % | 0,0245 % | 0,0135 % | 0,0256 % | 0,0347 % | 0,0290 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 2,0258 % | 1,0339 % | 1,3236 % | 1,2376 % | 1,0873 % | 1,3573 % |
| dicht | 2,0972 % | 1,3904 % | 1,3682 % | 1,6189 % | 1,5144 % | 1,7208 % |
| gesättigt | 0,5614 % | 0,6583 % | 0,3486 % | 0,7101 % | 0,8898 % | 0,7843 % |
| Stop&Go | 0,0376 % | 0,0852 % | 0,0239 % | 0,0854 % | 0,1444 % | 0,0985 % |
| Stop&Go II | 0,0103 % | 0,0202 % | 0,0066 % | 0,0198 % | 0,0344 % | 0,0236 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,6405 % | 0,3481 % | 0,4060 % | 0,4132 % | 0,3654 % | 0,4563 % |
| dicht | 0,7055 % | 0,4927 % | 0,4136 % | 0,5501 % | 0,5410 % | 0,6221 % |
| gesättigt | 0,2230 % | 0,2600 % | 0,1252 % | 0,2701 % | 0,3491 % | 0,3153 % |
| Stop&Go | 0,0135 % | 0,0302 % | 0,0079 % | 0,0290 % | 0,0508 % | 0,0357 % |
| Stop&Go II | 0,0038 % | 0,0070 % | 0,0022 % | 0,0064 % | 0,0107 % | 0,0086 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,2685 % | 0,1795 % | 0,1590 % | 0,1983 % | 0,1997 % | 0,2371 % |
| dicht | 0,3617 % | 0,2995 % | 0,1795 % | 0,3044 % | 0,3523 % | 0,3877 % |
| gesättigt | 0,1528 % | 0,1869 % | 0,0748 % | 0,1776 % | 0,2434 % | 0,2368 % |
| Stop&Go | 0,0086 % | 0,0170 % | 0,0048 % | 0,0158 % | 0,0270 % | 0,0202 % |
| Stop&Go II | 0,0021 % | 0,0034 % | 0,0012 % | 0,0031 % | 0,0049 % | 0,0042 % |
| La/HVS-k/30 | 0,1218 % | 0,1952 % | 0,0502 % | 0,2083 % | 0,3717 % | 0,2310 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0363 % | 0,0578 % | 0,0153 % | 0,0635 % | 0,1099 % | 0,0680 % |
| dicht | 0,0034 % | 0,0077 % | 0,0014 % | 0,0084 % | 0,0163 % | 0,0084 % |
| gesättigt | 0,0009 % | 0,0024 % | 0,0004 % | 0,0026 % | 0,0055 % | 0,0025 % |
| Stop&Go | 0,0003 % | 0,0007 % | 0,0001 % | 0,0008 % | 0,0018 % | 0,0008 % |
| Stop&Go II | 0,0003 % | 0,0006 % | 0,0001 % | 0,0006 % | 0,0014 % | 0,0007 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0303 % | 0,0480 % | 0,0136 % | 0,0531 % | 0,0940 % | 0,0561 % |
| dicht | 0,0033 % | 0,0067 % | 0,0014 % | 0,0073 % | 0,0134 % | 0,0077 % |
| gesättigt | 0,0008 % | 0,0020 % | 0,0003 % | 0,0022 % | 0,0047 % | 0,0022 % |
| Stop&Go | 0,0003 % | 0,0007 % | 0,0001 % | 0,0007 % | 0,0016 % | 0,0007 % |
| Stop&Go II | 0,0002 % | 0,0006 % | 0,0001 % | 0,0006 % | 0,0015 % | 0,0006 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0164 % | 0,0251 % | 0,0064 % | 0,0263 % | 0,0450 % | 0,0303 % |
| dicht | 0,0018 % | 0,0038 % | 0,0007 % | 0,0041 % | 0,0078 % | 0,0043 % |
| gesättigt | 0,0004 % | 0,0011 % | 0,0002 % | 0,0012 % | 0,0027 % | 0,0012 % |
| Stop&Go | 0,0002 % | 0,0003 % | 0,0001 % | 0,0003 % | 0,0006 % | 0,0003 % |
| Stop&Go II | 0,0001 % | 0,0003 % | 0,0001 % | 0,0003 % | 0,0006 % | 0,0003 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0236 % | 0,0313 % | 0,0089 % | 0,0302 % | 0,0528 % | 0,0394 % |
| dicht | 0,0022 % | 0,0045 % | 0,0008 % | 0,0043 % | 0,0086 % | 0,0055 % |
| gesättigt | 0,0006 % | 0,0011 % | 0,0002 % | 0,0011 % | 0,0023 % | 0,0013 % |
| Stop&Go | 0,0003 % | 0,0004 % | 0,0001 % | 0,0004 % | 0,0007 % | 0,0004 % |
| Stop&Go II | 0,0002 % | 0,0003 % | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0004 % | 0,0003 % |

| k, stgk, v | Pkw | LNF | SNF | Rbus | Lbus | KR |
|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| La/HVS-k/40 | 0,0483 % | 0,0641 % | 0,0311 % | 0,0864 % | 0,1393 % | 0,0674 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0133 % | 0,0185 % | 0,0087 % | 0,0238 % | 0,0417 % | 0,0198 % |
| dicht | 0,0008 % | 0,0021 % | 0,0005 % | 0,0028 % | 0,0049 % | 0,0021 % |
| gesättigt | 0,0003 % | 0,0010 % | 0,0002 % | 0,0013 % | 0,0026 % | 0,0009 % |
| Stop&Go | 0,0002 % | 0,0004 % | 0,0001 % | 0,0005 % | 0,0010 % | 0,0004 % |
| Stop&Go II | 0,0002 % | 0,0004 % | 0,0001 % | 0,0005 % | 0,0010 % | 0,0004 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0137 % | 0,0161 % | 0,0100 % | 0,0217 % | 0,0429 % | 0,0166 % |
| dicht | 0,0009 % | 0,0020 % | 0,0008 % | 0,0028 % | 0,0053 % | 0,0019 % |
| gesättigt | 0,0004 % | 0,0010 % | 0,0003 % | 0,0014 % | 0,0029 % | 0,0009 % |
| Stop&Go | 0,0002 % | 0,0005 % | 0,0001 % | 0,0007 % | 0,0014 % | 0,0004 % |
| Stop&Go II | 0,0001 % | 0,0004 % | 0,0001 % | 0,0006 % | 0,0012 % | 0,0004 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0084 % | 0,0087 % | 0,0048 % | 0,0119 % | 0,0151 % | 0,0095 % |
| dicht | 0,0004 % | 0,0008 % | 0,0002 % | 0,0011 % | 0,0018 % | 0,0008 % |
| gesättigt | 0,0001 % | 0,0003 % | 0,0001 % | 0,0004 % | 0,0006 % | 0,0003 % |
| Stop&Go | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0000 % | 0,0002 % | 0,0002 % | 0,0001 % |
| Stop&Go II | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0000 % | 0,0002 % | 0,0001 % | 0,0001 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0086 % | 0,0103 % | 0,0046 % | 0,0146 % | 0,0146 % | 0,0112 % |
| dicht | 0,0004 % | 0,0009 % | 0,0002 % | 0,0011 % | 0,0012 % | 0,0010 % |
| gesättigt | 0,0001 % | 0,0003 % | 0,0001 % | 0,0004 % | 0,0004 % | 0,0003 % |
| Stop&Go | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0000 % | 0,0002 % | 0,0001 % | 0,0001 % |
| Stop&Go II | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0000 % | 0,0002 % | 0,0001 % | 0,0001 % |
| La/HVS-k/50 | 1,6763 % | 2,8345 % | 0,8211 % | 3,0728 % | 4,6444 % | 3,4247 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,5626 % | 0,8962 % | 0,3044 % | 1,0076 % | 1,4758 % | 1,0797 % |
| dicht | 0,0638 % | 0,1519 % | 0,0296 % | 0,1683 % | 0,2718 % | 0,1755 % |
| gesättigt | 0,0248 % | 0,0684 % | 0,0125 % | 0,0771 % | 0,1273 % | 0,0762 % |
| Stop&Go | 0,0097 % | 0,0228 % | 0,0050 % | 0,0263 % | 0,0454 % | 0,0244 % |
| Stop&Go II | 0,0077 % | 0,0198 % | 0,0040 % | 0,0234 % | 0,0428 % | 0,0205 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,4407 % | 0,6828 % | 0,2221 % | 0,7458 % | 1,0934 % | 0,8340 % |
| dicht | 0,0530 % | 0,1261 % | 0,0255 % | 0,1340 % | 0,2256 % | 0,1480 % |
| gesättigt | 0,0195 % | 0,0566 % | 0,0096 % | 0,0614 % | 0,1057 % | 0,0640 % |
| Stop&Go | 0,0076 % | 0,0191 % | 0,0040 % | 0,0213 % | 0,0388 % | 0,0206 % |
| Stop&Go II | 0,0062 % | 0,0172 % | 0,0032 % | 0,0195 % | 0,0375 % | 0,0181 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,2067 % | 0,3060 % | 0,0878 % | 0,3257 % | 0,4600 % | 0,3791 % |
| dicht | 0,0240 % | 0,0553 % | 0,0104 % | 0,0559 % | 0,0903 % | 0,0672 % |
| gesättigt | 0,0074 % | 0,0221 % | 0,0035 % | 0,0224 % | 0,0380 % | 0,0260 % |
| Stop&Go | 0,0025 % | 0,0068 % | 0,0013 % | 0,0072 % | 0,0128 % | 0,0077 % |
| Stop&Go II | 0,0019 % | 0,0053 % | 0,0010 % | 0,0056 % | 0,0104 % | 0,0059 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,2029 % | 0,2980 % | 0,0828 % | 0,2960 % | 0,4423 % | 0,3782 % |
| dicht | 0,0252 % | 0,0527 % | 0,0101 % | 0,0491 % | 0,0803 % | 0,0668 % |
| gesättigt | 0,0069 % | 0,0185 % | 0,0029 % | 0,0176 % | 0,0303 % | 0,0226 % |
| Stop&Go | 0,0020 % | 0,0051 % | 0,0009 % | 0,0050 % | 0,0089 % | 0,0059 % |
| Stop&Go II | 0,0013 % | 0,0037 % | 0,0006 % | 0,0037 % | 0,0069 % | 0,0042 % |

| k, stgk, v | Pkw | LNF | SNF | Rbus | Lbus | KR |
|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| La/HVS-k/60 | 0,4378 % | 0,5769 % | 0,2689 % | 0,7647 % | 1,1823 % | 0,6150 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,1332 % | 0,1672 % | 0,0886 % | 0,2264 % | 0,3285 % | 0,1777 % |
| dicht | 0,0171 % | 0,0338 % | 0,0115 % | 0,0452 % | 0,0742 % | 0,0344 % |
| gesättigt | 0,0066 % | 0,0167 % | 0,0042 % | 0,0226 % | 0,0358 % | 0,0166 % |
| Stop&Go | 0,0031 % | 0,0066 % | 0,0020 % | 0,0089 % | 0,0148 % | 0,0065 % |
| Stop&Go II | 0,0024 % | 0,0058 % | 0,0014 % | 0,0078 % | 0,0137 % | 0,0057 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,1199 % | 0,1290 % | 0,0809 % | 0,1739 % | 0,2683 % | 0,1396 % |
| dicht | 0,0187 % | 0,0341 % | 0,0136 % | 0,0452 % | 0,0863 % | 0,0336 % |
| gesättigt | 0,0065 % | 0,0173 % | 0,0044 % | 0,0232 % | 0,0431 % | 0,0168 % |
| Stop&Go | 0,0026 % | 0,0067 % | 0,0017 % | 0,0089 % | 0,0174 % | 0,0063 % |
| Stop&Go II | 0,0020 % | 0,0057 % | 0,0012 % | 0,0074 % | 0,0156 % | 0,0053 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0594 % | 0,0612 % | 0,0299 % | 0,0813 % | 0,1150 % | 0,0676 % |
| dicht | 0,0087 % | 0,0141 % | 0,0048 % | 0,0182 % | 0,0308 % | 0,0146 % |
| gesättigt | 0,0025 % | 0,0064 % | 0,0016 % | 0,0081 % | 0,0147 % | 0,0064 % |
| Stop&Go | 0,0008 % | 0,0022 % | 0,0006 % | 0,0029 % | 0,0053 % | 0,0022 % |
| Stop&Go II | 0,0005 % | 0,0016 % | 0,0003 % | 0,0021 % | 0,0042 % | 0,0015 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0449 % | 0,0520 % | 0,0186 % | 0,0622 % | 0,0821 % | 0,0627 % |
| dicht | 0,0065 % | 0,0108 % | 0,0026 % | 0,0131 % | 0,0204 % | 0,0117 % |
| gesättigt | 0,0014 % | 0,0038 % | 0,0007 % | 0,0047 % | 0,0079 % | 0,0038 % |
| Stop&Go | 0,0005 % | 0,0013 % | 0,0003 % | 0,0015 % | 0,0026 % | 0,0013 % |
| Stop&Go II | 0,0003 % | 0,0007 % | 0,0001 % | 0,0009 % | 0,0014 % | 0,0008 % |
| La/HVS-k/70 | 1,5516 % | 1,9806 % | 1,1369 % | 2,5957 % | 3,9085 % | 2,1654 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,4922 % | 0,5299 % | 0,3561 % | 0,7034 % | 0,9251 % | 0,6056 % |
| dicht | 0,1222 % | 0,1847 % | 0,1020 % | 0,2389 % | 0,3793 % | 0,1955 % |
| gesättigt | 0,0527 % | 0,1305 % | 0,0419 % | 0,1692 % | 0,2820 % | 0,1338 % |
| Stop&Go | 0,0137 % | 0,0338 % | 0,0104 % | 0,0445 % | 0,0712 % | 0,0340 % |
| Stop&Go II | 0,0063 % | 0,0167 % | 0,0045 % | 0,0220 % | 0,0364 % | 0,0168 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,3475 % | 0,3319 % | 0,2579 % | 0,4473 % | 0,6049 % | 0,3800 % |
| dicht | 0,1154 % | 0,1617 % | 0,1153 % | 0,2111 % | 0,3967 % | 0,1642 % |
| gesättigt | 0,0503 % | 0,1272 % | 0,0489 % | 0,1663 % | 0,3256 % | 0,1239 % |
| Stop&Go | 0,0112 % | 0,0327 % | 0,0093 % | 0,0430 % | 0,0828 % | 0,0314 % |
| Stop&Go II | 0,0055 % | 0,0167 % | 0,0044 % | 0,0222 % | 0,0446 % | 0,0157 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,1380 % | 0,1250 % | 0,0764 % | 0,1671 % | 0,1996 % | 0,1464 % |
| dicht | 0,0414 % | 0,0595 % | 0,0250 % | 0,0757 % | 0,1307 % | 0,0623 % |
| gesättigt | 0,0167 % | 0,0434 % | 0,0118 % | 0,0548 % | 0,1059 % | 0,0428 % |
| Stop&Go | 0,0032 % | 0,0097 % | 0,0022 % | 0,0122 % | 0,0222 % | 0,0097 % |
| Stop&Go II | 0,0014 % | 0,0042 % | 0,0009 % | 0,0054 % | 0,0100 % | 0,0041 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0949 % | 0,1064 % | 0,0495 % | 0,1323 % | 0,1728 % | 0,1254 % |
| dicht | 0,0286 % | 0,0401 % | 0,0145 % | 0,0477 % | 0,0685 % | 0,0459 % |
| gesättigt | 0,0084 % | 0,0203 % | 0,0048 % | 0,0250 % | 0,0382 % | 0,0218 % |
| Stop&Go | 0,0014 % | 0,0043 % | 0,0009 % | 0,0054 % | 0,0085 % | 0,0044 % |
| Stop&Go II | 0,0006 % | 0,0017 % | 0,0004 % | 0,0022 % | 0,0034 % | 0,0017 % |

| k, stgk, v | Pkw | LNF | SNF | Rbus | Lbus | KR |
|---------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| La/HVS-k/80 | 0,2534 % | 0,2916 % | 0,1873 % | 0,4006 % | 0,5404 % | 0,3139 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0842 % | 0,0896 % | 0,0665 % | 0,1259 % | 0,1629 % | 0,0982 % |
| dicht | 0,0219 % | 0,0289 % | 0,0172 % | 0,0385 % | 0,0574 % | 0,0302 % |
| gesättigt | 0,0070 % | 0,0154 % | 0,0061 % | 0,0199 % | 0,0357 % | 0,0151 % |
| Stop&Go | 0,0014 % | 0,0033 % | 0,0014 % | 0,0042 % | 0,0077 % | 0,0031 % |
| Stop&Go II | 0,0005 % | 0,0012 % | 0,0004 % | 0,0015 % | 0,0032 % | 0,0011 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0485 % | 0,0472 % | 0,0363 % | 0,0684 % | 0,0761 % | 0,0532 % |
| dicht | 0,0163 % | 0,0202 % | 0,0148 % | 0,0274 % | 0,0409 % | 0,0211 % |
| gesättigt | 0,0068 % | 0,0161 % | 0,0071 % | 0,0207 % | 0,0408 % | 0,0154 % |
| Stop&Go | 0,0011 % | 0,0032 % | 0,0010 % | 0,0041 % | 0,0081 % | 0,0029 % |
| Stop&Go II | 0,0004 % | 0,0009 % | 0,0003 % | 0,0011 % | 0,0025 % | 0,0008 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0229 % | 0,0208 % | 0,0142 % | 0,0298 % | 0,0302 % | 0,0237 % |
| dicht | 0,0077 % | 0,0085 % | 0,0048 % | 0,0113 % | 0,0155 % | 0,0089 % |
| gesättigt | 0,0033 % | 0,0063 % | 0,0026 % | 0,0081 % | 0,0153 % | 0,0060 % |
| Stop&Go | 0,0003 % | 0,0008 % | 0,0002 % | 0,0010 % | 0,0019 % | 0,0008 % |
| Stop&Go II | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0001 % | 0,0003 % | 0,0006 % | 0,0002 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0220 % | 0,0178 % | 0,0102 % | 0,0244 % | 0,0233 % | 0,0209 % |
| dicht | 0,0070 % | 0,0070 % | 0,0031 % | 0,0088 % | 0,0105 % | 0,0080 % |
| gesättigt | 0,0018 % | 0,0033 % | 0,0009 % | 0,0041 % | 0,0064 % | 0,0035 % |
| Stop&Go | 0,0002 % | 0,0006 % | 0,0001 % | 0,0007 % | 0,0010 % | 0,0006 % |
| Stop&Go II | 0,0001 % | 0,0003 % | 0,0001 % | 0,0003 % | 0,0004 % | 0,0003 % |
| La/HVS-k/100 | 4,1693 % | 3,9634 % | 2,1182 % | 4,0943 % | 5,9718 % | 4,9677 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,4227 % | 0,2712 % | 0,2315 % | 0,3128 % | 0,3715 % | 0,3451 % |
| dicht | 0,5648 % | 0,4203 % | 0,2865 % | 0,4639 % | 0,6070 % | 0,5186 % |
| gesättigt | 0,3315 % | 0,5346 % | 0,1881 % | 0,5639 % | 0,9009 % | 0,6429 % |
| Stop&Go | 0,0365 % | 0,1317 % | 0,0215 % | 0,1406 % | 0,2060 % | 0,1565 % |
| Stop&Go II | 0,0055 % | 0,0162 % | 0,0032 % | 0,0165 % | 0,0300 % | 0,0184 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,3149 % | 0,1895 % | 0,1776 % | 0,2112 % | 0,2425 % | 0,2480 % |
| dicht | 0,5146 % | 0,3472 % | 0,2522 % | 0,3691 % | 0,4886 % | 0,4425 % |
| gesättigt | 0,3550 % | 0,5280 % | 0,1995 % | 0,5488 % | 0,9451 % | 0,6316 % |
| Stop&Go | 0,0337 % | 0,1318 % | 0,0209 % | 0,1388 % | 0,2274 % | 0,1543 % |
| Stop&Go II | 0,0052 % | 0,0180 % | 0,0031 % | 0,0182 % | 0,0366 % | 0,0199 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,1581 % | 0,1008 % | 0,0885 % | 0,1086 % | 0,1198 % | 0,1354 % |
| dicht | 0,3111 % | 0,2031 % | 0,1400 % | 0,2052 % | 0,2572 % | 0,2681 % |
| gesättigt | 0,2473 % | 0,2878 % | 0,1191 % | 0,2843 % | 0,4709 % | 0,3547 % |
| Stop&Go | 0,0143 % | 0,0523 % | 0,0092 % | 0,0507 % | 0,0902 % | 0,0620 % |
| Stop&Go II | 0,0023 % | 0,0071 % | 0,0014 % | 0,0070 % | 0,0138 % | 0,0079 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,1171 % | 0,0965 % | 0,0606 % | 0,0939 % | 0,1229 % | 0,1307 % |
| dicht | 0,3306 % | 0,2412 % | 0,1404 % | 0,2202 % | 0,3061 % | 0,3239 % |
| gesättigt | 0,3881 % | 0,3476 % | 0,1668 % | 0,3055 % | 0,4757 % | 0,4598 % |
| Stop&Go | 0,0138 % | 0,0346 % | 0,0069 % | 0,0314 % | 0,0535 % | 0,0426 % |
| Stop&Go II | 0,0022 % | 0,0040 % | 0,0011 % | 0,0036 % | 0,0060 % | 0,0048 % |

| k, stgk, v | Pkw | LNF | SNF | Rbus | Lbus | KR |
|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| La/SaS/30 | 0,0522 % | 0,0689 % | 0,0529 % | 0,0237 % | 0,0359 % | 0,0648 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0252 % | 0,0339 % | 0,0307 % | 0,0108 % | 0,0144 % | 0,0319 % |
| dicht | 0,0017 % | 0,0043 % | 0,0015 % | 0,0014 % | 0,0020 % | 0,0038 % |
| gesättigt | 0,0008 % | 0,0022 % | 0,0005 % | 0,0007 % | 0,0010 % | 0,0020 % |
| Stop&Go | 0,0003 % | 0,0009 % | 0,0002 % | 0,0003 % | 0,0004 % | 0,0008 % |
| Stop&Go II | 0,0003 % | 0,0011 % | 0,0002 % | 0,0003 % | 0,0005 % | 0,0010 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0107 % | 0,0109 % | 0,0104 % | 0,0042 % | 0,0073 % | 0,0103 % |
| dicht | 0,0012 % | 0,0025 % | 0,0009 % | 0,0010 % | 0,0017 % | 0,0023 % |
| gesättigt | 0,0006 % | 0,0016 % | 0,0005 % | 0,0006 % | 0,0011 % | 0,0014 % |
| Stop&Go | 0,0003 % | 0,0007 % | 0,0002 % | 0,0003 % | 0,0005 % | 0,0006 % |
| Stop&Go II | 0,0004 % | 0,0007 % | 0,0003 % | 0,0002 % | 0,0005 % | 0,0007 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0039 % | 0,0034 % | 0,0023 % | 0,0014 % | 0,0025 % | 0,0032 % |
| dicht | 0,0006 % | 0,0008 % | 0,0005 % | 0,0003 % | 0,0006 % | 0,0007 % |
| gesättigt | 0,0003 % | 0,0003 % | 0,0004 % | 0,0001 % | 0,0003 % | 0,0003 % |
| Stop&Go | 0,0002 % | 0,0002 % | 0,0003 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0002 % |
| Stop&Go II | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0001 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0044 % | 0,0037 % | 0,0032 % | 0,0013 % | 0,0019 % | 0,0036 % |
| dicht | 0,0007 % | 0,0009 % | 0,0005 % | 0,0003 % | 0,0005 % | 0,0008 % |
| gesättigt | 0,0002 % | 0,0004 % | 0,0002 % | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0004 % |
| Stop&Go | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0002 % |
| Stop&Go II | 0,0002 % | 0,0004 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0003 % |
| La/SaS/50 | 0,1947 % | 0,2817 % | 0,2110 % | 0,1983 % | 0,4883 % | 0,2779 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0810 % | 0,1086 % | 0,1016 % | 0,0695 % | 0,1597 % | 0,1060 % |
| dicht | 0,0090 % | 0,0210 % | 0,0095 % | 0,0129 % | 0,0315 % | 0,0206 % |
| gesättigt | 0,0041 % | 0,0114 % | 0,0034 % | 0,0068 % | 0,0172 % | 0,0113 % |
| Stop&Go | 0,0019 % | 0,0045 % | 0,0014 % | 0,0026 % | 0,0068 % | 0,0045 % |
| Stop&Go II | 0,0015 % | 0,0039 % | 0,0010 % | 0,0020 % | 0,0055 % | 0,0045 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0474 % | 0,0504 % | 0,0520 % | 0,0409 % | 0,1040 % | 0,0502 % |
| dicht | 0,0087 % | 0,0162 % | 0,0078 % | 0,0127 % | 0,0332 % | 0,0162 % |
| gesättigt | 0,0032 % | 0,0085 % | 0,0023 % | 0,0067 % | 0,0175 % | 0,0083 % |
| Stop&Go | 0,0014 % | 0,0033 % | 0,0010 % | 0,0026 % | 0,0068 % | 0,0032 % |
| Stop&Go II | 0,0012 % | 0,0032 % | 0,0009 % | 0,0024 % | 0,0063 % | 0,0034 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0122 % | 0,0156 % | 0,0121 % | 0,0134 % | 0,0350 % | 0,0154 % |
| dicht | 0,0036 % | 0,0070 % | 0,0027 % | 0,0058 % | 0,0155 % | 0,0070 % |
| gesättigt | 0,0013 % | 0,0033 % | 0,0009 % | 0,0027 % | 0,0073 % | 0,0032 % |
| Stop&Go | 0,0004 % | 0,0012 % | 0,0003 % | 0,0010 % | 0,0026 % | 0,0011 % |
| Stop&Go II | 0,0003 % | 0,0010 % | 0,0003 % | 0,0008 % | 0,0023 % | 0,0010 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0127 % | 0,0154 % | 0,0107 % | 0,0108 % | 0,0252 % | 0,0149 % |
| dicht | 0,0030 % | 0,0045 % | 0,0020 % | 0,0030 % | 0,0074 % | 0,0044 % |
| gesättigt | 0,0011 % | 0,0019 % | 0,0009 % | 0,0013 % | 0,0032 % | 0,0019 % |
| Stop&Go | 0,0003 % | 0,0005 % | 0,0002 % | 0,0003 % | 0,0008 % | 0,0005 % |
| Stop&Go II | 0,0002 % | 0,0003 % | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0004 % | 0,0003 % |

| k, stgk, v | Pkw | LNF | SNF | Rbus | Lbus | KR |
|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| La/SaS/60 | 0,0421 % | 0,0521 % | 0,0421 % | 0,0541 % | 0,1471 % | 0,0493 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0174 % | 0,0221 % | 0,0185 % | 0,0194 % | 0,0498 % | 0,0206 % |
| dicht | 0,0021 % | 0,0032 % | 0,0016 % | 0,0025 % | 0,0066 % | 0,0033 % |
| gesättigt | 0,0008 % | 0,0018 % | 0,0005 % | 0,0015 % | 0,0039 % | 0,0017 % |
| Stop&Go | 0,0002 % | 0,0004 % | 0,0002 % | 0,0003 % | 0,0009 % | 0,0004 % |
| Stop&Go II | 0,0001 % | 0,0003 % | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0006 % | 0,0003 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0105 % | 0,0102 % | 0,0102 % | 0,0129 % | 0,0357 % | 0,0099 % |
| dicht | 0,0039 % | 0,0036 % | 0,0039 % | 0,0045 % | 0,0131 % | 0,0035 % |
| gesättigt | 0,0010 % | 0,0016 % | 0,0008 % | 0,0020 % | 0,0059 % | 0,0015 % |
| Stop&Go | 0,0003 % | 0,0005 % | 0,0002 % | 0,0006 % | 0,0019 % | 0,0004 % |
| Stop&Go II | 0,0002 % | 0,0004 % | 0,0001 % | 0,0005 % | 0,0014 % | 0,0003 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0026 % | 0,0030 % | 0,0028 % | 0,0037 % | 0,0103 % | 0,0029 % |
| dicht | 0,0009 % | 0,0013 % | 0,0010 % | 0,0016 % | 0,0043 % | 0,0011 % |
| gesättigt | 0,0003 % | 0,0006 % | 0,0002 % | 0,0007 % | 0,0020 % | 0,0005 % |
| Stop&Go | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0000 % | 0,0002 % | 0,0006 % | 0,0002 % |
| Stop&Go II | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0000 % | 0,0002 % | 0,0006 % | 0,0001 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0012 % | 0,0020 % | 0,0016 % | 0,0024 % | 0,0067 % | 0,0020 % |
| dicht | 0,0003 % | 0,0004 % | 0,0001 % | 0,0005 % | 0,0015 % | 0,0004 % |
| gesättigt | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0001 % | 0,0003 % | 0,0009 % | 0,0002 % |
| Stop&Go | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0001 % |
| Stop&Go II | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0000 % |
| La/SaS/70 | 0,0834 % | 0,1214 % | 0,0900 % | 0,0975 % | 0,2548 % | 0,1224 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0318 % | 0,0484 % | 0,0381 % | 0,0354 % | 0,0877 % | 0,0455 % |
| dicht | 0,0118 % | 0,0154 % | 0,0118 % | 0,0108 % | 0,0267 % | 0,0153 % |
| gesättigt | 0,0053 % | 0,0124 % | 0,0046 % | 0,0085 % | 0,0212 % | 0,0128 % |
| Stop&Go | 0,0012 % | 0,0033 % | 0,0009 % | 0,0022 % | 0,0057 % | 0,0034 % |
| Stop&Go II | 0,0006 % | 0,0016 % | 0,0004 % | 0,0011 % | 0,0028 % | 0,0017 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0093 % | 0,0101 % | 0,0109 % | 0,0105 % | 0,0291 % | 0,0104 % |
| dicht | 0,0089 % | 0,0099 % | 0,0120 % | 0,0103 % | 0,0284 % | 0,0103 % |
| gesättigt | 0,0045 % | 0,0081 % | 0,0058 % | 0,0079 % | 0,0223 % | 0,0088 % |
| Stop&Go | 0,0007 % | 0,0017 % | 0,0006 % | 0,0015 % | 0,0046 % | 0,0020 % |
| Stop&Go II | 0,0004 % | 0,0009 % | 0,0003 % | 0,0008 % | 0,0025 % | 0,0011 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0014 % | 0,0010 % | 0,0004 % | 0,0011 % | 0,0028 % | 0,0012 % |
| dicht | 0,0028 % | 0,0018 % | 0,0010 % | 0,0018 % | 0,0047 % | 0,0020 % |
| gesättigt | 0,0024 % | 0,0021 % | 0,0010 % | 0,0020 % | 0,0055 % | 0,0023 % |
| Stop&Go | 0,0005 % | 0,0005 % | 0,0002 % | 0,0004 % | 0,0012 % | 0,0005 % |
| Stop&Go II | 0,0002 % | 0,0002 % | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0006 % | 0,0003 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0009 % | 0,0018 % | 0,0013 % | 0,0015 % | 0,0041 % | 0,0023 % |
| dicht | 0,0005 % | 0,0008 % | 0,0004 % | 0,0006 % | 0,0018 % | 0,0010 % |
| gesättigt | 0,0003 % | 0,0008 % | 0,0002 % | 0,0006 % | 0,0018 % | 0,0009 % |
| Stop&Go | 0,0001 % | 0,0003 % | 0,0000 % | 0,0003 % | 0,0009 % | 0,0003 % |
| Stop&Go II | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0004 % | 0,0001 % |

| k, stgk, v | Pkw | LNF | SNF | Rbus | Lbus | KR |
|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| La/SaS/80 | 0,0263 % | 0,0310 % | 0,0206 % | 0,0353 % | 0,0904 % | 0,0307 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0105 % | 0,0124 % | 0,0095 % | 0,0138 % | 0,0325 % | 0,0120 % |
| dicht | 0,0035 % | 0,0047 % | 0,0022 % | 0,0049 % | 0,0135 % | 0,0045 % |
| gesättigt | 0,0008 % | 0,0011 % | 0,0004 % | 0,0011 % | 0,0031 % | 0,0011 % |
| Stop&Go | 0,0002 % | 0,0004 % | 0,0001 % | 0,0004 % | 0,0012 % | 0,0004 % |
| Stop&Go II | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0004 % | 0,0001 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0048 % | 0,0042 % | 0,0041 % | 0,0051 % | 0,0120 % | 0,0043 % |
| dicht | 0,0018 % | 0,0017 % | 0,0012 % | 0,0019 % | 0,0055 % | 0,0020 % |
| gesättigt | 0,0006 % | 0,0008 % | 0,0005 % | 0,0009 % | 0,0024 % | 0,0009 % |
| Stop&Go | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0002 % | 0,0002 % | 0,0005 % | 0,0002 % |
| Stop&Go II | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0000 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0009 % | 0,0014 % | 0,0006 % | 0,0018 % | 0,0046 % | 0,0012 % |
| dicht | 0,0003 % | 0,0004 % | 0,0002 % | 0,0005 % | 0,0014 % | 0,0003 % |
| gesättigt | 0,0002 % | 0,0002 % | 0,0001 % | 0,0003 % | 0,0008 % | 0,0002 % |
| Stop&Go | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0000 % |
| Stop&Go II | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0000 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0012 % | 0,0019 % | 0,0007 % | 0,0025 % | 0,0068 % | 0,0018 % |
| dicht | 0,0009 % | 0,0011 % | 0,0005 % | 0,0013 % | 0,0039 % | 0,0011 % |
| gesättigt | 0,0002 % | 0,0003 % | 0,0001 % | 0,0003 % | 0,0010 % | 0,0004 % |
| Stop&Go | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0001 % |
| Stop&Go II | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0000 % |
| La/SaS/100 | 0,5426 % | 1,2373 % | 0,9584 % | 0,3669 % | 0,4480 % | 1,1546 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,2012 % | 0,4630 % | 0,3399 % | 0,1309 % | 0,1553 % | 0,4569 % |
| dicht | 0,0913 % | 0,1942 % | 0,2027 % | 0,0565 % | 0,0668 % | 0,1774 % |
| gesättigt | 0,0506 % | 0,1481 % | 0,0957 % | 0,0440 % | 0,0514 % | 0,1265 % |
| Stop&Go | 0,0119 % | 0,0430 % | 0,0193 % | 0,0129 % | 0,0144 % | 0,0337 % |
| Stop&Go II | 0,0028 % | 0,0115 % | 0,0046 % | 0,0034 % | 0,0041 % | 0,0087 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0524 % | 0,0773 % | 0,0800 % | 0,0237 % | 0,0344 % | 0,0776 % |
| dicht | 0,0331 % | 0,0564 % | 0,0459 % | 0,0177 % | 0,0242 % | 0,0535 % |
| gesättigt | 0,0305 % | 0,0837 % | 0,0544 % | 0,0282 % | 0,0366 % | 0,0732 % |
| Stop&Go | 0,0046 % | 0,0193 % | 0,0086 % | 0,0066 % | 0,0082 % | 0,0168 % |
| Stop&Go II | 0,0014 % | 0,0067 % | 0,0027 % | 0,0022 % | 0,0029 % | 0,0058 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0053 % | 0,0121 % | 0,0048 % | 0,0038 % | 0,0052 % | 0,0108 % |
| dicht | 0,0085 % | 0,0150 % | 0,0143 % | 0,0045 % | 0,0057 % | 0,0151 % |
| gesättigt | 0,0144 % | 0,0355 % | 0,0297 % | 0,0117 % | 0,0150 % | 0,0323 % |
| Stop&Go | 0,0021 % | 0,0066 % | 0,0054 % | 0,0021 % | 0,0028 % | 0,0060 % |
| Stop&Go II | 0,0007 % | 0,0022 % | 0,0013 % | 0,0007 % | 0,0009 % | 0,0020 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0104 % | 0,0186 % | 0,0216 % | 0,0054 % | 0,0057 % | 0,0175 % |
| dicht | 0,0075 % | 0,0141 % | 0,0109 % | 0,0038 % | 0,0043 % | 0,0134 % |
| gesättigt | 0,0115 % | 0,0229 % | 0,0134 % | 0,0068 % | 0,0074 % | 0,0217 % |
| Stop&Go | 0,0020 % | 0,0046 % | 0,0026 % | 0,0014 % | 0,0016 % | 0,0038 % |
| Stop&Go II | 0,0005 % | 0,0025 % | 0,0005 % | 0,0007 % | 0,0009 % | 0,0020 % |

| k, stgk, v | Pkw | LNF | SNF | Rbus | Lbus | KR |
|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| La/SaS-k/30 | 0,0373 % | 0,0408 % | 0,0319 % | 0,0123 % | 0,0154 % | 0,0381 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0127 % | 0,0136 % | 0,0112 % | 0,0041 % | 0,0051 % | 0,0125 % |
| dicht | 0,0021 % | 0,0030 % | 0,0019 % | 0,0009 % | 0,0011 % | 0,0029 % |
| gesättigt | 0,0007 % | 0,0011 % | 0,0006 % | 0,0003 % | 0,0004 % | 0,0011 % |
| Stop&Go | 0,0006 % | 0,0004 % | 0,0006 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0005 % |
| Stop&Go II | 0,0004 % | 0,0003 % | 0,0003 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0003 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0073 % | 0,0070 % | 0,0067 % | 0,0023 % | 0,0030 % | 0,0065 % |
| dicht | 0,0018 % | 0,0024 % | 0,0010 % | 0,0008 % | 0,0011 % | 0,0023 % |
| gesättigt | 0,0007 % | 0,0010 % | 0,0005 % | 0,0003 % | 0,0004 % | 0,0009 % |
| Stop&Go | 0,0002 % | 0,0003 % | 0,0002 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0003 % |
| Stop&Go II | 0,0002 % | 0,0003 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0002 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0030 % | 0,0030 % | 0,0026 % | 0,0009 % | 0,0011 % | 0,0028 % |
| dicht | 0,0007 % | 0,0011 % | 0,0007 % | 0,0003 % | 0,0004 % | 0,0010 % |
| gesättigt | 0,0003 % | 0,0005 % | 0,0003 % | 0,0002 % | 0,0002 % | 0,0005 % |
| Stop&Go | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0002 % |
| Stop&Go II | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0001 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0035 % | 0,0040 % | 0,0028 % | 0,0011 % | 0,0012 % | 0,0036 % |
| dicht | 0,0019 % | 0,0017 % | 0,0014 % | 0,0005 % | 0,0005 % | 0,0016 % |
| gesättigt | 0,0007 % | 0,0006 % | 0,0006 % | 0,0002 % | 0,0002 % | 0,0005 % |
| Stop&Go | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0001 % |
| Stop&Go II | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0001 % |
| La/SaS-k/50 | 0,0738 % | 0,1164 % | 0,0904 % | 0,0397 % | 0,0606 % | 0,1095 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0238 % | 0,0309 % | 0,0332 % | 0,0109 % | 0,0172 % | 0,0297 % |
| dicht | 0,0036 % | 0,0099 % | 0,0036 % | 0,0034 % | 0,0053 % | 0,0092 % |
| gesättigt | 0,0017 % | 0,0049 % | 0,0021 % | 0,0017 % | 0,0027 % | 0,0043 % |
| Stop&Go | 0,0006 % | 0,0019 % | 0,0006 % | 0,0007 % | 0,0011 % | 0,0017 % |
| Stop&Go II | 0,0008 % | 0,0029 % | 0,0005 % | 0,0010 % | 0,0017 % | 0,0025 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0119 % | 0,0156 % | 0,0137 % | 0,0058 % | 0,0095 % | 0,0146 % |
| dicht | 0,0042 % | 0,0070 % | 0,0047 % | 0,0025 % | 0,0042 % | 0,0065 % |
| gesättigt | 0,0016 % | 0,0039 % | 0,0019 % | 0,0014 % | 0,0023 % | 0,0036 % |
| Stop&Go | 0,0005 % | 0,0013 % | 0,0006 % | 0,0005 % | 0,0008 % | 0,0012 % |
| Stop&Go II | 0,0005 % | 0,0012 % | 0,0005 % | 0,0004 % | 0,0007 % | 0,0012 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0079 % | 0,0077 % | 0,0089 % | 0,0028 % | 0,0045 % | 0,0073 % |
| dicht | 0,0010 % | 0,0030 % | 0,0008 % | 0,0011 % | 0,0017 % | 0,0028 % |
| gesättigt | 0,0005 % | 0,0015 % | 0,0004 % | 0,0005 % | 0,0009 % | 0,0014 % |
| Stop&Go | 0,0001 % | 0,0005 % | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0003 % | 0,0005 % |
| Stop&Go II | 0,0001 % | 0,0003 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0003 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0108 % | 0,0153 % | 0,0161 % | 0,0040 % | 0,0047 % | 0,0166 % |
| dicht | 0,0027 % | 0,0056 % | 0,0016 % | 0,0018 % | 0,0019 % | 0,0040 % |
| gesättigt | 0,0012 % | 0,0021 % | 0,0007 % | 0,0007 % | 0,0007 % | 0,0016 % |
| Stop&Go | 0,0002 % | 0,0004 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0003 % |
| Stop&Go II | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0002 % |

