

Modell für die Berechnung von CO₂-Emissionen

zur Begleitung der Antragstellung
zu den Richtlinien und Grundsätzen
über die Gewährung von Zuwendungen oder Zuweisungen
zur Förderung der Forschung, Einführung und Nutzung
intelligenter Verkehrssysteme

Version 1.1

Stand: 15.01.2019

erstellt von:

Ministerium für Landesentwicklung und Verkehr
Turmschanzenstraße 30
39114 Magdeburg

Dieses Dokument wurde nach bestem Wissen erstellt, dennoch kann für etwaige Fehler keine Haftung übernommen werden. Wir bitten die Leserinnen und Leser, eventuelle Fehler oder Auslassungen mitzuteilen, damit diese in einer späteren Fassung des Dokumentes korrigiert werden können.

Magdeburg, 15.01.2019

Inhalt

0	Versionierung	6
1	Einführung	7
2	Hintergrund	8
3	Begriffsdefinitionen	11
4	Verkehrliche Veränderungsprozesse	13
5	Mathematisches Modell	15
5.1	Veränderung des Modal Split	15
5.1.1	Modellansatz	15
5.1.2	Modellgrundlagen	16
5.1.3	Berechnungsformeln für die Verlagerung vom IV zum ÖPNV	20
5.1.4	Berechnungsformeln für die Verlagerung vom ÖPNV zum IV	24
5.2	Veränderung der Verkehrsleistung	27
5.2.1	Modellansatz	27
5.2.2	Modellgrundlagen	28
5.2.3	Berechnungsformeln	29
5.3	Verstetigung des Kraftverkehrs	32
5.3.1	Modellansatz	32
5.3.2	Modellgrundlagen	33
5.4	Steigerung der Elektromobilität	36
5.4.1	Modellansatz	36
5.4.2	Modellgrundlagen	37
6	Bezugsgrößen, Umrechnungen und Variablen	39
6.1	Wirkungszeitraum	39
6.2	Umrechnungen	40
6.2.1	Umrechnung zeitraumbezogener Größen	40
6.2.2	Umrechnung des Kraftstoffverbrauchs in den streckenbezogenen Emissionsfaktor ...	40
6.2.3	Umrechnung des streckenbezogenen in den leistungsbezogenen Emissionsfaktor	40
6.3	Übersicht über die Bezeichnung und Verwendung der Variablen	41
6.4	Übersicht über den Wertebereich der Variablen	43
6.5	Umrechnungsfaktoren	44

6.6	Rundung	44
7	Parameterwerte	45
7.1	Parameter für die Veränderung des Modal Split	45
7.1.1	Streckenbezogener Emissionsfaktor	45
7.1.2	Streckenspezifischer Emissionsfaktor	45
7.1.3	Leistungsbezogener Emissionsfaktor	46
7.1.4	Mittlere Fahrtweite des öffentlichen Personenverkehrs	46
7.1.5	Besetzungszahl des Pkw	47
7.2	Parameter für die Veränderung der Verkehrsleistung	48
7.2.1	Streckenbezogener Emissionsfaktor	48
7.2.2	Streckenspezifischer Emissionsfaktor	48
7.3	Parameter für die Verstetigung des Kraftverkehrs	49
7.3.1	Leerlaufverbrauch	49
7.3.2	Zyklusmehrverbrauch	50
7.3.3	Verkehrszustand	52
7.3.4	CO ₂ -Gehalt des Kraftstoffs	53
7.3.5	Fahrzeugverteilung	53
7.4	Parameter für die Steigerung der Elektromobilität	54
7.4.1	Streckenbezogener Emissionsfaktor	54
7.4.2	Elektromobilitätsgrad	54
7.4.3	Mittlere Reichweite der Elektroautos	54
8	Rechenschema	55
8.1	Rechenschema für die Veränderung des Modal Split	55
8.2	Rechenschema für die Veränderung der Verkehrsleistung	57
8.3	Rechenschema für die Verstetigung des Kraftverkehrs	58
8.4	Rechenschema für die Steigerung der Elektromobilität	59
9	Anwendungsbeispiele	60
9.1	Anwendungsbeispiele für die Veränderung des Modal Split	60
9.1.1	Beispiel 1: Verlagerung vom Individualverkehr zum ÖPNV	60
9.1.2	Beispiel 2: Verlagerung vom Individualverkehr zum ÖPNV	62
9.1.3	Beispiel 3: Verlagerung vom Individualverkehr zum ÖPNV	65

9.1.4	Beispiel 4: Verlagerung vom Individualverkehr zum ÖPNV	68
9.1.5	Beispiel 5: Verlagerung vom Individualverkehr zum ÖPNV	71
9.2	Anwendungsbeispiele für die Veränderung der Verkehrsleistung	74
9.2.1	Beispiel 6: Aufbau eines Parkleitsystems für öffentliche Pkw-Stellplätze.....	74
9.2.2	Beispiel 7: Einrichtung eines Verkehrsdienstes für die Umgehungsstraße.....	76
9.3	Anwendungsbeispiele für die Verstetigung des Kraftverkehrs	78
9.3.1	Beispiel 8: Einführung eines dynamischen Fahrstreifenmanagements	78
9.4	Anwendungsbeispiele für die Steigerung der Elektromobilität	82
9.4.1	Beispiel 9: Aufbau einer Ladesäule für die kommunale Flotte	82
9.4.2	Beispiel 10: Aufbau einer Ladesäule für die bürgerliche Nutzung	84
9.4.3	Beispiel 11: Aufbau eines Mobilitätsportals für das Mobilitätsmanagement.....	86
9.4.4	Beispiel 12: Aufbau einer Ladesäule für die bürgerliche Nutzung	88
10	Abkürzungsverzeichnis	90
11	Symbolverzeichnis	91
12	Tabellenverzeichnis	92
13	Literaturverzeichnis	93

0 Versionierung

Version	Datum	Bemerkung
1.0	16.02.2017	Einführung
1.1	15.01.2019	Vornahme von Anpassungen im Zuge der Zweiten Änderung der Richtlinien und Grundsätze über die Gewährung von Zuwendungen bzw. Zuweisungen zur Förderung der Forschung, Einführung und Nutzung intelligenter Verkehrssysteme.

1 Einführung

Das *Operationelle Programm für den Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) des Landes Sachsen-Anhalt 2014 - 2020* (OP EFRE) (Land Sachsen-Anhalt, 2018) verfolgt u.a. das Ziel, die Kohlenstoffdioxid-(CO₂-)Emissionen im Verkehrssektor zu verringern. Dieses Ziel korrespondiert mit den Klimaschutzzielen der Europäischen Kommission und stellt auf die Reduzierung der Treibhausgasemissionen ab. Zur Umsetzung sollen die CO₂-Einsparpotenziale im Verkehrssektor aktiviert und zudem die Nutzer des Individualverkehrs durch eine Steigerung der Attraktivität des Öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) animiert werden, auf umweltfreundliche Verkehrsmittel umzusteigen. Zu diesen Zwecken werden Investitionen in **Intelligente Verkehrssysteme** (IVS) nach den *Richtlinien und Grundsätzen über die Gewährung von Zuwendungen oder Zuweisungen zur Förderung der Forschung, Einführung und Nutzung intelligenter Verkehrssysteme* (Förderrichtlinien) (Land Sachsen-Anhalt, 2017a; Land Sachsen-Anhalt, 2017b) mit Mitteln aus dem EFRE gefördert. Damit wird ein Rückgang der Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2023 angestrebt.

Gefördert werden Vorhaben, die einen **signifikanten** (bedeutsamen) und **nachhaltigen Beitrag** zur Verringerung von verkehrsbedingten Treibhausgasemissionen leisten¹. Dazu ist zu jedem Vorhaben der Nachweis der zu erwartenden CO₂-Einsparung im Zuge der Antragstellung auf Fördermittel zu erbringen² und das Maß der Einsparung – ausgedrückt als CO₂-Verringerung pro eingesetztem Euro EFRE-Mittel – bei der Auswahl der zu fördernden Vorhaben als Qualitätskriterium mit der höchsten Gewichtung zu berücksichtigen³. Die CO₂-Verringerung ist als Pflichtkriterium gleichzeitig auch das bestimmende Ausschlusskriterium für die Förderanträge⁴.

Gegenstand der Förderung können Vorhaben der praktischen Umsetzung und der anwendungsorientierten Forschung und Entwicklung sein. Die zwei Arten unterscheiden sich hinsichtlich ihres Beitrags zur Verringerung von CO₂-Emissionen wesentlich. So führen Vorhaben der praktischen Umsetzung regelmäßig zu einer unmittelbaren Verringerung, während Vorhaben der Forschung und Entwicklung keine Verringerung bewirken, sondern das Potenzial besitzen, durch Übertragung der Ergebnisse in die Anwendung einen Beitrag zur Verringerung von CO₂-Emissionen leisten zu können. In beiden Fällen setzt der quantitative Nachweis der Verringerung der CO₂-Emissionen eine Beschreibung der **verkehrlichen Veränderungsprozesse**, mit denen CO₂-Emissionen reduziert werden können, voraus (siehe Abschnitt 3) und erfordert ein **Berechnungsmodell** für den daraus resultierenden Rückgang der CO₂-Emissionen, das die mathematischen Formeln (siehe Abschnitt 5), die Parameter für Sachsen-Anhalt (siehe Abschnitt 7) und die schematischen Berechnungswege (siehe Abschnitt 8) umfasst.

Das Berechnungsmodell soll den Antragstellern für die Antragstellung als auch der Bewilligungsbehörde für die Antragsprüfung eine verbindliche Hilfestellung sein.

¹ siehe (Land Sachsen-Anhalt, 2018 S. 60) und Nr. 1.2 in (Land Sachsen-Anhalt, 2017a; Land Sachsen-Anhalt, 2017b)

² siehe Nr. 4.1 in (Land Sachsen-Anhalt, 2017a; Land Sachsen-Anhalt, 2017b)

³ siehe Nr. 7.9 in (Land Sachsen-Anhalt, 2017a; Land Sachsen-Anhalt, 2017b)

⁴ siehe (Land Sachsen-Anhalt, 2018 S. 61)

2 Hintergrund

In der Strategie *Europa-2020* (Europäische Kommission, 2010) ist das Kernziel formuliert, die Klimaschutzziele zu erreichen und bis 2020 die **Treibhausgasemissionen** um mindestens 20 Prozent, ausgehend vom Niveau des Jahres 1990, zu reduzieren. Das Ziel ist Bestandteil der Prioritäten für ein nachhaltiges Wachstum in Europa, mit denen das Wirtschaftswachstum von der Ressourcennutzung abgekoppelt und die Wettbewerbsfähigkeit von Europa gesteigert werden soll. Die zur Umsetzung von der Europäischen Kommission in der Leitinitiative *Ressourcenschonendes Europa*⁵ zusammengefassten Vorschläge sehen u.a. ein **modernisiertes und kohlenstoffärmeres Verkehrswesen** als Handlungsfeld für die Zielerreichung vor. Die Kommission übernimmt dazu folgende Aufgabe:

„Unterbreitung von Vorschlägen für ein modernisiertes und kohlenstoffärmeres Verkehrswesen ... Dies geschieht durch unterschiedliche Maßnahmen, z.B. Infrastrukturmaßnahmen wie den Aufbau von Netzinfrastrukturen für elektrische Mobilität, intelligentes Verkehrsmanagement, bessere Logistik, die weitere Reduzierung der CO₂-Emissionen bei Straßenfahrzeugen, im Luft- und Schiffsverkehr und die Einleitung einer großen europäischen Initiative für umweltfreundliche Automobile, mit der auf der Grundlage der Forschung, gemeinsamer Normen und der Entwicklung der notwendigen Infrastruktur neue Technologien sowie elektrische und Hybridfahrzeuge gefördert werden“ (Europäische Kommission, 2010 S. 18).

Zudem ist die Umsetzung der Europa-2020-Strategie im Rahmen nationaler Ziele und Verlaufspläne vorgesehen. Entsprechend sind die Mitgliedstaaten aufgefordert,

- *„intelligente, modernere und vollständig vernetzte Verkehrs- und Energieinfrastrukturen zu entwickeln und Informations- und Kommunikationstechnologie uneingeschränkt zu nutzen“ und*
- *„sich schwerpunktmäßig mit dem städtischen Verkehr als wichtigem Verursacher von Überlastungen und Emissionen zu befassen“ (Europäische Kommission, 2010 S. 19).*

Das Land Sachsen-Anhalt hat das Handlungsfeld in das OP EFRE eingebunden und dazu festgelegt:

*„... aufbauend auf dem Klimaprogramm 2020 des Landes und des IVS-Rahmenplans sind zentrale **CO₂-Minderungspotentiale im Verkehrssektor** zu realisieren. Dies soll insbesondere durch die Verlagerung des motorisierten Individualverkehrs und des Güterverkehrs auf umweltfreundlichere Verkehrsträger, den Einsatz energieeffizienter Technologien und erneuerbaren Energien sowie durch die Einführung intelligenter Verkehrssysteme erreicht werden“ (Land Sachsen-Anhalt, 2018 S. 14).*

Das Ziel, die CO₂-Emissionen im Verkehrssektor zu verringern, hat somit seinen Ursprung in den Klimaschutzzielen der Europäischen Kommission und stellt auf die Reduzierung der Treibhausgasemissionen ab.

⁵ siehe (Europäische Kommission, 2010 S. 18)

Als Treibhausgasemissionen gelten die erfolgten Ausstöße von Treibhausgasen in die Atmosphäre. Diese Emissionen können einen natürlichen oder einen anthropogenen, durch menschliche Tätigkeit verursachten Ursprung haben. Vorwiegend entstehen sie anthropogen als Nebenprodukt aus der Verbrennung fossiler Treibstoffe⁶ aus fossilen Kohlenstofflagerstätten, wie Erdöl, Erdgas und Kohle (Umweltbundesamt, 2015a), was zur Freisetzung der Treibhausgase führt. **Treibhausgase** sind diejenigen gasförmigen Bestandteile in der Atmosphäre, welche die thermische Infrarotstrahlung absorbieren und wieder ausstrahlen (Umweltbundesamt, 2015b). Durch diese Eigenschaft bewirken sie die Anhebung der Temperatur der Erdoberfläche und damit den so genannten Treibhauseffekt.

Das wichtigste anthropogene Treibhausgas ist das CO₂ (GutWetter Verlag, 2016b). Auf sein Konto geht mehr als die Hälfte des vom Menschen verursachten Treibhauseffekts. Deswegen kommt der Verringerung der von Menschen verursachten CO₂-Emissionen eine große Bedeutung zu.

Treibhausgase sind nicht direkt miteinander vergleichbar. Sie heizen das Klima unterschiedlich stark an. Sollen Treibhausgase hinsichtlich ihrer Klimaschädlichkeit verglichen werden, so sind sie auf eine einheitliche Bemessungsgrundlage zu beziehen (GutWetter Verlag, 2016a). Dazu wird das globale Erwärmungspotential der Gase in Relation zur Klimawirksamkeit von CO₂ gestellt (KlimAktiv, 2016) und dieser Zusammenhang durch das relative Treibhauspotential, englisch *Global Warming Potential (GWP)* oder auch *CO₂-Äquivalent (CO₂e)*⁷ genannt, ausgedrückt (Wikipedia, 2016h).

Das **CO₂-Äquivalent** ist eine Maßzahl für den relativen Beitrag eines Gases zum Treibhauseffekt. Es dient als Vergleichswert und verdeutlicht, wie viel die Masse eines Treibhausgases im Vergleich zur gleichen Masse von CO₂ bezogen auf einen bestimmten Zeitraum zur Erwärmung der Erdoberfläche beiträgt (Wikipedia, 2016h). Beispielsweise beträgt das CO₂-Äquivalent für Methan bei einem Zeithorizont von 100 Jahren 21: Ein Kilogramm Methan trägt innerhalb der ersten 100 Jahre nach seiner Freisetzung 21-mal so stark zum Treibhauseffekt bei wie ein Kilogramm CO₂.

Die CO₂-Äquivalente der Treibhausgase werden vom Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)⁸ festgelegt. Sie beschreiben die mittleren Erwärmungswirkungen über einen Zeitraum von 100 Jahren. Für die Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls ist der zweite Sachstandsbericht des IPCC aus dem Jahre 1995 maßgeblich (Wikipedia, 2016h).

Treibhausgas	Formel	Verweildauer (Jahre)	CO ₂ -Äquivalent (100 Jahre)
Kohlenstoffdioxid	CO ₂	5-200	1
Methan	CH ₄	12	21
Distickstoffoxid (= Lachgas)	N ₂ O	114	310
teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe	H-FKW/HFC	1,4-270	140-11 700
perfluorierte Kohlenwasserstoffe	FKW/PFC	740-50 000	6 500-9 200
Schwefelhexafluorid	SF ₆	3200	23 900

⁶ auch als „Kraftstoff“ bezeichnet

⁷ Der Buchstabe „e“ steht für das englische Wort equivalent.