| k, stgk, v | Pkw | LNF | SNF | Rbus | Lbus | KR |
|---------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| La/SaS-k/100 | 0,3438 % | 0,7869 % | 0,5972 % | 0,2252 % | 0,2790 % | 0,7635 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0730 % | 0,1685 % | 0,1436 % | 0,0488 % | 0,0617 % | 0,1690 % |
| dicht | 0,0597 % | 0,1140 % | 0,1085 % | 0,0333 % | 0,0397 % | 0,1104 % |
| gesättigt | 0,0280 % | 0,0910 % | 0,0465 % | 0,0249 % | 0,0308 % | 0,0869 % |
| Stop&Go | 0,0064 % | 0,0248 % | 0,0081 % | 0,0068 % | 0,0092 % | 0,0221 % |
| Stop&Go II | 0,0015 % | 0,0078 % | 0,0019 % | 0,0022 % | 0,0029 % | 0,0073 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0324 % | 0,0396 % | 0,0526 % | 0,0120 % | 0,0156 % | 0,0386 % |
| dicht | 0,0345 % | 0,0594 % | 0,0564 % | 0,0178 % | 0,0233 % | 0,0567 % |
| gesättigt | 0,0153 % | 0,0600 % | 0,0202 % | 0,0174 % | 0,0229 % | 0,0598 % |
| Stop&Go | 0,0016 % | 0,0117 % | 0,0020 % | 0,0033 % | 0,0045 % | 0,0119 % |
| Stop&Go II | 0,0005 % | 0,0036 % | 0,0007 % | 0,0010 % | 0,0014 % | 0,0041 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0058 % | 0,0081 % | 0,0111 % | 0,0024 % | 0,0031 % | 0,0074 % |
| dicht | 0,0129 % | 0,0271 % | 0,0206 % | 0,0081 % | 0,0099 % | 0,0248 % |
| gesättigt | 0,0162 % | 0,0438 % | 0,0298 % | 0,0126 % | 0,0152 % | 0,0422 % |
| Stop&Go | 0,0017 % | 0,0083 % | 0,0037 % | 0,0022 % | 0,0028 % | 0,0086 % |
| Stop&Go II | 0,0005 % | 0,0021 % | 0,0012 % | 0,0006 % | 0,0007 % | 0,0021 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0060 % | 0,0147 % | 0,0124 % | 0,0040 % | 0,0044 % | 0,0138 % |
| dicht | 0,0139 % | 0,0250 % | 0,0283 % | 0,0069 % | 0,0075 % | 0,0233 % |
| gesättigt | 0,0273 % | 0,0573 % | 0,0404 % | 0,0157 % | 0,0172 % | 0,0557 % |
| Stop&Go | 0,0057 % | 0,0172 % | 0,0079 % | 0,0046 % | 0,0052 % | 0,0163 % |
| Stop&Go II | 0,0008 % | 0,0029 % | 0,0014 % | 0,0008 % | 0,0009 % | 0,0025 % |
| La/ErS/30 | 0,2549 % | 0,0596 % | 0,0473 % | 0,0164 % | 0,0174 % | 0,0553 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0960 % | 0,0213 % | 0,0178 % | 0,0059 % | 0,0060 % | 0,0200 % |
| dicht | 0,0090 % | 0,0028 % | 0,0017 % | 0,0008 % | 0,0009 % | 0,0025 % |
| gesättigt | 0,0024 % | 0,0009 % | 0,0005 % | 0,0002 % | 0,0003 % | 0,0007 % |
| Stop&Go | 0,0008 % | 0,0003 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0002 % |
| Stop&Go II | 0,0007 % | 0,0002 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0002 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0522 % | 0,0116 % | 0,0098 % | 0,0032 % | 0,0033 % | 0,0109 % |
| dicht | 0,0057 % | 0,0016 % | 0,0010 % | 0,0004 % | 0,0005 % | 0,0015 % |
| gesättigt | 0,0013 % | 0,0005 % | 0,0002 % | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0004 % |
| Stop&Go | 0,0004 % | 0,0002 % | 0,0001 % | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0001 % |
| Stop&Go II | 0,0004 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0001 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0274 % | 0,0061 % | 0,0051 % | 0,0017 % | 0,0017 % | 0,0057 % |
| dicht | 0,0030 % | 0,0009 % | 0,0005 % | 0,0003 % | 0,0003 % | 0,0008 % |
| gesättigt | 0,0007 % | 0,0003 % | 0,0002 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0002 % |
| Stop&Go | 0,0003 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0001 % |
| Stop&Go II | 0,0002 % | 0,0001 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0001 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0476 % | 0,0106 % | 0,0090 % | 0,0029 % | 0,0030 % | 0,0099 % |
| dicht | 0,0045 % | 0,0015 % | 0,0008 % | 0,0004 % | 0,0005 % | 0,0014 % |
| gesättigt | 0,0013 % | 0,0004 % | 0,0002 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0003 % |
| Stop&Go | 0,0006 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0001 % |
| Stop&Go II | 0,0003 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0001 % |

| k, stgk, v | Pkw | LNF | SNF | Rbus | Lbus | KR |
|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| La/ErS/50 | 0,7819 % | 0,1831 % | 0,1451 % | 0,0504 % | 0,0534 % | 0,1699 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,3111 % | 0,0669 % | 0,0587 % | 0,0184 % | 0,0190 % | 0,0630 % |
| dicht | 0,0353 % | 0,0113 % | 0,0057 % | 0,0031 % | 0,0035 % | 0,0102 % |
| gesättigt | 0,0137 % | 0,0051 % | 0,0024 % | 0,0014 % | 0,0016 % | 0,0044 % |
| Stop&Go | 0,0054 % | 0,0017 % | 0,0010 % | 0,0005 % | 0,0006 % | 0,0014 % |
| Stop&Go II | 0,0043 % | 0,0015 % | 0,0008 % | 0,0004 % | 0,0006 % | 0,0012 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,1606 % | 0,0341 % | 0,0299 % | 0,0094 % | 0,0095 % | 0,0321 % |
| dicht | 0,0193 % | 0,0063 % | 0,0034 % | 0,0017 % | 0,0020 % | 0,0057 % |
| gesättigt | 0,0071 % | 0,0028 % | 0,0013 % | 0,0008 % | 0,0009 % | 0,0025 % |
| Stop&Go | 0,0028 % | 0,0010 % | 0,0005 % | 0,0003 % | 0,0003 % | 0,0008 % |
| Stop&Go II | 0,0023 % | 0,0009 % | 0,0004 % | 0,0002 % | 0,0003 % | 0,0007 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0798 % | 0,0169 % | 0,0147 % | 0,0047 % | 0,0048 % | 0,0159 % |
| dicht | 0,0093 % | 0,0031 % | 0,0017 % | 0,0008 % | 0,0009 % | 0,0028 % |
| gesättigt | 0,0028 % | 0,0012 % | 0,0006 % | 0,0003 % | 0,0004 % | 0,0011 % |
| Stop&Go | 0,0010 % | 0,0004 % | 0,0002 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0003 % |
| Stop&Go II | 0,0007 % | 0,0003 % | 0,0002 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0002 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,1077 % | 0,0234 % | 0,0200 % | 0,0065 % | 0,0067 % | 0,0218 % |
| dicht | 0,0134 % | 0,0041 % | 0,0024 % | 0,0011 % | 0,0012 % | 0,0038 % |
| gesättigt | 0,0037 % | 0,0015 % | 0,0007 % | 0,0004 % | 0,0005 % | 0,0013 % |
| Stop&Go | 0,0011 % | 0,0004 % | 0,0002 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0003 % |
| Stop&Go II | 0,0007 % | 0,0003 % | 0,0002 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0002 % |
| La/ErS/100 | 1,6672 % | 0,4188 % | 0,3108 % | 0,1122 % | 0,1229 % | 0,4079 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,3742 % | 0,0893 % | 0,0749 % | 0,0244 % | 0,0270 % | 0,0890 % |
| dicht | 0,3059 % | 0,0604 % | 0,0566 % | 0,0166 % | 0,0174 % | 0,0581 % |
| gesättigt | 0,1436 % | 0,0482 % | 0,0242 % | 0,0124 % | 0,0135 % | 0,0458 % |
| Stop&Go | 0,0329 % | 0,0131 % | 0,0042 % | 0,0034 % | 0,0040 % | 0,0116 % |
| Stop&Go II | 0,0079 % | 0,0041 % | 0,0010 % | 0,0011 % | 0,0013 % | 0,0038 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,1591 % | 0,0240 % | 0,0308 % | 0,0066 % | 0,0071 % | 0,0234 % |
| dicht | 0,1692 % | 0,0360 % | 0,0330 % | 0,0097 % | 0,0107 % | 0,0344 % |
| gesättigt | 0,0750 % | 0,0363 % | 0,0118 % | 0,0095 % | 0,0105 % | 0,0363 % |
| Stop&Go | 0,0080 % | 0,0071 % | 0,0012 % | 0,0018 % | 0,0020 % | 0,0072 % |
| Stop&Go II | 0,0024 % | 0,0022 % | 0,0004 % | 0,0005 % | 0,0006 % | 0,0025 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0245 % | 0,0036 % | 0,0049 % | 0,0010 % | 0,0011 % | 0,0033 % |
| dicht | 0,0543 % | 0,0119 % | 0,0091 % | 0,0033 % | 0,0036 % | 0,0112 % |
| gesättigt | 0,0681 % | 0,0193 % | 0,0131 % | 0,0051 % | 0,0055 % | 0,0191 % |
| Stop&Go | 0,0073 % | 0,0037 % | 0,0016 % | 0,0009 % | 0,0010 % | 0,0039 % |
| Stop&Go II | 0,0021 % | 0,0009 % | 0,0005 % | 0,0002 % | 0,0003 % | 0,0010 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0260 % | 0,0074 % | 0,0060 % | 0,0019 % | 0,0022 % | 0,0071 % |
| dicht | 0,0602 % | 0,0125 % | 0,0136 % | 0,0034 % | 0,0037 % | 0,0120 % |
| gesättigt | 0,1184 % | 0,0287 % | 0,0194 % | 0,0077 % | 0,0084 % | 0,0286 % |
| Stop&Go | 0,0248 % | 0,0086 % | 0,0038 % | 0,0023 % | 0,0026 % | 0,0084 % |
| Stop&Go II | 0,0033 % | 0,0015 % | 0,0007 % | 0,0004 % | 0,0004 % | 0,0013 % |

| k, stgk, v | Pkw | LNF | SNF | Rbus | Lbus | KR |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Ag/AB/60 | 0,0441 % | 0,1048 % | 0,0491 % | 0,1332 % | 0,0628 % | 0,0626 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0200 % | 0,0522 % | 0,0231 % | 0,0685 % | 0,0322 % | 0,0314 % |
| dicht | 0,0044 % | 0,0122 % | 0,0048 % | 0,0143 % | 0,0083 % | 0,0081 % |
| gesättigt | 0,0018 % | 0,0054 % | 0,0018 % | 0,0065 % | 0,0027 % | 0,0024 % |
| Stop&Go | 0,0010 % | 0,0025 % | 0,0008 % | 0,0031 % | 0,0010 % | 0,0008 % |
| Stop&Go II | 0,0004 % | 0,0011 % | 0,0003 % | 0,0013 % | 0,0004 % | 0,0003 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0088 % | 0,0154 % | 0,0093 % | 0,0204 % | 0,0084 % | 0,0087 % |
| dicht | 0,0026 % | 0,0046 % | 0,0032 % | 0,0052 % | 0,0031 % | 0,0035 % |
| gesättigt | 0,0010 % | 0,0020 % | 0,0012 % | 0,0023 % | 0,0012 % | 0,0012 % |
| Stop&Go | 0,0004 % | 0,0008 % | 0,0003 % | 0,0010 % | 0,0004 % | 0,0003 % |
| Stop&Go II | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0000 % | 0,0002 % | 0,0001 % | 0,0001 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0020 % | 0,0040 % | 0,0026 % | 0,0049 % | 0,0026 % | 0,0032 % |
| dicht | 0,0005 % | 0,0012 % | 0,0008 % | 0,0015 % | 0,0007 % | 0,0008 % |
| gesättigt | 0,0002 % | 0,0008 % | 0,0002 % | 0,0010 % | 0,0004 % | 0,0003 % |
| Stop&Go | 0,0001 % | 0,0004 % | 0,0001 % | 0,0005 % | 0,0001 % | 0,0001 % |
| Stop&Go II | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0000 % | 0,0002 % | 0,0001 % | 0,0000 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0004 % | 0,0015 % | 0,0004 % | 0,0018 % | 0,0010 % | 0,0011 % |
| dicht | 0,0001 % | 0,0003 % | 0,0001 % | 0,0004 % | 0,0002 % | 0,0002 % |
| gesättigt | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0000 % |
| Stop&Go | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0000 % | 0,0000 % |
| Stop&Go II | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % |
| Ag/AB/80 | 0,6083 % | 1,1040 % | 0,6007 % | 1,4755 % | 0,4858 % | 0,4610 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,3143 % | 0,5499 % | 0,3148 % | 0,7582 % | 0,2384 % | 0,2284 % |
| dicht | 0,0841 % | 0,1719 % | 0,0780 % | 0,2221 % | 0,0766 % | 0,0738 % |
| gesättigt | 0,0316 % | 0,0666 % | 0,0275 % | 0,0786 % | 0,0297 % | 0,0264 % |
| Stop&Go | 0,0109 % | 0,0208 % | 0,0083 % | 0,0235 % | 0,0086 % | 0,0069 % |
| Stop&Go II | 0,0017 % | 0,0035 % | 0,0012 % | 0,0038 % | 0,0015 % | 0,0013 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0916 % | 0,1545 % | 0,0933 % | 0,2137 % | 0,0710 % | 0,0636 % |
| dicht | 0,0266 % | 0,0460 % | 0,0261 % | 0,0590 % | 0,0211 % | 0,0211 % |
| gesättigt | 0,0108 % | 0,0182 % | 0,0097 % | 0,0209 % | 0,0089 % | 0,0085 % |
| Stop&Go | 0,0036 % | 0,0059 % | 0,0027 % | 0,0067 % | 0,0024 % | 0,0020 % |
| Stop&Go II | 0,0006 % | 0,0010 % | 0,0004 % | 0,0011 % | 0,0005 % | 0,0005 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0151 % | 0,0273 % | 0,0157 % | 0,0384 % | 0,0108 % | 0,0108 % |
| dicht | 0,0049 % | 0,0095 % | 0,0054 % | 0,0120 % | 0,0042 % | 0,0046 % |
| gesättigt | 0,0016 % | 0,0036 % | 0,0015 % | 0,0041 % | 0,0016 % | 0,0016 % |
| Stop&Go | 0,0005 % | 0,0010 % | 0,0004 % | 0,0012 % | 0,0004 % | 0,0004 % |
| Stop&Go II | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0001 % | 0,0001 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0065 % | 0,0149 % | 0,0096 % | 0,0208 % | 0,0057 % | 0,0066 % |
| dicht | 0,0022 % | 0,0056 % | 0,0038 % | 0,0070 % | 0,0025 % | 0,0029 % |
| gesättigt | 0,0011 % | 0,0027 % | 0,0017 % | 0,0031 % | 0,0013 % | 0,0013 % |
| Stop&Go | 0,0005 % | 0,0009 % | 0,0005 % | 0,0010 % | 0,0003 % | 0,0003 % |
| Stop&Go II | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0001 % | 0,0001 % |

| k, stgk, v | Pkw | LNf | SNF | Rbus | Lbus | KR |
|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Ag/AB/100 | 0,9527 % | 1,5251 % | 1,2028 % | 2,0362 % | 0,6710 % | 0,6687 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,3664 % | 0,6003 % | 0,4298 % | 0,8372 % | 0,2303 % | 0,2360 % |
| dicht | 0,1756 % | 0,3250 % | 0,2463 % | 0,4263 % | 0,1525 % | 0,1447 % |
| gesättigt | 0,0541 % | 0,1139 % | 0,0673 % | 0,1319 % | 0,0664 % | 0,0653 % |
| Stop&Go | 0,0115 % | 0,0204 % | 0,0126 % | 0,0232 % | 0,0091 % | 0,0082 % |
| Stop&Go II | 0,0015 % | 0,0029 % | 0,0016 % | 0,0032 % | 0,0013 % | 0,0012 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,1585 % | 0,1915 % | 0,1862 % | 0,2664 % | 0,0781 % | 0,0785 % |
| dicht | 0,0790 % | 0,1043 % | 0,1121 % | 0,1356 % | 0,0528 % | 0,0502 % |
| gesättigt | 0,0269 % | 0,0358 % | 0,0357 % | 0,0399 % | 0,0223 % | 0,0235 % |
| Stop&Go | 0,0047 % | 0,0059 % | 0,0055 % | 0,0066 % | 0,0028 % | 0,0026 % |
| Stop&Go II | 0,0007 % | 0,0010 % | 0,0007 % | 0,0011 % | 0,0004 % | 0,0004 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0314 % | 0,0426 % | 0,0398 % | 0,0588 % | 0,0175 % | 0,0186 % |
| dicht | 0,0154 % | 0,0226 % | 0,0234 % | 0,0296 % | 0,0102 % | 0,0109 % |
| gesättigt | 0,0072 % | 0,0090 % | 0,0098 % | 0,0100 % | 0,0054 % | 0,0062 % |
| Stop&Go | 0,0013 % | 0,0015 % | 0,0016 % | 0,0017 % | 0,0007 % | 0,0006 % |
| Stop&Go II | 0,0002 % | 0,0002 % | 0,0002 % | 0,0002 % | 0,0001 % | 0,0001 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0104 % | 0,0263 % | 0,0162 % | 0,0374 % | 0,0088 % | 0,0095 % |
| dicht | 0,0054 % | 0,0146 % | 0,0097 % | 0,0190 % | 0,0068 % | 0,0071 % |
| gesättigt | 0,0023 % | 0,0065 % | 0,0038 % | 0,0072 % | 0,0047 % | 0,0045 % |
| Stop&Go | 0,0003 % | 0,0008 % | 0,0005 % | 0,0008 % | 0,0006 % | 0,0005 % |
| Stop&Go II | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0001 % |
| Ag/AB/120 | 0,8557 % | 1,2172 % | 1,3206 % | 1,6625 % | 0,4904 % | 0,5043 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,2563 % | 0,3517 % | 0,3735 % | 0,5090 % | 0,1176 % | 0,1263 % |
| dicht | 0,2027 % | 0,3012 % | 0,3225 % | 0,4128 % | 0,1286 % | 0,1265 % |
| gesättigt | 0,1254 % | 0,2079 % | 0,2057 % | 0,2578 % | 0,1100 % | 0,1070 % |
| Stop&Go | 0,0139 % | 0,0226 % | 0,0180 % | 0,0265 % | 0,0100 % | 0,0092 % |
| Stop&Go II | 0,0012 % | 0,0018 % | 0,0015 % | 0,0020 % | 0,0009 % | 0,0009 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0894 % | 0,1010 % | 0,1315 % | 0,1463 % | 0,0319 % | 0,0358 % |
| dicht | 0,0689 % | 0,0852 % | 0,1056 % | 0,1172 % | 0,0322 % | 0,0348 % |
| gesättigt | 0,0450 % | 0,0606 % | 0,0697 % | 0,0750 % | 0,0295 % | 0,0314 % |
| Stop&Go | 0,0063 % | 0,0075 % | 0,0084 % | 0,0086 % | 0,0030 % | 0,0029 % |
| Stop&Go II | 0,0005 % | 0,0006 % | 0,0006 % | 0,0007 % | 0,0002 % | 0,0002 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0146 % | 0,0162 % | 0,0265 % | 0,0236 % | 0,0051 % | 0,0057 % |
| dicht | 0,0090 % | 0,0116 % | 0,0168 % | 0,0161 % | 0,0044 % | 0,0048 % |
| gesättigt | 0,0063 % | 0,0091 % | 0,0112 % | 0,0113 % | 0,0042 % | 0,0047 % |
| Stop&Go | 0,0007 % | 0,0009 % | 0,0009 % | 0,0011 % | 0,0003 % | 0,0003 % |
| Stop&Go II | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0000 % | 0,0000 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0065 % | 0,0155 % | 0,0119 % | 0,0226 % | 0,0046 % | 0,0054 % |
| dicht | 0,0044 % | 0,0120 % | 0,0082 % | 0,0167 % | 0,0038 % | 0,0042 % |
| gesättigt | 0,0042 % | 0,0107 % | 0,0076 % | 0,0139 % | 0,0037 % | 0,0039 % |
| Stop&Go | 0,0004 % | 0,0010 % | 0,0006 % | 0,0011 % | 0,0003 % | 0,0003 % |
| Stop&Go II | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0000 % | 0,0000 % |

| k, stgk, v | Pkw | LNF | SNF | Rbus | Lbus | KR |
|----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Ag/AB/130 | 0,5213 % | 0,7783 % | 0,8924 % | 1,0698 % | 0,2967 % | 0,3166 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0878 % | 0,1279 % | 0,1519 % | 0,1859 % | 0,0414 % | 0,0453 % |
| dicht | 0,1036 % | 0,1576 % | 0,1627 % | 0,2194 % | 0,0614 % | 0,0641 % |
| gesättigt | 0,1345 % | 0,2199 % | 0,2337 % | 0,2933 % | 0,0932 % | 0,0983 % |
| Stop&Go | 0,0139 % | 0,0218 % | 0,0183 % | 0,0265 % | 0,0083 % | 0,0080 % |
| Stop&Go II | 0,0013 % | 0,0021 % | 0,0017 % | 0,0024 % | 0,0009 % | 0,0009 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0426 % | 0,0477 % | 0,0775 % | 0,0691 % | 0,0151 % | 0,0169 % |
| dicht | 0,0424 % | 0,0527 % | 0,0684 % | 0,0733 % | 0,0190 % | 0,0210 % |
| gesättigt | 0,0486 % | 0,0686 % | 0,0944 % | 0,0907 % | 0,0301 % | 0,0319 % |
| Stop&Go | 0,0049 % | 0,0066 % | 0,0066 % | 0,0078 % | 0,0029 % | 0,0029 % |
| Stop&Go II | 0,0005 % | 0,0007 % | 0,0006 % | 0,0009 % | 0,0003 % | 0,0002 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0105 % | 0,0139 % | 0,0180 % | 0,0198 % | 0,0042 % | 0,0048 % |
| dicht | 0,0115 % | 0,0166 % | 0,0192 % | 0,0231 % | 0,0053 % | 0,0060 % |
| gesättigt | 0,0102 % | 0,0157 % | 0,0248 % | 0,0214 % | 0,0054 % | 0,0062 % |
| Stop&Go | 0,0011 % | 0,0021 % | 0,0021 % | 0,0027 % | 0,0007 % | 0,0008 % |
| Stop&Go II | 0,0002 % | 0,0005 % | 0,0002 % | 0,0006 % | 0,0001 % | 0,0001 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0019 % | 0,0051 % | 0,0023 % | 0,0075 % | 0,0015 % | 0,0017 % |
| dicht | 0,0021 % | 0,0067 % | 0,0028 % | 0,0095 % | 0,0021 % | 0,0024 % |
| gesättigt | 0,0033 % | 0,0107 % | 0,0070 % | 0,0144 % | 0,0041 % | 0,0048 % |
| Stop&Go | 0,0003 % | 0,0012 % | 0,0004 % | 0,0015 % | 0,0005 % | 0,0005 % |
| Stop&Go II | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0000 % | 0,0000 % |
| Ag/AB/>130 | 2,2019 % | 2,8949 % | 3,6562 % | 4,0163 % | 0,9876 % | 1,0467 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,2926 % | 0,3541 % | 0,4769 % | 0,5167 % | 0,1083 % | 0,1240 % |
| dicht | 0,5400 % | 0,6808 % | 0,8418 % | 0,9589 % | 0,2173 % | 0,2379 % |
| gesättigt | 0,6492 % | 0,9587 % | 1,1568 % | 1,3014 % | 0,3434 % | 0,3558 % |
| Stop&Go | 0,0461 % | 0,0665 % | 0,0619 % | 0,0802 % | 0,0253 % | 0,0228 % |
| Stop&Go II | 0,0027 % | 0,0040 % | 0,0035 % | 0,0046 % | 0,0019 % | 0,0015 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,1114 % | 0,1051 % | 0,1869 % | 0,1528 % | 0,0326 % | 0,0368 % |
| dicht | 0,1766 % | 0,1871 % | 0,2790 % | 0,2642 % | 0,0622 % | 0,0669 % |
| gesättigt | 0,2273 % | 0,2760 % | 0,3834 % | 0,3749 % | 0,1068 % | 0,1069 % |
| Stop&Go | 0,0159 % | 0,0187 % | 0,0197 % | 0,0225 % | 0,0075 % | 0,0066 % |
| Stop&Go II | 0,0010 % | 0,0011 % | 0,0011 % | 0,0013 % | 0,0004 % | 0,0004 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0223 % | 0,0281 % | 0,0401 % | 0,0408 % | 0,0084 % | 0,0097 % |
| dicht | 0,0335 % | 0,0448 % | 0,0559 % | 0,0635 % | 0,0140 % | 0,0155 % |
| gesättigt | 0,0419 % | 0,0636 % | 0,0787 % | 0,0872 % | 0,0229 % | 0,0239 % |
| Stop&Go | 0,0025 % | 0,0037 % | 0,0037 % | 0,0046 % | 0,0015 % | 0,0015 % |
| Stop&Go II | 0,0002 % | 0,0002 % | 0,0002 % | 0,0003 % | 0,0001 % | 0,0001 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0063 % | 0,0154 % | 0,0119 % | 0,0225 % | 0,0047 % | 0,0054 % |
| dicht | 0,0115 % | 0,0305 % | 0,0197 % | 0,0431 % | 0,0100 % | 0,0108 % |
| gesättigt | 0,0193 % | 0,0521 % | 0,0325 % | 0,0715 % | 0,0189 % | 0,0189 % |
| Stop&Go | 0,0016 % | 0,0041 % | 0,0021 % | 0,0050 % | 0,0015 % | 0,0013 % |
| Stop&Go II | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0001 % | 0,0001 % |

| k, stgk, v | Pkw | LNF | SNF | Rbus | Lbus | KR |
|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Ag/St-AB/50 | 0,0594 % | 0,1353 % | 0,0470 % | 0,0833 % | 0,1206 % | 0,1428 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0283 % | 0,0611 % | 0,0212 % | 0,0410 % | 0,0436 % | 0,0526 % |
| dicht | 0,0051 % | 0,0154 % | 0,0033 % | 0,0091 % | 0,0138 % | 0,0161 % |
| gesättigt | 0,0021 % | 0,0078 % | 0,0013 % | 0,0043 % | 0,0079 % | 0,0091 % |
| Stop&Go | 0,0011 % | 0,0033 % | 0,0006 % | 0,0018 % | 0,0033 % | 0,0038 % |
| Stop&Go II | 0,0008 % | 0,0026 % | 0,0005 % | 0,0014 % | 0,0028 % | 0,0033 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0100 % | 0,0164 % | 0,0099 % | 0,0100 % | 0,0159 % | 0,0191 % |
| dicht | 0,0019 % | 0,0055 % | 0,0017 % | 0,0030 % | 0,0061 % | 0,0072 % |
| gesättigt | 0,0012 % | 0,0036 % | 0,0011 % | 0,0018 % | 0,0044 % | 0,0051 % |
| Stop&Go | 0,0006 % | 0,0015 % | 0,0005 % | 0,0008 % | 0,0017 % | 0,0020 % |
| Stop&Go II | 0,0005 % | 0,0013 % | 0,0004 % | 0,0007 % | 0,0014 % | 0,0016 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0035 % | 0,0065 % | 0,0034 % | 0,0040 % | 0,0061 % | 0,0072 % |
| dicht | 0,0007 % | 0,0017 % | 0,0007 % | 0,0009 % | 0,0018 % | 0,0021 % |
| gesättigt | 0,0003 % | 0,0008 % | 0,0002 % | 0,0005 % | 0,0008 % | 0,0009 % |
| Stop&Go | 0,0002 % | 0,0003 % | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0003 % | 0,0003 % |
| Stop&Go II | 0,0002 % | 0,0003 % | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0002 % | 0,0003 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0019 % | 0,0043 % | 0,0012 % | 0,0023 % | 0,0062 % | 0,0073 % |
| dicht | 0,0005 % | 0,0015 % | 0,0005 % | 0,0007 % | 0,0024 % | 0,0027 % |
| gesättigt | 0,0002 % | 0,0007 % | 0,0002 % | 0,0003 % | 0,0011 % | 0,0012 % |
| Stop&Go | 0,0001 % | 0,0003 % | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0004 % | 0,0005 % |
| Stop&Go II | 0,0002 % | 0,0003 % | 0,0000 % | 0,0002 % | 0,0004 % | 0,0004 % |
| Ag/St-AB/60 | 0,1248 % | 0,1995 % | 0,1848 % | 0,1350 % | 0,1827 % | 0,1867 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0422 % | 0,0688 % | 0,0721 % | 0,0474 % | 0,0702 % | 0,0693 % |
| dicht | 0,0244 % | 0,0406 % | 0,0336 % | 0,0279 % | 0,0266 % | 0,0314 % |
| gesättigt | 0,0095 % | 0,0171 % | 0,0123 % | 0,0112 % | 0,0125 % | 0,0133 % |
| Stop&Go | 0,0040 % | 0,0068 % | 0,0052 % | 0,0042 % | 0,0056 % | 0,0056 % |
| Stop&Go II | 0,0010 % | 0,0019 % | 0,0012 % | 0,0011 % | 0,0019 % | 0,0019 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0182 % | 0,0250 % | 0,0272 % | 0,0167 % | 0,0309 % | 0,0295 % |
| dicht | 0,0096 % | 0,0117 % | 0,0117 % | 0,0079 % | 0,0093 % | 0,0108 % |
| gesättigt | 0,0034 % | 0,0048 % | 0,0044 % | 0,0031 % | 0,0039 % | 0,0041 % |
| Stop&Go | 0,0011 % | 0,0015 % | 0,0013 % | 0,0010 % | 0,0012 % | 0,0011 % |
| Stop&Go II | 0,0003 % | 0,0004 % | 0,0003 % | 0,0002 % | 0,0003 % | 0,0003 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0033 % | 0,0059 % | 0,0054 % | 0,0040 % | 0,0061 % | 0,0061 % |
| dicht | 0,0019 % | 0,0036 % | 0,0029 % | 0,0025 % | 0,0029 % | 0,0032 % |
| gesättigt | 0,0009 % | 0,0018 % | 0,0013 % | 0,0012 % | 0,0015 % | 0,0014 % |
| Stop&Go | 0,0003 % | 0,0006 % | 0,0004 % | 0,0004 % | 0,0004 % | 0,0004 % |
| Stop&Go II | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0001 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0032 % | 0,0055 % | 0,0037 % | 0,0039 % | 0,0072 % | 0,0061 % |
| dicht | 0,0009 % | 0,0022 % | 0,0010 % | 0,0015 % | 0,0014 % | 0,0016 % |
| gesättigt | 0,0003 % | 0,0009 % | 0,0004 % | 0,0007 % | 0,0005 % | 0,0005 % |
| Stop&Go | 0,0001 % | 0,0003 % | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0001 % | 0,0001 % |
| Stop&Go II | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % |

| k, stgk, v | Pkw | LNF | SNF | Rbus | Lbus | KR |
|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Ag/St-AB/70 | 0,1461 % | 0,2115 % | 0,2303 % | 0,1475 % | 0,1673 % | 0,1693 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0557 % | 0,0775 % | 0,0866 % | 0,0568 % | 0,0575 % | 0,0548 % |
| dicht | 0,0223 % | 0,0335 % | 0,0346 % | 0,0229 % | 0,0213 % | 0,0240 % |
| gesättigt | 0,0089 % | 0,0182 % | 0,0137 % | 0,0118 % | 0,0155 % | 0,0155 % |
| Stop&Go | 0,0021 % | 0,0040 % | 0,0030 % | 0,0026 % | 0,0030 % | 0,0030 % |
| Stop&Go II | 0,0007 % | 0,0012 % | 0,0009 % | 0,0008 % | 0,0008 % | 0,0008 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0280 % | 0,0328 % | 0,0438 % | 0,0240 % | 0,0275 % | 0,0262 % |
| dicht | 0,0089 % | 0,0117 % | 0,0138 % | 0,0077 % | 0,0094 % | 0,0105 % |
| gesättigt | 0,0046 % | 0,0078 % | 0,0081 % | 0,0045 % | 0,0080 % | 0,0090 % |
| Stop&Go | 0,0012 % | 0,0021 % | 0,0019 % | 0,0013 % | 0,0019 % | 0,0020 % |
| Stop&Go II | 0,0004 % | 0,0008 % | 0,0006 % | 0,0005 % | 0,0008 % | 0,0008 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0052 % | 0,0069 % | 0,0098 % | 0,0050 % | 0,0067 % | 0,0064 % |
| dicht | 0,0022 % | 0,0031 % | 0,0041 % | 0,0020 % | 0,0026 % | 0,0032 % |
| gesättigt | 0,0011 % | 0,0020 % | 0,0020 % | 0,0011 % | 0,0022 % | 0,0026 % |
| Stop&Go | 0,0003 % | 0,0005 % | 0,0004 % | 0,0003 % | 0,0004 % | 0,0005 % |
| Stop&Go II | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0003 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0026 % | 0,0053 % | 0,0043 % | 0,0038 % | 0,0056 % | 0,0052 % |
| dicht | 0,0011 % | 0,0023 % | 0,0018 % | 0,0016 % | 0,0019 % | 0,0023 % |
| gesättigt | 0,0006 % | 0,0013 % | 0,0008 % | 0,0007 % | 0,0015 % | 0,0017 % |
| Stop&Go | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0002 % |
| Stop&Go II | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0001 % |
| Ag/St-AB/80 | 0,2926 % | 0,2993 % | 0,4841 % | 0,2079 % | 0,2196 % | 0,2361 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,1385 % | 0,1339 % | 0,2460 % | 0,0944 % | 0,0912 % | 0,1029 % |
| dicht | 0,0499 % | 0,0561 % | 0,0838 % | 0,0378 % | 0,0399 % | 0,0428 % |
| gesättigt | 0,0142 % | 0,0188 % | 0,0196 % | 0,0122 % | 0,0149 % | 0,0152 % |
| Stop&Go | 0,0034 % | 0,0039 % | 0,0038 % | 0,0026 % | 0,0027 % | 0,0024 % |
| Stop&Go II | 0,0009 % | 0,0010 % | 0,0008 % | 0,0007 % | 0,0006 % | 0,0005 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0460 % | 0,0399 % | 0,0683 % | 0,0286 % | 0,0269 % | 0,0312 % |
| dicht | 0,0163 % | 0,0163 % | 0,0256 % | 0,0111 % | 0,0130 % | 0,0137 % |
| gesättigt | 0,0060 % | 0,0064 % | 0,0096 % | 0,0036 % | 0,0067 % | 0,0075 % |
| Stop&Go | 0,0011 % | 0,0011 % | 0,0012 % | 0,0006 % | 0,0012 % | 0,0011 % |
| Stop&Go II | 0,0003 % | 0,0003 % | 0,0003 % | 0,0002 % | 0,0003 % | 0,0003 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0079 % | 0,0076 % | 0,0113 % | 0,0062 % | 0,0085 % | 0,0064 % |
| dicht | 0,0029 % | 0,0035 % | 0,0048 % | 0,0027 % | 0,0050 % | 0,0035 % |
| gesättigt | 0,0013 % | 0,0015 % | 0,0018 % | 0,0012 % | 0,0025 % | 0,0015 % |
| Stop&Go | 0,0004 % | 0,0005 % | 0,0006 % | 0,0003 % | 0,0010 % | 0,0004 % |
| Stop&Go II | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0001 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0020 % | 0,0043 % | 0,0040 % | 0,0030 % | 0,0025 % | 0,0033 % |
| dicht | 0,0009 % | 0,0024 % | 0,0017 % | 0,0015 % | 0,0017 % | 0,0021 % |
| gesättigt | 0,0004 % | 0,0013 % | 0,0005 % | 0,0009 % | 0,0009 % | 0,0010 % |
| Stop&Go | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0001 % |
| Stop&Go II | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0000 % | 0,0000 % |

| k, stgk, v | Pkw | LNF | SNF | Rbus | Lbus | KR |
|---------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Ag/St-AB/100 | 0,4200 % | 0,4433 % | 0,7313 % | 0,3124 % | 0,3429 % | 0,3458 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,1468 % | 0,1394 % | 0,2370 % | 0,1024 % | 0,0899 % | 0,0946 % |
| dicht | 0,0880 % | 0,1010 % | 0,1630 % | 0,0722 % | 0,0768 % | 0,0742 % |
| gesättigt | 0,0307 % | 0,0492 % | 0,0649 % | 0,0309 % | 0,0458 % | 0,0487 % |
| Stop&Go | 0,0033 % | 0,0050 % | 0,0050 % | 0,0030 % | 0,0050 % | 0,0050 % |
| Stop&Go II | 0,0005 % | 0,0007 % | 0,0007 % | 0,0004 % | 0,0008 % | 0,0006 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0624 % | 0,0482 % | 0,0964 % | 0,0354 % | 0,0310 % | 0,0330 % |
| dicht | 0,0377 % | 0,0364 % | 0,0676 % | 0,0255 % | 0,0297 % | 0,0291 % |
| gesättigt | 0,0172 % | 0,0203 % | 0,0360 % | 0,0127 % | 0,0222 % | 0,0216 % |
| Stop&Go | 0,0017 % | 0,0024 % | 0,0032 % | 0,0015 % | 0,0027 % | 0,0024 % |
| Stop&Go II | 0,0003 % | 0,0003 % | 0,0004 % | 0,0002 % | 0,0004 % | 0,0003 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0100 % | 0,0086 % | 0,0162 % | 0,0066 % | 0,0056 % | 0,0054 % |
| dicht | 0,0070 % | 0,0074 % | 0,0128 % | 0,0056 % | 0,0073 % | 0,0058 % |
| gesättigt | 0,0038 % | 0,0051 % | 0,0082 % | 0,0029 % | 0,0059 % | 0,0065 % |
| Stop&Go | 0,0004 % | 0,0007 % | 0,0005 % | 0,0004 % | 0,0008 % | 0,0008 % |
| Stop&Go II | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0001 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0047 % | 0,0073 % | 0,0077 % | 0,0056 % | 0,0061 % | 0,0052 % |
| dicht | 0,0031 % | 0,0062 % | 0,0059 % | 0,0044 % | 0,0071 % | 0,0059 % |
| gesättigt | 0,0022 % | 0,0045 % | 0,0052 % | 0,0025 % | 0,0053 % | 0,0061 % |
| Stop&Go | 0,0002 % | 0,0005 % | 0,0005 % | 0,0003 % | 0,0005 % | 0,0005 % |
| Stop&Go II | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % |
| Ag/St-AB/120 | 0,0990 % | 0,0778 % | 0,1859 % | 0,0528 % | 0,0505 % | 0,0590 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0356 % | 0,0218 % | 0,0633 % | 0,0157 % | 0,0103 % | 0,0130 % |
| dicht | 0,0227 % | 0,0175 % | 0,0426 % | 0,0123 % | 0,0105 % | 0,0120 % |
| gesättigt | 0,0129 % | 0,0146 % | 0,0279 % | 0,0091 % | 0,0123 % | 0,0138 % |
| Stop&Go | 0,0010 % | 0,0013 % | 0,0019 % | 0,0007 % | 0,0013 % | 0,0013 % |
| Stop&Go II | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0002 % | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0002 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0092 % | 0,0053 % | 0,0149 % | 0,0038 % | 0,0027 % | 0,0035 % |
| dicht | 0,0071 % | 0,0050 % | 0,0126 % | 0,0034 % | 0,0034 % | 0,0039 % |
| gesättigt | 0,0044 % | 0,0042 % | 0,0113 % | 0,0026 % | 0,0042 % | 0,0046 % |
| Stop&Go | 0,0004 % | 0,0004 % | 0,0010 % | 0,0002 % | 0,0005 % | 0,0005 % |
| Stop&Go II | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0016 % | 0,0013 % | 0,0024 % | 0,0010 % | 0,0006 % | 0,0008 % |
| dicht | 0,0013 % | 0,0012 % | 0,0022 % | 0,0008 % | 0,0008 % | 0,0010 % |
| gesättigt | 0,0014 % | 0,0015 % | 0,0035 % | 0,0009 % | 0,0013 % | 0,0016 % |
| Stop&Go | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0003 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0001 % |
| Stop&Go II | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0004 % | 0,0009 % | 0,0005 % | 0,0007 % | 0,0005 % | 0,0006 % |
| dicht | 0,0005 % | 0,0011 % | 0,0007 % | 0,0008 % | 0,0008 % | 0,0008 % |
| gesättigt | 0,0003 % | 0,0011 % | 0,0005 % | 0,0006 % | 0,0011 % | 0,0013 % |
| Stop&Go | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0001 % |
| Stop&Go II | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % |

| k, stgk, v | Pkw | LNF | SNF | Rbus | Lbus | KR |
|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Ag/FSstr/30 | 0,1289 % | 0,3071 % | 0,0869 % | 0,2119 % | 0,1541 % | 0,1865 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0603 % | 0,1349 % | 0,0397 % | 0,0935 % | 0,0718 % | 0,0867 % |
| dicht | 0,0104 % | 0,0260 % | 0,0059 % | 0,0174 % | 0,0143 % | 0,0167 % |
| gesättigt | 0,0058 % | 0,0135 % | 0,0031 % | 0,0089 % | 0,0075 % | 0,0088 % |
| Stop&Go | 0,0035 % | 0,0070 % | 0,0019 % | 0,0047 % | 0,0039 % | 0,0046 % |
| Stop&Go II | 0,0029 % | 0,0073 % | 0,0014 % | 0,0046 % | 0,0046 % | 0,0054 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0244 % | 0,0600 % | 0,0184 % | 0,0424 % | 0,0261 % | 0,0324 % |
| dicht | 0,0041 % | 0,0114 % | 0,0028 % | 0,0079 % | 0,0049 % | 0,0058 % |
| gesättigt | 0,0020 % | 0,0051 % | 0,0013 % | 0,0035 % | 0,0022 % | 0,0026 % |
| Stop&Go | 0,0010 % | 0,0023 % | 0,0007 % | 0,0016 % | 0,0010 % | 0,0012 % |
| Stop&Go II | 0,0007 % | 0,0021 % | 0,0004 % | 0,0014 % | 0,0010 % | 0,0011 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0072 % | 0,0189 % | 0,0057 % | 0,0134 % | 0,0081 % | 0,0101 % |
| dicht | 0,0011 % | 0,0033 % | 0,0008 % | 0,0023 % | 0,0014 % | 0,0016 % |
| gesättigt | 0,0004 % | 0,0013 % | 0,0003 % | 0,0009 % | 0,0005 % | 0,0006 % |
| Stop&Go | 0,0002 % | 0,0006 % | 0,0002 % | 0,0004 % | 0,0002 % | 0,0003 % |
| Stop&Go II | 0,0002 % | 0,0005 % | 0,0001 % | 0,0004 % | 0,0002 % | 0,0003 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0038 % | 0,0102 % | 0,0033 % | 0,0070 % | 0,0053 % | 0,0067 % |
| dicht | 0,0006 % | 0,0015 % | 0,0005 % | 0,0011 % | 0,0007 % | 0,0008 % |
| gesättigt | 0,0002 % | 0,0006 % | 0,0002 % | 0,0004 % | 0,0003 % | 0,0003 % |
| Stop&Go | 0,0001 % | 0,0003 % | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0001 % | 0,0001 % |
| Stop&Go II | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0001 % |
| Ag/FSstr/50 | 3,5397 % | 6,9852 % | 2,8223 % | 4,8493 % | 3,3741 % | 4,0761 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 1,2893 % | 2,2300 % | 1,1260 % | 1,5827 % | 1,0473 % | 1,2863 % |
| dicht | 0,5274 % | 1,1134 % | 0,3802 % | 0,7619 % | 0,5431 % | 0,6488 % |
| gesättigt | 0,2132 % | 0,5163 % | 0,1423 % | 0,3450 % | 0,2684 % | 0,3157 % |
| Stop&Go | 0,1039 % | 0,2069 % | 0,0682 % | 0,1372 % | 0,1096 % | 0,1280 % |
| Stop&Go II | 0,0629 % | 0,1446 % | 0,0409 % | 0,0943 % | 0,0808 % | 0,0943 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,5521 % | 1,0048 % | 0,4814 % | 0,7144 % | 0,4651 % | 0,5709 % |
| dicht | 0,2331 % | 0,5321 % | 0,1728 % | 0,3659 % | 0,2538 % | 0,3048 % |
| gesättigt | 0,0900 % | 0,2511 % | 0,0618 % | 0,1693 % | 0,1252 % | 0,1481 % |
| Stop&Go | 0,0411 % | 0,0938 % | 0,0274 % | 0,0626 % | 0,0484 % | 0,0570 % |
| Stop&Go II | 0,0263 % | 0,0659 % | 0,0172 % | 0,0428 % | 0,0373 % | 0,0440 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,1622 % | 0,2949 % | 0,1325 % | 0,2081 % | 0,1407 % | 0,1724 % |
| dicht | 0,0690 % | 0,1504 % | 0,0499 % | 0,1034 % | 0,0708 % | 0,0850 % |
| gesättigt | 0,0244 % | 0,0638 % | 0,0170 % | 0,0432 % | 0,0309 % | 0,0364 % |
| Stop&Go | 0,0109 % | 0,0228 % | 0,0075 % | 0,0152 % | 0,0115 % | 0,0134 % |
| Stop&Go II | 0,0066 % | 0,0151 % | 0,0043 % | 0,0098 % | 0,0085 % | 0,0099 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0766 % | 0,1534 % | 0,0583 % | 0,1083 % | 0,0699 % | 0,0873 % |
| dicht | 0,0334 % | 0,0789 % | 0,0233 % | 0,0542 % | 0,0377 % | 0,0448 % |
| gesättigt | 0,0105 % | 0,0305 % | 0,0072 % | 0,0204 % | 0,0159 % | 0,0183 % |
| Stop&Go | 0,0040 % | 0,0100 % | 0,0026 % | 0,0066 % | 0,0053 % | 0,0062 % |
| Stop&Go II | 0,0026 % | 0,0065 % | 0,0017 % | 0,0041 % | 0,0039 % | 0,0045 % |

| k, stgk, v | Pkw | LNF | SNF | Rbus | Lbus | KR |
|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Ag/FSstr/60 | 0,3055 % | 0,4905 % | 0,3171 % | 0,3383 % | 0,2739 % | 0,3238 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0670 % | 0,0916 % | 0,0712 % | 0,0645 % | 0,0489 % | 0,0615 % |
| dicht | 0,0740 % | 0,1113 % | 0,0733 % | 0,0780 % | 0,0543 % | 0,0657 % |
| gesättigt | 0,0397 % | 0,0782 % | 0,0415 % | 0,0530 % | 0,0418 % | 0,0483 % |
| Stop&Go | 0,0120 % | 0,0206 % | 0,0123 % | 0,0139 % | 0,0109 % | 0,0123 % |
| Stop&Go II | 0,0043 % | 0,0089 % | 0,0044 % | 0,0058 % | 0,0053 % | 0,0062 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0275 % | 0,0409 % | 0,0303 % | 0,0284 % | 0,0272 % | 0,0318 % |
| dicht | 0,0307 % | 0,0456 % | 0,0318 % | 0,0317 % | 0,0262 % | 0,0307 % |
| gesättigt | 0,0173 % | 0,0332 % | 0,0185 % | 0,0221 % | 0,0213 % | 0,0239 % |
| Stop&Go | 0,0044 % | 0,0081 % | 0,0043 % | 0,0054 % | 0,0048 % | 0,0053 % |
| Stop&Go II | 0,0017 % | 0,0035 % | 0,0016 % | 0,0023 % | 0,0022 % | 0,0024 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0069 % | 0,0105 % | 0,0085 % | 0,0073 % | 0,0074 % | 0,0085 % |
| dicht | 0,0072 % | 0,0117 % | 0,0065 % | 0,0080 % | 0,0069 % | 0,0084 % |
| gesättigt | 0,0038 % | 0,0074 % | 0,0036 % | 0,0048 % | 0,0049 % | 0,0056 % |
| Stop&Go | 0,0008 % | 0,0016 % | 0,0007 % | 0,0010 % | 0,0010 % | 0,0011 % |
| Stop&Go II | 0,0003 % | 0,0007 % | 0,0003 % | 0,0004 % | 0,0005 % | 0,0005 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0033 % | 0,0063 % | 0,0041 % | 0,0044 % | 0,0041 % | 0,0049 % |
| dicht | 0,0027 % | 0,0055 % | 0,0025 % | 0,0039 % | 0,0031 % | 0,0034 % |
| gesättigt | 0,0014 % | 0,0038 % | 0,0013 % | 0,0026 % | 0,0024 % | 0,0025 % |
| Stop&Go | 0,0003 % | 0,0008 % | 0,0003 % | 0,0005 % | 0,0005 % | 0,0005 % |
| Stop&Go II | 0,0001 % | 0,0003 % | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0002 % | 0,0002 % |
| Ag/FSstr/70 | 0,7475 % | 1,0471 % | 0,9529 % | 0,7340 % | 0,5616 % | 0,6422 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,2951 % | 0,3582 % | 0,3862 % | 0,2563 % | 0,1813 % | 0,2122 % |
| dicht | 0,1325 % | 0,1845 % | 0,1611 % | 0,1284 % | 0,0934 % | 0,1065 % |
| gesättigt | 0,0542 % | 0,0949 % | 0,0659 % | 0,0646 % | 0,0502 % | 0,0574 % |
| Stop&Go | 0,0182 % | 0,0284 % | 0,0214 % | 0,0194 % | 0,0146 % | 0,0162 % |
| Stop&Go II | 0,0059 % | 0,0120 % | 0,0072 % | 0,0082 % | 0,0064 % | 0,0071 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,1036 % | 0,1338 % | 0,1331 % | 0,0968 % | 0,0703 % | 0,0803 % |
| dicht | 0,0503 % | 0,0763 % | 0,0663 % | 0,0517 % | 0,0438 % | 0,0520 % |
| gesättigt | 0,0212 % | 0,0439 % | 0,0301 % | 0,0283 % | 0,0308 % | 0,0350 % |
| Stop&Go | 0,0065 % | 0,0124 % | 0,0083 % | 0,0083 % | 0,0081 % | 0,0087 % |
| Stop&Go II | 0,0023 % | 0,0053 % | 0,0026 % | 0,0035 % | 0,0037 % | 0,0040 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0243 % | 0,0331 % | 0,0293 % | 0,0235 % | 0,0151 % | 0,0191 % |
| dicht | 0,0112 % | 0,0184 % | 0,0129 % | 0,0124 % | 0,0101 % | 0,0121 % |
| gesättigt | 0,0046 % | 0,0101 % | 0,0059 % | 0,0063 % | 0,0077 % | 0,0088 % |
| Stop&Go | 0,0012 % | 0,0027 % | 0,0015 % | 0,0017 % | 0,0018 % | 0,0021 % |
| Stop&Go II | 0,0005 % | 0,0011 % | 0,0006 % | 0,0007 % | 0,0008 % | 0,0010 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0093 % | 0,0176 % | 0,0123 % | 0,0137 % | 0,0150 % | 0,0116 % |
| dicht | 0,0046 % | 0,0090 % | 0,0056 % | 0,0065 % | 0,0051 % | 0,0051 % |
| gesättigt | 0,0016 % | 0,0041 % | 0,0020 % | 0,0029 % | 0,0025 % | 0,0024 % |
| Stop&Go | 0,0004 % | 0,0010 % | 0,0005 % | 0,0007 % | 0,0008 % | 0,0005 % |
| Stop&Go II | 0,0001 % | 0,0003 % | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0002 % | 0,0002 % |

| k, stgk, v | Pkw | LNF | SNF | Rbus | Lbus | KR |
|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Ag/FStr/80 | 0,1167 % | 0,1389 % | 0,2158 % | 0,0976 % | 0,0892 % | 0,0972 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0499 % | 0,0516 % | 0,0923 % | 0,0368 % | 0,0293 % | 0,0348 % |
| dicht | 0,0192 % | 0,0249 % | 0,0374 % | 0,0173 % | 0,0171 % | 0,0169 % |
| gesättigt | 0,0047 % | 0,0075 % | 0,0091 % | 0,0052 % | 0,0059 % | 0,0053 % |
| Stop&Go | 0,0008 % | 0,0013 % | 0,0014 % | 0,0008 % | 0,0008 % | 0,0008 % |
| Stop&Go II | 0,0002 % | 0,0003 % | 0,0003 % | 0,0002 % | 0,0002 % | 0,0002 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0173 % | 0,0184 % | 0,0329 % | 0,0136 % | 0,0095 % | 0,0116 % |
| dicht | 0,0067 % | 0,0099 % | 0,0138 % | 0,0067 % | 0,0066 % | 0,0073 % |
| gesättigt | 0,0020 % | 0,0046 % | 0,0031 % | 0,0029 % | 0,0050 % | 0,0047 % |
| Stop&Go | 0,0004 % | 0,0010 % | 0,0005 % | 0,0007 % | 0,0012 % | 0,0009 % |
| Stop&Go II | 0,0001 % | 0,0003 % | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0004 % | 0,0004 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0069 % | 0,0061 % | 0,0111 % | 0,0044 % | 0,0032 % | 0,0038 % |
| dicht | 0,0030 % | 0,0035 % | 0,0052 % | 0,0024 % | 0,0023 % | 0,0024 % |
| gesättigt | 0,0008 % | 0,0016 % | 0,0012 % | 0,0010 % | 0,0014 % | 0,0015 % |
| Stop&Go | 0,0002 % | 0,0003 % | 0,0002 % | 0,0002 % | 0,0003 % | 0,0003 % |
| Stop&Go II | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0001 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0027 % | 0,0037 % | 0,0040 % | 0,0026 % | 0,0025 % | 0,0027 % |
| dicht | 0,0014 % | 0,0025 % | 0,0022 % | 0,0016 % | 0,0022 % | 0,0023 % |
| gesättigt | 0,0005 % | 0,0011 % | 0,0007 % | 0,0007 % | 0,0011 % | 0,0011 % |
| Stop&Go | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0001 % |
| Stop&Go II | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0000 % |
| Ag/FStr/100 | 0,4612 % | 0,5444 % | 0,8203 % | 0,3834 % | 0,2966 % | 0,3406 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0861 % | 0,0657 % | 0,1693 % | 0,0479 % | 0,0347 % | 0,0433 % |
| dicht | 0,1293 % | 0,1292 % | 0,2542 % | 0,0916 % | 0,0674 % | 0,0787 % |
| gesättigt | 0,0725 % | 0,1153 % | 0,1252 % | 0,0801 % | 0,0616 % | 0,0682 % |
| Stop&Go | 0,0065 % | 0,0177 % | 0,0094 % | 0,0119 % | 0,0103 % | 0,0115 % |
| Stop&Go II | 0,0009 % | 0,0020 % | 0,0011 % | 0,0013 % | 0,0012 % | 0,0014 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0282 % | 0,0234 % | 0,0516 % | 0,0174 % | 0,0134 % | 0,0158 % |
| dicht | 0,0491 % | 0,0501 % | 0,0824 % | 0,0358 % | 0,0265 % | 0,0303 % |
| gesättigt | 0,0373 % | 0,0598 % | 0,0525 % | 0,0410 % | 0,0341 % | 0,0389 % |
| Stop&Go | 0,0039 % | 0,0115 % | 0,0051 % | 0,0076 % | 0,0074 % | 0,0081 % |
| Stop&Go II | 0,0005 % | 0,0013 % | 0,0007 % | 0,0009 % | 0,0009 % | 0,0009 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0064 % | 0,0058 % | 0,0110 % | 0,0042 % | 0,0024 % | 0,0033 % |
| dicht | 0,0126 % | 0,0145 % | 0,0191 % | 0,0104 % | 0,0063 % | 0,0077 % |
| gesättigt | 0,0113 % | 0,0202 % | 0,0141 % | 0,0139 % | 0,0111 % | 0,0124 % |
| Stop&Go | 0,0011 % | 0,0034 % | 0,0014 % | 0,0022 % | 0,0023 % | 0,0026 % |
| Stop&Go II | 0,0001 % | 0,0004 % | 0,0002 % | 0,0002 % | 0,0003 % | 0,0003 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0024 % | 0,0032 % | 0,0040 % | 0,0023 % | 0,0019 % | 0,0023 % |
| dicht | 0,0062 % | 0,0084 % | 0,0099 % | 0,0059 % | 0,0054 % | 0,0058 % |
| gesättigt | 0,0062 % | 0,0109 % | 0,0082 % | 0,0077 % | 0,0080 % | 0,0075 % |
| Stop&Go | 0,0005 % | 0,0014 % | 0,0008 % | 0,0009 % | 0,0013 % | 0,0014 % |
| Stop&Go II | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0001 % |

| k, stgk, v | Pkw | LNF | SNF | Rbus | Lbus | KR |
|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Ag/RiStr/30 | 0,1000 % | 0,1802 % | 0,0293 % | 0,0620 % | 0,3421 % | 0,3662 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0427 % | 0,0774 % | 0,0117 % | 0,0266 % | 0,1545 % | 0,1698 % |
| dicht | 0,0071 % | 0,0142 % | 0,0017 % | 0,0047 % | 0,0290 % | 0,0300 % |
| gesättigt | 0,0040 % | 0,0079 % | 0,0010 % | 0,0025 % | 0,0163 % | 0,0168 % |
| Stop&Go | 0,0022 % | 0,0039 % | 0,0005 % | 0,0012 % | 0,0082 % | 0,0085 % |
| Stop&Go II | 0,0019 % | 0,0042 % | 0,0005 % | 0,0013 % | 0,0088 % | 0,0092 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0211 % | 0,0349 % | 0,0073 % | 0,0125 % | 0,0607 % | 0,0649 % |
| dicht | 0,0033 % | 0,0067 % | 0,0010 % | 0,0023 % | 0,0121 % | 0,0123 % |
| gesättigt | 0,0016 % | 0,0034 % | 0,0005 % | 0,0011 % | 0,0063 % | 0,0065 % |
| Stop&Go | 0,0007 % | 0,0015 % | 0,0002 % | 0,0005 % | 0,0028 % | 0,0029 % |
| Stop&Go II | 0,0007 % | 0,0018 % | 0,0003 % | 0,0006 % | 0,0034 % | 0,0034 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0075 % | 0,0120 % | 0,0023 % | 0,0043 % | 0,0204 % | 0,0216 % |
| dicht | 0,0010 % | 0,0019 % | 0,0003 % | 0,0007 % | 0,0033 % | 0,0033 % |
| gesättigt | 0,0004 % | 0,0008 % | 0,0001 % | 0,0003 % | 0,0014 % | 0,0015 % |
| Stop&Go | 0,0002 % | 0,0003 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0006 % | 0,0006 % |
| Stop&Go II | 0,0002 % | 0,0003 % | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0006 % | 0,0006 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0044 % | 0,0070 % | 0,0014 % | 0,0027 % | 0,0105 % | 0,0109 % |
| dicht | 0,0005 % | 0,0011 % | 0,0002 % | 0,0004 % | 0,0018 % | 0,0018 % |
| gesättigt | 0,0002 % | 0,0005 % | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0008 % | 0,0009 % |
| Stop&Go | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0003 % | 0,0003 % |
| Stop&Go II | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0003 % | 0,0004 % |
| Ag/RiStr/50 | 2,3444 % | 3,4138 % | 0,8417 % | 1,2015 % | 6,5511 % | 7,0363 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,8189 % | 1,0254 % | 0,3145 % | 0,3697 % | 2,0043 % | 2,1825 % |
| dicht | 0,3874 % | 0,6127 % | 0,1224 % | 0,2093 % | 1,2154 % | 1,3061 % |
| gesättigt | 0,1718 % | 0,3266 % | 0,0534 % | 0,1085 % | 0,6565 % | 0,7036 % |
| Stop&Go | 0,0850 % | 0,1374 % | 0,0265 % | 0,0448 % | 0,2791 % | 0,2999 % |
| Stop&Go II | 0,0611 % | 0,1094 % | 0,0194 % | 0,0352 % | 0,2234 % | 0,2408 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,3212 % | 0,3896 % | 0,1277 % | 0,1467 % | 0,6968 % | 0,7417 % |
| dicht | 0,1512 % | 0,2411 % | 0,0517 % | 0,0855 % | 0,4433 % | 0,4667 % |
| gesättigt | 0,0618 % | 0,1300 % | 0,0210 % | 0,0444 % | 0,2438 % | 0,2580 % |
| Stop&Go | 0,0276 % | 0,0497 % | 0,0094 % | 0,0165 % | 0,0942 % | 0,1011 % |
| Stop&Go II | 0,0196 % | 0,0393 % | 0,0067 % | 0,0128 % | 0,0756 % | 0,0822 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0898 % | 0,1074 % | 0,0342 % | 0,0403 % | 0,1842 % | 0,1966 % |
| dicht | 0,0417 % | 0,0634 % | 0,0141 % | 0,0228 % | 0,1120 % | 0,1165 % |
| gesättigt | 0,0153 % | 0,0309 % | 0,0051 % | 0,0106 % | 0,0560 % | 0,0588 % |
| Stop&Go | 0,0064 % | 0,0112 % | 0,0021 % | 0,0038 % | 0,0204 % | 0,0215 % |
| Stop&Go II | 0,0046 % | 0,0086 % | 0,0015 % | 0,0029 % | 0,0159 % | 0,0169 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0491 % | 0,0711 % | 0,0199 % | 0,0270 % | 0,1239 % | 0,1312 % |
| dicht | 0,0212 % | 0,0347 % | 0,0080 % | 0,0123 % | 0,0603 % | 0,0630 % |
| gesättigt | 0,0069 % | 0,0160 % | 0,0027 % | 0,0054 % | 0,0288 % | 0,0305 % |
| Stop&Go | 0,0023 % | 0,0055 % | 0,0009 % | 0,0018 % | 0,0101 % | 0,0108 % |
| Stop&Go II | 0,0016 % | 0,0038 % | 0,0007 % | 0,0012 % | 0,0071 % | 0,0077 % |

| k, stgk, v | Pkw | LNF | SNF | Rbus | Lbus | KR |
|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Ag/RiStr/60 | 0,1970 % | 0,2412 % | 0,1086 % | 0,0946 % | 0,5223 % | 0,5356 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0822 % | 0,0895 % | 0,0541 % | 0,0371 % | 0,1929 % | 0,2036 % |
| dicht | 0,0286 % | 0,0365 % | 0,0123 % | 0,0127 % | 0,0802 % | 0,0842 % |
| gesättigt | 0,0123 % | 0,0184 % | 0,0050 % | 0,0062 % | 0,0406 % | 0,0419 % |
| Stop&Go | 0,0055 % | 0,0071 % | 0,0021 % | 0,0025 % | 0,0156 % | 0,0159 % |
| Stop&Go II | 0,0033 % | 0,0050 % | 0,0013 % | 0,0017 % | 0,0109 % | 0,0112 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0323 % | 0,0352 % | 0,0169 % | 0,0156 % | 0,0775 % | 0,0745 % |
| dicht | 0,0105 % | 0,0143 % | 0,0051 % | 0,0052 % | 0,0310 % | 0,0318 % |
| gesättigt | 0,0040 % | 0,0071 % | 0,0017 % | 0,0024 % | 0,0155 % | 0,0158 % |
| Stop&Go | 0,0016 % | 0,0025 % | 0,0006 % | 0,0009 % | 0,0055 % | 0,0054 % |
| Stop&Go II | 0,0009 % | 0,0016 % | 0,0003 % | 0,0006 % | 0,0037 % | 0,0036 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0069 % | 0,0069 % | 0,0037 % | 0,0030 % | 0,0134 % | 0,0125 % |
| dicht | 0,0023 % | 0,0026 % | 0,0013 % | 0,0012 % | 0,0054 % | 0,0050 % |
| gesättigt | 0,0008 % | 0,0014 % | 0,0005 % | 0,0008 % | 0,0034 % | 0,0026 % |
| Stop&Go | 0,0003 % | 0,0005 % | 0,0001 % | 0,0003 % | 0,0011 % | 0,0008 % |
| Stop&Go II | 0,0002 % | 0,0003 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0007 % | 0,0005 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0036 % | 0,0080 % | 0,0025 % | 0,0028 % | 0,0158 % | 0,0169 % |
| dicht | 0,0011 % | 0,0027 % | 0,0007 % | 0,0009 % | 0,0054 % | 0,0056 % |
| gesättigt | 0,0004 % | 0,0012 % | 0,0002 % | 0,0004 % | 0,0024 % | 0,0025 % |
| Stop&Go | 0,0001 % | 0,0004 % | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0008 % | 0,0008 % |
| Stop&Go II | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0005 % | 0,0005 % |
| Ag/RiStr/70 | 0,2966 % | 0,2914 % | 0,1995 % | 0,1356 % | 0,5577 % | 0,5095 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,1066 % | 0,0920 % | 0,0726 % | 0,0435 % | 0,1786 % | 0,1637 % |
| dicht | 0,0479 % | 0,0424 % | 0,0298 % | 0,0179 % | 0,0745 % | 0,0707 % |
| gesättigt | 0,0202 % | 0,0241 % | 0,0119 % | 0,0102 % | 0,0422 % | 0,0399 % |
| Stop&Go | 0,0059 % | 0,0067 % | 0,0034 % | 0,0028 % | 0,0117 % | 0,0108 % |
| Stop&Go II | 0,0027 % | 0,0036 % | 0,0015 % | 0,0016 % | 0,0064 % | 0,0057 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0431 % | 0,0369 % | 0,0300 % | 0,0164 % | 0,0694 % | 0,0679 % |
| dicht | 0,0234 % | 0,0239 % | 0,0169 % | 0,0104 % | 0,0459 % | 0,0433 % |
| gesättigt | 0,0095 % | 0,0148 % | 0,0073 % | 0,0065 % | 0,0298 % | 0,0270 % |
| Stop&Go | 0,0024 % | 0,0038 % | 0,0018 % | 0,0018 % | 0,0079 % | 0,0067 % |
| Stop&Go II | 0,0010 % | 0,0018 % | 0,0007 % | 0,0008 % | 0,0037 % | 0,0032 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0126 % | 0,0104 % | 0,0092 % | 0,0046 % | 0,0185 % | 0,0194 % |
| dicht | 0,0070 % | 0,0067 % | 0,0044 % | 0,0030 % | 0,0127 % | 0,0124 % |
| gesättigt | 0,0029 % | 0,0044 % | 0,0020 % | 0,0021 % | 0,0090 % | 0,0081 % |
| Stop&Go | 0,0008 % | 0,0011 % | 0,0005 % | 0,0005 % | 0,0022 % | 0,0019 % |
| Stop&Go II | 0,0003 % | 0,0005 % | 0,0002 % | 0,0003 % | 0,0011 % | 0,0008 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0062 % | 0,0115 % | 0,0049 % | 0,0096 % | 0,0298 % | 0,0167 % |
| dicht | 0,0029 % | 0,0044 % | 0,0017 % | 0,0025 % | 0,0092 % | 0,0070 % |
| gesättigt | 0,0011 % | 0,0020 % | 0,0007 % | 0,0010 % | 0,0041 % | 0,0033 % |
| Stop&Go | 0,0002 % | 0,0004 % | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0008 % | 0,0006 % |
| Stop&Go II | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0004 % | 0,0003 % |

| k, stgk, v | Pkw | LNF | SNF | Rbus | Lbus | KR |
|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Ag/RiStr/80 | 0,1138 % | 0,1109 % | 0,0944 % | 0,0546 % | 0,2423 % | 0,2329 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0550 % | 0,0502 % | 0,0499 % | 0,0242 % | 0,1032 % | 0,1088 % |
| dicht | 0,0136 % | 0,0143 % | 0,0099 % | 0,0073 % | 0,0307 % | 0,0273 % |
| gesättigt | 0,0044 % | 0,0061 % | 0,0029 % | 0,0031 % | 0,0133 % | 0,0114 % |
| Stop&Go | 0,0013 % | 0,0017 % | 0,0011 % | 0,0009 % | 0,0035 % | 0,0029 % |
| Stop&Go II | 0,0003 % | 0,0004 % | 0,0002 % | 0,0002 % | 0,0010 % | 0,0008 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0188 % | 0,0148 % | 0,0152 % | 0,0072 % | 0,0333 % | 0,0307 % |
| dicht | 0,0058 % | 0,0051 % | 0,0046 % | 0,0027 % | 0,0118 % | 0,0100 % |
| gesättigt | 0,0035 % | 0,0035 % | 0,0027 % | 0,0017 % | 0,0081 % | 0,0074 % |
| Stop&Go | 0,0004 % | 0,0007 % | 0,0002 % | 0,0004 % | 0,0020 % | 0,0014 % |
| Stop&Go II | 0,0002 % | 0,0003 % | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0009 % | 0,0006 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0038 % | 0,0036 % | 0,0030 % | 0,0016 % | 0,0083 % | 0,0088 % |
| dicht | 0,0019 % | 0,0021 % | 0,0015 % | 0,0012 % | 0,0055 % | 0,0044 % |
| gesättigt | 0,0010 % | 0,0012 % | 0,0007 % | 0,0007 % | 0,0033 % | 0,0027 % |
| Stop&Go | 0,0002 % | 0,0002 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0006 % | 0,0005 % |
| Stop&Go II | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0002 % | 0,0002 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0021 % | 0,0036 % | 0,0012 % | 0,0016 % | 0,0089 % | 0,0087 % |
| dicht | 0,0009 % | 0,0016 % | 0,0005 % | 0,0009 % | 0,0044 % | 0,0034 % |
| gesättigt | 0,0006 % | 0,0010 % | 0,0003 % | 0,0005 % | 0,0028 % | 0,0022 % |
| Stop&Go | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0005 % | 0,0004 % |
| Stop&Go II | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0002 % | 0,0002 % |
| Ag/HVS/30 | 0,7082 % | 1,0424 % | 0,2667 % | 0,3576 % | 2,0157 % | 2,0150 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,2554 % | 0,3613 % | 0,0947 % | 0,1243 % | 0,7175 % | 0,7294 % |
| dicht | 0,0447 % | 0,0757 % | 0,0154 % | 0,0244 % | 0,1529 % | 0,1542 % |
| gesättigt | 0,0210 % | 0,0359 % | 0,0073 % | 0,0111 % | 0,0729 % | 0,0752 % |
| Stop&Go | 0,0104 % | 0,0160 % | 0,0037 % | 0,0048 % | 0,0327 % | 0,0342 % |
| Stop&Go II | 0,0096 % | 0,0166 % | 0,0034 % | 0,0049 % | 0,0341 % | 0,0361 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,1582 % | 0,2219 % | 0,0622 % | 0,0789 % | 0,4171 % | 0,4101 % |
| dicht | 0,0288 % | 0,0482 % | 0,0101 % | 0,0160 % | 0,0919 % | 0,0914 % |
| gesättigt | 0,0119 % | 0,0209 % | 0,0042 % | 0,0067 % | 0,0400 % | 0,0407 % |
| Stop&Go | 0,0049 % | 0,0079 % | 0,0017 % | 0,0025 % | 0,0153 % | 0,0157 % |
| Stop&Go II | 0,0044 % | 0,0078 % | 0,0016 % | 0,0024 % | 0,0151 % | 0,0157 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0654 % | 0,0908 % | 0,0260 % | 0,0326 % | 0,1678 % | 0,1625 % |
| dicht | 0,0108 % | 0,0184 % | 0,0038 % | 0,0062 % | 0,0347 % | 0,0340 % |
| gesättigt | 0,0043 % | 0,0076 % | 0,0016 % | 0,0025 % | 0,0143 % | 0,0143 % |
| Stop&Go | 0,0018 % | 0,0028 % | 0,0007 % | 0,0009 % | 0,0054 % | 0,0055 % |
| Stop&Go II | 0,0016 % | 0,0028 % | 0,0007 % | 0,0009 % | 0,0053 % | 0,0055 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0601 % | 0,0827 % | 0,0236 % | 0,0299 % | 0,1514 % | 0,1437 % |
| dicht | 0,0092 % | 0,0155 % | 0,0037 % | 0,0052 % | 0,0288 % | 0,0282 % |
| gesättigt | 0,0034 % | 0,0060 % | 0,0014 % | 0,0020 % | 0,0112 % | 0,0113 % |
| Stop&Go | 0,0013 % | 0,0021 % | 0,0005 % | 0,0007 % | 0,0039 % | 0,0039 % |
| Stop&Go II | 0,0011 % | 0,0018 % | 0,0004 % | 0,0006 % | 0,0034 % | 0,0034 % |

| k, stgk, v | Pkw | LNF | SNF | Rbus | Lbus | KR |
|------------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|
| Ag/HVS/40 | 0,0649 % | 0,0983 % | 0,0261 % | 0,0358 % | 0,2115 % | 0,2138 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0169 % | 0,0237 % | 0,0093 % | 0,0097 % | 0,0523 % | 0,0509 % |
| dicht | 0,0050 % | 0,0084 % | 0,0013 % | 0,0029 % | 0,0174 % | 0,0175 % |
| gesättigt | 0,0020 % | 0,0038 % | 0,0005 % | 0,0012 % | 0,0078 % | 0,0079 % |
| Stop&Go | 0,0008 % | 0,0014 % | 0,0002 % | 0,0004 % | 0,0028 % | 0,0029 % |
| Stop&Go II | 0,0006 % | 0,0010 % | 0,0001 % | 0,0003 % | 0,0021 % | 0,0021 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0142 % | 0,0181 % | 0,0056 % | 0,0078 % | 0,0383 % | 0,0350 % |
| dicht | 0,0039 % | 0,0062 % | 0,0012 % | 0,0022 % | 0,0122 % | 0,0123 % |
| gesättigt | 0,0015 % | 0,0028 % | 0,0005 % | 0,0009 % | 0,0057 % | 0,0058 % |
| Stop&Go | 0,0007 % | 0,0011 % | 0,0003 % | 0,0004 % | 0,0023 % | 0,0024 % |
| Stop&Go II | 0,0006 % | 0,0010 % | 0,0002 % | 0,0003 % | 0,0021 % | 0,0023 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0052 % | 0,0075 % | 0,0026 % | 0,0025 % | 0,0156 % | 0,0169 % |
| dicht | 0,0018 % | 0,0031 % | 0,0008 % | 0,0010 % | 0,0067 % | 0,0070 % |
| gesättigt | 0,0007 % | 0,0015 % | 0,0003 % | 0,0004 % | 0,0031 % | 0,0033 % |
| Stop&Go | 0,0003 % | 0,0006 % | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0013 % | 0,0014 % |
| Stop&Go II | 0,0003 % | 0,0006 % | 0,0002 % | 0,0002 % | 0,0014 % | 0,0015 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0066 % | 0,0105 % | 0,0019 % | 0,0033 % | 0,0237 % | 0,0267 % |
| dicht | 0,0023 % | 0,0040 % | 0,0007 % | 0,0012 % | 0,0092 % | 0,0100 % |
| gesättigt | 0,0008 % | 0,0016 % | 0,0002 % | 0,0005 % | 0,0038 % | 0,0042 % |
| Stop&Go | 0,0004 % | 0,0007 % | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0017 % | 0,0018 % |
| Stop&Go II | 0,0004 % | 0,0008 % | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0019 % | 0,0020 % |
| Ag/HVS/50 | 8,0271 % | 10,4199 % | 3,0591 % | 3,7175 % | 19,0839 % | 18,7726 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 2,9068 % | 3,3579 % | 1,1139 % | 1,2306 % | 6,3067 % | 6,2597 % |
| dicht | 0,7847 % | 1,1457 % | 0,2680 % | 0,3877 % | 2,1798 % | 2,1742 % |
| gesättigt | 0,4231 % | 0,7070 % | 0,1449 % | 0,2323 % | 1,3559 % | 1,3632 % |
| Stop&Go | 0,1886 % | 0,2727 % | 0,0638 % | 0,0867 % | 0,5282 % | 0,5403 % |
| Stop&Go II | 0,1273 % | 0,2119 % | 0,0446 % | 0,0663 % | 0,4126 % | 0,4267 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 1,4691 % | 1,7044 % | 0,5997 % | 0,6342 % | 3,0049 % | 2,9137 % |
| dicht | 0,4193 % | 0,6349 % | 0,1522 % | 0,2229 % | 1,1364 % | 1,1069 % |
| gesättigt | 0,2156 % | 0,3957 % | 0,0777 % | 0,1345 % | 0,7139 % | 0,7026 % |
| Stop&Go | 0,0870 % | 0,1391 % | 0,0316 % | 0,0456 % | 0,2536 % | 0,2548 % |
| Stop&Go II | 0,0608 % | 0,1064 % | 0,0231 % | 0,0342 % | 0,1950 % | 0,2001 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,5253 % | 0,6018 % | 0,2120 % | 0,2280 % | 1,0280 % | 0,9725 % |
| dicht | 0,1525 % | 0,2185 % | 0,0575 % | 0,0781 % | 0,3784 % | 0,3628 % |
| gesättigt | 0,0711 % | 0,1236 % | 0,0271 % | 0,0429 % | 0,2157 % | 0,2085 % |
| Stop&Go | 0,0257 % | 0,0403 % | 0,0099 % | 0,0136 % | 0,0711 % | 0,0696 % |
| Stop&Go II | 0,0181 % | 0,0297 % | 0,0072 % | 0,0098 % | 0,0529 % | 0,0527 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,3823 % | 0,4547 % | 0,1576 % | 0,1725 % | 0,7736 % | 0,7163 % |
| dicht | 0,1042 % | 0,1547 % | 0,0418 % | 0,0560 % | 0,2663 % | 0,2459 % |
| gesättigt | 0,0434 % | 0,0806 % | 0,0177 % | 0,0281 % | 0,1401 % | 0,1323 % |
| Stop&Go | 0,0130 % | 0,0235 % | 0,0052 % | 0,0079 % | 0,0413 % | 0,0402 % |
| Stop&Go II | 0,0092 % | 0,0167 % | 0,0037 % | 0,0055 % | 0,0296 % | 0,0296 % |

| k, stgk, v | Pkw | LNF | SNF | Rbus | Lbus | KR |
|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Ag/HVS/60 | 0,2623 % | 0,3188 % | 0,1285 % | 0,1155 % | 0,6640 % | 0,6826 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,1194 % | 0,1344 % | 0,0620 % | 0,0494 % | 0,2844 % | 0,3007 % |
| dicht | 0,0240 % | 0,0315 % | 0,0092 % | 0,0106 % | 0,0672 % | 0,0672 % |
| gesättigt | 0,0118 % | 0,0177 % | 0,0042 % | 0,0057 % | 0,0379 % | 0,0381 % |
| Stop&Go | 0,0058 % | 0,0070 % | 0,0021 % | 0,0022 % | 0,0150 % | 0,0150 % |
| Stop&Go II | 0,0031 % | 0,0048 % | 0,0013 % | 0,0015 % | 0,0103 % | 0,0105 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0483 % | 0,0511 % | 0,0262 % | 0,0190 % | 0,1035 % | 0,1077 % |
| dicht | 0,0106 % | 0,0144 % | 0,0048 % | 0,0054 % | 0,0299 % | 0,0285 % |
| gesättigt | 0,0053 % | 0,0093 % | 0,0021 % | 0,0032 % | 0,0192 % | 0,0188 % |
| Stop&Go | 0,0026 % | 0,0037 % | 0,0010 % | 0,0012 % | 0,0075 % | 0,0075 % |
| Stop&Go II | 0,0016 % | 0,0027 % | 0,0006 % | 0,0009 % | 0,0056 % | 0,0057 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0130 % | 0,0147 % | 0,0067 % | 0,0057 % | 0,0277 % | 0,0286 % |
| dicht | 0,0029 % | 0,0044 % | 0,0017 % | 0,0018 % | 0,0088 % | 0,0083 % |
| gesättigt | 0,0013 % | 0,0028 % | 0,0008 % | 0,0011 % | 0,0055 % | 0,0052 % |
| Stop&Go | 0,0006 % | 0,0010 % | 0,0004 % | 0,0004 % | 0,0018 % | 0,0017 % |
| Stop&Go II | 0,0004 % | 0,0007 % | 0,0002 % | 0,0002 % | 0,0013 % | 0,0012 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0086 % | 0,0136 % | 0,0039 % | 0,0054 % | 0,0283 % | 0,0279 % |
| dicht | 0,0019 % | 0,0029 % | 0,0008 % | 0,0010 % | 0,0057 % | 0,0056 % |
| gesättigt | 0,0008 % | 0,0015 % | 0,0004 % | 0,0005 % | 0,0029 % | 0,0028 % |
| Stop&Go | 0,0003 % | 0,0005 % | 0,0002 % | 0,0002 % | 0,0010 % | 0,0009 % |
| Stop&Go II | 0,0002 % | 0,0003 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0006 % | 0,0005 % |
| Ag/HVS/70 | 0,5406 % | 0,5373 % | 0,2941 % | 0,2088 % | 0,8971 % | 0,8363 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,1995 % | 0,1704 % | 0,1150 % | 0,0693 % | 0,2828 % | 0,2609 % |
| dicht | 0,0906 % | 0,0908 % | 0,0479 % | 0,0341 % | 0,1503 % | 0,1391 % |
| gesättigt | 0,0300 % | 0,0414 % | 0,0168 % | 0,0152 % | 0,0695 % | 0,0649 % |
| Stop&Go | 0,0095 % | 0,0118 % | 0,0055 % | 0,0043 % | 0,0197 % | 0,0180 % |
| Stop&Go II | 0,0039 % | 0,0059 % | 0,0023 % | 0,0021 % | 0,0098 % | 0,0094 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0793 % | 0,0680 % | 0,0431 % | 0,0274 % | 0,1130 % | 0,1047 % |
| dicht | 0,0418 % | 0,0433 % | 0,0221 % | 0,0163 % | 0,0731 % | 0,0696 % |
| gesättigt | 0,0141 % | 0,0223 % | 0,0078 % | 0,0082 % | 0,0386 % | 0,0374 % |
| Stop&Go | 0,0041 % | 0,0061 % | 0,0024 % | 0,0022 % | 0,0105 % | 0,0100 % |
| Stop&Go II | 0,0018 % | 0,0031 % | 0,0011 % | 0,0011 % | 0,0053 % | 0,0053 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0230 % | 0,0210 % | 0,0097 % | 0,0082 % | 0,0344 % | 0,0323 % |
| dicht | 0,0131 % | 0,0144 % | 0,0057 % | 0,0053 % | 0,0240 % | 0,0231 % |
| gesättigt | 0,0042 % | 0,0067 % | 0,0021 % | 0,0023 % | 0,0114 % | 0,0115 % |
| Stop&Go | 0,0011 % | 0,0016 % | 0,0005 % | 0,0006 % | 0,0028 % | 0,0027 % |
| Stop&Go II | 0,0005 % | 0,0008 % | 0,0002 % | 0,0003 % | 0,0013 % | 0,0013 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0143 % | 0,0157 % | 0,0077 % | 0,0065 % | 0,0272 % | 0,0253 % |
| dicht | 0,0070 % | 0,0092 % | 0,0029 % | 0,0037 % | 0,0157 % | 0,0137 % |
| gesättigt | 0,0021 % | 0,0035 % | 0,0010 % | 0,0013 % | 0,0061 % | 0,0055 % |
| Stop&Go | 0,0004 % | 0,0007 % | 0,0002 % | 0,0003 % | 0,0012 % | 0,0011 % |
| Stop&Go II | 0,0002 % | 0,0003 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0005 % | 0,0004 % |

| k, stgk, v | Pkw | LNF | SNF | Rbus | Lbus | KR |
|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Ag/HVS/80 | 0,1092 % | 0,1212 % | 0,0893 % | 0,0634 % | 0,2845 % | 0,2505 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0499 % | 0,0538 % | 0,0405 % | 0,0323 % | 0,1297 % | 0,1067 % |
| dicht | 0,0124 % | 0,0147 % | 0,0095 % | 0,0066 % | 0,0334 % | 0,0297 % |
| gesättigt | 0,0033 % | 0,0046 % | 0,0024 % | 0,0018 % | 0,0103 % | 0,0092 % |
| Stop&Go | 0,0009 % | 0,0013 % | 0,0006 % | 0,0005 % | 0,0030 % | 0,0025 % |
| Stop&Go II | 0,0004 % | 0,0006 % | 0,0003 % | 0,0003 % | 0,0014 % | 0,0011 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0202 % | 0,0192 % | 0,0171 % | 0,0104 % | 0,0459 % | 0,0415 % |
| dicht | 0,0069 % | 0,0069 % | 0,0056 % | 0,0033 % | 0,0162 % | 0,0145 % |
| gesättigt | 0,0026 % | 0,0031 % | 0,0020 % | 0,0013 % | 0,0069 % | 0,0066 % |
| Stop&Go | 0,0007 % | 0,0010 % | 0,0006 % | 0,0005 % | 0,0024 % | 0,0021 % |
| Stop&Go II | 0,0003 % | 0,0005 % | 0,0003 % | 0,0002 % | 0,0013 % | 0,0012 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0041 % | 0,0041 % | 0,0037 % | 0,0016 % | 0,0087 % | 0,0094 % |
| dicht | 0,0018 % | 0,0021 % | 0,0017 % | 0,0007 % | 0,0043 % | 0,0046 % |
| gesättigt | 0,0007 % | 0,0012 % | 0,0007 % | 0,0005 % | 0,0026 % | 0,0025 % |
| Stop&Go | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0005 % | 0,0005 % |
| Stop&Go II | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0003 % | 0,0003 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0032 % | 0,0052 % | 0,0029 % | 0,0021 % | 0,0114 % | 0,0127 % |
| dicht | 0,0010 % | 0,0017 % | 0,0011 % | 0,0008 % | 0,0042 % | 0,0038 % |
| gesättigt | 0,0003 % | 0,0006 % | 0,0002 % | 0,0003 % | 0,0014 % | 0,0012 % |
| Stop&Go | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0004 % | 0,0004 % |
| Stop&Go II | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0001 % |
| Ag/SaS/30 | 0,8565 % | 1,1851 % | 0,4418 % | 0,2575 % | 0,3878 % | 1,5553 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,2940 % | 0,3931 % | 0,1605 % | 0,0872 % | 0,1272 % | 0,5183 % |
| dicht | 0,0997 % | 0,1417 % | 0,0458 % | 0,0298 % | 0,0469 % | 0,1868 % |
| gesättigt | 0,0460 % | 0,0692 % | 0,0218 % | 0,0145 % | 0,0229 % | 0,0897 % |
| Stop&Go | 0,0180 % | 0,0272 % | 0,0091 % | 0,0057 % | 0,0090 % | 0,0347 % |
| Stop&Go II | 0,0145 % | 0,0243 % | 0,0075 % | 0,0052 % | 0,0079 % | 0,0307 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,1256 % | 0,1698 % | 0,0690 % | 0,0373 % | 0,0560 % | 0,2255 % |
| dicht | 0,0502 % | 0,0733 % | 0,0247 % | 0,0157 % | 0,0245 % | 0,0967 % |
| gesättigt | 0,0221 % | 0,0360 % | 0,0116 % | 0,0077 % | 0,0120 % | 0,0464 % |
| Stop&Go | 0,0081 % | 0,0133 % | 0,0043 % | 0,0028 % | 0,0044 % | 0,0168 % |
| Stop&Go II | 0,0071 % | 0,0128 % | 0,0036 % | 0,0028 % | 0,0043 % | 0,0159 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0493 % | 0,0628 % | 0,0272 % | 0,0143 % | 0,0208 % | 0,0822 % |
| dicht | 0,0174 % | 0,0239 % | 0,0068 % | 0,0049 % | 0,0078 % | 0,0315 % |
| gesättigt | 0,0068 % | 0,0098 % | 0,0028 % | 0,0020 % | 0,0032 % | 0,0128 % |
| Stop&Go | 0,0025 % | 0,0035 % | 0,0011 % | 0,0007 % | 0,0011 % | 0,0045 % |
| Stop&Go II | 0,0022 % | 0,0033 % | 0,0011 % | 0,0007 % | 0,0011 % | 0,0043 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0627 % | 0,0767 % | 0,0309 % | 0,0167 % | 0,0245 % | 0,1009 % |
| dicht | 0,0193 % | 0,0268 % | 0,0089 % | 0,0057 % | 0,0086 % | 0,0352 % |
| gesättigt | 0,0072 % | 0,0112 % | 0,0034 % | 0,0024 % | 0,0036 % | 0,0144 % |
| Stop&Go | 0,0021 % | 0,0036 % | 0,0011 % | 0,0007 % | 0,0011 % | 0,0045 % |
| Stop&Go II | 0,0016 % | 0,0028 % | 0,0008 % | 0,0006 % | 0,0009 % | 0,0036 % |

| k, stgk, v | Pkw | LNF | SNF | Rbus | Lbus | KR |
|----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Ag/SaS/50 | 1,1347 % | 1,6173 % | 0,6191 % | 0,3542 % | 0,5473 % | 2,1153 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,3126 % | 0,3917 % | 0,2142 % | 0,0933 % | 0,1321 % | 0,5135 % |
| dicht | 0,1496 % | 0,2475 % | 0,0716 % | 0,0516 % | 0,0833 % | 0,3257 % |
| gesättigt | 0,1088 % | 0,2027 % | 0,0530 % | 0,0411 % | 0,0688 % | 0,2641 % |
| Stop&Go | 0,0388 % | 0,0736 % | 0,0189 % | 0,0149 % | 0,0250 % | 0,0949 % |
| Stop&Go II | 0,0254 % | 0,0515 % | 0,0127 % | 0,0105 % | 0,0174 % | 0,0660 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,1294 % | 0,1414 % | 0,0758 % | 0,0341 % | 0,0479 % | 0,1841 % |
| dicht | 0,0693 % | 0,1020 % | 0,0329 % | 0,0216 % | 0,0353 % | 0,1346 % |
| gesättigt | 0,0485 % | 0,0835 % | 0,0233 % | 0,0171 % | 0,0291 % | 0,1094 % |
| Stop&Go | 0,0168 % | 0,0297 % | 0,0086 % | 0,0061 % | 0,0103 % | 0,0385 % |
| Stop&Go II | 0,0124 % | 0,0232 % | 0,0064 % | 0,0048 % | 0,0080 % | 0,0301 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0471 % | 0,0485 % | 0,0174 % | 0,0113 % | 0,0168 % | 0,0643 % |
| dicht | 0,0329 % | 0,0367 % | 0,0148 % | 0,0079 % | 0,0128 % | 0,0487 % |
| gesättigt | 0,0224 % | 0,0284 % | 0,0113 % | 0,0059 % | 0,0099 % | 0,0372 % |
| Stop&Go | 0,0077 % | 0,0098 % | 0,0035 % | 0,0020 % | 0,0034 % | 0,0126 % |
| Stop&Go II | 0,0053 % | 0,0073 % | 0,0023 % | 0,0015 % | 0,0025 % | 0,0095 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0462 % | 0,0481 % | 0,0169 % | 0,0108 % | 0,0151 % | 0,0635 % |
| dicht | 0,0298 % | 0,0399 % | 0,0142 % | 0,0087 % | 0,0128 % | 0,0523 % |
| gesättigt | 0,0217 % | 0,0347 % | 0,0135 % | 0,0073 % | 0,0113 % | 0,0448 % |
| Stop&Go | 0,0064 % | 0,0106 % | 0,0055 % | 0,0022 % | 0,0034 % | 0,0133 % |
| Stop&Go II | 0,0036 % | 0,0065 % | 0,0024 % | 0,0014 % | 0,0021 % | 0,0082 % |
| Ag/ErS/<30 | 0,0555 % | 0,0291 % | 0,0108 % | 0,0063 % | 0,0091 % | 0,0380 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0144 % | 0,0073 % | 0,0030 % | 0,0016 % | 0,0023 % | 0,0096 % |
| dicht | 0,0049 % | 0,0026 % | 0,0008 % | 0,0005 % | 0,0008 % | 0,0034 % |
| gesättigt | 0,0023 % | 0,0013 % | 0,0004 % | 0,0003 % | 0,0004 % | 0,0017 % |
| Stop&Go | 0,0009 % | 0,0005 % | 0,0002 % | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0006 % |
| Stop&Go II | 0,0007 % | 0,0005 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0006 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0126 % | 0,0063 % | 0,0025 % | 0,0014 % | 0,0019 % | 0,0082 % |
| dicht | 0,0051 % | 0,0027 % | 0,0009 % | 0,0006 % | 0,0009 % | 0,0035 % |
| gesättigt | 0,0022 % | 0,0013 % | 0,0004 % | 0,0003 % | 0,0004 % | 0,0017 % |
| Stop&Go | 0,0008 % | 0,0005 % | 0,0002 % | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0006 % |
| Stop&Go II | 0,0007 % | 0,0005 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0006 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0040 % | 0,0020 % | 0,0009 % | 0,0004 % | 0,0006 % | 0,0026 % |
| dicht | 0,0014 % | 0,0008 % | 0,0002 % | 0,0002 % | 0,0002 % | 0,0010 % |
| gesättigt | 0,0005 % | 0,0003 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0004 % |
| Stop&Go | 0,0002 % | 0,0001 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0001 % |
| Stop&Go II | 0,0002 % | 0,0001 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0001 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0031 % | 0,0015 % | 0,0006 % | 0,0003 % | 0,0005 % | 0,0020 % |
| dicht | 0,0010 % | 0,0005 % | 0,0002 % | 0,0001 % | 0,0002 % | 0,0007 % |
| gesättigt | 0,0004 % | 0,0002 % | 0,0001 % | 0,0000 % | 0,0001 % | 0,0003 % |
| Stop&Go | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0001 % |
| Stop&Go II | 0,0001 % | 0,0001 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0000 % | 0,0001 % |

| k, stgk, v | Pkw | LNF | SNF | Rbus | Lbus | KR |
|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Ag/ErS/30 | 1,8269 % | 0,9572 % | 0,3557 % | 0,2066 % | 0,2991 % | 1,2496 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,5982 % | 0,3018 % | 0,1226 % | 0,0666 % | 0,0936 % | 0,3960 % |
| dicht | 0,2027 % | 0,1088 % | 0,0350 % | 0,0227 % | 0,0345 % | 0,1427 % |
| gesättigt | 0,0936 % | 0,0532 % | 0,0167 % | 0,0110 % | 0,0168 % | 0,0686 % |
| Stop&Go | 0,0366 % | 0,0209 % | 0,0069 % | 0,0044 % | 0,0066 % | 0,0265 % |
| Stop&Go II | 0,0295 % | 0,0187 % | 0,0057 % | 0,0040 % | 0,0058 % | 0,0234 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,2795 % | 0,1382 % | 0,0563 % | 0,0301 % | 0,0430 % | 0,1823 % |
| dicht | 0,1117 % | 0,0597 % | 0,0202 % | 0,0127 % | 0,0188 % | 0,0781 % |
| gesättigt | 0,0492 % | 0,0293 % | 0,0095 % | 0,0062 % | 0,0092 % | 0,0375 % |
| Stop&Go | 0,0181 % | 0,0108 % | 0,0035 % | 0,0023 % | 0,0034 % | 0,0136 % |
| Stop&Go II | 0,0157 % | 0,0104 % | 0,0029 % | 0,0023 % | 0,0033 % | 0,0129 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,1125 % | 0,0568 % | 0,0243 % | 0,0127 % | 0,0179 % | 0,0741 % |
| dicht | 0,0396 % | 0,0216 % | 0,0061 % | 0,0044 % | 0,0067 % | 0,0284 % |
| gesättigt | 0,0155 % | 0,0089 % | 0,0025 % | 0,0018 % | 0,0027 % | 0,0115 % |
| Stop&Go | 0,0057 % | 0,0031 % | 0,0010 % | 0,0006 % | 0,0010 % | 0,0041 % |
| Stop&Go II | 0,0050 % | 0,0030 % | 0,0009 % | 0,0006 % | 0,0009 % | 0,0039 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,1440 % | 0,0709 % | 0,0285 % | 0,0154 % | 0,0222 % | 0,0930 % |
| dicht | 0,0444 % | 0,0248 % | 0,0082 % | 0,0053 % | 0,0078 % | 0,0324 % |
| gesättigt | 0,0166 % | 0,0103 % | 0,0032 % | 0,0022 % | 0,0032 % | 0,0133 % |
| Stop&Go | 0,0049 % | 0,0033 % | 0,0010 % | 0,0007 % | 0,0010 % | 0,0042 % |
| Stop&Go II | 0,0038 % | 0,0026 % | 0,0007 % | 0,0006 % | 0,0008 % | 0,0033 % |
| Ag/ErS/50 | 1,4977 % | 0,7847 % | 0,2919 % | 0,1694 % | 0,2451 % | 1,0240 % |
| 0 % | | | | | | |
| flüssig | 0,3343 % | 0,1442 % | 0,0766 % | 0,0339 % | 0,0449 % | 0,1886 % |
| dicht | 0,1600 % | 0,0911 % | 0,0256 % | 0,0187 % | 0,0283 % | 0,1196 % |
| gesättigt | 0,1164 % | 0,0746 % | 0,0190 % | 0,0149 % | 0,0234 % | 0,0970 % |
| Stop&Go | 0,0415 % | 0,0271 % | 0,0068 % | 0,0054 % | 0,0085 % | 0,0349 % |
| Stop&Go II | 0,0272 % | 0,0190 % | 0,0045 % | 0,0038 % | 0,0059 % | 0,0242 % |
| +/-2 % | | | | | | |
| flüssig | 0,1870 % | 0,0780 % | 0,0401 % | 0,0184 % | 0,0240 % | 0,1013 % |
| dicht | 0,1001 % | 0,0562 % | 0,0174 % | 0,0117 % | 0,0177 % | 0,0740 % |
| gesättigt | 0,0702 % | 0,0460 % | 0,0123 % | 0,0092 % | 0,0146 % | 0,0602 % |
| Stop&Go | 0,0243 % | 0,0164 % | 0,0046 % | 0,0033 % | 0,0052 % | 0,0212 % |
| Stop&Go II | 0,0180 % | 0,0128 % | 0,0034 % | 0,0026 % | 0,0040 % | 0,0165 % |
| +/-4 % | | | | | | |
| flüssig | 0,0711 % | 0,0339 % | 0,0120 % | 0,0078 % | 0,0106 % | 0,0444 % |
| dicht | 0,0497 % | 0,0257 % | 0,0102 % | 0,0054 % | 0,0080 % | 0,0337 % |
| gesättigt | 0,0338 % | 0,0198 % | 0,0078 % | 0,0041 % | 0,0062 % | 0,0257 % |
| Stop&Go | 0,0116 % | 0,0068 % | 0,0024 % | 0,0014 % | 0,0021 % | 0,0087 % |
| Stop&Go II | 0,0080 % | 0,0051 % | 0,0016 % | 0,0010 % | 0,0016 % | 0,0066 % |
| +/-6 % | | | | | | |
| flüssig | 0,1049 % | 0,0441 % | 0,0153 % | 0,0098 % | 0,0135 % | 0,0583 % |
| dicht | 0,0676 % | 0,0366 % | 0,0128 % | 0,0079 % | 0,0115 % | 0,0481 % |
| gesättigt | 0,0493 % | 0,0318 % | 0,0123 % | 0,0067 % | 0,0101 % | 0,0412 % |
| Stop&Go | 0,0146 % | 0,0097 % | 0,0050 % | 0,0020 % | 0,0031 % | 0,0122 % |
| Stop&Go II | 0,0082 % | 0,0059 % | 0,0022 % | 0,0013 % | 0,0019 % | 0,0076 % |

A.4 Emissionsergebnisse der Validierung des fiktiven signalisierten Straßenzugs

Tabelle 91: Emissionen für 5 % Schwerverkehr und -6 % Steigung für Hauptverkehrsstraßen

| | | Flüssig | Dicht | Gesättigt | Stop&Go | Stop&Go II |
|----------------------------|---------|---------|--------|-----------|---------|------------|
| CO ₂ Pkw [g/km] | PHEM | 55,06 | 64,19 | 117,14 | 189,28 | 384,55 |
| | HBEFA | 37,62 | 64,46 | 101,01 | 152,54 | 303,95 |
| | Abw [%] | -31,67 | 0,42 | -13,77 | -19,41 | -20,96 |
| NO _x Pkw [g/km] | PHEM | 0,20 | 0,21 | 0,40 | 0,40 | 0,93 |
| | HBEFA | 0,02 | 0,21 | 0,27 | 0,37 | 0,62 |
| | Abw [%] | -26,57 | -0,39 | -31,73 | -6,02 | -32,99 |
| PM Pkw [g/km] | PHEM | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 |
| | HBEFA | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 |
| | Abw [%] | -16,88 | 17,10 | -21,84 | 3,93 | -23,13 |
| CO ₂ SNF [g/km] | PHEM | 201,33 | 354,20 | 615,93 | 917,66 | 1656,69 |
| | HBEFA | 38,26 | 71,29 | 416,32 | 602,10 | 874,78 |
| | Abw [%] | -80,99 | -79,87 | -32,41 | -34,39 | -47,20 |
| NO _x SNF [g/km] | PHEM | 0,69 | 3,36 | 3,76 | 5,52 | 12,20 |
| | HBEFA | 0,75 | 0,90 | 3,21 | 5,17 | 8,30 |
| | Abw [%] | 8,42 | -73,25 | -14,45 | -6,29 | -32,00 |
| PM SNF [g/km] | PHEM | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,05 | 0,11 |
| | HBEFA | 0,01 | 0,01 | 0,03 | 0,04 | 0,07 |
| | Abw [%] | -32,01 | -43,21 | -13,44 | -11,78 | -30,01 |
| CO ₂ [g/km] | PHEM | 62,24 | 79,28 | 141,78 | 225,93 | 451,78 |
| | HBEFA | 37,65 | 64,80 | 116,78 | 175,02 | 332,49 |
| | Abw [%] | -39,50 | -18,27 | -17,64 | -22,53 | -26,41 |
| NO _x [g/km] | PHEM | 0,23 | 0,38 | 0,56 | 0,66 | 1,53 |
| | HBEFA | 0,18 | 0,25 | 0,42 | 0,61 | 1,01 |
| | Abw [%] | -21,10 | -34,47 | -25,72 | -6,36 | -34,00 |
| PM [g/km] | PHEM | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 |
| | HBEFA | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 |
| | Abw [%] | -20,64 | -7,66 | -18,65 | -2,68 | -27,21 |

Tabelle 92: Emissionen für 5 % Schwerverkehr und -6 % Steigung für Sammelstraßen

| | | Flüssig | Dicht | Gesättigt | Stop&Go | Stop&Go II |
|----------------------------|---------|---------|--------|-----------|---------|------------|
| CO ₂ Pkw [g/km] | PHEM | 55,06 | 64,19 | 117,14 | 189,28 | 384,55 |
| | HBEFA | 33,88 | 59,60 | 113,44 | 152,47 | 304,02 |
| | Abw [%] | -38,48 | -7,15 | -3,16 | -19,45 | -20,94 |
| NO _x Pkw [g/km] | PHEM | 0,20 | 0,21 | 0,40 | 0,40 | 0,93 |
| | HBEFA | 0,15 | 0,18 | 0,30 | 0,37 | 0,63 |
| | Abw [%] | -27,48 | -14,92 | -23,34 | -5,82 | -32,93 |
| PM Pkw [g/km] | PHEM | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 |
| | HBEFA | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 |
| | Abw [%] | -12,08 | 3,78 | -14,91 | 3,95 | -23,13 |
| CO ₂ SNF [g/km] | PHEM | 201,33 | 354,20 | 615,93 | 917,66 | 1656,69 |
| | HBEFA | 33,80 | 71,45 | 467,08 | 602,10 | 874,78 |
| | Abw [%] | -83,21 | -79,83 | -24,17 | -34,39 | -47,20 |
| NO _x SNF [g/km] | PHEM | 0,69 | 3,36 | 3,76 | 5,52 | 12,20 |
| | HBEFA | 0,71 | 0,93 | 3,41 | 5,18 | 8,15 |
| | Abw [%] | 3,15 | -72,41 | -9,21 | -6,16 | -33,24 |
| PM SNF [g/km] | PHEM | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,05 | 0,11 |
| | HBEFA | 0,01 | 0,01 | 0,03 | 0,04 | 0,07 |
| | Abw [%] | -32,41 | -41,18 | -5,76 | -11,78 | -30,02 |
| CO ₂ [g/km] | PHEM | 62,24 | 79,28 | 141,78 | 225,93 | 451,78 |
| | HBEFA | 33,87 | 60,19 | 131,12 | 174,95 | 332,56 |
| | Abw [%] | -45,58 | -24,08 | -7,52 | -22,56 | -26,39 |
| NO _x [g/km] | PHEM | 0,23 | 0,38 | 0,56 | 0,66 | 1,53 |
| | HBEFA | 0,18 | 0,22 | 0,46 | 0,61 | 1,00 |
| | Abw [%] | -22,67 | -41,92 | -18,35 | -6,20 | -34,47 |
| PM [g/km] | PHEM | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 |
| | HBEFA | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 |
| | Abw [%] | -17,23 | -14,91 | -11,44 | -2,68 | -27,22 |

Tabelle 93: Emissionen für 5 % Schwerverkehr und -6 % Steigung für Fernstraße City

| | | Flüssig | Dicht | Gesättigt | Stop&Go | Stop&Go II |
|----------------------------|---------|---------|--------|-----------|---------|------------|
| CO ₂ Pkw [g/km] | PHEM | 55,06 | 64,19 | 117,14 | 189,28 | 384,55 |
| | HBEFA | 31,03 | 46,37 | 81,86 | 152,50 | 303,72 |
| | Abw [%] | -43,64 | -27,77 | -30,12 | -19,43 | -21,02 |
| NO _x Pkw [g/km] | PHEM | 0,20 | 0,21 | 0,40 | 0,40 | 0,93 |
| | HBEFA | 0,13 | 0,17 | 0,26 | 0,38 | 0,63 |
| | Abw [%] | -37,49 | -18,28 | -35,35 | -5,52 | -32,41 |
| PM Pkw [g/km] | PHEM | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 |
| | HBEFA | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 |
| | Abw [%] | -21,65 | 1,43 | -19,80 | 3,95 | -23,13 |
| CO ₂ SNF [g/km] | PHEM | 201,33 | 354,20 | 615,93 | 917,66 | 1656,69 |
| | HBEFA | 47,83 | 88,81 | 131,28 | 602,10 | 874,77 |
| | Abw [%] | -76,24 | -74,93 | -78,69 | -34,39 | -47,20 |
| NO _x SNF [g/km] | PHEM | 0,69 | 3,36 | 3,76 | 5,52 | 12,20 |
| | HBEFA | 0,73 | 1,12 | 1,63 | 5,58 | 8,93 |
| | Abw [%] | 5,92 | -66,57 | -56,59 | 1,08 | -26,78 |
| PM SNF [g/km] | PHEM | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,05 | 0,11 |
| | HBEFA | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,04 | 0,07 |
| | Abw [%] | -37,75 | -46,30 | -45,90 | -11,78 | -30,02 |
| CO ₂ [g/km] | PHEM | 62,24 | 79,28 | 141,78 | 225,93 | 451,78 |
| | HBEFA | 31,87 | 48,49 | 84,33 | 174,98 | 332,28 |
| | Abw [%] | -48,79 | -38,84 | -40,52 | -22,55 | -26,45 |
| NO _x [g/km] | PHEM | 0,23 | 0,38 | 0,56 | 0,66 | 1,53 |
| | HBEFA | 0,16 | 0,22 | 0,33 | 0,64 | 1,05 |
| | Abw [%] | -30,75 | -41,14 | -42,20 | -2,97 | -31,58 |
| PM [g/km] | PHEM | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 |
| | HBEFA | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 |
| | Abw [%] | -25,70 | -18,29 | -28,53 | -2,68 | -27,22 |

Tabelle 94: Emissionen für 5 % Schwerverkehr und -4 % Steigung für Hauptverkehrsstraßen

| | | Flüssig | Dicht | Gesättigt | Stop&Go | Stop&Go II |
|----------------------------|---------|---------|--------|-----------|---------|------------|
| CO ₂ Pkw [g/km] | PHEM | 76,18 | 83,92 | 139,79 | 213,44 | 414,06 |
| | HBEFA | 57,10 | 85,51 | 126,40 | 183,79 | 342,11 |
| | Abw [%] | -25,05 | 1,89 | -9,58 | -13,89 | -17,38 |
| NO _x Pkw [g/km] | PHEM | 0,22 | 0,27 | 0,46 | 0,44 | 1,00 |
| | HBEFA | 0,17 | 0,25 | 0,31 | 0,41 | 0,66 |
| | Abw [%] | -21,64 | -8,12 | -31,43 | -6,72 | -33,58 |
| PM Pkw [g/km] | PHEM | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 |
| | HBEFA | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 |
| | Abw [%] | -22,05 | 20,08 | -23,30 | 9,83 | -31,98 |
| CO ₂ SNF [g/km] | PHEM | 398,32 | 471,77 | 804,63 | 1147,19 | 1840,45 |
| | HBEFA | 93,40 | 158,46 | 596,27 | 810,65 | 1095,17 |
| | Abw [%] | -76,55 | -66,41 | -25,89 | -29,34 | -40,49 |
| NO _x SNF [g/km] | PHEM | 1,36 | 3,81 | 4,58 | 6,29 | 12,79 |
| | HBEFA | 1,18 | 1,38 | 3,94 | 6,14 | 8,97 |
| | Abw [%] | -12,98 | -63,75 | -13,90 | -2,27 | -29,87 |
| PM SNF [g/km] | PHEM | 0,03 | 0,02 | 0,04 | 0,05 | 0,12 |
| | HBEFA | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,05 | 0,08 |
| | Abw [%] | -55,70 | -29,52 | -17,13 | 5,54 | -32,41 |
| CO ₂ [g/km] | PHEM | 91,98 | 104,10 | 172,62 | 260,40 | 489,43 |
| | HBEFA | 58,91 | 89,15 | 149,89 | 215,13 | 379,76 |
| | Abw [%] | -35,95 | -14,36 | -13,17 | -17,38 | -22,41 |
| NO _x [g/km] | PHEM | 0,28 | 0,45 | 0,66 | 0,74 | 1,62 |
| | HBEFA | 0,22 | 0,30 | 0,49 | 0,70 | 1,08 |
| | Abw [%] | -19,22 | -33,03 | -25,09 | -5,04 | -33,49 |
| PM [g/km] | PHEM | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,02 |
| | HBEFA | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 |
| | Abw [%] | -34,44 | -0,24 | -20,78 | 7,88 | -33,45 |

Tabelle 95: Emissionen für 5 % Schwerverkehr und -4 % Steigung für Sammelstraßen

| | | Flüssig | Dicht | Gesättigt | Stop&Go | Stop&Go II |
|----------------------------|---------|---------|--------|-----------|---------|------------|
| CO ₂ Pkw [g/km] | PHEM | 76,18 | 83,92 | 139,79 | 213,44 | 414,06 |
| | HBEFA | 57,58 | 84,55 | 138,76 | 183,78 | 342,12 |
| | Abw [%] | -24,42 | 0,76 | -0,74 | -13,90 | -17,37 |
| NO _x Pkw [g/km] | PHEM | 0,22 | 0,27 | 0,46 | 0,44 | 1,00 |
| | HBEFA | 0,17 | 0,22 | 0,35 | 0,41 | 0,66 |
| | Abw [%] | -21,27 | -19,30 | -22,88 | -6,71 | -33,58 |
| PM Pkw [g/km] | PHEM | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 |
| | HBEFA | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 |
| | Abw [%] | -16,29 | 9,21 | -16,35 | -9,83 | -31,98 |
| CO ₂ SNF [g/km] | PHEM | 398,32 | 471,77 | 804,63 | 1147,19 | 1840,45 |
| | HBEFA | 86,83 | 159,21 | 666,76 | 810,65 | 1095,15 |
| | Abw [%] | -78,20 | -66,25 | -17,13 | -29,34 | -40,50 |
| NO _x SNF [g/km] | PHEM | 1,36 | 3,81 | 4,58 | 6,29 | 12,79 |
| | HBEFA | 1,12 | 1,41 | 4,19 | 6,15 | 8,85 |
| | Abw [%] | -17,43 | -62,88 | -8,48 | -2,14 | -30,77 |
| PM SNF [g/km] | PHEM | 0,03 | 0,02 | 0,04 | 0,05 | 0,12 |
| | HBEFA | 0,01 | 0,02 | 0,04 | 0,05 | 0,08 |
| | Abw [%] | -56,02 | -27,35 | -10,00 | 5,54 | -32,41 |
| CO ₂ [g/km] | PHEM | 91,98 | 104,10 | 172,62 | 260,40 | 489,43 |
| | HBEFA | 59,04 | 88,29 | 165,16 | 215,12 | 379,77 |
| | Abw [%] | -35,82 | -15,19 | -4,33 | -17,39 | -22,41 |
| NO _x [g/km] | PHEM | 0,28 | 0,45 | 0,66 | 0,74 | 1,62 |
| | HBEFA | 0,22 | 0,28 | 0,54 | 0,70 | 1,07 |
| | Abw [%] | -20,03 | -38,96 | -17,60 | -4,98 | -33,84 |
| PM [g/km] | PHEM | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,02 |
| | HBEFA | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 |
| | Abw [%] | -30,98 | -6,05 | -13,73 | 7,88 | -33,45 |

Tabelle 96: Emissionen für 5 % Schwerverkehr und -4 % Steigung für Fernstraße City

| | | Flüssig | Dicht | Gesättigt | Stop&Go | Stop&Go II |
|----------------------------|---------|---------|--------|-----------|---------|------------|
| CO ₂ Pkw [g/km] | PHEM | 76,18 | 83,92 | 139,79 | 213,44 | 414,06 |
| | HBEFA | 56,60 | 68,01 | 112,44 | 183,76 | 341,93 |
| | Abw [%] | -25,69 | -18,96 | -19,56 | -13,90 | -17,42 |
| NO _x Pkw [g/km] | PHEM | 0,22 | 0,27 | 0,46 | 0,44 | 1,00 |
| | HBEFA | 0,16 | 0,20 | 0,30 | 0,41 | 0,66 |
| | Abw [%] | -8,23 | -24,04 | -35,16 | -6,71 | -33,57 |
| PM Pkw [g/km] | PHEM | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 |
| | HBEFA | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 |
| | Abw [%] | -22,39 | 7,98 | -17,36 | 9,83 | -31,98 |
| CO ₂ SNF [g/km] | PHEM | 398,32 | 471,77 | 804,63 | 1147,19 | 1840,45 |
| | HBEFA | 105,89 | 190,93 | 252,37 | 810,68 | 1095,17 |
| | Abw [%] | -73,42 | -59,53 | -68,64 | -29,33 | -40,49 |
| NO _x SNF [g/km] | PHEM | 1,36 | 3,81 | 4,58 | 6,29 | 12,79 |
| | HBEFA | 1,15 | 1,82 | 2,35 | 6,71 | 9,91 |
| | Abw [%] | -15,35 | -52,15 | -48,66 | 6,67 | -22,54 |
| PM SNF [g/km] | PHEM | 0,03 | 0,02 | 0,04 | 0,05 | 0,12 |
| | HBEFA | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,05 | 0,08 |
| | Abw [%] | -58,88 | -31,83 | -44,10 | 5,55 | -32,41 |
| CO ₂ [g/km] | PHEM | 91,98 | 104,10 | 172,62 | 260,40 | 489,43 |
| | HBEFA | 59,07 | 74,16 | 119,44 | 215,11 | 379,59 |
| | Abw [%] | -35,78 | -28,76 | -30,81 | -17,39 | -22,44 |
| NO _x [g/km] | PHEM | 0,28 | 0,45 | 0,66 | 0,74 | 1,62 |
| | HBEFA | 0,21 | 0,28 | 0,40 | 0,73 | 1,13 |
| | Abw [%] | -24,80 | -37,10 | -39,59 | -1,22 | -30,60 |
| PM [g/km] | PHEM | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,02 |
| | HBEFA | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 |
| | Abw [%] | -35,87 | -8,49 | -26,66 | 7,88 | -33,45 |

Tabelle 97: Emissionen für 5 % Schwerverkehr und -2 % Steigung für Hauptverkehrsstraßen

| | | Flüssig | Dicht | Gesättigt | Stop&Go | Stop&Go II |
|----------------------------|---------|---------|--------|-----------|---------|------------|
| CO ₂ Pkw [g/km] | PHEM | 120,32 | 126,69 | 183,06 | 256,42 | 451,69 |
| | HBEFA | 100,86 | 122,16 | 161,93 | 221,63 | 383,42 |
| | Abw [%] | -16,18 | -3,57 | -11,55 | -13,57 | -15,12 |
| NO _x Pkw [g/km] | PHEM | 0,33 | 0,36 | 0,53 | 0,55 | 1,07 |
| | HBEFA | 0,23 | 0,31 | 0,38 | 0,47 | 0,71 |
| | Abw [%] | -30,29 | -13,90 | -28,63 | -14,08 | -33,94 |
| PM Pkw [g/km] | PHEM | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 |
| | HBEFA | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 |
| | Abw [%] | -27,59 | 11,37 | -24,06 | -1,43 | -20,32 |
| CO ₂ SNF [g/km] | PHEM | 656,91 | 687,58 | 1048,85 | 1386,78 | 2038,90 |
| | HBEFA | 251,16 | 350,86 | 848,92 | 1080,49 | 1381,72 |
| | Abw [%] | -61,77 | -48,97 | -19,06 | -22,09 | -32,23 |
| NO _x SNF [g/km] | PHEM | 2,30 | 4,31 | 4,90 | 7,17 | 12,72 |
| | HBEFA | 2,72 | 2,23 | 4,56 | 6,65 | 9,73 |
| | Abw [%] | 18,38 | -48,28 | -6,91 | -7,21 | -23,55 |
| PM SNF [g/km] | PHEM | 0,03 | 0,02 | 0,05 | 0,06 | 0,12 |
| | HBEFA | 0,02 | 0,02 | 0,04 | 0,06 | 0,10 |
| | Abw [%] | -41,75 | -0,02 | -19,59 | 2,12 | -15,66 |
| CO ₂ [g/km] | PHEM | 146,67 | 155,87 | 225,81 | 313,29 | 535,54 |
| | HBEFA | 108,37 | 133,60 | 196,28 | 264,57 | 433,33 |
| | Abw [%] | -26,11 | -14,29 | -13,08 | -15,55 | -19,08 |
| NO _x [g/km] | PHEM | 0,42 | 0,57 | 0,75 | 0,88 | 1,69 |
| | HBEFA | 0,35 | 0,41 | 0,59 | 0,78 | 1,16 |
| | Abw [%] | -16,78 | -28,18 | -21,26 | -11,50 | -31,31 |
| PM [g/km] | PHEM | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,02 |
| | HBEFA | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| | Abw [%] | -31,96 | 6,51 | -22,08 | -0,03 | -20,11 |

Tabelle 98: Emissionen für 5 % Schwerverkehr und -2 % Steigung für Sammelstraßen

| | | Flüssig | Dicht | Gesättigt | Stop&Go | Stop&Go II |
|----------------------------|---------|---------|--------|-----------|---------|------------|
| CO ₂ Pkw [g/km] | PHEM | 120,32 | 126,69 | 183,06 | 256,42 | 451,69 |
| | HBEFA | 97,90 | 123,67 | 172,17 | 221,62 | 383,25 |
| | Abw [%] | -18,64 | -2,38 | -5,95 | -13,57 | -15,15 |
| NO _x Pkw [g/km] | PHEM | 0,33 | 0,36 | 0,53 | 0,55 | 1,07 |
| | HBEFA | 0,22 | 0,27 | 0,42 | 0,47 | 0,71 |
| | Abw [%] | -31,94 | -24,09 | -21,01 | -14,08 | -33,93 |
| PM Pkw [g/km] | PHEM | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 |
| | HBEFA | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 |
| | Abw [%] | -28,11 | -2,42 | -17,88 | -1,43 | -20,33 |
| CO ₂ SNF [g/km] | PHEM | 656,91 | 687,58 | 1048,85 | 1386,78 | 2038,90 |
| | HBEFA | 241,97 | 351,06 | 930,42 | 1080,49 | 1381,80 |
| | Abw [%] | -63,17 | -48,94 | -11,29 | -22,09 | -32,23 |
| NO _x SNF [g/km] | PHEM | 2,30 | 4,31 | 4,90 | 7,17 | 12,72 |
| | HBEFA | 2,67 | 2,30 | 4,79 | 6,68 | 9,59 |
| | Abw [%] | 15,85 | -46,62 | -2,24 | -6,85 | -24,63 |
| PM SNF [g/km] | PHEM | 0,03 | 0,02 | 0,05 | 0,06 | 0,12 |
| | HBEFA | 0,02 | 0,02 | 0,04 | 0,06 | 0,10 |
| | Abw [%] | -42,03 | 1,63 | -13,69 | 2,12 | -15,67 |
| CO ₂ [g/km] | PHEM | 146,67 | 155,87 | 225,81 | 313,29 | 535,54 |
| | HBEFA | 105,10 | 135,04 | 210,09 | 264,56 | 433,18 |
| | Abw [%] | -28,34 | -13,36 | -6,96 | ,15,56 | -19,11 |
| NO _x [g/km] | PHEM | 0,42 | 0,57 | 0,75 | 0,88 | 1,69 |
| | HBEFA | 0,34 | 0,38 | 0,64 | 0,78 | 1,15 |
| | Abw [%] | -18,67 | -33,72 | -14,57 | -11,35 | -31,72 |
| PM [g/km] | PHEM | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,02 |
| | HBEFA | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| | Abw [%] | -32,41 | -2,25 | -15,98 | -0,03 | -20,13 |