⁸ <http://www.ipcc.ch>

Tabelle 1: CO₂-Äquivalente nach dem zweiten Sachstandsbericht des IPCC (KlimAktiv, 2016)

Beim Klimaschutz steht die Reduktion der Emissionsmengen im Fokus. Die Klimawirksamkeit oder die Erwärmungswirkung der einzelnen Treibhausgase sind von entscheidender Bedeutung. Aus diesem Grund werden die Treibhausgase mit Hilfe der CO₂-Äquivalente bewertet und auf diese Weise hinsichtlich ihres Treibhauspotentials gewichtet (Wikipedia, 2016h). Die Reduktion von Methan-Emissionen um eine Tonne ist beispielsweise gleichwertig zu der Reduktion von CO₂-Emissionen um 21 Tonnen. In beiden Fällen fallen Emissionen in Höhe von 21 Tonnen CO₂-Äquivalenten weniger an.

Die mengenmäßige Verringerung der CO₂-Emissionen kann direkt als Masse von CO₂ oder indirekt als CO₂-Äquivalent eines anderen Treibhausgases angegeben werden.

Redaktioneller Hinweis: Da der Verkehrssektor kein anderes Treibhausgas als CO₂ emittiert, wird in diesem Dokument durchgängig die Bezeichnung „CO₂-Emissionen“ verwendet und die mengenmäßige Verringerung der CO₂-Emissionen direkt als Masse von CO₂ angegeben.

3 Begriffsdefinitionen

Im Dokument bezeichnet der Ausdruck

- „Berufsverkehr“ jenen Verkehr, der durch die Fahrten oder Wege der Menschen zwischen ihren Wohn- und Arbeitsstätten (Berufstätigkeit) entsteht (BMVI, 2014b S. 213);
- „Elektroauto“ ein elektrisch betriebenes Fahrzeug, das als reines Batterieelektrofahrzeug (Kurzform: E-Fahrzeug) emissionsfrei oder als Hybridelektrofahrzeug (Kurzform: Plug-In Hybrid) emissionsarm ist;
- „Freizeitverkehr“ jenen Verkehr, der in Zusammenhang mit Tätigkeiten des Menschen für Erholung und Abwechslung (Freizeitaktivitäten) entsteht (BMVI, 2014b S. 214);
- „Kraftfahrzeug“ ein durch einen Motor angetriebenes, nicht an Schienen gebundenes ein- oder mehrspuriges Fahrzeug (Kurzform: Kfz) (Duden, 2016a; Wiesinger, 2016);
- „Kraftverkehr“ die Gesamtheit aller am Verkehr teilnehmenden Kfz und zugleich die Bewegung von Personen und Gütern unter Verwendung von kraftmaschinengetriebenen Fahrzeugen (Kfz) (Duden, 2016c; Wikipedia, 2016d);
- „Kraftwagen“ ein mehrspuriges Kfz zur Beförderung von Personen und Frachtgütern, also ein Personenkraftwagen (Pkw) oder ein Nutzkraftwagen (Nkw) in der Ausprägung als Lastkraftwagen (Lkw), Kraftomnibus (KOM) oder Zugmaschine (Wiesinger, 2016; Wikipedia, 2016a);
- „Krafttrad“ ein einspuriges, zweirädriges Kfz (Kurzform: Krad), also ein Motorrad, Motorroller, Kleinkrafttrad (Moped, Mofa, Kleinmotorrad) oder Leichtkrafttrad (Duden, 2016b);
- „Individualverkehr“ die Nutzung eines im Personenverkehr vom Verkehrsteilnehmer selbst zur Verfügung gestellten Verkehrsmittels, in der Regel ein Pkw, Krafttrad oder Fahrrad oder das zu Fuß gehen (Kurzform: IV) (BMVI, 2014a);
- „Modal Split“ die Verteilung des Transportaufkommens auf verschiedene Verkehrsmittel;

- „Motor“ eine Maschine, die fossile Treibstoffe verbrennt und dessen chemische Energie in mechanische Arbeit umwandelt (Verbrennungsmotor) (Wikipedia, 2016e);
- „Motorisierter Individualverkehr“ die Nutzung von Pkw und Kraftrad im Personenverkehr (Kurzform: MIV) (BMVI, 2015a);
- „Nichtmotorisierter Individualverkehr“ die Nutzung eines Verkehrsmittels ohne Motor, wie dem Fahrrad, oder die eigenen Füße (Kurzform: NMIV) (BMVI, 2010);
- „Personenverkehr“ jenen Verkehr, der durch die Ortsveränderung von Personen mit Verkehrsmitteln (Personenbeförderung) entsteht (Wikipedia, 2016g);
- „öffentlicher Personennahverkehr“ jener Personenverkehr, der im Zuge der allgemein zugänglichen und regelmäßigen Beförderung von Personen im Stadt-, Vorort- und Regionalverkehr entsteht und die durchschnittliche Reiseweite von 50 km oder die durchschnittliche Reisezeit von einer Stunde nicht übersteigt (VDV, 2015 S. 95);
- „Verkehrsmittel“ eine im Verkehr eingesetzte, technische Einrichtung zur Beförderung von Personen oder Gütern (Duden, 2016d; Wikipedia, 2016j);
- „Verkehrszeit“ eine aus den tageszeitlichen Schwankungen abgeleitete Kategorie der Verkehrsnachfrage, also die Hauptverkehrszeit (HVZ), die Normalverkehrszeit bzw. Nebenverkehrszeit (NVZ) und die Schwachverkehrszeit (SVZ) (Wikipedia, 2016k);
- „Verkehrszustand“ eine aus dem Grad der Inanspruchnahme (Belegung) von Straßen abgeleitete Kategorie der Verkehrsbelastung, also die Situation von freiem, teilgebundenem, gebundenem oder überfülltem (gestautem) Verkehr, wobei der überfüllte Verkehr die niedrigste Kategorie und der freie Verkehr die höchste Kategorie ist (Schnabel, et al., 1997 S. 72), und
- „Wirtschaftsverkehr“ jenen Verkehr, der durch die Ortsveränderung von Gütern und Personen im Zusammenhang mit der Produktion von Gütern (Waren und Dienstleistungen) und zur Ver- und Entsorgung von Wirtschaftseinheiten (Industrie, Gewerbe, Handel) stattfindet (Wikipedia, 2016l).

4 Verkehrliche Veränderungsprozesse

Die CO₂-Emissionen im Verkehrssektor haben ihren Ursprung hauptsächlich in den Verkehrsmitteln des Straßenverkehrs (Europäische Kommission, 2015), also den Kfz, deren Motoren fossile Treibstoffe aus fossilen Kohlenstofflagerstätten, wie Erdöl und Erdgas, verbrennen. Verkehrliche Veränderungsprozesse, mit denen CO₂-Emissionen reduziert werden können, sind daher primär Veränderungen im Bereich des Kraftverkehrs, und zwar solche, die auf eine Verlagerung, Verringerung oder Verflüssigung des Kraftverkehrs (VCD, 2007) sowie den Einsatz von Elektroautos abzielen. Sekundär zählen auch solche Veränderungen dazu, die in ihrer Wirkung geeignet sind, primäre Veränderungen herbeizuführen, etwa weil sie eine Steigerung der Attraktivität des ÖPNV bewirken oder die Nutzer des MIV animieren, auf umweltfreundliche Verkehrsmittel umzusteigen.

Die **Verkehrsverlagerung** zielt auf eine Veränderung des Mobilitätsverhaltens der Menschen und ihren Umstieg vom MIV zum ÖPNV ab. Dadurch wird die Verkehrsleistung des MIV verringert und die des ÖPNV erhöht. Zugleich wird Verkehr von einem Verkehrsmittel mit hoher spezifischer Emission auf ein Verkehrsmittel mit geringerer spezifischer Emission verlagert. Diese Umverteilung bei der Verkehrsmittelwahl bewirkt im Ergebnis eine Veränderung des Modal Split zu Gunsten des ÖPNV und führt zu einer Reduzierung der CO₂-Emissionen.

Die **Verkehrsverringerung** stellt auf die Reduzierung des Kraftverkehrs ab, etwa durch den Verzicht auf Wege oder durch das Vermeiden von Wegen mit einem Kfz. Im Ergebnis kommt es zum Wegfall oder zur Verkürzung von Wegstrecken des Kraftverkehrs, was entweder das Verkehrsaufkommen oder die Verkehrsdichte reduziert und somit ein Herabsetzen der Verkehrsleistung des Kraftverkehrs bewirkt. Dies wiederum bedeutet eine Reduzierung der CO₂-Emissionen des Kraftverkehrs.

Die **Verkehrsverflüssigung** fokussiert auf eine Reduzierung der Anzahl der Anhalte- und Anfahrtsvorgänge von Kfz (Halte) und eine Verringerung der Summe der Standzeiten der Kfz mit laufendem Motor (Wartezeiten). Sie führt bei gleichbleibendem Verkehrsaufkommen zu einer Verstetigung des Kraftverkehrs an Knotenpunkten, an Hindernissen und Engpassstellen sowie entlang von Straßenzügen über den Verkehrstag oder zu bestimmten Verkehrszeiten. Dies macht den Verkehr flüssiger, wodurch der Kraftverkehr CO₂-ärmer abgewickelt wird.

Durch den **Einsatz von Elektroautos** wird der Anteil der Elektromobilität am Verkehr erhöht und so der Anteil der Fahrten von konventionellen, mit fossilen Kraftstoffen angetriebenen Kraftwagen vermindert. Je nach Ausprägung des Elektroautos wird Verkehr von Verkehrsmitteln mit hoher spezifischer Emission auf Verkehrsmittel mit einer nur geringen oder keiner spezifischen Emission verlagert und damit CO₂-Emissionen eingespart.

Die Reduktion der CO₂-Emissionen bei primären Veränderungen im Bereich des Kraftverkehrs ist mathematisch über die Fahrdynamik modellierbar. Ihre Modellierung ist im Berechnungsmodell enthalten und wird im nachfolgenden Abschnitt 5 beschrieben.

Die Reduktion der CO₂-Emissionen bei sekundären Veränderungen, wie der Nutzung von Daten oder die Einführung von IVS-Diensten und kooperativen Systemen, ist dagegen nicht direkt modellierbar. Sie ist nur über die Wirkung der Veränderungen auf den Kraftverkehr quantifizierbar. Deswegen müssen diese sekundären Veränderungen hinsichtlich ihres Potenzials zur Erzielung einer Verkehrsverlagerung, -verringern oder -verflüssigung des Kraftverkehrs beurteilt werden. Für die potentiell zu erwartende Verkehrsverlagerung, -verringern oder -verflüssigung kann dann wie zuvor die Reduktion der CO₂-Emissionen mathematisch hergeleitet werden.

Somit sind folgende Veränderungsprozesse für das CO₂-Berechnungsmodell relevant:

Veränderungsprozess			Wirkbereich	
primär	1	Veränderung des Modal Split (Verkehrsverlagerung)	Pkw	ÖPNV
			Bus, Bahn	
	2	Veränderung der Verkehrsleistung (Verkehrsverringern)	Kfz	Straße
	3	Verstetigung des Kraftverkehrs (Verkehrsverflüssigung)	Kfz	
	4	Steigerung der Elektromobilität (Einsatz von Elektroautos)	Elektromobilität	
sekundär	5	Nutzung von Daten und Einführung von IVS-Diensten und kooperativen Systemen	Informations- und Kom- munikationstechnik	

Tabelle 2: Übersicht der verkehrlichen Veränderungsprozesse

5 Mathematisches Modell

5.1 Veränderung des Modal Split

5.1.1 Modellansatz

Bei der Veränderung des Modal Split wird eine **Minderung** der CO₂-Emissionen durch die Verlagerung der Verkehrsleistung von Verkehrsmitteln mit hoher spezifischer Emission zu Verkehrsmitteln mit geringerer spezifischer Emission bewirkt. Bei gleichbleibendem Verkehrsaufkommen findet also eine **Verkehrsverlagerung** zwischen den Verkehrsmitteln statt.

Es wird angenommen, dass sich durch die Wirkung eines Vorhabens das Mobilitätsverhalten der Menschen ändert und im Vergleich zum anfänglichen Referenzfall zu einer Umverteilung der Verkehrsmittelwahl führt, und zwar **vom MIV zum ÖPNV**. Die Emissionsqualität dieser Verkehrsverlagerung wird durch die quantitativen Merkmale des Verlagerungsprozesses bestimmt. So sind neben den Verkehrsmitteln, von und zu denen verlagert wird, die Länge der Wegstrecken und die Menge des Verkehrs, die von der Verlagerung erfasst sind, zur Berechnung heranzuziehen.

Konkret werden die CO₂-Emissionen der Wegstrecken, die mit Verkehrsmitteln mit hoher spezifischer Emission zurückgelegt werden, durch solche von Verkehrsmitteln mit geringerer spezifischer Emission substituiert. Hierbei wird unterstellt, dass die von den Verkehrsmitteln zurückgelegten Wegstrecken gleichlang sind. Die Gesamtmenge der CO₂-Emissionen der Verkehrsverlagerung ergibt sich dann im Sinne einer Bilanz als gegenseitige Aufrechnung der CO₂-Mengen für das die Verkehrsleistung abgebende und für das die Verkehrsleistung aufnehmende Verkehrsmittel.

Die Bilanz wird pro Einzelereignis und Tag gezogen und über die Anzahl der Tage, an denen die Verkehrsverlagerung wirksam ist, auf den Wirkungszeitraum bezogen (siehe Abschnitt 6).

Als Einzelereignis gilt die orts- und zeitpunktbezogene Verkehrsverlagerung. Die Verlagerung erfolgt also im Einzelfall für einen Bezugsort (Route, Orts- oder Linienverbindung) und wirkt ab einen Bezugszeitpunkt (Zeitpunkt des Wirksamwerdens). Eine über den Einzelfall und den Bezugsort hinausgehende, komplexe Verkehrsverlagerungen ist in Einzelereignisse aufzulösen.

Hinweis: Grundsätzlich kann die Veränderung des Modal Split auch die Verkehrsverlagerung **vom ÖPNV zum MIV** einschließen. Bei dieser Veränderung wird ein **Zuwachs** der CO₂-Emissionen dann erfolgen, wenn die Verlagerung der Verkehrsleistung von Verkehrsmitteln mit geringer spezifischer Emission zu Verkehrsmitteln mit höherer spezifischer Emission erfolgt. Deswegen sind die CO₂-Mengen für das die Verkehrsleistung abgebende und für das die Verkehrsleistung aufnehmende Verkehrsmittel unter Beachtung der Regeln der Vorzeichen zu ermitteln.

5.1.2 Modellgrundlagen

Die **Menge** M der CO₂-Emissionen eines Verkehrsmittels ergibt sich als Funktion der Wegstrecke s_{km} und dem streckenbezogenen Emissionsfaktor $\varepsilon_{s_{km}}$ des Verkehrsmittels, mit dem die Wegstrecke zurückgelegt wird.

$$M = f(s_{km}, \varepsilon_{s_{km}}) \quad (1)$$

Vorzeichenregel: Die wegfallende Wegstrecke s_{km} ist mit negativem Vorzeichen einzuführen und bewirkt eine negative Mengenangabe, die als Minderung der CO₂-Emissionen definiert wird. Dies entspricht der CO₂-Emission des Verkehrsmittels, das die Verkehrsleistung abgibt. Entsprechend stellt ein positiver Wert eine hinzukommende Wegstrecke dar und führt zu einer positiven Mengenangabe, die den Zuwachs der CO₂-Emissionen ausdrückt. Dies entspricht der CO₂-Emission des Verkehrsmittels, das die Verkehrsleistung aufnimmt. Diese Vorzeichenregel wird einheitlich im mathematischen Modell für die CO₂-Emissionen angewendet.

$$M = \pm s_{km} \times \varepsilon_{s_{km}} \mid \{- = \text{Minderung}, + = \text{Zuwachs}\} \quad (2)$$

Andererseits kann die Menge M der CO₂-Emissionen eines Verkehrsmittels auch als Funktion seiner Verkehrsleistung VL und seinem leistungsbezogenen Emissionsfaktor $\varepsilon_{P_{km}}$ ermittelt werden.

$$M = \pm VL \times \varepsilon_{P_{km}} \mid \{- = \text{Minderung}, + = \text{Zuwachs}\} \quad (3)$$

Die Vorzeichenregel für die Verkehrsleistung VL ist dieselbe wie bei der Wegstrecke s_{km} . Ein negativer Wert entspricht der Abgabe, ein positiver der Aufnahme einer Verkehrsleistung.