Tabelle 99: Emissionen für 5 % Schwerverkehr und -2 % Steigung für Fernstraße City

| | | Flüssig | Dicht | Gesättigt | Stop&Go | Stop&Go II |
|----------------------------|---------|---------|--------|-----------|---------|------------|
| CO ₂ Pkw [g/km] | PHEM | 120,32 | 126,69 | 183,06 | 256,42 | 451,69 |
| | HBEFA | 94,60 | 107,55 | 152,76 | 221,56 | 383,31 |
| | Abw [%] | -21,38 | -15,11 | -16,55 | -13,59 | -15,14 |
| NO _x Pkw [g/km] | PHEM | 0,33 | 0,36 | 0,53 | 0,55 | 1,07 |
| | HBEFA | 0,21 | 0,26 | 0,36 | 0,47 | 0,71 |
| | Abw [%] | -35,66 | -29,19 | -32,49 | -14,08 | -33,94 |
| PM Pkw [g/km] | PHEM | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 |
| | HBEFA | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 |
| | Abw [%] | -31,91 | -2,71 | -16,81 | -1,43 | -20,32 |
| CO ₂ SNF [g/km] | PHEM | 656,91 | 687,58 | 1048,85 | 1386,78 | 2038,90 |
| | HBEFA | 250,36 | 389,15 | 474,87 | 1080,12 | 1381,54 |
| | Abw [%] | -61,89 | -43,40 | -54,72 | -22,11 | -32,24 |
| NO _x SNF [g/km] | PHEM | 2,30 | 4,31 | 4,90 | 7,17 | 12,72 |
| | HBEFA | 1,99 | 2,78 | 3,40 | 7,16 | 10,88 |
| | Abw [%] | -13,38 | -35,65 | -30,63 | -0,15 | -14,51 |
| PM SNF [g/km] | PHEM | 0,03 | 0,02 | 0,05 | 0,06 | 0,12 |
| | HBEFA | 0,02 | 0,02 | 0,03 | 0,06 | 0,10 |
| | Abw [%] | -47,20 | -5,46 | -39,01 | 2,11 | -15,68 |
| CO ₂ [g/km] | PHEM | 146,67 | 155,87 | 225,81 | 313,29 | 535,54 |
| | HBEFA | 102,39 | 121,63 | 168,87 | 264,79 | 433,22 |
| | Abw [%] | -30,19 | -21,97 | -25,22 | -15,58 | -19,11 |
| NO _x [g/km] | PHEM | 0,42 | 0,57 | 0,75 | 0,88 | 1,69 |
| | HBEFA | 0,30 | 0,68 | 0,51 | 0,81 | 1,22 |
| | Abw [%] | -29,34 | -32,65 | -31,63 | -8,63 | -27,91 |
| PM [g/km] | PHEM | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,02 |
| | HBEFA | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| | Abw [%] | -36,68 | -4,66 | -24,69 | -0,25 | -20,13 |

Tabelle 100: Emissionen für 5 % Schwerverkehr und 0 % Steigung für Hauptverkehrsstraßen

| | | Flüssig | Dicht | Gesättigt | Stop&Go | Stop&Go II |
|----------------------------|---------|---------|---------|-----------|---------|------------|
| CO ₂ Pkw [g/km] | PHEM | 171,38 | 178,14 | 231,79 | 292,60 | 500,53 |
| | HBEFA | 153,03 | 163,48 | 202,96 | 263,88 | 428,14 |
| | Abw [%] | -10,71 | -8,23 | -12,44 | -9,81 | -14,46 |
| NO _x Pkw [g/km] | PHEM | 0,44 | 0,43 | 0,65 | 0,87 | 1,16 |
| | HBEFA | 0,32 | 0,40 | 0,47 | 0,55 | 0,78 |
| | Abw [%] | -28,69 | -6,14 | -28,29 | -37,16 | -32,64 |
| PM Pkw [g/km] | PHEM | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 |
| | HBEFA | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 |
| | Abw [%] | -48,37 | -20,42 | -13,62 | -32,41 | -32,74 |
| CO ₂ SNF [g/km] | PHEM | 999,03 | 1008,53 | 1346,59 | 1972,02 | 2392,44 |
| | HBEFA | 615,79 | 693,48 | 1201,86 | 1430,17 | 1741,65 |
| | Abw [%] | -38,36 | -31,24 | -10,75 | -27,48 | -27,20 |
| NO _x SNF [g/km] | PHEM | 2,13 | 3,63 | 4,54 | 7,91 | 13,42 |
| | HBEFA | 2,24 | 2,58 | 4,71 | 6,68 | 10,24 |
| | Abw [%] | 5,15 | -28,88 | 3,73 | -15,53 | -23,69 |
| PM SNF [g/km] | PHEM | 0,02 | 0,04 | 0,04 | 0,07 | 0,14 |
| | HBEFA | 0,03 | 0,03 | 0,05 | 0,07 | 0,11 |
| | Abw [%] | 11,68 | -15,13 | 17,78 | -1,77 | -20,19 |
| CO ₂ [g/km] | PHEM | 211,98 | 221,34 | 286,85 | 377,10 | 600,51 |
| | HBEFA | 176,17 | 189,98 | 252,91 | 322,19 | 493,82 |
| | Abw [%] | -16,89 | -14,17 | -11,83 | -14,56 | -17,77 |
| NO _x [g/km] | PHEM | 0,53 | 0,59 | 0,84 | 1,23 | 1,81 |
| | HBEFA | 0,41 | 0,51 | 0,68 | 0,85 | 1,26 |
| | Abw [%] | -21,61 | -14,14 | -19,46 | -30,30 | -30,62 |
| PM [g/km] | PHEM | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 |
| | HBEFA | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| | Abw [%] | -37,16 | -19,66 | -3,43 | -22,32 | -29,34 |

Tabelle 101: Emissionen für 5 % Schwerverkehr und 0 % Steigung für Sammelstraßen

| | | Flüssig | Dicht | Gesättigt | Stop&Go | Stop&Go II |
|----------------------------|---------|---------|---------|-----------|---------|------------|
| CO ₂ Pkw [g/km] | PHEM | 171,38 | 178,14 | 231,79 | 292,60 | 500,53 |
| | HBEFA | 146,36 | 167,58 | 213,23 | 263,91 | 428,12 |
| | Abw [%] | -14,60 | -5,93 | -8,01 | -9,80 | -14,47 |
| NO _x Pkw [g/km] | PHEM | 0,44 | 0,43 | 0,65 | 0,87 | 1,16 |
| | HBEFA | 0,30 | 0,36 | 0,51 | 0,55 | 0,78 |
| | Abw [%] | -32,47 | -16,44 | -22,00 | -37,16 | -32,63 |
| PM Pkw [g/km] | PHEM | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 |
| | HBEFA | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 |
| | Abw [%] | -50,45 | -27,56 | -10,19 | -32,41 | -32,74 |
| CO ₂ SNF [g/km] | PHEM | 999,03 | 1008,53 | 1346,59 | 1972,02 | 2392,44 |
| | HBEFA | 605,71 | 693,49 | 1279,69 | 1430,26 | 1741,62 |
| | Abw [%] | -39,37 | -31,24 | -4,97 | -27,47 | -27,20 |
| NO _x SNF [g/km] | PHEM | 2,13 | 3,63 | 4,54 | 7,91 | 13,42 |
| | HBEFA | 2,29 | 2,71 | 4,92 | 6,72 | 10,06 |
| | Abw [%] | 7,36 | -25,48 | 8,32 | -15,03 | -25,04 |
| PM SNF [g/km] | PHEM | 0,02 | 0,04 | 0,04 | 0,07 | 0,14 |
| | HBEFA | 0,03 | 0,03 | 0,05 | 0,07 | 0,11 |
| | Abw [%] | 12,05 | -15,26 | 20,83 | -1,82 | -20,19 |
| CO ₂ [g/km] | PHEM | 211,98 | 221,34 | 286,85 | 377,10 | 600,51 |
| | HBEFA | 169,63 | 193,87 | 266,55 | 322,23 | 493,79 |
| | Abw [%] | -20,12 | -12,41 | -7,08 | -14,55 | -17,77 |
| NO _x [g/km] | PHEM | 0,53 | 0,59 | 0,84 | 1,23 | 1,81 |
| | HBEFA | 0,40 | 0,47 | 0,73 | 0,86 | 1,25 |
| | Abw [%] | -24,19 | -20,12 | -13,61 | -30,14 | -31,11 |
| PM [g/km] | PHEM | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 |
| | HBEFA | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| | Abw [%] | -38,79 | -24,56 | -0,11 | -22,34 | -29,35 |

Tabelle 102: Emissionen für 5 % Schwerverkehr und 0 % Steigung für Fernstraße City

| | | Flüssig | Dicht | Gesättigt | Stop&Go | Stop&Go II |
|----------------------------|---------|---------|---------|-----------|---------|------------|
| CO ₂ Pkw [g/km] | PHEM | 171,38 | 178,14 | 231,79 | 292,60 | 500,53 |
| | HBEFA | 137,92 | 153,95 | 195,78 | 263,85 | 428,19 |
| | Abw [%] | -19,52 | -13,58 | -15,54 | -9,83 | -14,45 |
| NO _x Pkw [g/km] | PHEM | 0,44 | 0,43 | 0,65 | 0,87 | 1,16 |
| | HBEFA | 0,29 | 0,34 | 0,44 | 0,55 | 0,78 |
| | Abw [%] | -34,81 | -20,14 | -32,99 | -37,16 | -32,63 |
| PM Pkw [g/km] | PHEM | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 |
| | HBEFA | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 |
| | Abw [%] | -53,98 | -27,32 | -10,11 | -32,41 | -32,75 |
| CO ₂ SNF [g/km] | PHEM | 999,03 | 1008,53 | 1346,59 | 1972,02 | 2392,44 |
| | HBEFA | 625,81 | 746,85 | 831,55 | 1429,87 | 1742,98 |
| | Abw [%] | -37,36 | -25,95 | -38,25 | -27,49 | -27,15 |
| NO _x SNF [g/km] | PHEM | 2,13 | 3,63 | 4,54 | 7,91 | 13,42 |
| | HBEFA | 1,77 | 2,34 | 3,84 | 6,51 | 11,08 |
| | Abw [%] | -17,05 | -35,56 | -15,47 | -17,68 | -17,45 |
| PM SNF [g/km] | PHEM | 0,02 | 0,04 | 0,04 | 0,07 | 0,14 |
| | HBEFA | 0,03 | 0,03 | 0,04 | 0,07 | 0,11 |
| | Abw [%] | 5,23 | -21,20 | -4,46 | -2,09 | -20,15 |
| CO ₂ [g/km] | PHEM | 211,98 | 221,34 | 286,85 | 377,10 | 600,51 |
| | HBEFA | 162,31 | 183,59 | 227,57 | 322,15 | 493,93 |
| | Abw [%] | -23,43 | -17,06 | -20,67 | -14,57 | -17,75 |
| NO _x [g/km] | PHEM | 0,53 | 0,59 | 0,84 | 1,23 | 1,81 |
| | HBEFA | 0,36 | 0,44 | 0,61 | 0,85 | 1,30 |
| | Abw [%] | -31,01 | ,25,74 | -28,08 | -30,99 | -28,30 |
| PM [g/km] | PHEM | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 |
| | HBEFA | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| | Abw [%] | -42,94 | ,26,23 | -8,02 | -22,43 | -29,34 |

Tabelle 103: Emissionen für 5 % Schwerverkehr und 2 % Steigung für Hauptverkehrsstraßen

| | | Flüssig | Dicht | Gesättigt | Stop&Go | Stop&Go II |
|----------------------------|---------|---------|---------|-----------|---------|------------|
| CO ₂ Pkw [g/km] | PHEM | 219,36 | 227,66 | 277,52 | 344,61 | 538,29 |
| | HBEFA | 203,67 | 211,88 | 248,61 | 308,81 | 477,58 |
| | Abw [%] | -7,15 | -6,93 | -10,42 | -10,39 | -11,28 |
| NO _x Pkw [g/km] | PHEM | 0,54 | 0,59 | 0,73 | 0,74 | 1,26 |
| | HBEFA | 0,42 | 0,52 | 0,58 | 0,64 | 0,85 |
| | Abw [%] | -23,43 | -12,17 | -19,98 | -12,95 | -32,64 |
| PM Pkw [g/km] | PHEM | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| | HBEFA | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 |
| | Abw [%] | -12,17 | 11,85 | -16,16 | -7,73 | -27,44 |
| CO ₂ SNF [g/km] | PHEM | 1591,89 | 1577,69 | 1886,40 | 2112,04 | 2910,67 |
| | HBEFA | 1145,06 | 1195,02 | 1634,45 | 1849,34 | 2176,46 |
| | Abw [%] | -28,07 | -24,25 | -13,36 | -12,44 | -25,22 |
| NO _x SNF [g/km] | PHEM | 2,72 | 3,11 | 4,59 | 7,03 | 14,04 |
| | HBEFA | 1,97 | 2,48 | 4,61 | 6,45 | 10,71 |
| | Abw [%] | -27,42 | -20,32 | 0,52 | -8,14 | -23,74 |
| PM SNF [g/km] | PHEM | 0,04 | 0,04 | 0,06 | 0,07 | 0,15 |
| | HBEFA | 0,04 | 0,04 | 0,05 | 0,08 | 0,13 |
| | Abw [%] | -2,90 | 8,35 | -9,10 | 8,62 | -11,58 |
| CO ₂ [g/km] | PHEM | 286,77 | 297,73 | 356,52 | 432,95 | 662,39 |
| | HBEFA | 250,74 | 261,03 | 317,90 | 385,84 | 562,52 |
| | Abw [%] | -12,57 | -12,32 | -10,83 | -10,88 | -15,08 |
| NO _x [g/km] | PHEM | 0,65 | 0,72 | 0,92 | 1,05 | 1,93 |
| | HBEFA | 0,49 | 0,62 | 0,78 | 0,93 | 1,34 |
| | Abw [%] | -24,04 | -14,52 | -14,55 | -11,33 | -30,43 |
| PM [g/km] | PHEM | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 |
| | HBEFA | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| | Abw [%] | -8,62 | 9,31 | -13,17 | -1,39 | -22,41 |

Tabelle 104: Emissionen für 5 % Schwerverkehr und 2 % Steigung für Sammelstraßen

| | | Flüssig | Dicht | Gesättigt | Stop&Go | Stop&Go II |
|----------------------------|---------|---------|---------|-----------|---------|------------|
| CO ₂ Pkw [g/km] | PHEM | 219,36 | 227,66 | 277,52 | 344,61 | 538,29 |
| | HBEFA | 195,88 | 215,56 | 260,43 | 308,80 | 477,72 |
| | Abw [%] | -10,70 | -5,31 | -6,16 | -10,39 | -11,25 |
| NO _x Pkw [g/km] | PHEM | 0,54 | 0,59 | 0,73 | 0,74 | 1,26 |
| | HBEFA | 0,40 | 0,48 | 0,62 | 0,64 | 0,85 |
| | Abw [%] | -26,90 | -19,51 | -14,24 | -12,95 | -32,63 |
| PM Pkw [g/km] | PHEM | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| | HBEFA | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 |
| | Abw [%] | -16,10 | 4,11 | -12,43 | -7,73 | -27,45 |
| CO ₂ SNF [g/km] | PHEM | 1591,89 | 1577,69 | 1886,40 | 2112,04 | 2910,67 |
| | HBEFA | 1135,82 | 1195,95 | 1711,69 | 1848,21 | 2177,68 |
| | Abw [%] | -28,65 | -24,20 | -9,26 | -12,49 | -25,18 |
| NO _x SNF [g/km] | PHEM | 2,72 | 3,11 | 4,59 | 7,03 | 14,04 |
| | HBEFA | 1,97 | 2,54 | 4,85 | 6,47 | 10,58 |
| | Abw [%] | -27,51 | -18,49 | 5,69 | -7,87 | -24,69 |
| PM SNF [g/km] | PHEM | 0,04 | 0,04 | 0,06 | 0,07 | 0,15 |
| | HBEFA | 0,04 | 0,04 | 0,06 | 0,08 | 0,13 |
| | Abw [%] | -2,10 | 8,96 | -6,01 | 8,62 | -11,59 |
| CO ₂ [g/km] | PHEM | 286,77 | 297,73 | 356,52 | 432,95 | 662,39 |
| | HBEFA | 242,88 | 264,58 | 333,00 | 385,77 | 562,71 |
| | Abw [%] | -15,31 | -11,13 | -6,60 | -10,90 | -15,05 |
| NO _x [g/km] | PHEM | 0,65 | 0,72 | 0,92 | 1,05 | 1,93 |
| | HBEFA | 0,48 | 0,58 | 0,84 | 0,93 | 1,34 |
| | Abw [%] | -26,81 | -19,83 | -8,94 | -11,24 | -30,77 |
| PM [g/km] | PHEM | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 |
| | HBEFA | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| | Abw [%] | -11,00 | 4,55 | -9,65 | -1,39 | -22,42 |

Tabelle 105: Emissionen für 5 % Schwerverkehr und 2 % Steigung für Fernstraße City

| | | Flüssig | Dicht | Gesättigt | Stop&Go | Stop&Go II |
|----------------------------|---------|---------|---------|-----------|---------|------------|
| CO ₂ Pkw [g/km] | PHEM | 219,36 | 227,66 | 277,52 | 344,61 | 538,29 |
| | HBEFA | 183,74 | 202,68 | 240,90 | 308,78 | 477,71 |
| | Abw [%] | -16,24 | -10,97 | -13,19 | -10,40 | -11,25 |
| NO _x Pkw [g/km] | PHEM | 0,54 | 0,59 | 0,73 | 0,74 | 1,26 |
| | HBEFA | 0,40 | 0,44 | 0,52 | 0,64 | 0,85 |
| | Abw [%] | -26,79 | -25,56 | -27,98 | -12,95 | -32,63 |
| PM Pkw [g/km] | PHEM | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| | HBEFA | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 |
| | Abw [%] | -23,48 | 0,11 | -14,09 | -7,72 | -27,44 |
| CO ₂ SNF [g/km] | PHEM | 1591,89 | 1577,69 | 1886,40 | 2112,04 | 2910,67 |
| | HBEFA | 1170,51 | 1240,56 | 1293,57 | 1848,77 | 2176,80 |
| | Abw [%] | -26,47 | -21,37 | -31,43 | -12,47 | -25,21 |
| NO _x SNF [g/km] | PHEM | 2,72 | 3,11 | 4,59 | 7,03 | 14,04 |
| | HBEFA | 1,78 | 2,21 | 3,47 | 6,27 | 10,92 |
| | Abw [%] | -34,75 | -29,17 | -24,41 | -10,70 | -22,22 |
| PM SNF [g/km] | PHEM | 0,04 | 0,04 | 0,06 | 0,07 | 0,15 |
| | HBEFA | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,08 | 0,13 |
| | Abw [%] | -14,39 | -2,27 | -18,52 | 8,65 | -11,62 |
| CO ₂ [g/km] | PHEM | 286,77 | 297,73 | 356,52 | 432,95 | 662,39 |
| | HBEFA | 233,08 | 254,58 | 293,54 | 385,78 | 562,67 |
| | Abw [%] | -18,72 | -14,49 | -17,67 | -10,89 | -15,06 |
| NO _x [g/km] | PHEM | 0,65 | 0,72 | 0,92 | 1,05 | 1,93 |
| | HBEFA | 0,47 | 0,53 | 0,67 | 0,92 | 1,35 |
| | Abw [%] | -28,24 | -26,83 | -26,82 | -12,19 | -29,87 |
| PM [g/km] | PHEM | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 |
| | HBEFA | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| | Abw [%] | -20,05 | -1,91 | -15,17 | -1,37 | -22,43 |

Tabelle 106: Emissionen für 5 % Schwerverkehr und 4 % Steigung für Hauptverkehrsstraßen

| | | Flüssig | Dicht | Gesättigt | Stop&Go | Stop&Go II |
|----------------------------|---------|---------|---------|-----------|---------|------------|
| CO ₂ Pkw [g/km] | PHEM | 267,27 | 278,72 | 326,44 | 387,04 | 577,05 |
| | HBEFA | 252,93 | 262,80 | 300,27 | 357,35 | 528,59 |
| | Abw [%] | -5,37 | -5,71 | -8,02 | -7,67 | -8,40 |
| NO _x Pkw [g/km] | PHEM | 0,71 | 0,75 | 0,86 | 0,83 | 1,33 |
| | HBEFA | 0,56 | 0,64 | 0,72 | 0,75 | 0,93 |
| | Abw [%] | -21,85 | -13,65 | -16,32 | -9,28 | -30,24 |
| PM Pkw [g/km] | PHEM | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| | HBEFA | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| | Abw [%] | 2,93 | 11,34 | -4,71 | -6,48 | -26,64 |
| CO ₂ SNF [g/km] | PHEM | 1847,83 | 2087,87 | 2316,60 | 2426,69 | 3240,25 |
| | HBEFA | 1740,16 | 1778,13 | 2119,18 | 2335,45 | 2675,78 |
| | Abw [%] | -5,83 | -14,84 | -8,52 | -3,76 | -17,42 |
| NO _x SNF [g/km] | PHEM | 2,54 | 2,79 | 4,49 | 7,43 | 14,37 |
| | HBEFA | 2,24 | 2,62 | 4,53 | 6,48 | 11,08 |
| | Abw [%] | -11,76 | -5,96 | 0,98 | -12,77 | -22,91 |
| PM SNF [g/km] | PHEM | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 0,08 | 0,15 |
| | HBEFA | 0,05 | 0,05 | 0,06 | 0,09 | 0,15 |
| | Abw [%] | 7,08 | -1,94 | 6,79 | 13,42 | -1,00 |
| CO ₂ [g/km] | PHEM | 344,86 | 373,47 | 425,93 | 490,92 | 717,59 |
| | HBEFA | 327,29 | 338,57 | 381,22 | 456,26 | 635,95 |
| | Abw [%] | -5,09 | -9,35 | -8,15 | -7,06 | -11,38 |
| NO _x [g/km] | PHEM | 0,80 | 0,85 | 1,04 | 1,17 | 2,02 |
| | HBEFA | 0,64 | 0,74 | 0,91 | 1,04 | 1,44 |
| | Abw [%] | -20,09 | -12,88 | -12,58 | -10,87 | -28,88 |
| PM [g/km] | PHEM | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 |
| | HBEFA | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 |
| | Abw [%] | 4,92 | 4,78 | -0,92 | 0,46 | -18,22 |

Tabelle 107: Emissionen für 5 % Schwerverkehr und 4 % Steigung für Sammelstraßen

| | | Flüssig | Dicht | Gesättigt | Stop&Go | Stop&Go II |
|----------------------------|---------|---------|---------|-----------|---------|------------|
| CO ₂ Pkw [g/km] | PHEM | 267,27 | 278,72 | 326,44 | 387,04 | 577,05 |
| | HBEFA | 247,07 | 267,14 | 310,88 | 357,35 | 528,49 |
| | Abw [%] | -7,56 | -4,15 | -4,77 | -7,67 | -8,42 |
| NO _x Pkw [g/km] | PHEM | 0,71 | 0,75 | 0,86 | 0,83 | 1,33 |
| | HBEFA | 0,53 | 0,63 | 0,76 | 0,75 | 0,93 |
| | Abw [%] | -25,75 | -15,56 | -10,95 | -9,28 | -30,26 |
| PM Pkw [g/km] | PHEM | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| | HBEFA | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| | Abw [%] | -2,00 | 5,82 | 1,64 | -6,49 | -26,66 |
| CO ₂ SNF [g/km] | PHEM | 1847,83 | 2087,87 | 2316,60 | 2426,69 | 3240,25 |
| | HBEFA | 1732,86 | 1777,04 | 2186,63 | 2335,73 | 2674,86 |
| | Abw [%] | -6,22 | -14,89 | -5,61 | -3,75 | -17,45 |
| NO _x SNF [g/km] | PHEM | 2,54 | 2,79 | 4,49 | 7,43 | 14,37 |
| | HBEFA | 2,23 | 2,68 | 4,76 | 6,47 | 10,94 |
| | Abw [%] | -11,93 | -3,78 | 6,01 | -12,91 | -23,90 |
| PM SNF [g/km] | PHEM | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 0,08 | 0,15 |
| | HBEFA | 0,05 | 0,05 | 0,06 | 0,09 | 0,15 |
| | Abw [%] | 7,86 | -1,29 | 8,30 | 13,50 | -2,00 |
| CO ₂ [g/km] | PHEM | 344,86 | 373,47 | 425,93 | 490,92 | 717,59 |
| | HBEFA | 321,36 | 342,63 | 404,67 | 456,27 | 635,81 |
| | Abw [%] | -6,81 | -8,26 | -4,99 | -7,06 | -11,40 |
| NO _x [g/km] | PHEM | 0,80 | 0,85 | 1,04 | 1,17 | 2,02 |
| | HBEFA | 0,61 | 0,73 | 0,96 | 1,04 | 1,43 |
| | Abw [%] | -23,40 | -14,12 | -7,28 | -10,92 | -29,24 |
| PM [g/km] | PHEM | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 |
| | HBEFA | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 |
| | Abw [%] | 1,92 | 1,58 | 3,84 | 0,49 | -18,62 |

Tabelle 108: Emissionen für 5 % Schwerverkehr und 4 % Steigung für Fernstraße City

| | | Flüssig | Dicht | Gesättigt | Stop&Go | Stop&Go II |
|----------------------------|---------|---------|---------|-----------|---------|------------|
| CO ₂ Pkw [g/km] | PHEM | 267,27 | 278,72 | 326,44 | 387,04 | 577,05 |
| | HBEFA | 233,62 | 252,82 | 289,84 | 357,30 | 528,74 |
| | Abw [%] | -12,59 | -9,29 | -11,21 | -7,68 | -8,37 |
| NO _x Pkw [g/km] | PHEM | 0,71 | 0,75 | 0,86 | 0,83 | 1,33 |
| | HBEFA | 0,54 | 0,56 | 0,66 | 0,75 | 0,93 |
| | Abw [%] | -24,15 | -24,74 | -22,75 | -9,29 | -30,24 |
| PM Pkw [g/km] | PHEM | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| | HBEFA | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| | Abw [%] | -10,15 | -2,51 | -8,35 | -6,48 | -26,65 |
| CO ₂ SNF [g/km] | PHEM | 1847,83 | 2087,87 | 2316,60 | 2426,69 | 3240,25 |
| | HBEFA | 1766,51 | 1802,58 | 1826,71 | 2335,95 | 2674,53 |
| | Abw [%] | -4,40 | -13,66 | -21,15 | -3,74 | -17,46 |
| NO _x SNF [g/km] | PHEM | 2,54 | 2,79 | 4,49 | 7,43 | 14,37 |
| | HBEFA | 2,16 | 2,46 | 3,43 | 6,39 | 11,00 |
| | Abw [%] | -14,97 | -11,82 | -23,56 | -14,05 | -23,47 |
| PM SNF [g/km] | PHEM | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 0,08 | 0,15 |
| | HBEFA | 0,04 | 0,04 | 0,06 | 0,09 | 0,15 |
| | Abw [%] | -7,34 | -12,90 | -0,91 | 13,53 | -1,84 |
| CO ₂ [g/km] | PHEM | 344,86 | 373,47 | 425,93 | 490,92 | 717,59 |
| | HBEFA | 310,26 | 330,30 | 366,69 | 456,23 | 636,03 |
| | Abw [%] | -10,03 | -11,56 | -13,91 | -7,07 | -11,37 |
| NO _x [g/km] | PHEM | 0,80 | 0,85 | 1,04 | 1,17 | 2,02 |
| | HBEFA | 0,62 | 0,66 | 0,80 | 1,03 | 1,43 |
| | Abw [%] | -22,53 | -23,06 | -22,92 | -11,28 | -29,08 |
| PM [g/km] | PHEM | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 |
| | HBEFA | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 |
| | Abw [%] | -8,69 | -7,80 | -5,90 | 0,51 | -18,55 |

Tabelle 109: Emissionen für 5 % Schwerverkehr und 6 % Steigung für Hauptverkehrsstraßen

| | | Flüssig | Dicht | Gesättigt | Stop&Go | Stop&Go II |
|----------------------------|---------|---------|---------|-----------|---------|------------|
| CO ₂ Pkw [g/km] | PHEM | 316,10 | 326,22 | 374,16 | 433,52 | 609,34 |
| | HBEFA | 302,69 | 315,13 | 349,66 | 407,99 | 585,09 |
| | Abw [%] | -4,24 | -3,40 | -6,55 | -5,89 | -3,98 |
| NO _x Pkw [g/km] | PHEM | 0,83 | 0,87 | 0,98 | 0,97 | 1,42 |
| | HBEFA | 0,72 | 0,81 | 0,88 | 0,88 | 1,03 |
| | Abw [%] | -13,44 | -7,28 | -10,57 | -9,48 | -27,64 |
| PM Pkw [g/km] | PHEM | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| | HBEFA | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| | Abw [%] | -4,21 | 29,21 | 2,74 | -9,98 | -19,76 |
| CO ₂ SNF [g/km] | PHEM | 2613,71 | 2678,95 | 2771,17 | 2641,38 | 3452,51 |
| | HBEFA | 2362,27 | 2397,42 | 2640,36 | 2855,11 | 3223,04 |
| | Abw [%] | -9,62 | -10,51 | -4,72 | 8,09 | -6,65 |
| NO _x SNF [g/km] | PHEM | 2,86 | 3,60 | 4,70 | 7,41 | 13,72 |
| | HBEFA | 2,67 | 2,99 | 4,76 | 6,61 | 11,32 |
| | Abw [%] | -6,95 | -16,91 | 1,33 | -10,72 | -17,49 |
| PM SNF [g/km] | PHEM | 0,03 | 0,05 | 0,06 | 0,08 | 0,16 |
| | HBEFA | 0,05 | 0,06 | 0,07 | 0,10 | 0,17 |
| | Abw [%] | 49,24 | 10,02 | 3,15 | 23,46 | 3,94 |
| CO ₂ [g/km] | PHEM | 428,53 | 447,27 | 490,55 | 549,04 | 756,38 |
| | HBEFA | 405,67 | 419,24 | 464,19 | 530,35 | 716,98 |
| | Abw [%] | -5,34 | -6,26 | -5,37 | -3,41 | -5,21 |
| NO _x [g/km] | PHEM | 0,93 | 1,01 | 1,16 | 1,31 | 2,06 |
| | HBEFA | 0,82 | 0,92 | 1,07 | 1,17 | 1,54 |
| | Abw [%] | -12,24 | -9,35 | -7,76 | -10,87 | -25,00 |
| PM [g/km] | PHEM | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 |
| | HBEFA | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 |
| | Abw [%] | 9,43 | 21,05 | 3,79 | 0,16 | -11,33 |

Tabelle 110: Emissionen für 5 % Schwerverkehr und 6 % Steigung für Sammelstraßen

| | | Flüssig | Dicht | Gesättigt | Stop&Go | Stop&Go II |
|----------------------------|---------|---------|---------|-----------|---------|------------|
| CO ₂ Pkw [g/km] | PHEM | 316,10 | 326,22 | 374,16 | 433,52 | 609,34 |
| | HBEFA | 299,25 | 317,03 | 361,66 | 407,98 | 585,01 |
| | Abw [%] | -5,33 | -2,82 | -3,34 | -5,89 | -3,99 |
| NO _x Pkw [g/km] | PHEM | 0,83 | 0,87 | 0,98 | 0,97 | 1,42 |
| | HBEFA | 0,69 | 0,80 | 0,93 | 0,88 | 1,03 |
| | Abw [%] | -17,12 | -8,76 | -5,73 | -9,48 | -27,67 |
| PM Pkw [g/km] | PHEM | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| | HBEFA | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| | Abw [%] | -7,51 | 22,91 | 9,98 | -9,98 | -19,79 |
| CO ₂ SNF [g/km] | PHEM | 2613,71 | 2678,95 | 2771,17 | 2641,38 | 3452,51 |
| | HBEFA | 2355,63 | 2393,87 | 2694,25 | 2855,11 | 3222,74 |
| | Abw [%] | -9,87 | -10,64 | -2,78 | 8,09 | -6,66 |
| NO _x SNF [g/km] | PHEM | 2,86 | 3,60 | 4,70 | 7,41 | 13,72 |
| | HBEFA | 2,65 | 3,02 | 4,98 | 6,62 | 11,23 |
| | Abw [%] | -7,53 | -16,14 | 5,93 | -10,58 | -18,15 |
| PM SNF [g/km] | PHEM | 0,03 | 0,05 | 0,06 | 0,08 | 0,16 |
| | HBEFA | 0,05 | 0,06 | 0,07 | 0,10 | 0,16 |
| | Abw [%] | 50,47 | 8,82 | 4,22 | 23,46 | 3,44 |
| CO ₂ [g/km] | PHEM | 428,53 | 447,27 | 490,55 | 549,04 | 756,38 |
| | HBEFA | 402,07 | 420,87 | 478,29 | 530,34 | 716,90 |
| | Abw [%] | -6,17 | -5,90 | -2,50 | -3,41 | -5,22 |
| NO _x [g/km] | PHEM | 0,93 | 1,01 | 1,16 | 1,31 | 2,06 |
| | HBEFA | 0,79 | 0,91 | 1,13 | 1,17 | 1,54 |
| | Abw [%] | -15,46 | -10,42 | -2,94 | -10,83 | -25,24 |
| PM [g/km] | PHEM | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 |
| | HBEFA | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 |
| | Abw [%] | 7,24 | 16,66 | 8,99 | 0,16 | -11,55 |

Tabelle 111: Emissionen für 5 % Schwerverkehr und 6 % Steigung für Fernstraße City

| | | Flüssig | Dicht | Gesättigt | Stop&Go | Stop&Go II |
|----------------------------|---------|---------|---------|-----------|---------|------------|
| CO ₂ Pkw [g/km] | PHEM | 316,10 | 326,22 | 374,16 | 433,52 | 609,34 |
| | HBEFA | 286,48 | 303,78 | 341,55 | 408,03 | 585,16 |
| | Abw [%] | -9,37 | -6,88 | -8,72 | -5,88 | -3,97 |
| NO _x Pkw [g/km] | PHEM | 0,83 | 0,87 | 0,98 | 0,97 | 1,42 |
| | HBEFA | 0,72 | 0,72 | 0,82 | 0,88 | 1,03 |
| | Abw [%] | -13,30 | -17,56 | -16,23 | -9,48 | -27,67 |
| PM Pkw [g/km] | PHEM | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| | HBEFA | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| | Abw [%] | -8,09 | 12,07 | -0,87 | -9,97 | -19,79 |
| CO ₂ SNF [g/km] | PHEM | 2613,71 | 2678,95 | 2771,17 | 2641,38 | 3452,51 |
| | HBEFA | 2389,10 | 2404,65 | 2423,54 | 2855,56 | 3221,52 |
| | Abw [%] | -8,59 | -10,24 | -12,54 | 8,11 | -6,69 |
| NO _x SNF [g/km] | PHEM | 2,86 | 3,60 | 4,70 | 7,41 | 13,72 |
| | HBEFA | 2,61 | 2,83 | 3,60 | 6,54 | 11,10 |
| | Abw [%] | -9,01 | -21,33 | -23,37 | -11,75 | -19,10 |
| PM SNF [g/km] | PHEM | 0,03 | 0,05 | 0,06 | 0,08 | 0,16 |
| | HBEFA | 0,05 | 0,05 | 0,06 | 0,10 | 0,16 |
| | Abw [%] | 34,76 | -4,61 | -1,15 | 23,56 | 2,65 |
| CO ₂ [g/km] | PHEM | 428,53 | 447,27 | 490,55 | 549,04 | 756,38 |
| | HBEFA | 391,61 | 408,82 | 445,65 | 530,41 | 716,98 |
| | Abw [%] | -8,62 | -8,60 | -9,15 | -3,39 | -5,21 |
| NO _x [g/km] | PHEM | 0,93 | 1,01 | 1,16 | 1,31 | 2,06 |
| | HBEFA | 0,82 | 0,83 | 0,96 | 1,16 | 1,53 |
| | Abw [%] | -12,44 | -18,55 | -17,29 | -11,15 | -25,56 |
| PM [g/km] | PHEM | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 |
| | HBEFA | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 |
| | Abw [%] | 2,91 | 4,99 | -0,09 | 0,20 | -11,86 |

A.5 Tabellarische Maßnahmensammlung

| Primärer Wirkungsort | Primärer Ansatzpunkt der Maßnahme | Maßnahmentyp | Effekte am primären Wirkungsort | | | | | | | ...im gesamten Wirkungsbereich | | | | | |
|------------------------|---|--|--|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|----------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------------|---|
| | | | Verstetigter Verkehr durch... | | | | Sonstige verkehrliche Effekte | | | Verkehrliche Effekte | | | | | |
| | | | weniger Störungen | verändertes Fahrverhalten | erhöhte Kapazität (Angebot) | reduzierte MIV-Fahrleistung | reduzierte MIV-Fahrleistung | niedrigere Emissionsfaktoren | verringert Emissionen ÖSPV | verringerte Luftschadstoffbelastung | verstetigter Verkehr | reduzierte MIV-Fahrleistung | niedrigere Emissionsfaktoren | verringerte Treibhausgasemissionen | |
| Maßnahmenort (Strecke) | Störungen auf Fahrbahn | Be- und Entladevorgänge des Lieferverkehrs optimieren (Ladezonen, Ladekonzepte) | + | | | | | | | ↔ | | | | ↔ | |
| | | Park- und Halteverbote ausweisen und Verstöße kontrollieren | + | - | | | | | | ↔ | | | | ↔ | |
| | | Müllabfuhr und Straßenreinigung zeitlich und räumlich optimieren | + | | | | + | | | ↔ | | - | | ↔ | |
| | | Baustellenmanagement | + | | | + | + | | | ↔ | | +/- | | ?↔ | |
| | | Straßenraum MIV-freundlich umgestalten (Fahrbahnverbreiterung, Rückbau Entschleunigungselemente, Busbuchten, ...) | + | - | | | - | | | ↕↔ | | | | ↔ | |
| | | Zusätzlichen Fahrstreifen für den MIV einrichten | | | + | - | - | | | ↕↔ | | - | | ↕↔ | |
| | MIV Kapazität | Zulässige Höchstgeschwindigkeit verkehrsabhängig steuern | | + | + | | | | | ↔ | | | | ↔ | |
| | | Fahrverhalten | Dynamische Hinweise und Informationen im Straßenraum geben | | + | | | | + | | ↔ | | | | ↔ |
| | | | (Lkw-)Überholverbote anordnen | | + | + | | | | | ↔ | | | | ↔ |
| | Zulässige Höchstgeschwindigkeit herabsetzen (lokal) | | | + | +/- | | | +/- | | ↕↔ | | | | ↔ | |
| | Umweltverbund | Verkehrsberuhigung herbeiführen (Verkehrsberuhigter Bereich, Shared Space, stadt- und straßenbauliche Elemente, ...) | - | +/- | | | + | +/- | | ↕↔ | | - | | ↔ | |
| | | Fußgängerüberweg ausweisen (Zebrastreifen) | - | | | | | | | ↘ | | o | | ↔ | |
| | | Fahrradverkehr im Mischverkehr aufwerten (Radstreifen, Fahrradstraße) | - | +/- | | | | | | ? | | | | ↔ | |
| | | MIV-Verkehrsfläche umwidmen (Fahrradweg, Busfahrstreifen, Umweltfahrstreifen, ...) | | | - | + | + | | | ↕↔ | | o | | ↔ | |

| Primärer Wirkungsort | Primärer Ansatzpunkt der Maßnahme | Maßnahmentyp | Effekte am primären Wirkungsort | | | | | | ...im gesamten Wirkungsbereich | | | | | | | |
|----------------------------|-----------------------------------|---|---------------------------------|---------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|----------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------------|--|---|
| | | | Verstetigter Verkehr durch... | | | Sonstige verkehrliche Effekte | | | Verkehrliche Effekte | | | | | | | |
| | | | weniger Störungen | verändertes Fahrverhalten | erhöhte Kapazität (Angebot) | reduzierte MIV-Fahrleistung | reduzierte MIV-Fahrleistung | niedrigere Emissionsfaktoren | verringert Emissionen ÖSPV | verringerte Luftschadstoffbelastung | verstetigter Verkehr | reduzierte MIV-Fahrleistung | niedrigere Emissionsfaktoren | verringerte Treibhausgasemissionen | | |
| Maßnahmenort (Knotenpunkt) | Verkehrsfluss MIV | LSA-Programm für MIV optimieren (Signalzeitenpläne überarbeiten, Grüne Welle, verkehrsabhängige bzw. umweltsensitive Steuerung) | + | | + | | | | | | → | | - | | | ↕ |
| | | Knotenpunkt ohne LSA für den MIV optimieren | + | | + | | | | | | → | | - | | | → |
| | | Knotenpunkt zu Kreisverkehrsplatz umgestalten | +/- | +/- | +/- | | | | | | ↕ | | | | | → |
| | | LSA-gesteuerten Knotenpunkt zu planfreien Knoten umgestalten | + | | + | - | - | | | | → | | | | | → |
| | | LSA-Nachabschaltung einrichten | + | | | | | | | | → | | | | | → |
| Maßnahmenort | Umweltverbund | ÖV-Bevorrechtigung an LSA-gesteuerten Knotenpunkten einrichten | - | | - | | | | | + | ↕ | | o | | | ? |
| | | Knotenpunktgestaltung und LSA-Programme für Rad- und Fußverkehr optimieren | - | | - | | | | | | ↕ | | o | | | ? |
| | | Freigabeanforderung für zu Fuß gehende an LSA-gesteuerten Knotenpunkten einrichten | +/- | | +/- | | | | | | ↕ | | o | | | → |

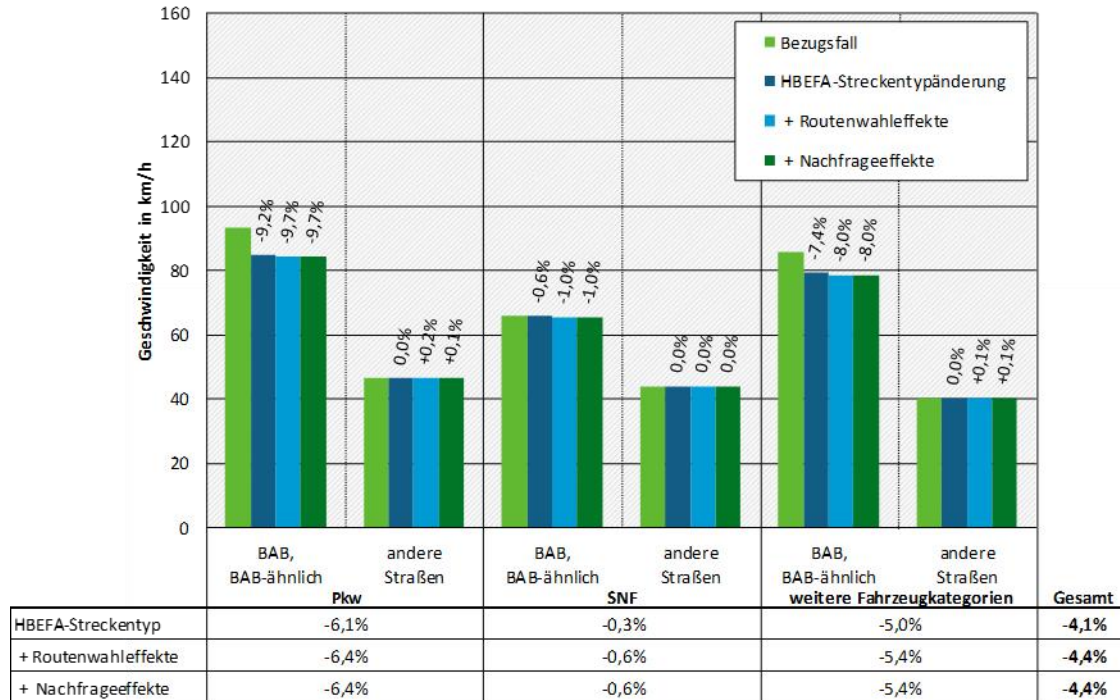
| Primärer Wirkungsort | Primärer Ansatzpunkt der Maßnahme | Maßnahmentyp | Effekte am primären Wirkungsort | | | | | | ...im gesamten Wirkungsbereich | | | | | |
|----------------------|-----------------------------------|---|---------------------------------|---------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|----------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------------|
| | | | Verstetigter Verkehr durch... | | | Sonstige verkehrliche Effekte | | | Verkehrliche Effekte | | | | | |
| | | | weniger Störungen | verändertes Fahrverhalten | erhöhte Kapazität (Angebot) | reduzierte MIV-Fahrleistung | reduzierte MIV-Fahrleistung | niedrigere Emissionsfaktoren | verringert Emissionen ÖSPV | verringerte Luftschadstoffbelastung | verstetigter Verkehr | reduzierte MIV-Fahrleistung | niedrigere Emissionsfaktoren | verringerte Treibhausgasemissionen |
| Definiertes Gebiet | Fahrleistungsminderung | Routenwahl-Information für den MIV (häufig Lkw) verbessern/bereitstellen (Wegweisung, Leitsystem, Navigationssystem, Netzkategorisierung) | | | | + | + | | | | | ↔ | ↔ | |
| | | Lkw-Fahrverbote und -beschränkungen ausweisen | | | | + | + | | | | | - | ↔ | |
| | | Kleinräumige routenwahlbeeinflussende Netzgestaltung einsetzen (z.B. Einbahnstraßen, Abbiegeverbote) | | | + | + | + | | | | | | - | ↔ |
| | | Entlastungsstrecke (aus-)bauen (Ortsumfahrung, (Stadt-)Tunnel) | | | | + | + | | | | + | - | | ↔ |
| | | Pförtnerung an LSA einrichten | | | | + | + | | | | - | +/- | | ↔ |
| | | MIV-Nutzung in einem bestimmten Gebiet bepreisen (City-Maut) | | | | + | + | (+) | | ↗ | ↗ | + | (+) | ↗ |
| | Parken | Öffentlichen Parkraum verknappen und/oder verteuern (Parkraummanagement bzw. -bewirtschaftung) | + | -/+ | | + | + | | | | | | + | ↗ |
| | | Parkleitsystem verbessern/aufbauen | + | + | | | +/- | | | | | | +/- | ? |
| | | Parkplatzkapazitäten außerhalb des Straßenraums ausbauen (z.B. Parkhäuser) | + | + | | | +/- | | | | | | | ↗ |
| | | | | | | | | | | | | | | |

| Primärer Wirkungsort | Primärer Ansatzpunkt der Maßnahme | Maßnahmentyp | Effekte am primären Wirkungsort | | | | | | ...im gesamten Wirkungsbereich | | | | |
|---------------------------------------|--|---|---------------------------------|---------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|----------------------|-----------------------------|------------------------------|
| | | | Verstetigter Verkehr durch... | | | Sonstige verkehrliche Effekte | | | Verkehrliche Effekte | | | | |
| | | | weniger Störungen | verändertes Fahrverhalten | erhöhte Kapazität (Angebot) | reduzierte MIV-Fahrleistung | reduzierte MIV-Fahrleistung | niedrigere Emissionsfaktoren | verringert Emissionen ÖSPV | verringert Luftschadstoffbelastung | verstetigter Verkehr | reduzierte MIV-Fahrleistung | niedrigere Emissionsfaktoren |
| Primärer Wirkungsbereich | Fahrleistungsminderung Personenverkehr | ÖPNV-Attraktivität steigern, ohne Einfluss im MIV-Verkehrsraum (Ausbau Angebot Schiene, Tarife, Komfort und Information, ...) | | | | + | + | | | | | | ↑↑ |
| | | Angebot im ÖSPV ausweiten (Takt verdichten, Fahrplan ausweiten) | - | | | | + | | - | ↔ | | | ↑ |
| | | Fahrrad- und Fußverkehrs fördern (ohne Eingriff in den MIV-Verkehrsraum) | +/- | | | | + | | | ↔ | | | ↑ |
| | | Fahrgemeinschaften fördern (Vermittlungsportale, Mitfahrbänke, ...) | | | | | + | | | → | | | ↔ |
| | | Carsharing-Angebote fördern/betreiben | | | | | +/- | | | ↕ | | | ↕ |
| | | Intermodale Wege vereinfachen (Mobilitätsstationen, Park+Ride, Bike+Ride, ...) | | | | | + | | | ↔ | | | ↔ |
| | | Pkw-Verkehr verteuern (Maut, Kraftstoffsteuer, Kfz-Steuer, ...) | | + | | + | + | + | + | ↑↑ | | | |
| Großräumig (primärer Wirkungsbereich) | Güterverkehr | Großräumigen Lkw-Verkehr reduzieren | | + | | + | + | | | | | | ↑↑ |
| | | Kleinräumigen Lieferverkehr besser organisieren (Mikrohubs, Lastenräder, kooperative Belieferung, Paketstationen, ...) | + | | | | + | | | ↔ | | | ↔ |
| Großräumig | Fahrverhalten | Fahrtraining für Privatpersonen oder Unternehmen fördern oder für ÖPNV-Fahrer*innen/städtische Mitarbeiter*innen anbieten | | + | | | | | + | + | → | | → |
| | | (Hoch-)automatisiertes und autonomes Fahren ermöglichen | | + | | - | - | | +/- | ? | | | ? |
| | | Regelgeschwindigkeit innerorts reduzieren | | + | - | + | + | +/- | | ↕ | | | ↕ |
| | | Regelgeschwindigkeit außerorts und auf Autobahnen reduzieren | | + | + | + | + | + | | ↑ | | | ↑ |

A.6 Weitere Diagramme zu Wirkungen und Schadstoffbilanzierung der Maßnahmen

A.6.1 Allgemeines Tempolimit auf Autobahnen von 120 km/h

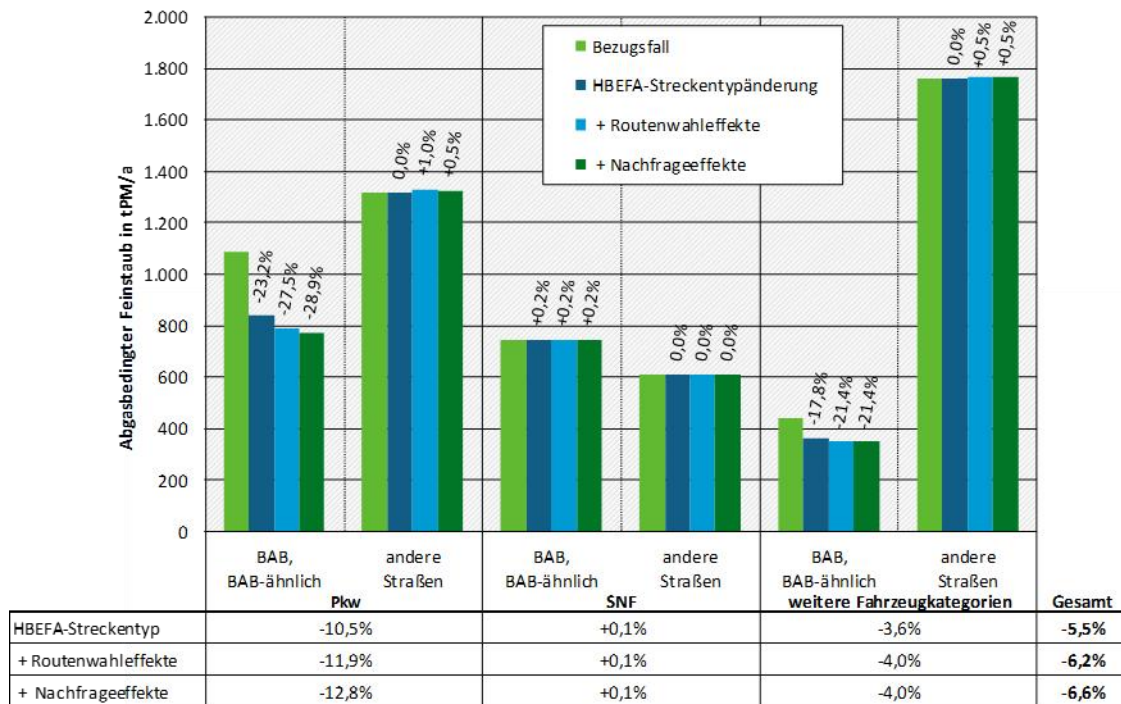
Abbildung 85: Wirkung der Maßnahme „Allgemeines Tempolimit auf Autobahnen von 120 km/h“ auf die durchschnittliche Geschwindigkeit



Unter „weitere Fahrzeugkategorien“ sind alle weiteren HBEFA-Fahrzeugkategorien (LNF, Lbus, Rbus und KR/MR) zusammengefasst.

Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart

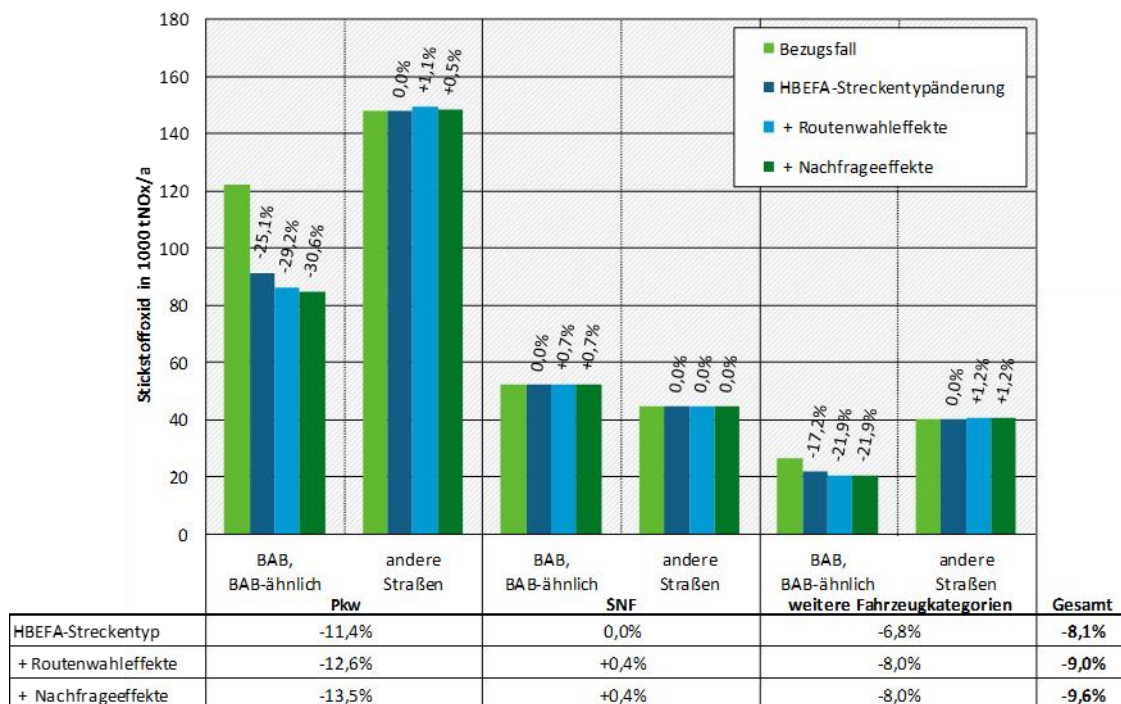
Abbildung 86: Wirkung der Maßnahme „Allgemeines Tempolimit auf Autobahnen von 120 km/h“ auf den abgasbedingten Feinstaub



Unter „weitere Fahrzeugkategorien“ sind alle weiteren HBEFA-Fahrzeugkategorien (LNF, Lbus, Rbus und KR/MR) zusammengefasst.

Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart

Abbildung 87: Wirkung der Maßnahme „Allgemeines Tempolimit auf Autobahnen von 120 km/h“ auf den Stickstoffoxidausstoß

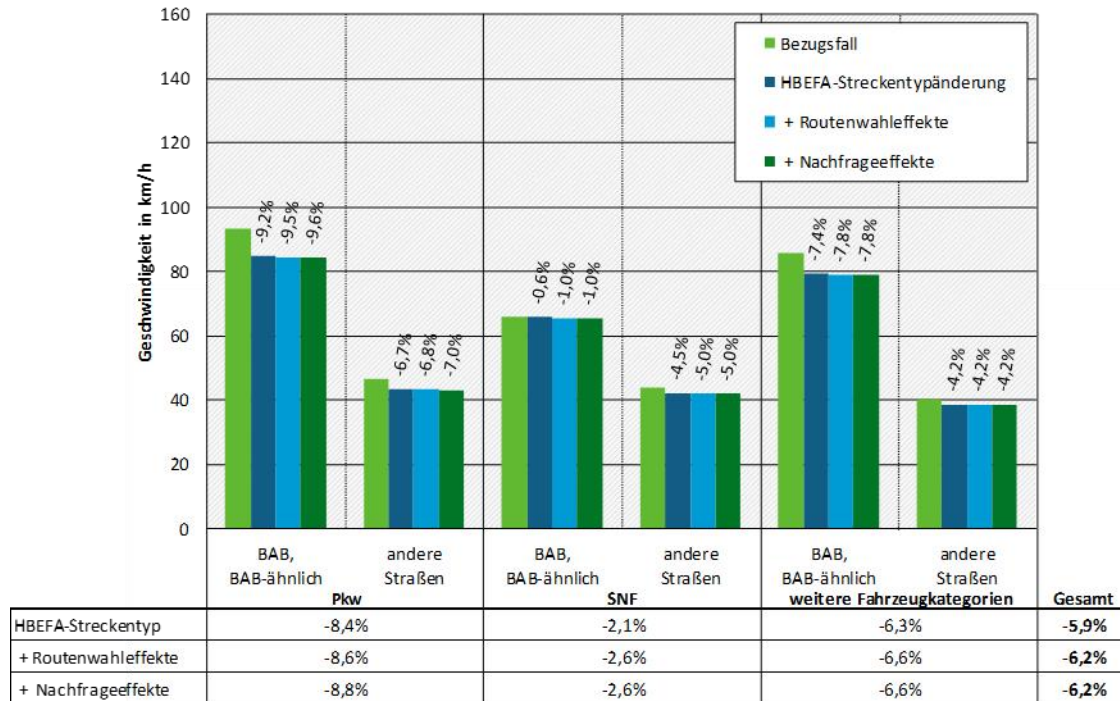


Unter „weitere Fahrzeugkategorien“ sind alle weiteren HBEFA-Fahrzeugkategorien (LNF, Lbus, Rbus und KR/MR) zusammengefasst.

Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart

A.6.2 Allgemeines Tempolimit auf Autobahnen von 120 km/h und im Außerortsbereich von 80 km/h

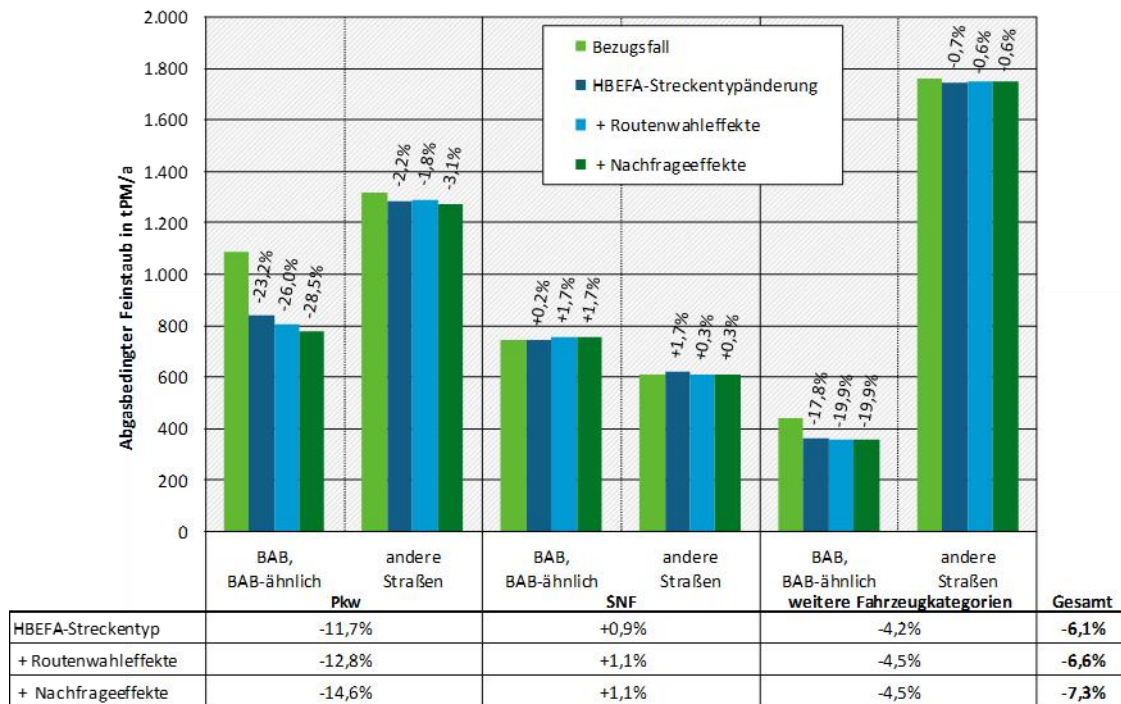
Abbildung 88: Wirkung der Maßnahme „Allgemeines Tempolimit auf Autobahnen von 120 km/h und im Außerortsbereich von 80 km/h“ auf die durchschnittliche Geschwindigkeit



Unter „weitere Fahrzeugkategorien“ sind alle weiteren HBEFA-Fahrzeugkategorien (LNF, Lbus, Rbus und KR/MR) zusammengefasst.

Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart

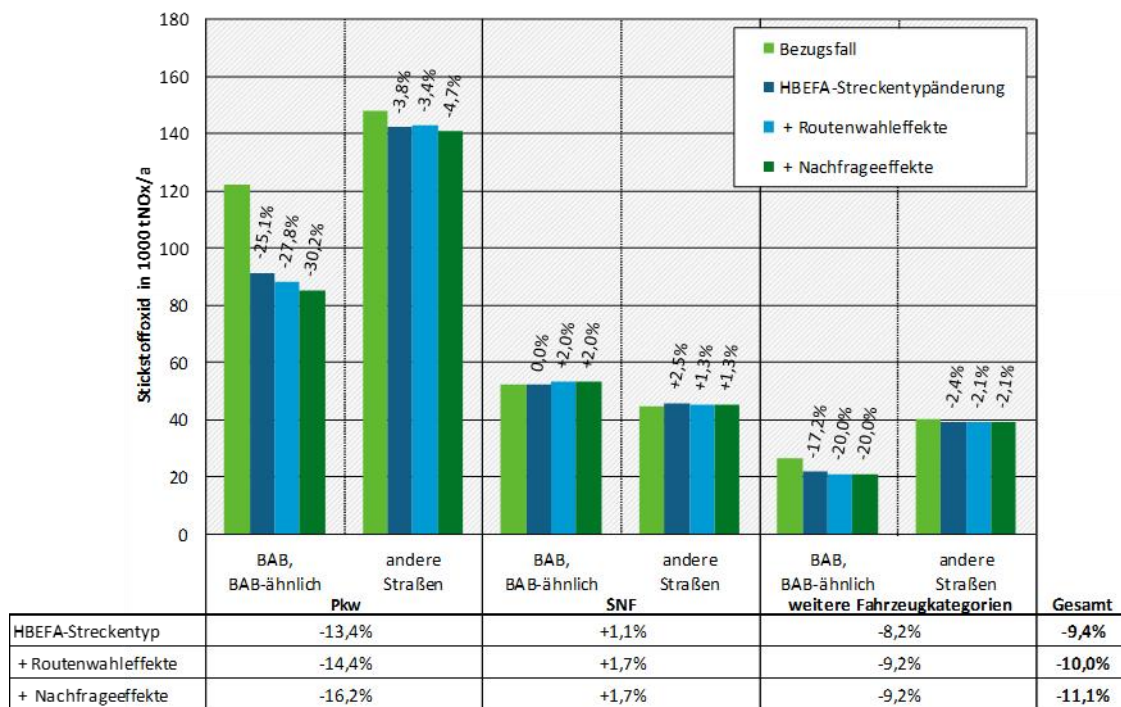
Abbildung 89: Wirkung der Maßnahme „Allgemeines Tempolimit auf Autobahnen von 120 km/h und im Außerortsbereich von 80 km/h“ auf den abgasbedingten Feinstaub



Unter „weitere Fahrzeugkategorien“ sind alle weiteren HBEFA-Fahrzeugkategorien (LNF, Lbus, Rbus und KR/MR) zusammengefasst.

Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart

Abbildung 90: Wirkung der Maßnahme „Allgemeines Tempolimit auf Autobahnen von 120 km/h und im Außerortsbereich von 80 km/h“ auf den Stickstoffoxidausstoß

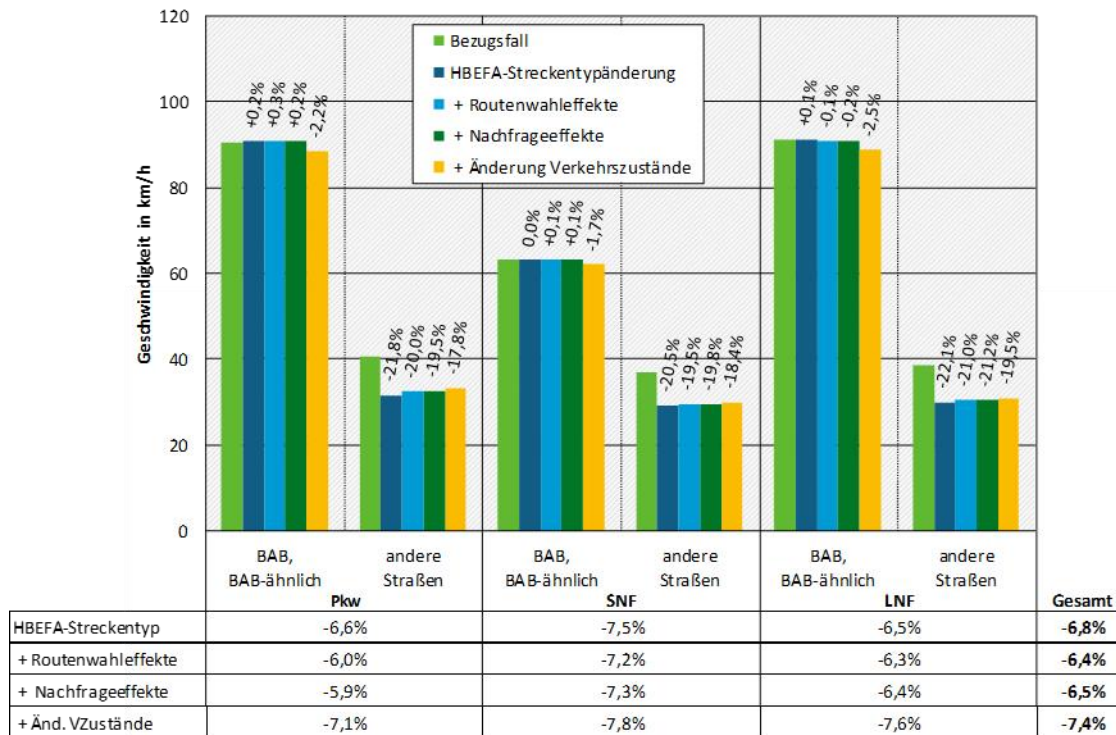


Unter „weitere Fahrzeugkategorien“ sind alle weiteren HBEFA-Fahrzeugkategorien (LNF, Lbus, Rbus und KR/MR) zusammengefasst.

Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart

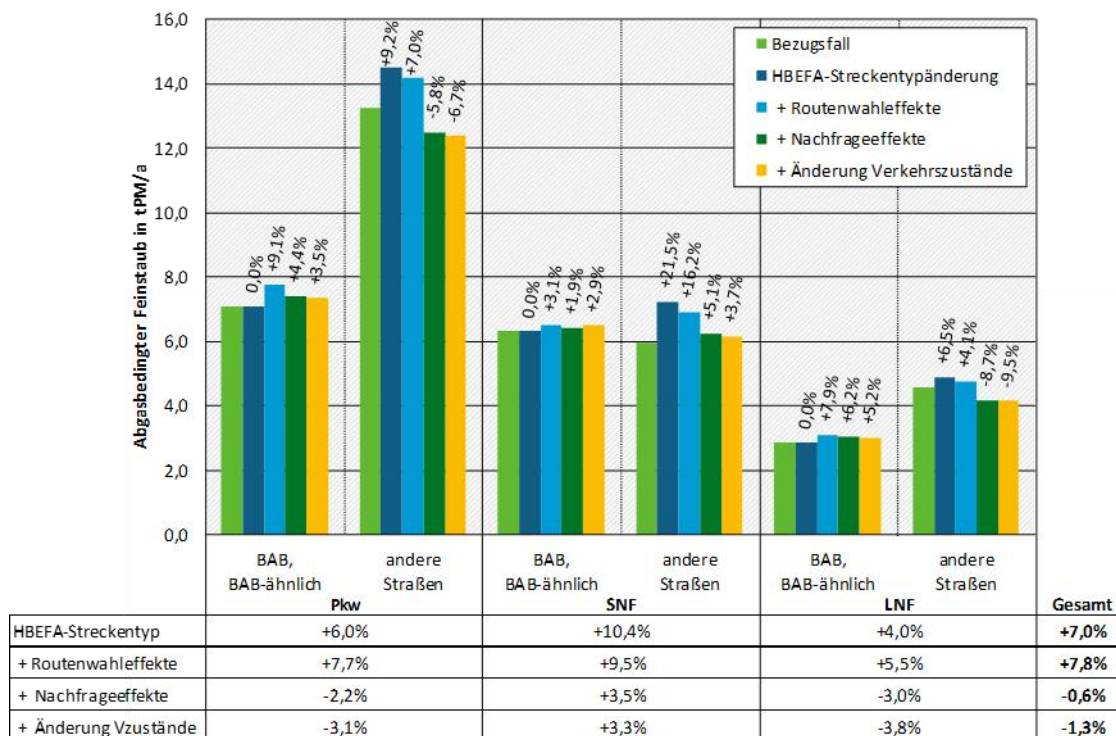
A.6.3 Regelgeschwindigkeit im Innerortsbereich von 30 km/h

Abbildung 91: Wirkung der Maßnahme „Regelgeschwindigkeit im Innerortsbereich von 30 km/h“ auf die durchschnittliche Geschwindigkeit für die Stadtregion Dresden



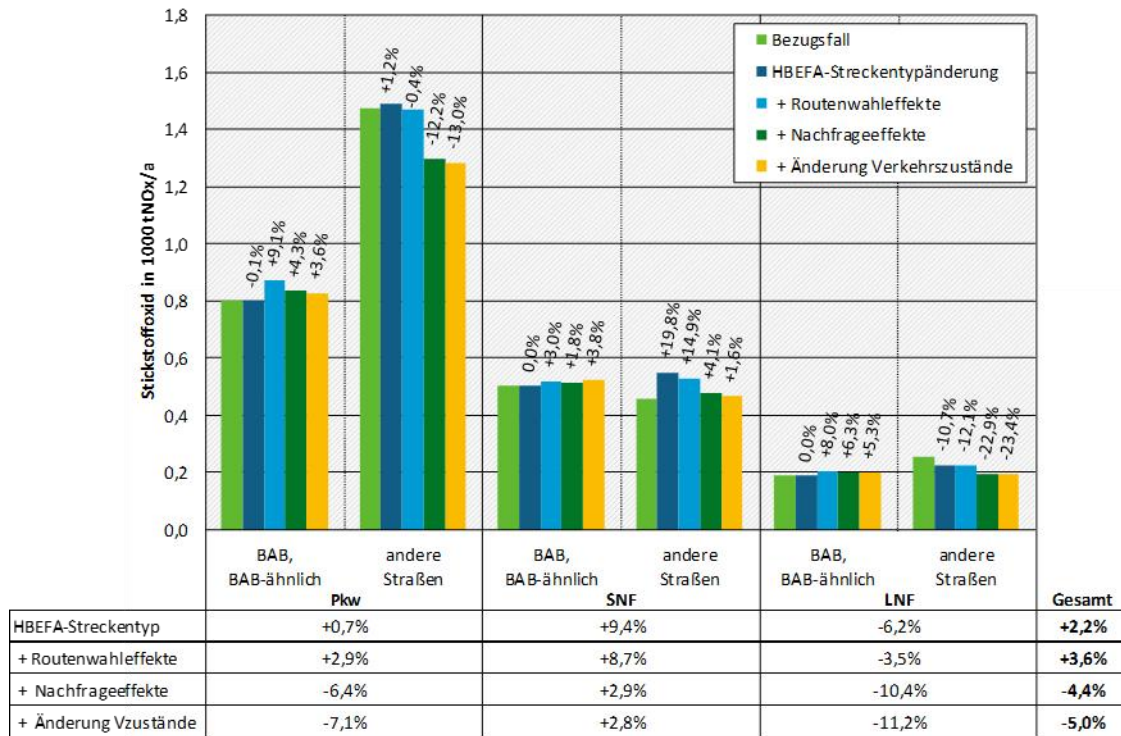
Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart

Abbildung 92: Wirkung der Maßnahme „Regelgeschwindigkeit im Innerortsbereich von 30 km/h“ auf den abgasbedingten Feinstaub für die Stadtregion Dresden



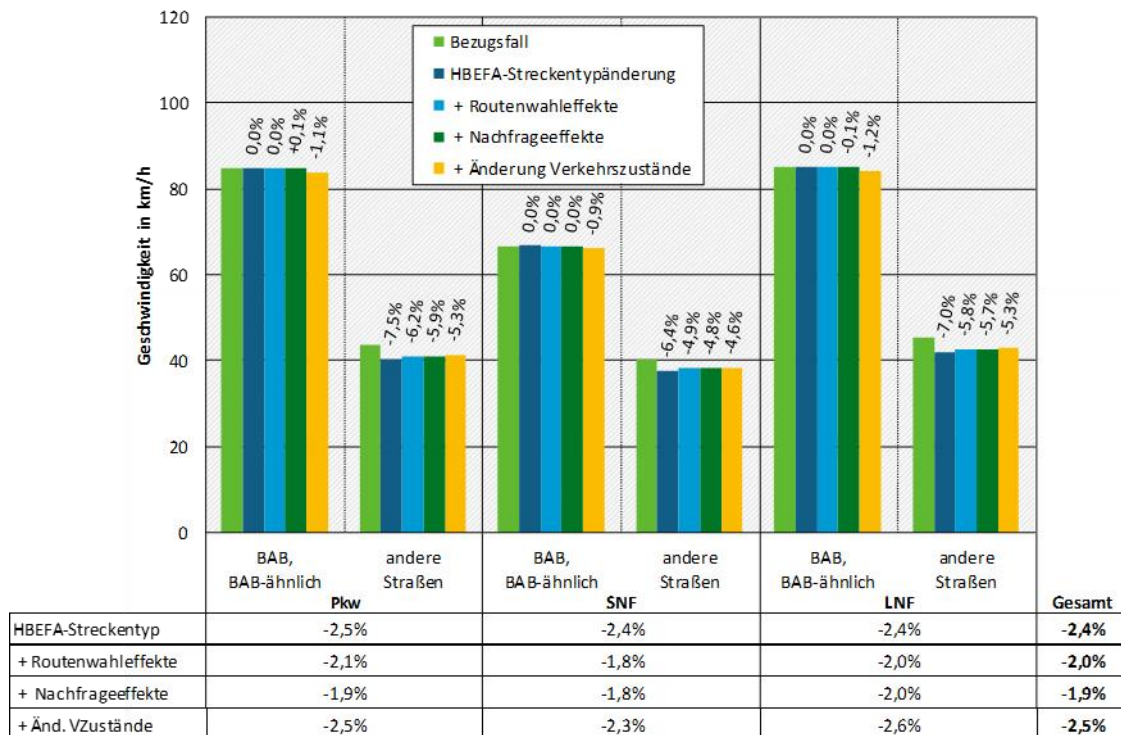
Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart

Abbildung 93: Wirkung der Maßnahme „Regelgeschwindigkeit im Innerortsbereich von 30 km/h“ auf den Stickstoffoxidausstoß für die Stadtregion Dresden



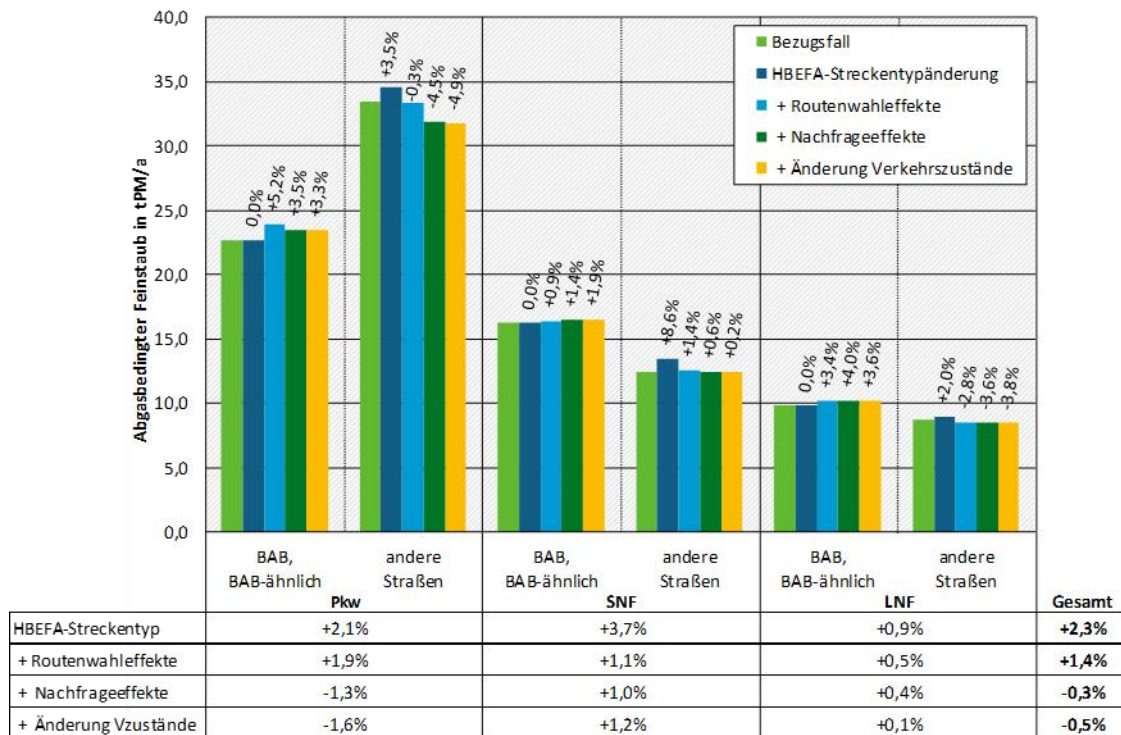
Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart

Abbildung 94: Wirkung der Maßnahme „Regelgeschwindigkeit im Innerortsbereich von 30 km/h“ auf die durchschnittliche Geschwindigkeit für die Stadtregion Stuttgart