Die **Gesamtmenge** \bar{M} der CO₂-Emissionen der Verkehrsverlagerung stellt sich als Summe der Einzelmengen dar. Unter Anwendung der Vorzeichenregel für die Wegstrecke oder die Verkehrsleistung entspricht diese der Bilanz für die Verlagerung der Verkehrsleistung, also einer gegenseitigen Aufrechnung der CO₂-Mengen.

$$\bar{M} = \sum_{i=1}^{n_V} M_i \mid \{n_V = \text{Anzahl der Verkehrsmittel}\} \quad (4)$$

Unter der Annahme, dass die Wegstrecke oder die Verkehrsleistung eine auf den Tag bezogene Größe darstellt, entspricht die Gesamtmenge \bar{M} der CO₂-Emissionen der Verkehrsverlagerung der Tagesmenge des Einzelereignisses. Über die Anzahl n_T der Tage, an denen die Verkehrsverlagerung als Einzelereignis wirkt, ergibt sich die **wirksame Menge** \bar{M}_W der CO₂-Emissionen bezogen auf den Wirkungszeitraum (siehe Abschnitt 6).

$$\bar{M}_W = n_T \times \bar{M} \quad (5)$$

Die **Wegstrecke** s_{km} ist die Länge des Fahrweges, der von einem Fahrzeug des abgebenden oder des aufnehmenden Verkehrsmittels zurückgelegt wird. In der Regel erfolgt die Verlagerung der Verkehrsleistung einer Vielzahl n_{Fzg} von Fahrzeugen. Deswegen ist an Stelle der einzelnen Wegstrecke die Summe $\overline{s_{km}}$ aller zurückgelegten Wegstrecken in Ansatz zu bringen.

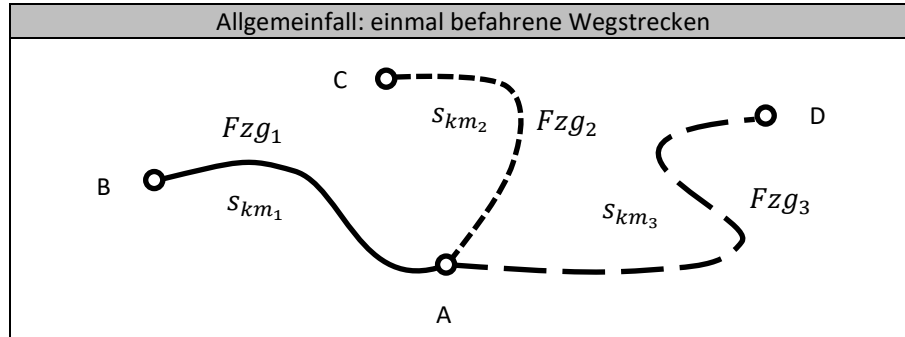


Abbildung 1: Allgemeinfall der einmal befahrenen Wegstrecken

$$\overline{s_{km}} = \sum_{i=1}^{n_{Fzg}} s_{km_i} \mid \{n_{Fzg} = \text{Anzahl der Fahrzeuge}\} \quad (6)$$

Sonderfall 1:

Bei für alle Fahrzeuge gleichlangen Wegstrecken s_{km} vereinfacht sich die Summe dahingehend, dass die Wegstrecke mit der Anzahl n_{Fzg} der Fahrzeuge zu multiplizieren ist, deren Verkehrsleistungen auf dieser Wegstrecke verlagert werden.

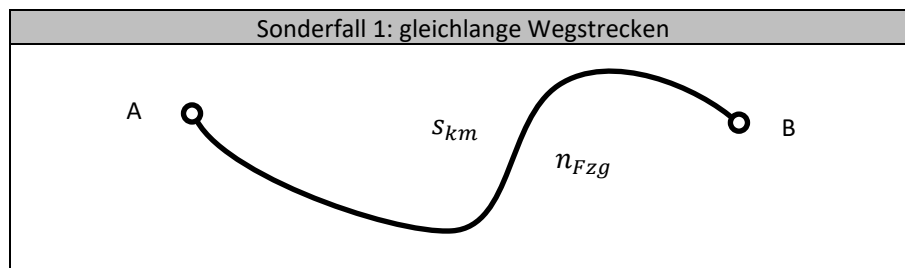


Abbildung 2: Sonderfall der gleichlangen Wegstrecken

$$\overline{s_{km}} = n_{Fzg} \times s_{km} \quad (7)$$

Sonderfall 2:

Werden Verkehrsleistungen auf verschiedenen, unterschiedlich langen Wegstrecken s_{km_i} und mit einer für jede Wegstrecke unterschiedlichen Anzahl n_{Fzgi} an Fahrzeugen verlagert, so ergibt sich die Summe $\overline{s_{km}}$ aller zurückgelegten Wegstrecken als Summe der Einzelprodukte $n_{Fzgi} \times s_{km_i}$ über die Anzahl n_s der unterschiedlichen Wegstrecken.

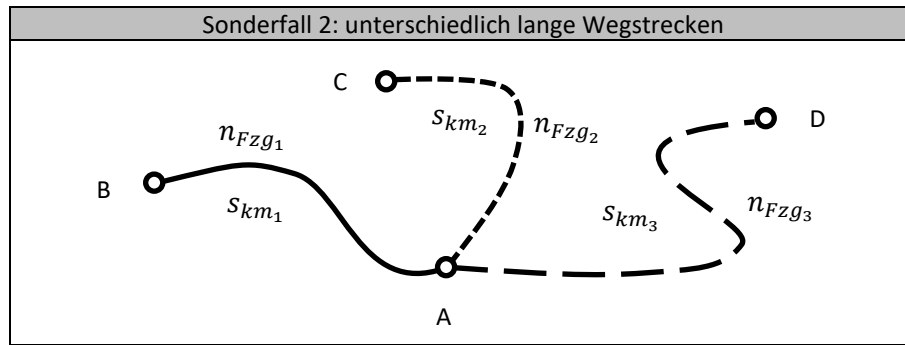


Abbildung 3: Sonderfall der unterschiedlich langen Wegstrecken

$$\overline{s_{km}} = \sum_{i=1}^{n_s} n_{Fzg_i} \times s_{km_i} \mid \{n_s = \text{Anzahl der Wegstrecken}\} \quad (8)$$

Sonderfall 3:

Bei einer umfangreichen Veränderung des Modal Split können die einzelnen Wegstrecken und die jeweilige Anzahl der auf diesen Wegstrecken verlagerten Fahrzeuge schwierig zu handhaben und eine Berechnung der CO₂-Mengen über die Wegstrecken nicht praktikabel sein.

Die **mittlere Fahrtweite** $s_{\text{ÖV}}$ des öffentlichen Personenverkehrs kann in diesem Fall zur Substitution der Wegstrecke s_{km} herangezogen werden. In der Berechnung müssen dann nur die Länge dieser einen Wegstrecke sowie die Anzahl $\overline{n_{Fzg}}$ aller verlagerten Fahrzeuge einfließen. Allerdings besitzt diese Substitution nur für den motorisierten Individualverkehr Gültigkeit.

$$s_{km} \stackrel{\text{def}}{=} s_{\text{ÖV}} \quad (9)$$

$$\overline{s_{km}} = \sum_{i=1}^{n_s} n_{Fzg_i} \times s_{\text{ÖV}} \mid \{n_s = \text{Anzahl der Wegstrecken}\} \quad (10)$$

$$\overline{s_{km}} = \overline{n_{Fzg}} \times s_{\text{ÖV}} \quad (11)$$

Sonderfall 4:

Mit Blick auf die Menge der CO₂-Emissionen, die von einem Verkehrsmittel beim Befahren einer Wegstrecke emittiert wird, kann die Wegstrecke zudem nach ihrer Lage differenziert werden. So kann die Wegstrecke nur innerhalb geschlossener Ortschaften (= innerorts (*io*)) liegen oder sich auf freier Strecke außerhalb geschlossener Ortschaften (= außerorts (*ao*)) oder auf einer Kraftfahrstraße (= Autobahn (*AB*)) befinden. Liegt die Wegstrecke durchgängig in nur einem dieser Bereiche, so soll sie als **lagegleich** bezeichnet werden. Liegt die Wegstrecke in mindestens zwei verschiedenen Bereichen, so ist die Strecke **lageungleich**. In diesem Fall ist die Wegstrecke s_{km} in die Teilstrecken $s_{km,io}$, $s_{km,ao}$ und $s_{km,AB}$ aufzulösen.