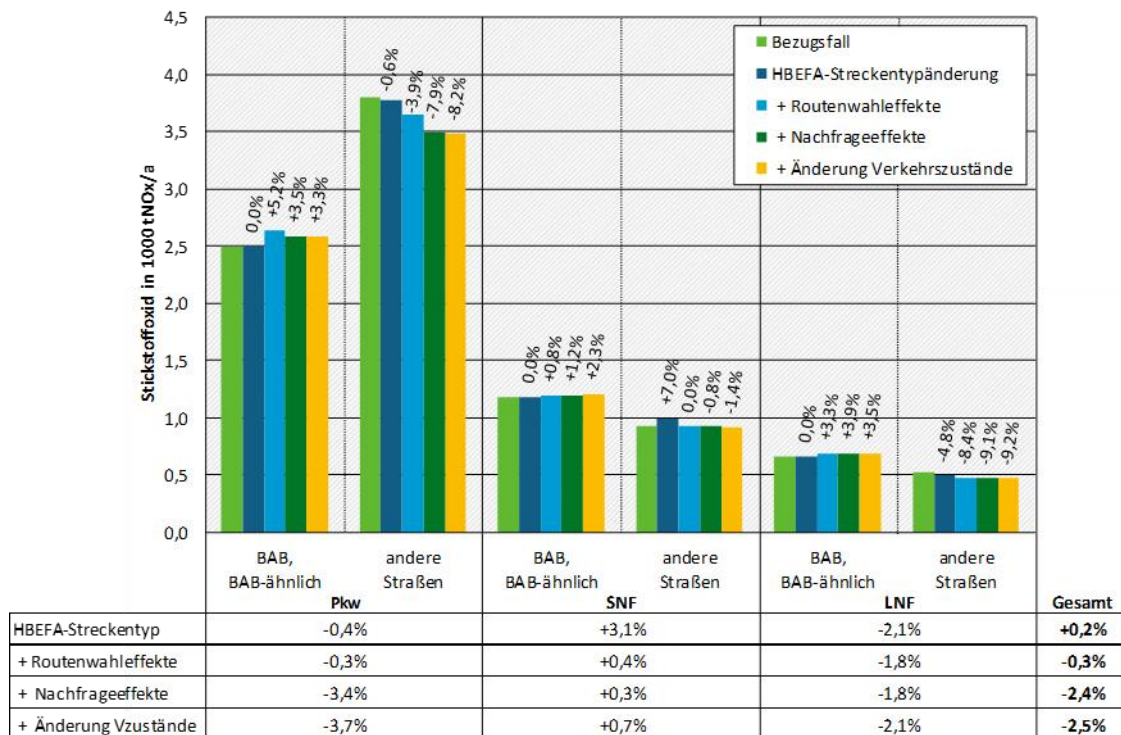
Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart

Abbildung 95: Wirkung der Maßnahme „Regelgeschwindigkeit im Innerortsbereich von 30 km/h“ auf den abgasbedingten Feinstaub für die Stadtregion Stuttgart



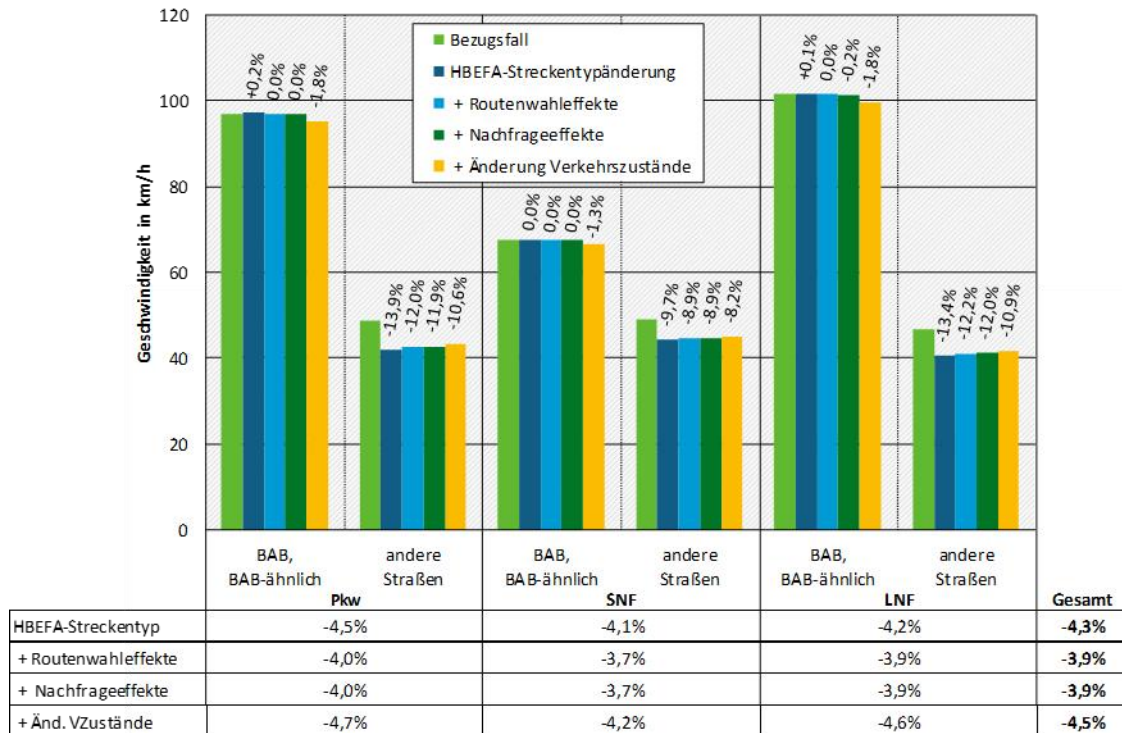
Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart

Abbildung 96: Wirkung der Maßnahme „Regelgeschwindigkeit im Innerortsbereich von 30 km/h“ auf den Stickstoffoxidausstoß für die Stadtregion Stuttgart



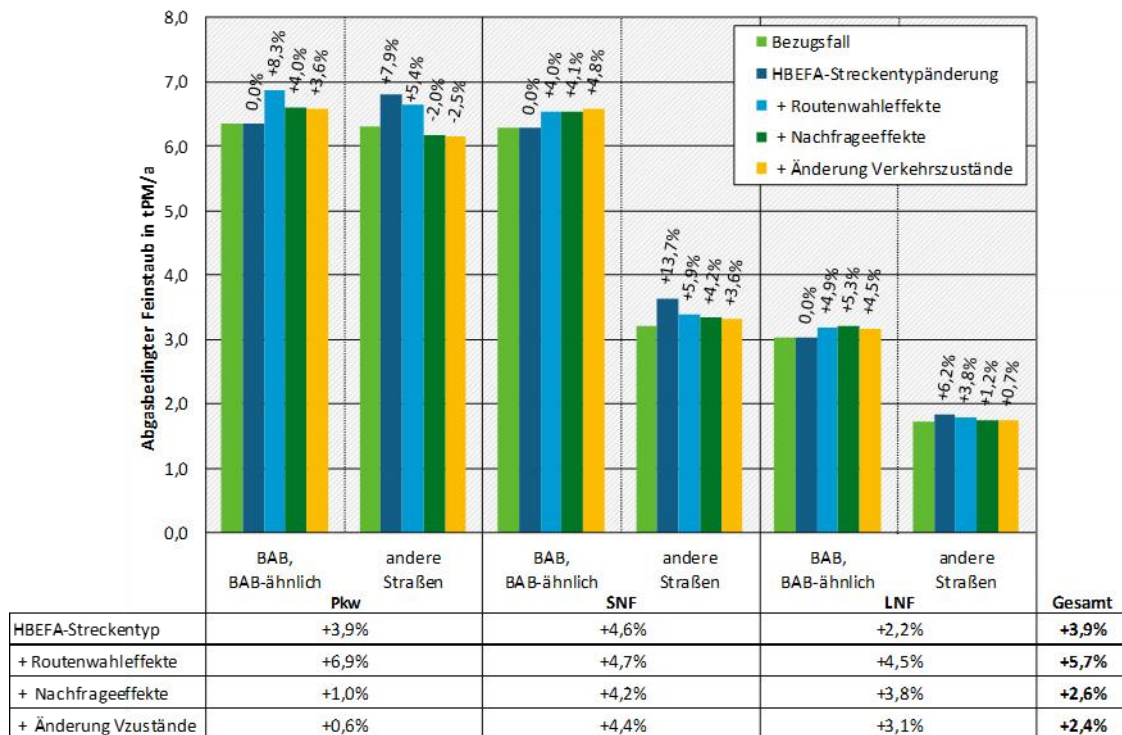
Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart

Abbildung 97: Wirkung der Maßnahme „Regelgeschwindigkeit im Innerortsbereich von 30 km/h“ auf die durchschnittliche Geschwindigkeit für die Stadtregion Magdeburg



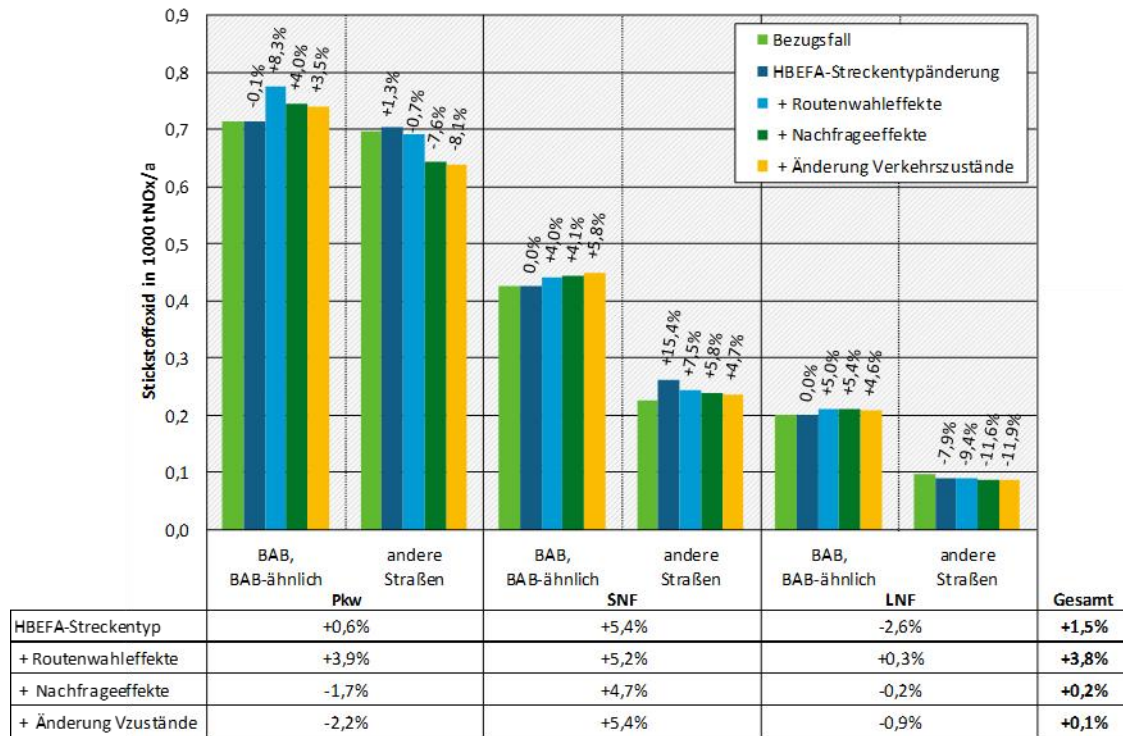
Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart

Abbildung 98: Wirkung der Maßnahme „Regelgeschwindigkeit im Innerortsbereich von 30 km/h“ auf den abgasbedingten Feinstaub für die Stadtregion Magdeburg



Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart

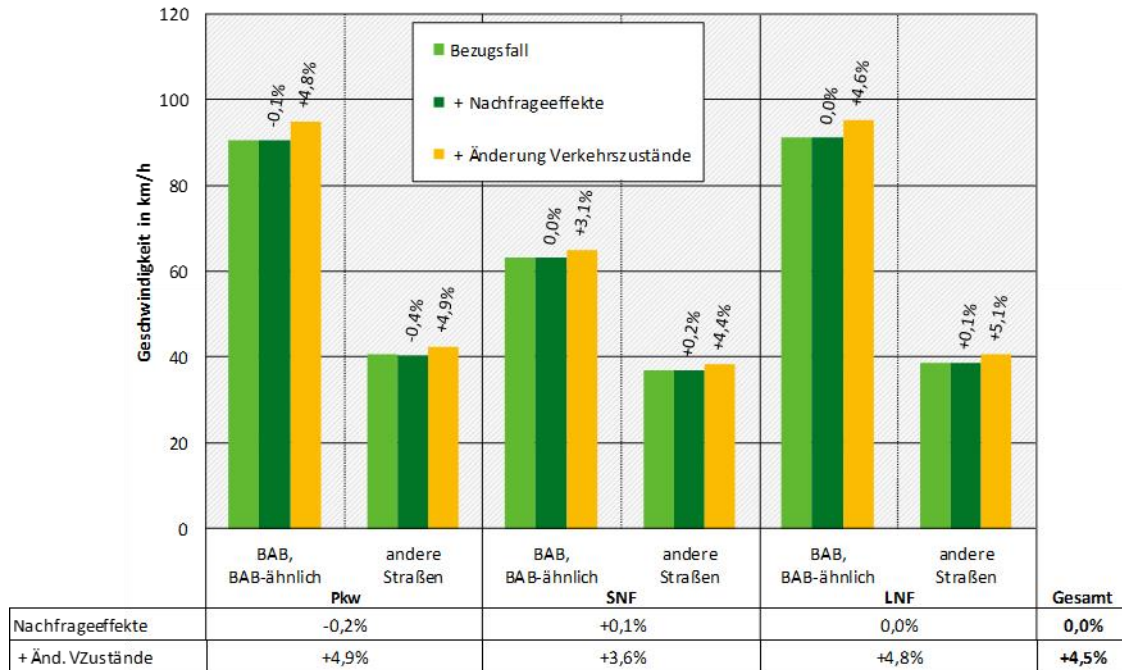
Abbildung 99: Wirkung der Maßnahme „Regelgeschwindigkeit im Innerortsbereich von 30 km/h“ auf den Stickstoffoxidausstoß für die Stadtregion Magdeburg



Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart

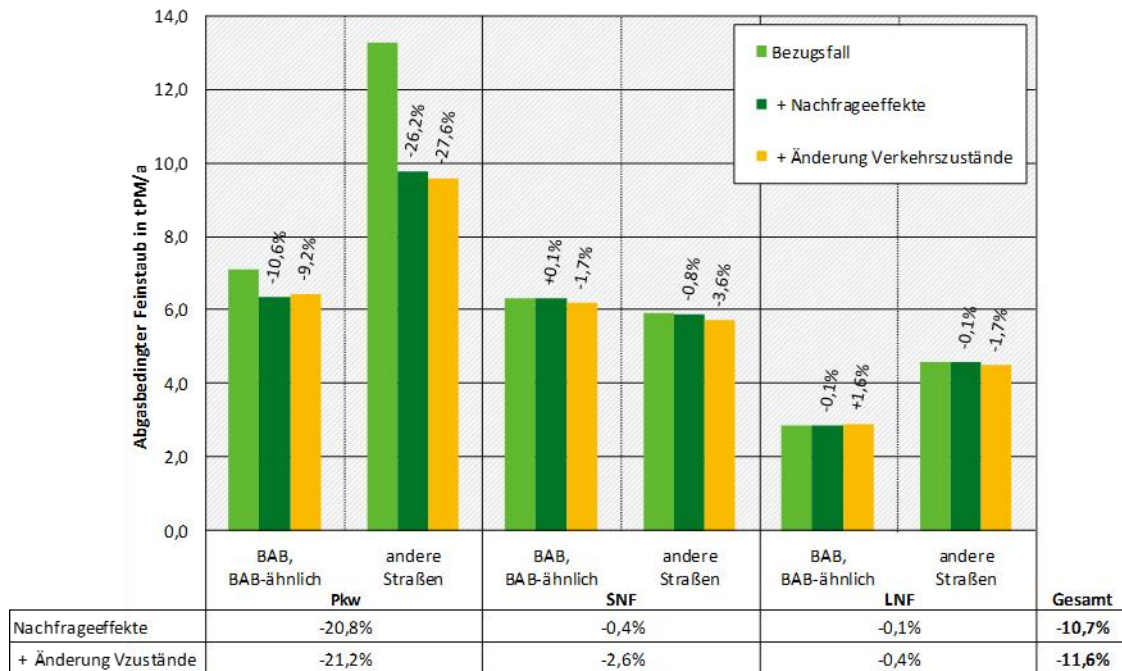
A.6.4 Erhöhung des durchschnittlichen Besetzungsgrads

Abbildung 100: Wirkung der Maßnahme „Erhöhung des durchschnittlichen Besetzungsgrads“ auf die durchschnittliche Geschwindigkeit



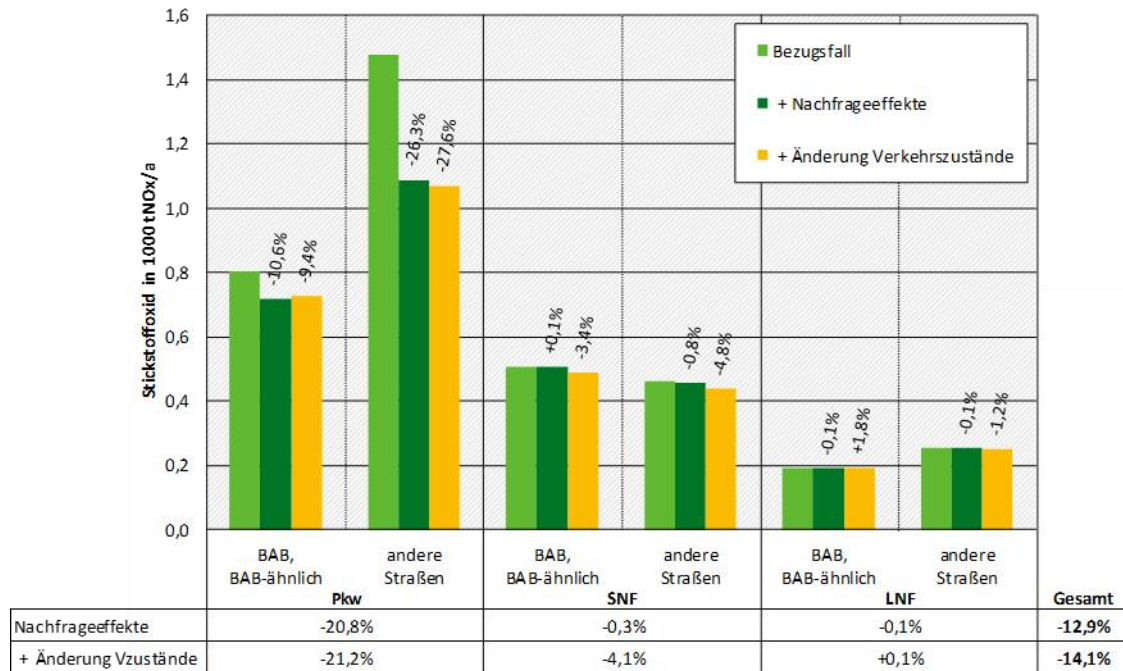
Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart

Abbildung 101: Wirkung der Maßnahme „Erhöhung des durchschnittlichen Besetzungsgrads“ auf den abgasbedingten Feinstaub



Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart

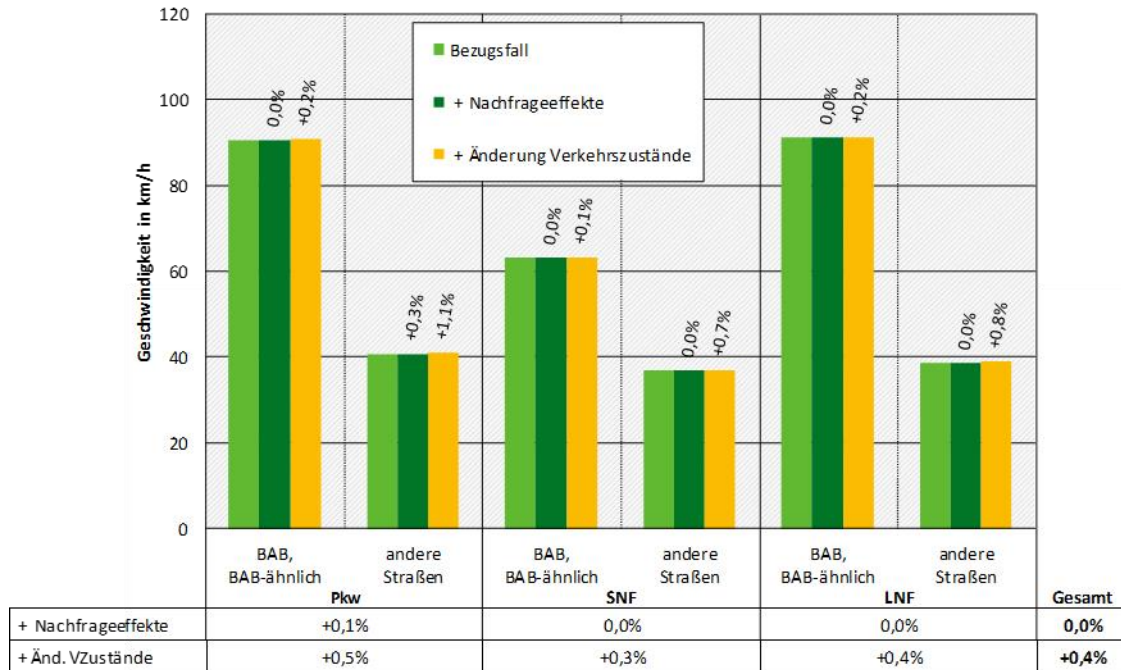
Abbildung 102: Wirkung der Maßnahme „Erhöhung des durchschnittlichen Besetzungsgrads“ auf den Stickstoffoxidausstoß



Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart

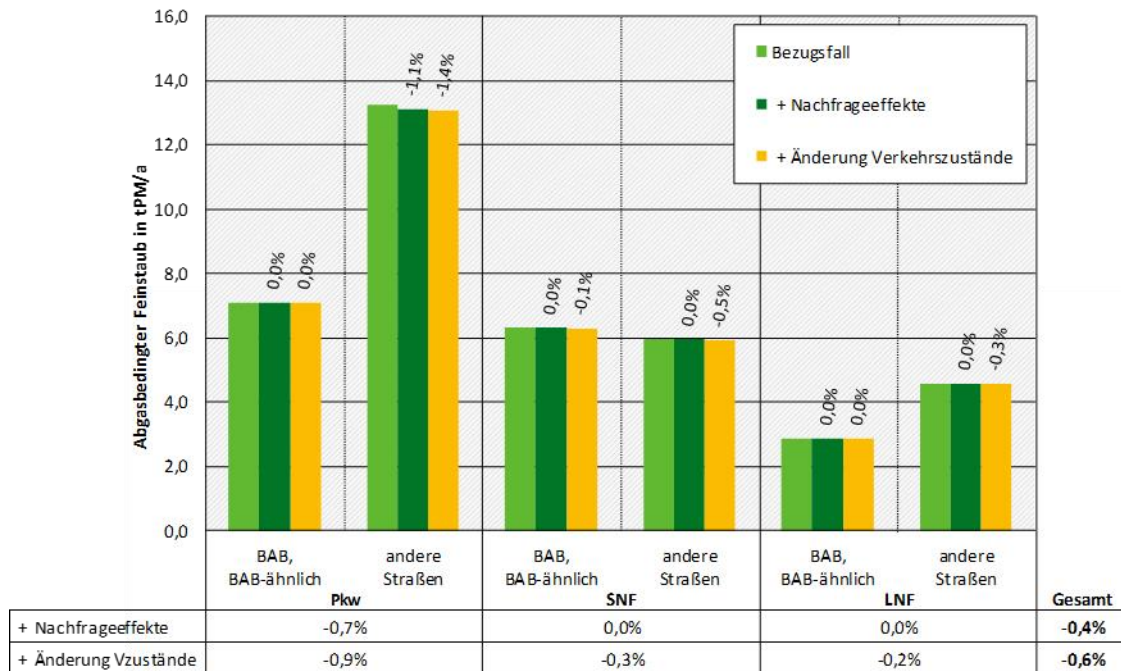
A.6.5 Reduzierung des Parksuchverkehrs

Abbildung 103: Wirkung der Maßnahme „Reduzierung des Parksuchverkehrs – konservative Annahme“ auf die durchschnittliche Geschwindigkeit



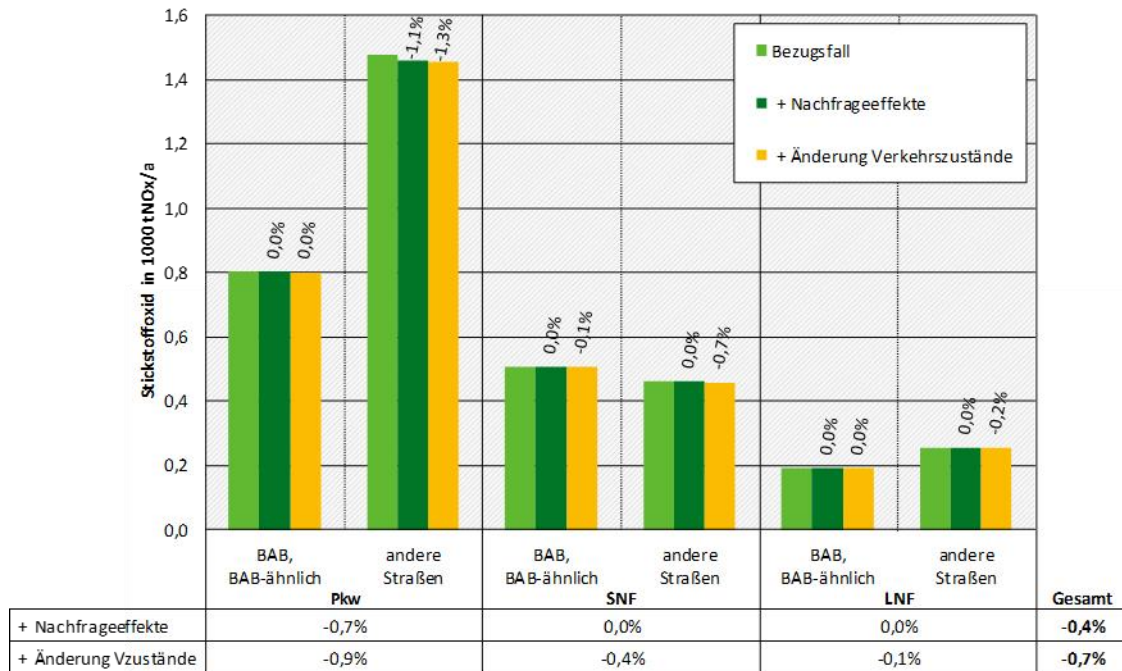
Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart

Abbildung 104: Wirkung der Maßnahme „Reduzierung des Parksuchverkehrs – konservative Annahme“ auf den abgasbedingten Feinstaub



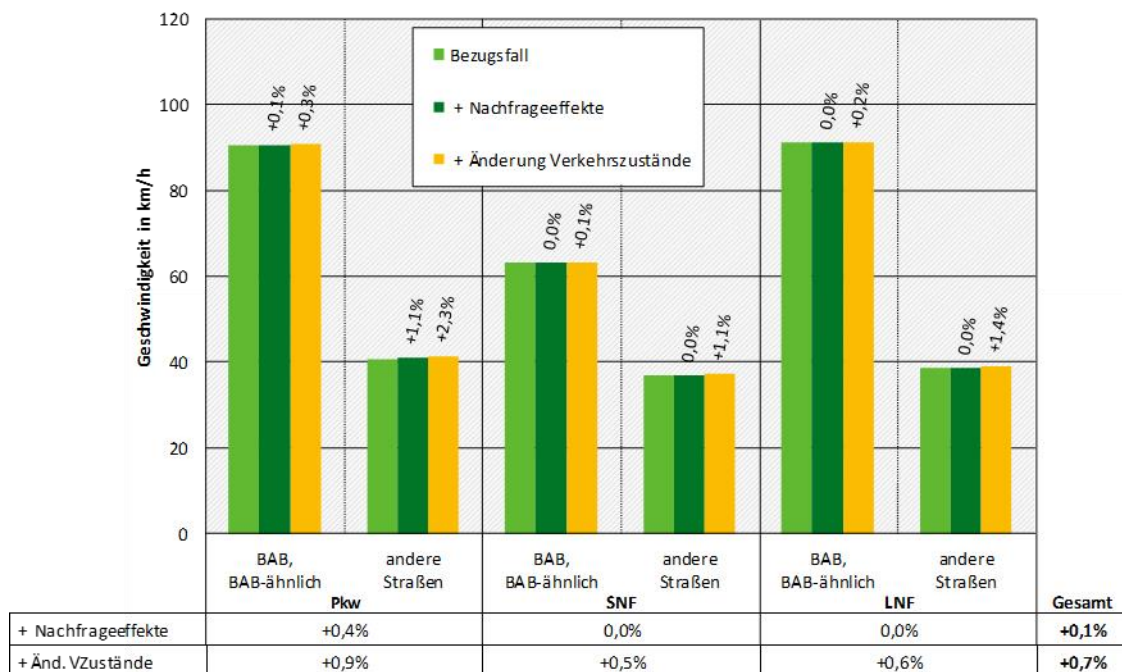
Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart

Abbildung 105: Wirkung der Maßnahme „Reduzierung des Parksuchverkehrs – konservative Annahme“ auf den Stickstoffoxidausstoß



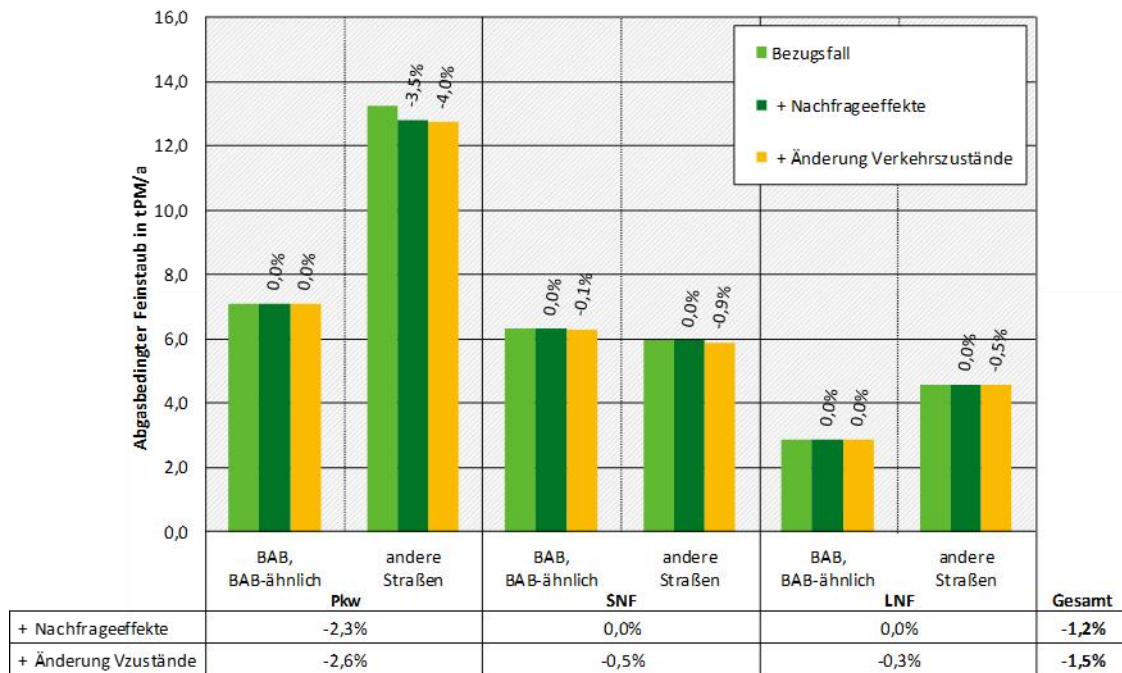
Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart

Abbildung 106: Wirkung der Maßnahme „Reduzierung des Parksuchverkehrs – optimistische Annahme“ auf die durchschnittliche Geschwindigkeit



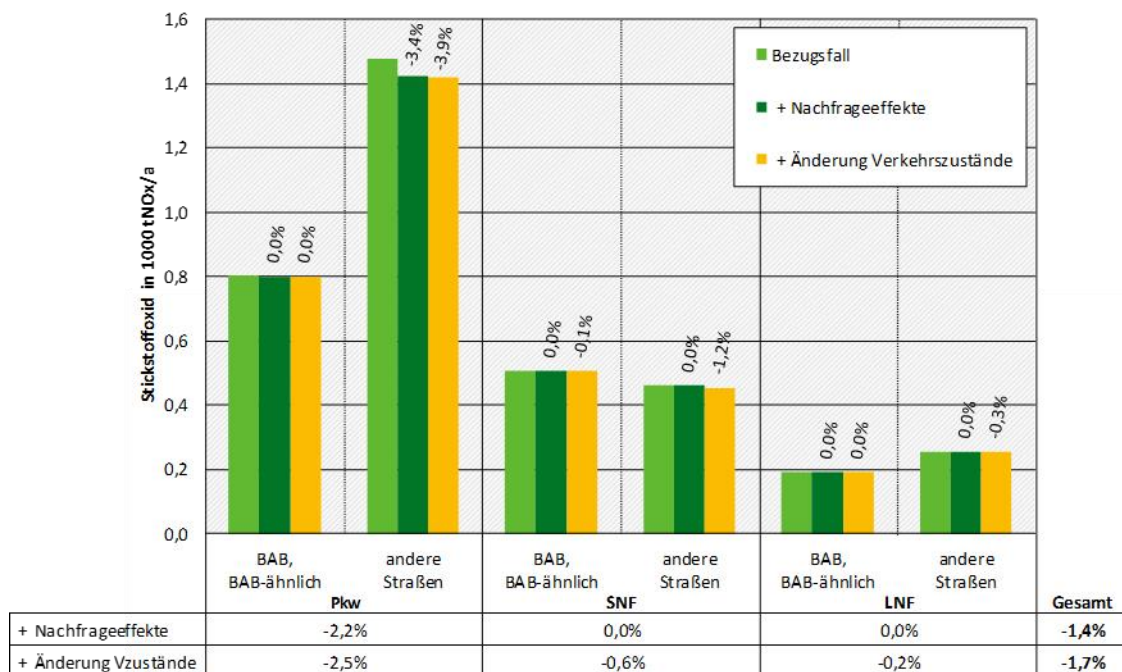
Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart

Abbildung 107: Wirkung der Maßnahme „Reduzierung des Parksuchverkehrs – optimistische Annahme“ auf den abgasbedingten Feinstaub



Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart

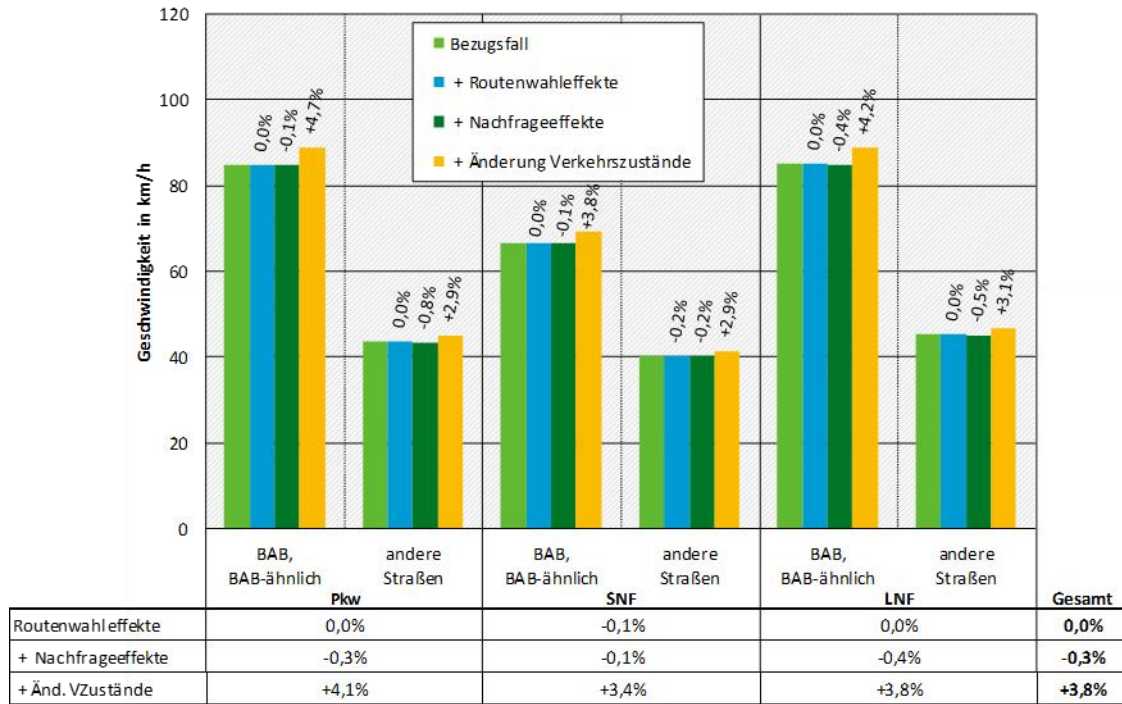
Abbildung 108: Wirkung der Maßnahme „Reduzierung des Parksuchverkehrs – optimistische Annahme“ auf den Stickstoffoxidausstoß



Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart

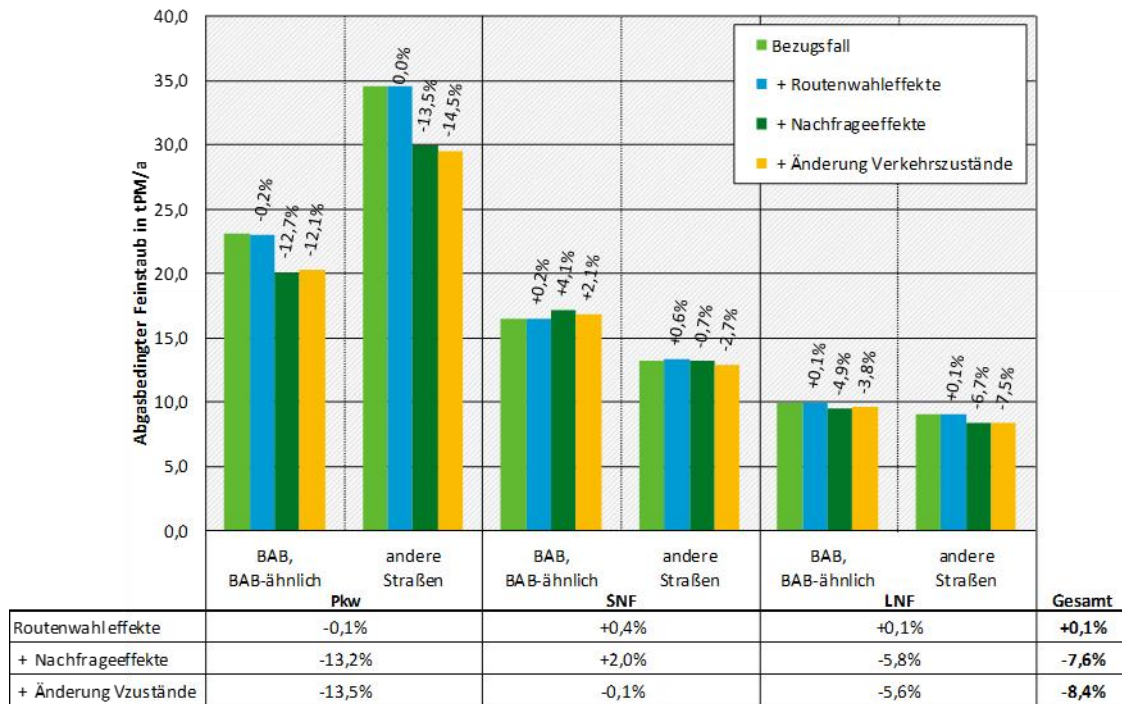
A.6.6 Fahrleistungsabhängige Pkw-Maut von 6 ct/km

Abbildung 109: Wirkung der Maßnahme „Fahrleistungsabhängige Pkw-Maut von 6 ct/km“ auf die durchschnittliche Geschwindigkeit