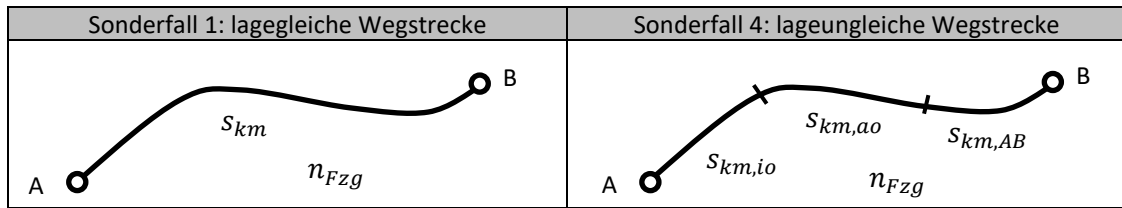


Abbildung 4: Sonderfall der lageungleichen Wegstrecken

$$s_{km} \stackrel{\text{def}}{=} x \times s_{km,io} + y \times s_{km,ao} + z \times s_{km,AB} \mid \{0 \leq x, y, z \leq 1 \wedge x + y + z = 1\} \quad (12)$$

Dieser Fall ist nur dann von Bedeutung, wenn aufgrund der Lage der Wegstrecken besondere streckenspezifische CO₂-Minderungspotentiale bestehen, etwa weil die Wegstrecke überwiegend innerhalb nur eines Bereiches liegt und der CO₂-Ausstoß in diesem Bereich sich wesentlich von dem der anderen Bereiche unterscheidet.

Der **Emissionsfaktor** ε gibt die Menge der CO₂-Emissionen eines Verkehrsmittels pro Bezugseinheit an. Im realen Verkehr ist der Ausstoß von CO₂ an den tatsächlichen Kraftstoffverbrauch des Verkehrsmittels gekoppelt und variiert je nach objektiven Fahrbedingungen (Fahrten innerhalb geschlossener Ortschaften, außerhalb geschlossener Ortschaften und auf einer Kraftfahrstraße) und subjektiven Nutzungsverhalten. Deswegen wird ein durchschnittlicher Ausstoß des Verkehrsmittels über die objektiven Fahrbedingungen benutzt und dieser Durchschnittswert als **streckenbezogener** Emissionsfaktor $\varepsilon_{s_{km}}$ oder als **leistungsbezogener** Emissionsfaktor $\varepsilon_{p_{km}}$ verwendet. Bei dem streckenbezogenen Emissionsfaktor $\varepsilon_{s_{km}}$ ist die Bezugseinheit die Wegstrecke s_{km} eines Fahrzeuges, wobei die Wegstrecke mit der Länge von einem Kilometer als Bezugsgröße dient. Bei dem leistungsbezogenen Emissionsfaktor $\varepsilon_{p_{km}}$ ist die Bezugseinheit die Verkehrsleistung VL . Hier wird die Verkehrsleistung für die Beförderung einer Person pro zurückgelegtem Kilometer Wegstrecke als Bezugseinheit verwendet.

Je nach Lage der Wegstrecke nimmt der streckenbezogene Emissionsfaktor des Verkehrsmittels unterschiedliche Größen an. Die Wegstrecke s_{km} ist dann in Abhängigkeit ihrer Lage mit dem **streckenspezifischen** Emissionsfaktor $\varepsilon_{s_{km,io}}$, $\varepsilon_{s_{km,ao}}$ oder $\varepsilon_{s_{km,AB}}$ zu berücksichtigen.

$$M = \pm s_{km(io,ao,AB)} \times \varepsilon_{s_{km(io,ao,AB)}} \mid \{- = \text{Minderung}, + = \text{Zuwachs}\} \quad (13)$$

Die **Verkehrsleistung** VL beschreibt die im Personenverkehr pro Zeiteinheit t erbrachte Verkehrsarbeit VA (BMVI, 2014b).

$$VL = \frac{VA}{t} \quad (14)$$

Die Verkehrsarbeit VA wiederum ist definiert als Produkt der Verkehrsmenge VM , also der Summe der beförderten Verkehrseinheiten (Güter, Personen), und der von ihr zurückgelegten

Wegstrecke s_{km} (Wikipedia, 2016i). In dem hier behandelten Veränderungsprozess ist die Verkehrseinheit die Person. Die Verkehrsmenge ist somit gleich der Summe n_p der beförderten Personen.

$$VA = VM \times s_{km} = n_p \times s_{km} \quad (15)$$

Nach dem Modellansatz wird die Bilanz der CO₂-Emissionen pro Tag gezogen (vgl. Abschnitt 5.1.1). Dementsprechend ist die Zeiteinheit t gleich einem Tag und in (14) $t = 1$ zu setzen, so dass für den auf den Tag bezogenen Modellansatz gilt:

$$VL \equiv VA \quad (16)$$

Die Verkehrsleistung eines Verkehrsmittels bestimmt sich aus der absoluten Anzahl n_p der mit dem Verkehrsmittel pro Zeiteinheit beförderten Personen. Für den IV mit dem Pkw kann diese über die Anzahl n_{Fzg} der Fahrzeuge und die Besetzungszahl N_{Pkw} des Pkw abgeleitet werden. Die Besetzungszahl gibt die Anzahl der durchschnittlich im Pkw beförderten Personen an.

$$n_p = N_{Pkw} \times n_{Fzg} \quad (17)$$

5.1.3 Berechnungsformeln für die Verlagerung vom IV zum ÖPNV

Schritt 1:

Bei der Verlagerung des Verkehrs vom IV zum ÖPNV sind zunächst für das abgebende Verkehrsmittel des IV – unter Kenntnis der Wegstrecke s_{km} , der Anzahl n_{Fzg} der Fahrzeuge und der Besetzungszahl N_{Pkw} – die Menge M der CO₂-Emissionen und die Verkehrsleistung VL zu ermitteln. Bei der Ermittlung der Menge der CO₂-Emissionen ist auf den streckenbezogenen Emissionsfaktor $\varepsilon_{s_{km}}$ zurückzugreifen, da gewöhnlich nur dieser für Verkehrsmittel des MIV bekannt ist.

Für den **Individualverkehr mit dem Pkw** ergibt sich

- die Menge der CO₂-Emissionen aus (2) und (6):

$$M_{Pkw} = \overline{s_{km_{Pkw}}} \times \varepsilon_{s_{km_{Pkw}}} \quad (18)$$

- im Sonderfall 1 mit (7):

$$M_{Pkw} = n_{Fzg_{Pkw}} \times s_{km_{Pkw}} \times \varepsilon_{s_{km_{Pkw}}} \quad (19)$$

- im Sonderfall 2 mit (8):

$$M_{Pkw} = \sum_{i=1}^{n_S} n_{Fzg_{Pkw_i}} \times s_{km_{Pkw_i}} \times \varepsilon_{s_{km_{Pkw}}} \quad (20)$$

- im Sonderfall 3 mit der Substitution nach (9) bis (11):

$$M_{Pkw} = \overline{n_{FzgPkw}} \times s_{\ddot{O}V} \times \varepsilon_{s_{km}Pkw} \quad (21)$$

- im Sonderfall 4 mit (7) und der Zerlegung nach (12):

$$M_{Pkw} = n_{FzgPkw} \times (s_{km,io} \times \varepsilon_{s_{km,io}} + s_{km,ao} \times \varepsilon_{s_{km,ao}} + s_{km,AB} \times \varepsilon_{s_{km,AB}}) \quad (22)$$

- die Verkehrsleistung aus (15) bis (17):

- im Sonderfall 1 mit (7):

$$VL_{Pkw} = N_{Pkw} \times n_{FzgPkw} \times s_{kmPkw} = N_{Pkw} \times \overline{s_{kmPkw}} \quad (23)$$

- im Sonderfall 2 mit (8):

$$VL_{Pkw} = \sum_{i=1}^{n_S} N_{Pkw} \times n_{FzgPkw_i} \times s_{kmPkw_i} = N_{Pkw} \times \overline{s_{kmPkw}} \quad (24)$$

- im Sonderfall 3 mit (9) bis (11):

$$VL_{Pkw} = N_{Pkw} \times \overline{n_{FzgPkw}} \times s_{\ddot{O}V} = N_{Pkw} \times \overline{s_{kmPkw}} \quad (25)$$

- im Sonderfall 4 mit (7) und (12):

$$VL_{Pkw} = N_{Pkw} \times n_{FzgPkw} \times s_{kmPkw} = N_{Pkw} \times (\overline{s_{km,ioPkw}} + \overline{s_{km,aoPkw}} + \overline{s_{km,ABPkw}}) \quad (26)$$

- mit:

M_{Pkw}	: CO ₂ -Menge, die vom Pkw verlagert wird
VL_{Pkw}	: Verkehrsleistung, die vom Pkw verlagert wird
n_{FzgPkw}	: Anzahl der Pkw, deren Verkehrsleistung auf einer Wegstrecke verlagert wird
s_{kmPkw}	: mit dem Pkw zurückgelegte Wegstrecke
$\overline{n_{FzgPkw}}$	: Anzahl aller Pkw, deren Verkehrsleistung verlagert wird
$\overline{s_{kmPkw}}$	: Summe der mit den Pkw zurückgelegten Wegstrecken
$\overline{s_{km,ioPkw}}$	: Summe der mit den Pkw zurückgelegten Wegstrecken in der Lage innerorts
$\overline{s_{km,aoPkw}}$	: Summe der mit den Pkw zurückgelegten Wegstrecken in der Lage außerorts
$\overline{s_{km,ABPkw}}$	: Summe der mit den Pkw zurückgelegten Wegstrecken in der Lage Autobahn
$s_{\ddot{O}V}$	: mittlere Fahrtweite des öffentlichen Personenverkehrs
$\varepsilon_{s_{km}Pkw}$	: streckenbezogener Emissionsfaktor für den Pkw
$\varepsilon_{s_{km,ioPkw}}$	: streckenspezifischer Emissionsfaktor für den Pkw in der Lage innerorts
$\varepsilon_{s_{km,aoPkw}}$	: streckenspezifischer Emissionsfaktor für den Pkw in der Lage außerorts
$\varepsilon_{s_{km,ABPkw}}$	: streckenspezifischer Emissionsfaktor für den Pkw in der Lage Autobahn
N_{Pkw}	: Besetzungszahl für den Pkw
n_S	: Anzahl der Wegstrecken

Für den **Individualverkehr mit dem Fahrrad** ergibt sich

- die Menge der CO₂-Emissionen stets zu Null, da der Emissionsfaktor gleich Null ist:

$$M_{Rad} \stackrel{!}{=} 0 \quad (27)$$

- die Verkehrsleistung aus (15) mit der Substitution nach (16):

$$VL_{Rad} = n_p \times s_{km_{Rad}} = \overline{n_{Fzg_{Rad}}} \times s_{km_{Rad}} \quad (28)$$

- mit:

M_{Rad} : CO₂-Menge, die vom Fahrrad verlagert wird

VL_{Rad} : Verkehrsleistung, die vom Fahrrad verlagert wird

n_p : Anzahl der beförderten Personen

$\overline{n_{Fzg_{Rad}}}$: Anzahl der Fahrräder, deren Verkehrsleistung verlagert wird

$s_{km_{Rad}}$: mittlere Wegstrecke des Fahrradverkehrs

Für den **Individualverkehr zu Fuß** ergibt sich

- die Menge der CO₂-Emissionen stets zu Null, da der Emissionsfaktor gleich Null ist:

$$M_{Fuß} \stackrel{!}{=} 0 \quad (29)$$

- die Verkehrsleistung aus (15) mit der Substitution nach (16):

$$VL_{Fuß} = n_p \times s_{km_{Fuß}} = \overline{n_{Fzg_{Fuß}}} \times s_{km_{Fuß}} \quad (30)$$

- mit:

$M_{Fuß}$: CO₂-Menge, die vom Fußgänger verlagert wird

$VL_{Fuß}$: Verkehrsleistung, die vom Fußgänger verlagert wird

n_p : Anzahl der beförderten Personen

$\overline{n_{Fzg_{Fuß}}}$: Anzahl der Fußgänger, deren Verkehrsleistung verlagert wird

$s_{km_{Fuß}}$: mittlere Wegstrecke des Fußverkehrs

Schritt 2:

Die Verkehrsleistung des IV wird vom ÖPNV aufgenommen. Deswegen entspricht die Verkehrsleistung des ÖPNV der zuvor ermittelten Verkehrsleistung des IV und kann durch sie substituiert werden. Die Ermittlung der Menge M der CO₂-Emissionen für das aufnehmende Verkehrsmittel des ÖPNV erfolgt dann mit Hilfe des leistungsbezogenen Emissionsfaktors $\varepsilon_{P_{km}}$, da in der Regel nur dieser für die Verkehrsmittel des ÖPNV angegeben wird.

Für den **öffentlichen Verkehr mit dem Kraftomnibus** ergibt sich

- die Menge der CO₂-Emissionen aus (3) und mit der Substitution:

$$VL_{Bus} \stackrel{\text{def}}{=} VL_{Pkw} + VL_{Rad} + VL_{Fu\beta} \quad (31)$$

$$M_{Bus} = VL_{Bus} \times \varepsilon_{Pkm_{Bus}} \quad (32)$$

- mit:

M_{Bus} : CO₂-Menge, die beim Bus durch die Verlagerung entsteht

VL_{Bus} : Verkehrsleistung, die zum Bus verlagert wird

VL_{Pkw} : Verkehrsleistung, die vom Pkw verlagert wird

VL_{Rad} : Verkehrsleistung, die vom Fahrrad verlagert wird

$VL_{Fu\beta}$: Verkehrsleistung, die vom Fußgänger verlagert wird

$\varepsilon_{Pkm_{Bus}}$: leistungsbezogener Emissionsfaktor für den Bus

Für den **öffentlichen Verkehr mit anderen Verkehrsmitteln** als dem Kraftomnibus (U-Bahn, Stadtbahn, Straßenbahn, Regionalzug, Fernzug) ergibt sich die Menge der CO₂-Emissionen – unter Verwendung der jeweiligen Emissionsfaktoren – analog der Berechnungsformel zum Bus.

Schritt 3:

Die berechneten Mengen der CO₂-Emissionen der abgebenden Verkehrsmittel des IV und der aufnehmenden Verkehrsmittel des ÖPNV sind gegenseitig aufzurechnen, damit die Gesamtmenge \bar{M} der CO₂-Emissionen der Verkehrsverlagerung erhalten wird.

- Die Gesamtmenge \bar{M} ergibt sich nach (4) und unter Beachtung von (27) und (29) zu:

$$\bar{M} = \sum_{i=1}^{n_V} M_i = M_{Pkw} + M_{Bus} \quad (33)$$

- mit:

\bar{M} : CO₂-Menge der Verkehrsverlagerung

M_{Pkw} : CO₂-Menge, die vom Pkw verlagert wird

M_{Bus} : CO₂-Menge, die beim Bus durch die Verlagerung entsteht

n_V : Anzahl der Verkehrsmittel

Schritt 4:

Die ermittelte Gesamtmenge \bar{M} der CO₂-Emissionen der Verkehrsverlagerung entspricht der Tagesmenge des Einzelereignisses. Durch Hochrechnung mit der Anzahl der wirksamen Arbeitstage wird nach (5) die wirksame Menge \bar{M}_W der CO₂-Emissionen bezogen auf den Wirkungszeitraum erhalten. Ggf. kann es anschließend noch erforderlich sein, die wirksamen Mengen der Einzelereignisse einer komplexen Verkehrsverlagerung zusammenzufassen.

5.1.4 Berechnungsformeln für die Verlagerung vom ÖPNV zum IV

Schritt 1:

Bei der Verlagerung des Verkehrs vom ÖPNV zum IV ist zunächst für das abgebende Verkehrsmittel des ÖPNV – unter Kenntnis der Verkehrsleistung VL – die Menge M der CO₂-Emissionen zu ermitteln.

Für den **öffentlichen Verkehr mit dem Kraftomnibus** ergibt sich

- die Menge der CO₂-Emissionen aus (32):

$$(32) \quad M_{Bus} = VL_{Bus} \times \varepsilon_{Pkm_{Bus}}$$

- mit:

M_{Bus} : CO₂-Menge, die vom Bus verlagert wird

VL_{Bus} : Verkehrsleistung, die vom Bus verlagert wird

$\varepsilon_{Pkm_{Bus}}$: leistungsbezogener Emissionsfaktor für den Bus

Für den **öffentlichen Verkehr mit anderen Verkehrsmitteln** als dem Kraftomnibus (U-Bahn, Stadtbahn, Straßenbahn, Regionalzug, Fernzug) ergibt sich die Menge der CO₂-Emissionen – unter Verwendung der jeweiligen Emissionsfaktoren – analog der Berechnungsformel zum Bus.