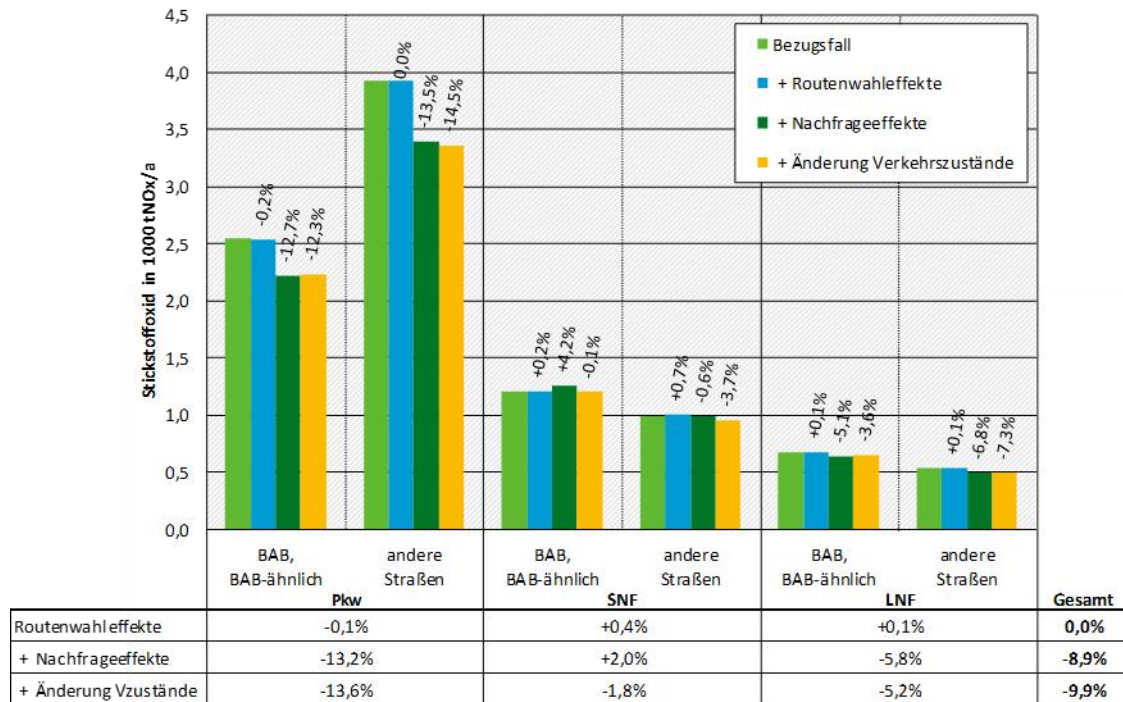
Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart

Abbildung 110: Wirkung der Maßnahme „Fahrleistungsabhängige Pkw-Maut von 6 ct/km“ auf den abgasbedingten Feinstaub



Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart

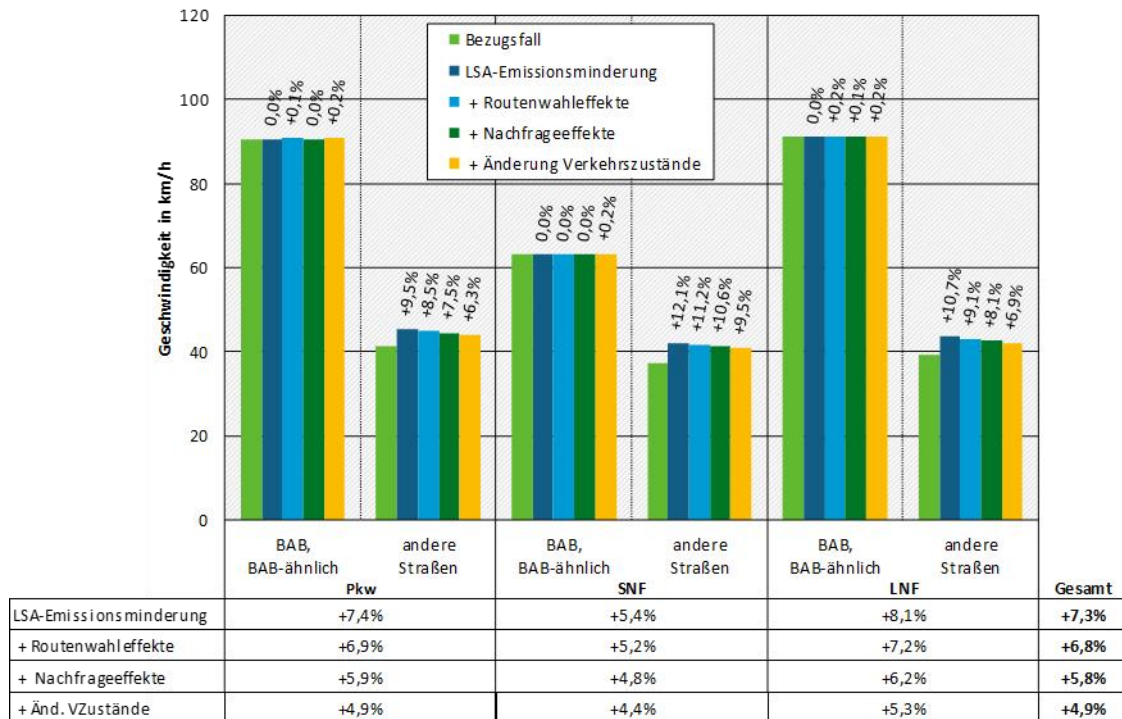
Abbildung 111: Wirkung der Maßnahme „Fahrleistungsabhängige Pkw-Maut von 6 ct/km“ auf den Stickstoffoxidausstoß



Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart

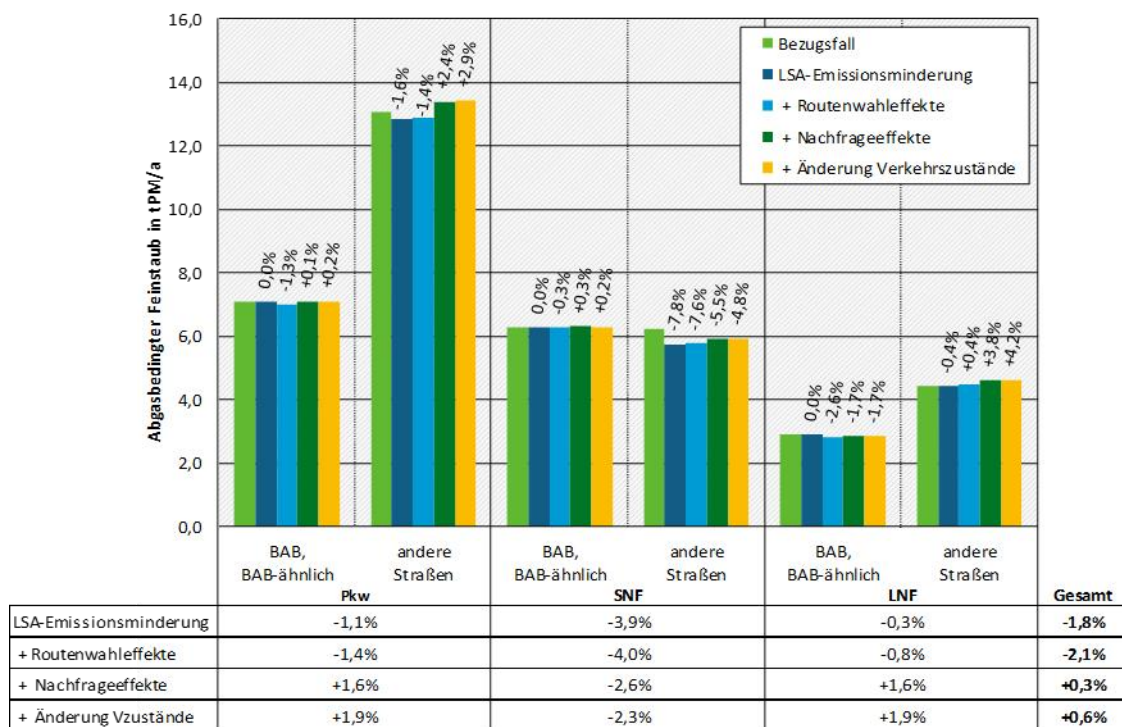
A.6.7 Optimierung des MIV-Verkehrsflusses an LSA-Knotenpunkten im Innerortsbereich

Abbildung 112: Wirkung der Maßnahme „Optimierung des MIV-Verkehrsflusses an LSA-Knotenpunkten im Innerortsbereich“ auf die durchschnittliche Geschwindigkeit



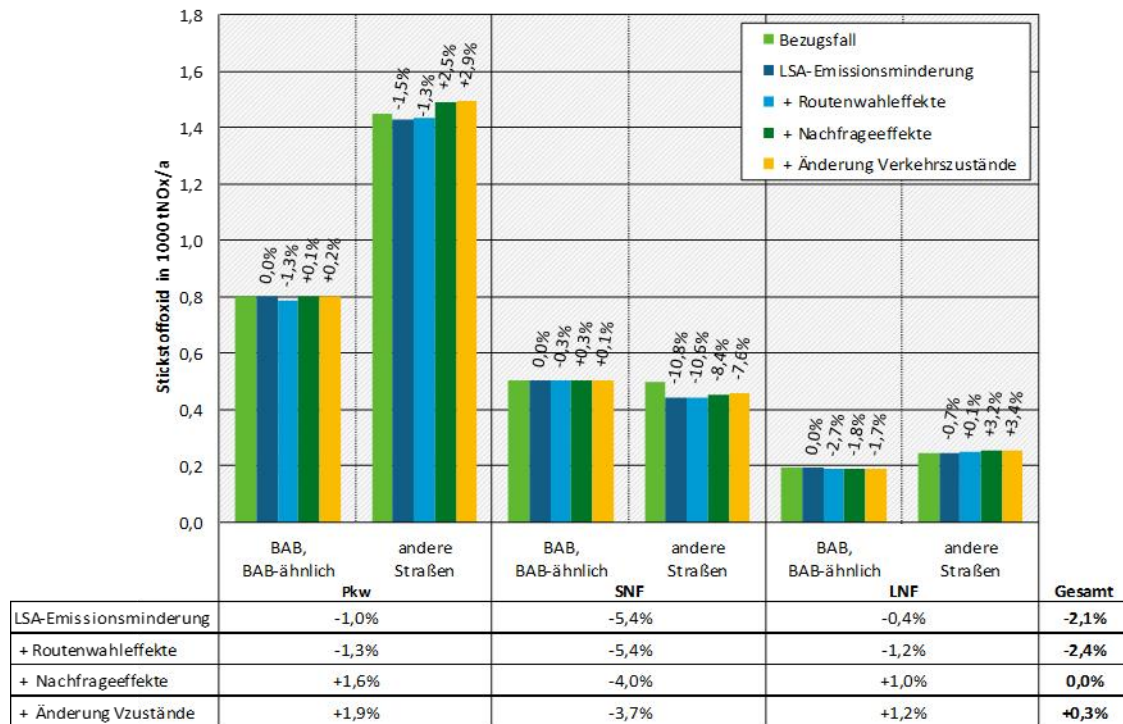
Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart

Abbildung 113: Wirkung der Maßnahme „Optimierung des MIV-Verkehrsflusses an LSA-Knotenpunkten im Innerortsbereich“ auf den abgasbedingten Feinstaub



Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart

Abbildung 114: Wirkung der Maßnahme „Optimierung des MIV-Verkehrsflusses an LSA-Knotenpunkten im Innerortsbereich“ auf den Stickstoffoxidausstoß



Quelle: eigene Darstellung, ISV Universität Stuttgart

A.7 Vergleich der Forschungsvorhaben „Umweltwirkungen einer innerörtlichen Regelgeschwindigkeit von 30 km/h“ und „Flüssiger Verkehr für Klimaschutz und Luftreinhaltung“

A.7.1 Einleitung

Die Projekte „Umweltwirkungen einer innerörtlichen Regelgeschwindigkeit von 30 km/h“ und „Flüssiger Verkehr für Klimaschutz und Luftreinhaltung“ behandeln beide die Auswirkungen von Tempo 30 als Regelgeschwindigkeit innerorts, wobei das Projekt „Flüssiger Verkehr“ keine Lärmwirkungen betrachtete. Das vorliegende Memo beschreibt die Unterschiede in der Herangehensweise der beiden Forschungsvorhaben und erklärt die Ursachen für relevante Abweichungen bei den Ergebnissen im Bereich Verkehr und Luftschadstoffe.

Grundlage dieses Memos sind Abstimmungen der Bearbeitenden beider Projekte vom 29.03.2022 und 07.04.2022. Teilgenommen haben folgende Personen:

Vom Projekt „Flüssiger Verkehr für Klimaschutz und Luftreinhaltung“:

- ▶ Prof. Dr. Markus Friedrich | Universität Stuttgart (nur 29.03.2022)
- ▶ Dr. Matthias Schmaus | Universität Stuttgart
- ▶ Ralf Lohse | PTV (nur 29.03.2022)
- ▶ Jörg Uhlig | PTV

Vom Projekt „Umweltwirkungen einer innerörtlichen Regelgeschwindigkeit von 30 km/h“:

- ▶ Sebastian Eggers | Lärmkontor
- ▶ Dr. Eckhart Heinrichs | LK Argus
- ▶ Tim Klein | Argus Stadt und Verkehr

A.7.2 Allgemeine Unterschiede zwischen den Projekten

Das Projekt „Umweltwirkungen von Tempo 30“ untersucht drei Städte (Halle, Göttingen, Ravensburg), das Projekt „Flüssiger Verkehr für Klimaschutz und Luftreinhaltung“ betrachtet drei Stadtregionen (Dresden, Magdeburg, Stuttgart). Die betrachteten Beispielstädte haben unterschiedliche Strukturen mit entsprechenden Auswirkungen auf die Ergebnisse (Tabelle 112).

Zum Beispiel unterscheiden sich die Beispielstädte hinsichtlich

- ▶ der Anteile ländlicher Bereiche im Gemeindegebiet,
- ▶ der Einwohnerdichte im Umland,
- ▶ der Siedlungsstruktur, insbesondere hinsichtlich Dichte und Ausdehnung,
- ▶ dem Anteil von Fernstraßen mit gebietsfremden Verkehren im Gemeindegebiet, und
- ▶ der ÖPNV-Struktur und -Qualität.

Tabelle 112: Strukturgrößen der Untersuchungsgebiete

| | Flüssiger Verkehr | | | Umweltwirkungen von Tempo 30 | | |
|---------------------------------------|-------------------|-----------|-----------|------------------------------|-----------|------------|
| | Dresden | Magdeburg | Stuttgart | Halle | Göttingen | Ravensburg |
| Fläche [km ²] | 328 | 201 | 207 | 135 | 117 | 92 |
| Einwohnende [Tsd.] | 556 | 236 | 630 | 238 | 117 | 51 |
| Einwohnerdichte [EW/km ²] | 1.696 | 1.173 | 3.045 | 1.762 | 999 | 552 |

Die Vorhaben bilden eine unterschiedliche räumliche Ausdehnung der reduzierten Regelgeschwindigkeit ab und stellen insofern unterschiedliche Maßnahmen dar:

- ▶ „Flüssiger Verkehr“ nimmt an, dass deutschlandweit Tempo 30 als Regelgeschwindigkeit eingeführt wird.
- ▶ „Umweltwirkungen von Tempo 30“ simuliert Tempo 30 nur in der jeweiligen Beispielstadt.

Zwar wird in beiden Vorhaben nur der Verkehr innerhalb des administrativen Stadtgebiets der Beispielstädte (siehe unten) bilanziert. Ein- und auspendelnde Verkehre machen davon aber einen bedeutenden Anteil aus. Diese werden bei „Flüssiger Verkehr“ zusätzlich durch die herabgesetzten Regelgeschwindigkeiten in den umliegenden Gemeinden beeinflusst. Bei „Umweltwirkungen von Tempo 30“ gibt es diesen Einfluss nicht.

Die Vorhaben treffen in der Modellierung unterschiedliche Annahmen und verwenden teilweise unterschiedliche Datengrundlagen:

- ▶ „Flüssiger Verkehr“ setzt in der Simulation eine 10 Prozent geringere Streckenkapazität infolge von Tempo 30 ausgehend von Tempo 50 und eine 6 Prozent geringere Kapazität bei Tempo 30 ausgehend von Tempo 40 an.
 „Umweltwirkungen von Tempo 30“ setzt eine unveränderte Kapazität an. Beide Ansätze sind plausibel begründbar; sie bilden die Spannweite der möglichen Ansätze ab. Beispielsweise gibt es in der Praxis verschiedene Ansätze zur Modellierung der Zeitverluste an Knotenpunkten einerseits und auf der Strecke andererseits. Die Annahme aus „Flüssiger Verkehr“ beruht auf Simulationen, die eine um bis zu 10 Prozent reduzierte Kapazität an LSA-Knoten zeigen. „Umweltwirkungen von Tempo 30“ berücksichtigt, dass sich die Kapazitätsreduzierungen nur auf Fahrbeziehungen mit Sättigungsverkehrsstärke auswirken – was in der Regel nur einen Strom je Phase zu den Tagesspitzen betrifft. Es besteht derzeit keine wissenschaftliche Grundlage dafür, eine der beiden Vorgehensweisen zu bevorzugen. Insofern gibt es hier kein richtiges oder falsches Vorgehen, sondern nur die o. g. unterschiedlichen Annahmen. Dass an dieser Stelle noch Forschungsbedarf besteht, zeigt sich auch darin, dass sich aktuell ein BASt-Forschungsvorhaben mit dem Titel „Nachweis der Auswirkungen von Tempo 30 auf die LSA-Steuerung und Kapazität (77.0523)“ mit genau dieser Fragestellung beschäftigt. Dessen Ergebnisse zu diesem Thema werden die Diskussion weiter voranbringen.

- ▶ „Flüssiger Verkehr“ geht davon aus, dass das ÖPNV-Angebot von Tempo 30 nicht beeinträchtigt wird. „Umweltwirkungen von Tempo 30“ berücksichtigt Fahrzeitverluste auch beim ÖPNV.
- ▶ Die Emissionsfaktoren werden in beiden Projekten aus dem Handbuch für Emissionsfaktoren entnommen (HBEFA Version 4.1). Die Zuordnung der Straßenkategorien war bei „Umweltwirkungen von Tempo 30“ bereits in den verwendeten Verkehrsnachfragemodellen hinterlegt. Die Zuordnung war bei „Flüssiger Verkehr“ ein wichtiger Bestandteil des Projektes, die Methodik kann dem dortigen Bericht entnommen werden.
- ▶ Beide Projekte differenzieren die Straßen nach „innerorts“ und „außerorts“ anhand der Landnutzungsdaten, die auf den clc5-Datensatz des Bundesamts für Kartografie und Geodäsie zurückgeführt werden können.

Die Auswahl der Strecken, die durch die Maßnahme betroffen sind, wurde in beiden Projekten vergleichbar getroffen, nämlich Tempo 30 auf allen innerörtlichen Straßen außer auf ausgewählten mehrstreifigen Magistralen, wo weiterhin eine höhere Geschwindigkeit zulässig ist. Die Ausnahmen sind in den Projektberichten dargestellt. Trotz vergleichbarer Kriterien ergeben sich in Abhängigkeit von den Strukturen im Gemeindegebiet (siehe oben) unterschiedliche Anteile der von Tempo 30 betroffenen Streckenlänge bzw. Fahrleistung in den jeweiligen untersuchten Städten (Tabelle 113).

Tabelle 113: Von Tempo 30_{neu} betroffene Strecken- und Fahrleistungsanteile in den Untersuchungsgebieten

| | Flüssiger Verkehr | | | Umweltwirkungen von Tempo 30 | | |
|---------------------------------|-------------------|-----------|-----------|------------------------------|-----------|------------|
| | Dresden | Magdeburg | Stuttgart | Halle | Göttingen | Ravensburg |
| Anteil der Streckenlänge | 38,1 % | 24,2 % | 26,4 % | 23,3 % | 22,8 % | 13,8 % |
| Anteil der Fahrleistung | 57,0 % | 51,6 % | 35,1 % | 48,1 % | 30,1 % | 23,9 % |

Die Streckenanteile sind weniger aussagekräftig als die Fahrleistungsanteile, da diese stark von der Tiefe des Netzmodells abhängen. Die Fahrleistungsanteile beziehen sich auf die Fahrleistung aller modellierten Fahrzeugkategorien (Pkw, SNF, LNF)

A.7.3 Bezugsgebiet

Sowohl „Umweltwirkungen von Tempo 30“ als auch „Flüssiger Verkehr“ werten die Ergebnisse für die administrativen Stadtgebiete aus. Alle hier dargestellten Werte beziehen sich auf die administrativen Stadtgebiete.

„Flüssiger Verkehr“ betrachtet in seinem Projektbericht darüber hinaus die Wirkungen in den Stadtregionen, schließt also die umliegenden Gemeinden mit ein. Die Ergebnisse für die dort betrachteten erweiterten Untersuchungsräume sind in diesem Memo nicht dargestellt.

A.7.4 Verkehrsmittelwahl

Beide Vorhaben geben Modal Split Werte aus dem jeweiligen Verkehrsmodell an (Tabelle 114). Relevante Abweichungen gibt es in folgenden Punkten:

- ▶ Die Reduzierung des MIV-Anteils durch Tempo 30 ist bei „Flüssiger Verkehr“ tendenziell höher, weil die reduzierte Regelgeschwindigkeit nicht nur für die betrachtete Gemeinde modelliert wird, sondern für alle innerörtlichen Straßen im Untersuchungsraum (s. o. „Allgemeines“). Verkehre zwischen zwei Gemeinden sind dadurch nicht nur in einer Gemeinde, z. B. am Ziel des Weges, von der verminderten Geschwindigkeit betroffen, sondern auch am Start des Weges und auf allen Innerortsstraßen unterwegs.
- ▶ Die auffällig hohe Fahrleistungsabnahme des MIV in Dresden ist erklärbar durch die große Ost-West-Ausdehnung der Stadt als Band entlang der Elbe, das gleichzeitig sehr gut durch die S-Bahn erschlossen ist.
- ▶ Die Auswirkungen auf den ÖPNV sind in „Umweltwirkungen von Tempo 30“ negativer, weil dort die Fahrtzeitverlängerungen berücksichtigt werden (s. o. „Allgemeines“). Deshalb nimmt der ÖPNV-Anteil bei „Umweltwirkungen von Tempo 30“ grundsätzlich ab, während er bei „Flüssiger Verkehr“ aufgrund der Verlangsamung des MIV grundsätzlich zunimmt.

Beide Vorhaben zeigen aber in Summe ähnliche Tendenzen in den betrachteten Beispielstädten: Grundsätzlich sinkt durch Tempo 30 der MIV und Fuß- und Radverkehr nehmen zu. Lediglich in Ravensburg zeigt der MIV ein positives Vorzeichen, da die Fahrzeiterhöhungen für den ÖPNV überwiegen.

Tabelle 114: Änderung der Modal-Split Werte durch Tempo 30 (Aufkommensbezogener Modal-Split, Quell-, Ziel- und Binnenverkehre)

| | Flüssiger Verkehr | | | Umweltwirkungen von Tempo 30 | | |
|-------------|-------------------|-----------|-----------|------------------------------|-----------|------------|
| | Dresden | Magdeburg | Stuttgart | Halle | Göttingen | Ravensburg |
| Fuß | +1,4 % | +0,7 % | +0,4 % | +2,9 % | +0,2 % | -0,4 % |
| Rad | +0,8 % | +0,6 % | +0,2 % | -0,4 % | +0,3 % | +1,0 % |
| MIV | -3,7 % | -1,8 % | -1,3 % | -1,7 % | -0,5 % | +0,1 % |
| ÖPNV | +1,5 % | +0,5 % | +0,7 % | -0,8 % | 0,0 % | -0,6 % |

A.7.5 Fahrleistungen

Die Vorhaben zeigen in Summe dieselbe Tendenz (Tabelle 115). Die Fahrleistung nimmt durch die Maßnahme ab. Die unterschiedlich starken Abnahmen resultieren aus den unterschiedlichen Ansätzen in der Modellierung (s. o. „Allgemeines“) und den unter „Verkehrsmittelwahl“ beschriebenen unterschiedlich starken Verlagerungseffekten.

Tabelle 115: Änderung der Fahrleistung durch Tempo 30 (alle modellierten Fahrzeugkategorien: Pkw, SNF, LNF)

| | Flüssiger Verkehr | | | Umweltwirkungen von Tempo 30 | | |
|---------------------------|-------------------|-----------|-----------|------------------------------|-----------|------------|
| | Dresden | Magdeburg | Stuttgart | Halle | Göttingen | Ravensburg |
| Änderung der Fahrleistung | -9,0 % | -5,2 % | -2,7 % | -3,2 % | -2,5 % | -0,5 % |

A.7.6 Level of Service (LoS) / Verkehrszustände

Der Grund für die deutlichen Unterschiede in der Aufteilung der Verkehrszustände im Analysezustand (Tabelle 116) liegt darin, dass sich die Methoden zur Zuordnung der LoS grundlegend unterscheiden:

- ▶ „Umweltwirkungen von Tempo 30“ folgt dem in der Luftreinhaltungsplanung üblichen Vorgehen.
 Hierbei wird die stündliche Verkehrsmenge auf einem Streckenabschnitt mit der stündlichen Kapazität verglichen. Die Kapazität ergibt sich aus Straßentyp und Anzahl der Fahrspuren. Abweichend von dem Vorgehen in der Luftreinhaltungsplanung wird für Halle eine genauere stündliche Verkehrsmenge zugrunde gelegt (sonst: durchschnittlicher täglicher Verkehr über pauschalisierten Tagesgang auf Stunden verteilt), für alle LoS-Ermittlungen wird nicht eine Zuordnung in „Stufen“, sondern „gleitend“ vorgenommen.
 Die Länge eines Streckenabschnitts entspricht dabei jeweils der gesamten Länge von Knoten zu Knoten, für den einheitliche Verkehrsmengen vorliegen. Eine Unterteilung der Abschnitte erfolgt nicht, bei der LoS-Ermittlung würden sich (durch gleiche Verkehrsmenge und gleiche Kapazität) auch keine Unterschiede ergeben. Eine Trennung in Kreuzungsbereich und freie Strecke ist nach HBEFA generell nicht vorgesehen.
 Die Streckentypen nach HBEFA wurden pauschalisiert anhand verschiedener Parameter aus den Verkehrsmodellen (Anzahl Spuren, Klassifizierung Streckentyp, Geschwindigkeiten) vergeben. Eine einheitliche Zuordnung aus den Modellen lag nicht vor.
- ▶ „Flüssiger Verkehr“ leitet die LoS aus Floating Car Data des Anbieters TomTom ab. Die Daten liegen auf Streckenabschnitten mit Längen von i. d. R. einigen hundert Metern vor. Die Zuordnung der LoS erfolgt anhand der Perzentile der gefahrenen Geschwindigkeiten. Die Geschwindigkeiten wurden zur Zuordnung eines LoS des HBEFA anhand der mittleren Geschwindigkeiten der Fahrzyklen verwendet. Die Länge der Streckenabschnitte aus den TomTom-Daten stimmt nicht mit der Länge der Fahrzyklen des HBEFA (z. B. 3,5 km) überein. Da die Fahrzeuge auf jedem Streckenabschnitt unterschiedlichen Geschwindigkeitsperzentilen zugeordnet werden können, werden die innerhalb eines Fahrzyklus durchlaufenen Fahreigenschaften (Halte an Knotenpunkten, freie Fahrt zwischen den Knotenpunkten etc.) aufgrund der Methodik in einzelne Verkehrszustände zerlegt. Im Vergleich zu „Umweltwirkungen von Tempo 30“ entsteht eine extremere Verteilung, d. h. es entfällt mehr Fahrleistung auf die Verkehrszustände flüssig und Stop&Go / Stop&Go II.
- ▶ Die Prüfung der Auswirkungen von unterschiedlichen Verteilungen zeigt, dass die Auswirkungen auf die Ergebnisse der Luftschadstoff-Emissionsmodellierung des Analysefalls im Vergleich zu anderen Modellfaktoren eher gering ausfallen. Lärmauswirkungen wurden im Projekt „Flüssiger Verkehr“ nicht untersucht.

Die Auswirkungen von Tempo 30 auf die LoS (Tabelle 117) unterscheiden sich aufgrund der folgenden Unterschiede in den Modellansätzen:

- ▶ Bei „Flüssiger Verkehr“ bewirkt Tempo 30 gegenüber „Umweltwirkungen von Tempo 30“ eine größere auslastungsbedingte Verbesserung der Verkehrszustände infolge der stärker gesunkenen Fahrleistungen. Dem wirkt jedoch die Annahme einer herabgesetzten Streckenkapazität entgegen. Weiterhin bewirken die Verlagerungen auf andere Strecken (insbesondere auf Autobahnnetzabschnitte) eine Änderung der Zusammensetzung der jeweiligen LoS. Die dort ermittelten Verkehrszustände unterscheiden sich bereits im Analysefall stark von jenen Streckenabschnitten, die von Tempo-30-Maßnahmen betroffen sind.
- ▶ „Umweltwirkungen von Tempo 30“ geht im Rahmen der LoS-Ermittlung davon aus, dass die Kapazität der Tempo-30-Abschnitte gegenüber Tempo 50 grundsätzlich unverändert ist. Es gibt somit nur die Veränderung der LoS-Zuordnung durch die geänderten Verkehrsmengen. Andere Ansätze sind nicht bekannt, im Rahmen der Luftreinhalteplanung werden auch für Tempo-30-Hauptverkehrsstraßen keine abweichenden Ansätze vorgenommen.

Die Begriffe „flüssig“ usw. werden in der Verkehrsplanung und im HBEFA zwar gleichlautend verwendet, aber unterschiedlich mit Inhalt gefüllt und verstanden. Hier besteht eine große Gefahr von Missverständnissen.

- ▶ In der Verkehrsplanung wird nach HBS¹ die Verkehrsqualität durch die QSV (Qualitätsstufe des Verkehrsablaufs) an Strecken und Knotenpunkten bzw. die SAQ (Stufen der Angebotsqualität) bei Betrachtung von Netzabschnitten beschrieben. Der Begriff „freier Verkehrsfluss“ wird hier auf Strecken für die beste QSV verwendet, die Bemessungskriterien sind auf Autobahnen der Auslastungsgrad, auf Land- und Stadtstraßen die Verkehrsdichte.
- ▶ Im HBEFA bedeutet „flüssig“ „free traffic flow“.² Die Klasse „flüssig“ (LoS 1) wird bei geringen stündlichen Verkehrsmengen gewählt, dabei ist stets eine mittlere Verkehrsmenge pro Stunde oder mittlere Geschwindigkeit in einem Messintervall (z. B. >5 Minuten) die Grundlage der Bewertung. Nach einer Studie zu den Daten im HBEFA und TREMOD³ wird für Agglomerationen typischerweise von <10 Prozent flüssigem Verkehr ausgegangen.
- ▶ Die Teilnehmenden der diesem Memo zugrundeliegenden Abstimmungsgespräche sind sich einig, dass die teilweise ähnlichen Fachbegriffe bei den Schnittstellen zwischen Verkehrsmodellen und HBEFA zu Problemen führen können. So ist die Kapazität im Verkehrsmodell (Grundlage für die CR-Funktion) nicht direkt zu einer Kapazität für die LoS-Bestimmung (z. B. nach dem auch von IVU-Umwelt publizierten Modell) zu überführen. Die Übernahme von Modellparametern sollte daher stets kritisch geprüft werden.

¹ FGSV: Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS), Ausgabe 2015

² Work programme 2016 – 2018 for HBEFA Version 4.1, Report of the work carried out for work package 2, April 2019

³ Umweltbundesamt (Hrsg.) / IFEU (Bearb.): Aktualisierung und Recherche zu Emissionsfaktoren von Euro 5- und Euro 6-Fahrzeugen und nachgerüsteten Kfz und Übertragung der Daten ins Handbuch für Emissionsfaktoren (HBEFA) und in TREMOD, FKZ 3711 45 105, AP 200, Dezember 2013

Tabelle 116: Anteile der Pkw-Fahrleistung nach Verkehrszuständen im Analysefall Tempo 50

| | Flüssiger Verkehr | | | Umweltwirkungen von Tempo 30 | | |
|---------------------|-------------------|-----------|-----------|------------------------------|-----------|------------|
| | Dresden | Magdeburg | Stuttgart | Halle | Göttingen | Ravensburg |
| Flüssig | 45,8 % | 60,1 % | 53,9 % | 19,2 % | 16,1 % | 15,7 % |
| Dicht | 28,3 % | 22,6 % | 27,7 % | 56,2 % | 61,1 % | 49,1 % |
| Gesättigt | 20,1 % | 11,3 % | 12,2 % | 19,7 % | 19,9 % | 28,3 % |
| Stop + Go | 3,9 % | 3,7 % | 3,8 % | 3,7 % | 2,8 % | 6,3 % |
| Stop + Go II | 2,0 % | 2,2 % | 2,5 % | 1,3 % | 0,0 % | 0,5 % |

Tabelle 117: Änderung der Fahrleistungsanteile an den Verkehrszuständen durch Tempo 30 in Prozentpunkten

| | Flüssiger Verkehr | | | Umweltwirkungen von Tempo 30 | | |
|---------------------|-------------------|-----------|-----------|------------------------------|-----------|------------|
| | Dresden | Magdeburg | Stuttgart | Halle | Göttingen | Ravensburg |
| Flüssig | -0,9 % | -0,3 % | -0,2 % | +1,1 % | +1,6 % | +0,8 % |
| Dicht | -0,6 % | 0,0 % | 0,0 % | -1,1 % | -0,4 % | -0,1 % |
| Gesättigt | +2,0 % | +0,7 % | +0,5 % | -0,5 % | -2,0 % | -0,7 % |
| Stop + Go | -0,3 % | -0,3 % | -0,1 % | +0,5 % | +0,7 % | +0,1 % |
| Stop + Go II | -0,3 % | -0,2 % | -0,1 % | 0,0 % | +0,1 % | 0,0 % |

A.7.7 CO₂-Emissionen

Für den Kraftfahrzeugverkehr (Pkw, SNF, LNF) kommen die beiden Untersuchungen bei den CO₂-Emissionen je Fahrzeugkilometer im Analysefall (Tempo 50) zu ähnlichen Ergebnissen. Abweichungen resultieren größtenteils aus den unterschiedlichen Zusammensetzungen der Fahrzeugkategorien (Lkw-Anteil).

Auch die Änderungen der CO₂-Emissionen je Fahrzeugkilometer durch Tempo 30 sind mit +1,3 bis +3,4 Prozent im Kfz-Verkehr bei „Umweltwirkungen von Tempo 30“ und +0,7 bis +3,7 Prozent bei „Flüssiger Verkehr“ ähnlich. Die Zunahme der kilometerspezifischen Emissionen ist dadurch bedingt, dass nach HBEFA 4.1 für Pkw die Emissionsfaktoren für Tempo-30-Strecken im Durchschnitt höher sind als für Tempo-50-Strecken. Die unterschiedlichen Größen sind erklärbar. So ist beispielsweise der Wert in Stuttgart mit +0,7 Prozent so gering, weil dort auf einem beträchtlichen Teil des Hauptstraßennetzes bereits im Bestand ein Tempolimit von 40 km/h gilt.

Die Unterschiede bei den resultierenden Änderungen der verkehrsbedingten CO₂-Emissionen in den Beispielstädten (Tabelle 118) erklären sich damit vornehmlich aus der unterschiedlichen Stärke der Fahrleistungsänderung und weniger aus den Unterschieden bei den kilometerspezifischen Emissionen. Aufgrund der beschriebenen Maßnahmenausgestaltung und

Modellannahmen (s. o. „Allgemeines“) dominieren die berechneten starken Fahrleistungsrückgänge bei „Flüssiger Verkehr“. Die CO₂-Emissionen nehmen hier durchweg ab. Bei „Umweltwirkungen von Tempo 30“ ist die Wirkrichtung nicht eindeutig. Die Modellierung zeigt, dass die Maßnahme (aufgrund der steigenden Emission pro km) auch zu Mehremissionen bei CO₂ führen kann. Dieser Aspekt ist für die politische Diskussion von Bedeutung: Der Vergleich zeigt, dass eine kommunal individuelle Tempo-30-Regelung negative Auswirkungen haben kann, weil damit die Verkehrsnachfrage nicht ausreichend beeinflusst werden kann. Bei einer großräumigen Einführung von Tempo 30 als innerörtliche Regelgeschwindigkeit zeigt die Modellierung dagegen, dass der Fahrleistungsrückgang überwiegt und die CO₂-Bilanz der Maßnahme positiv ist.

Tabelle 118: Änderung der CO₂-Emissionen (Pkw, SNF, LNF) durch Tempo 30

| | Flüssiger Verkehr | | | Umweltwirkungen von Tempo 30 | | |
|-----------------------------|-------------------|-----------|-----------|------------------------------|-----------|------------|
| | Dresden | Magdeburg | Stuttgart | Halle | Göttingen | Ravensburg |
| Wirkung auf CO ₂ | -5,7 % | -2,4 % | -2,0 % | -1,9 % | +0,3 % | +2,8 % |

A.7.8 NO_x-Emissionen

Bei „Umweltwirkungen von Tempo 30“ weichen nur die Änderungen von NO_x pro km in Halle mit -5,6 Prozent deutlich von den anderen Städten des Projekts „Umweltwirkungen von Tempo 30“ (+1,4 bis + 2,0 Prozent) sowie „Flüssiger Verkehr“ (+0,6 bis +4,6 Prozent) ab. Da das HBEFA für Straßen mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit > 50 km/h niedrigere NO_x-Emissionen je Fahrzeugkilometer ermittelt als für Straßen mit Tempo 50, kann dies durch den höheren Anteil des Verkehrs auf Strecken mit weiterhin hoher zulässiger Höchstgeschwindigkeit >50 km/h (BAB A 14, B 100, Europachaussee) erklärt werden.

Tabelle 119: Änderung der NO_x-Emissionen (Pkw, SNF, LNF) durch Tempo 30

| | Flüssiger Verkehr | | | Umweltwirkungen von Tempo 30 | | |
|-----------------------------|-------------------|-----------|-----------|------------------------------|-----------|------------|
| | Dresden | Magdeburg | Stuttgart | Halle | Göttingen | Ravensburg |
| Wirkung auf NO _x | -4,9 % | -2,2 % | -2,1 % | -8,6 % | -1,2 % | +1,5 % |

A.7.9 PM-Emissionen

Die Unterschiede der kilometerbezogenen Emissionen (Tabelle 120) ergeben sich aus den Faktoren Abrieb und Aufwirbelung (AWAR), die in „Umweltwirkungen von Tempo 30“ berücksichtigt werden und in „Flüssiger Verkehr“ nicht (dort nur Auspuff).

Auch die Änderungen der PM-Emissionen je Fahrzeugkilometer bei Tempo 30 in „Umweltwirkungen von Tempo 30“ sind durch die AWAR-Emissionen geprägt. Die Fahrzeugemissionen setzt das HBEFA für Geschwindigkeiten <80 km/h deutlich höher an (SNF: 0,70 g/km für <80 km/h, 0,13 g/km ab 80 km/h; d. h. -81 Prozent; für Pkw ist die Minderung mit

-9 Prozent deutlich geringer). Daraus resultiert vor allem die relativ hohe Minderung für Halle (-7,3 Prozent pro Fahrzeug-km), da Verkehre von Strecken mit vormals Tempo 50 (Merseburger Straße, An der Magistrale) auf Strecken mit Tempo ≥ 80 (Europachaussee, B 80) verlagert werden.

Durch den unterschiedlichen Bilanzrahmen (AWAR-Emissionen ein-/ausgeschlossen) ergeben sich auch Unterschiede in den Gesamtergebnissen (Tabelle 121). Aufgrund des größeren Bilanzrahmens erfassen die Ergebnisse des Projekts „Umweltwirkungen von Tempo 30“ die realen Wirkungen der Maßnahme besser und sind damit als Entscheidungsgrundlage geeigneter. Da die Gesamtwirkung aus der Multiplikation aus Fahrleistung und spezifischen Emissionen je Fzg.-km resultiert, ist wegen der höheren Fahrleistungsminderungen bei „Flüssiger Verkehr“ davon auszugehen, dass sich unter Einschluss der AWAR-Emissionen ebenfalls ein Emissionsrückgang, also ein positiver Effekt der Maßnahme, einstellen würde.

Tabelle 120: Mittlere spezifische PM-Emissionen je Fzg.-km (Pkw, SNF, LNF) im Analysefall und Änderung durch Tempo 30

| | Flüssiger Verkehr | | | Umweltwirkungen von Tempo 30 | | |
|-------------------------------------|-------------------|-----------|-----------|------------------------------|-----------|------------|
| | Dresden | Magdeburg | Stuttgart | Halle | Göttingen | Ravensburg |
| Spezifische Emission [mg/km] | 6,12 | 5,22 | 5,64 | 60,10 | 63,40 | 65,50 |
| Änderung durch Tempo 30 | +10,0 % | +9,2 % | +4,1 % | -7,3 % | -1,6 % | -0,8 % |

Tabelle 121: Änderung der PM-Emissionen (Pkw, SNF, LNF) durch Tempo 30

| | Flüssiger Verkehr | | | Umweltwirkungen von Tempo 30 | | |
|-----------------------|-------------------|-----------|-----------|------------------------------|-----------|------------|
| | Dresden | Magdeburg | Stuttgart | Halle | Göttingen | Ravensburg |
| Wirkung auf PM | +0,1 % | +3,5 % | +1,3 % | -10,2 % | -4,1 % | -1,3 % |