Schritt 2:

Die Verkehrsleistung des ÖPNV wird vom IV aufgenommen. Deswegen kann die Verkehrsleistung des IV durch die Verkehrsleistung des ÖPNV substituiert werden. Ggf. ist die Verkehrsleistung des ÖPNV auf die Verkehrsmittel des IV (Pkw, Fahrrad, zu Fuß) aufzuteilen. Mit Hilfe dieser Verkehrsleistung ist – unter Kenntnis der Wegstrecke s_{km} oder deren Alternativen ($s_{ÖV}$, $s_{km_{Rad}}$ oder $s_{km_{Fuß}}$) sowie der Besetzungszahl N_{Pkw} – die Anzahl der Pkw, Fahrräder oder Fußgänger, auf die die Verkehrsleistung verlagert werden muss, zu berechnen.

Für den **Individualverkehr mit dem Pkw** ergibt sich

- die Anzahl der Pkw aus (25) und mit der Substitution:

$$VL_{Pkw} \stackrel{\text{def}}{=} VL_{Bus} \vee VL_{Pkw} \subseteq VL_{Bus} \quad (34)$$

$$\overline{n_{Fzg_{Pkw}}} = \frac{VL_{Pkw}}{N_{Pkw} \times s_{ÖV}} \quad (35)$$

- die Menge der CO₂-Emissionen aus (21):

$$(21) \quad M_{Pkw} = \overline{n_{FzgPkw}} \times s_{\dot{O}V} \times \varepsilon_{skmPkw}$$

- mit:

M_{Pkw} : CO₂-Menge, die zum Pkw verlagert wird

VL_{Pkw} : Verkehrsleistung, die zum Pkw verlagert wird

$\overline{n_{FzgPkw}}$: Anzahl der Pkw, zu denen Verkehrsleistung verlagert wird

$s_{\dot{O}V}$: mittlere Fahrtweite des öffentlichen Personenverkehrs

ε_{skmPkw} : streckenbezogener Emissionsfaktor für den Pkw

N_{Pkw} : Besetzungszahl für den Pkw

Für den **Individualverkehr mit dem Fahrrad** ergibt sich

- die Anzahl der Fahrräder aus (28) und mit der Substitution:

$$VL_{Rad} \stackrel{\text{def}}{=} VL_{Bus} \vee VL_{Rad} \subseteq VL_{Bus} \quad (36)$$

$$\overline{n_{FzgRad}} = \frac{VL_{Rad}}{s_{kmRad}} \quad (37)$$

- die Menge der CO₂-Emissionen stets zu Null, da der Emissionsfaktor gleich Null ist:

$$(27) \quad M_{Rad} \stackrel{!}{=} 0$$

- mit:

M_{Rad} : CO₂-Menge, die zum Fahrrad verlagert wird

VL_{Rad} : Verkehrsleistung, die zum Fahrrad verlagert wird

$\overline{n_{FzgRad}}$: Anzahl der Fahrräder, zu denen Verkehrsleistung verlagert wird

s_{kmRad} : mittlere Wegstrecke des Fahrradverkehrs

Für den **Individualverkehr zu Fuß** ergibt sich

- die Anzahl der Fußgänger aus (30) und mit der Substitution:

$$VL_{Fu\beta} \stackrel{\text{def}}{=} VL_{Bus} \vee VL_{Fu\beta} \subseteq VL_{Bus} \quad (38)$$

$$\overline{n_{FzgFu\beta}} = \frac{VL_{Fu\beta}}{s_{kmFu\beta}} \quad (39)$$

- die Menge der CO₂-Emissionen stets zu Null, da der Emissionsfaktor gleich Null ist:

(29)
$$M_{Fu\beta} \stackrel{!}{=} 0$$

- mit:

$M_{Fu\beta}$: CO₂-Menge, die zum Fußgänger verlagert wird

$VL_{Fu\beta}$: Verkehrsleistung, die zum Fußgänger verlagert wird

$\overline{n_{Fzg_{Fu\beta}}}$: Anzahl der Fußgänger, zu denen Verkehrsleistung verlagert wird

$s_{km_{Fu\beta}}$: mittlere Wegstrecke des Fußverkehrs

Schritt 3:

Die berechneten Mengen der CO₂-Emissionen der abgebenden Verkehrsmittel des ÖPNV und der aufnehmenden Verkehrsmittel des IV sind analog zu Schritt 3 in Abschnitt 5.1.3 gegenseitig aufzurechnen.

Schritt 4:

Das weitere Vorgehen erfolgt analog zu Schritt 4 in Abschnitt 5.1.3.

5.2 Veränderung der Verkehrsleistung

5.2.1 Modellansatz

Bei der Veränderung der Verkehrsleistung wird eine **Minderung** der CO₂-Emissionen durch die Verkürzung oder den Wegfall von Wegstrecken eines Verkehrsmittels mit hoher spezifischer Emission bewirkt. Anders als bei der Veränderung des Modal Split (vgl. Abschnitt 5.1) erfolgt hier keine Verlagerung des Verkehrs, sondern eine konkrete **Verkehrsverringerung**.

Es wird angenommen, dass durch die Wirkung eines Vorhabens Verkehre von Kfz gezielt in ihrem Umfang reduziert oder gänzlich vermieden werden. Die Emissionsqualität dieser Verkehrsverringerung wird durch die quantitativen Merkmale des Verringerungsprozesses bestimmt. So sind neben den Kfz, für die die Wegstrecke verkürzt werden, die Länge der Wegstrecken, die Anzahl der Wegstrecken und die Menge des Verkehrs, die von der Verkehrsverringerung erfasst ist, zur Berechnung heranzuziehen.

Konkret werden die CO₂-Emissionen für jede verkürzte oder wegfallende Wegstrecke ermittelt. Die Gesamtmenge der CO₂-Emissionen der Verkehrsverringerung ergibt sich dann als Summe der CO₂-Emissionen aller Wegstrecken.

Die Summe wird pro Einzelereignis und Tag gebildet und über die Anzahl der Tage, an denen die Verkehrsverringerung wirksam ist, auf den Wirkungszeitraum bezogen (siehe Abschnitt 6).

Als Einzelereignis gilt die orts- und zeitpunktbezogene Verkehrsverringerung. Die Verringerung erfolgt also im Einzelfall für einen Bezugsort, der eine Wegeverbindung oder eine Gruppe von Wegeverbindungen in Bezug auf einen gemeinsamen Zielpunkt sein kann. Zudem wirkt die Verringerung ab einem Bezugszeitpunkt (Zeitpunkt des Wirksamwerdens). Eine über den Einzelfall und den Bezugsort hinausgehende, komplexe Verkehrsverringerung ist in Einzelereignisse aufzulösen.

Hinweis: Die Veränderung der Verkehrsleistung kann auch die **Verkehrserhöhung** einschließen. Bei der Erhöhung der Verkehrsleistung erfolgt ein **Zuwachs** der CO₂-Emissionen durch die Verlängerung oder die Aufnahme von Wegstrecken. Der Zuwachs wirkt der Minderung der CO₂-Emissionen durch Verkehrsverringerung entgegen. Deswegen ist die Gesamtmenge der CO₂-Emissionen unter Beachtung der Regeln der Vorzeichen zu ermitteln und der Zuwachs mit der Minderung der CO₂-Emissionen im Sinne einer Bilanz gegenseitig aufzurechnen.

5.2.2 Modellgrundlagen

Die **Menge** M der CO₂-Emissionen eines Verkehrsmittels ergibt sich nach (1) als Funktion der Wegstrecke s_{km} und dem streckenbezogenen Emissionsfaktor $\varepsilon_{s_{km}}$ des Kfz, mit dem die Wegstrecke zurückgelegt wurde.

$$(1) \quad M = f(s_{km}, \varepsilon_{s_{km}})$$

Vorzeichenregel: Die verkürzte oder wegfallende Wegstrecke s_{km} ist mit negativem Vorzeichen einzuführen und bewirkt eine negative Mengenangabe, die als Minderung der CO₂-Emissionen definiert ist. Entsprechend stellt ein positiver Wert eine verlängerte oder aufgenommene Wegstrecke dar und führt zu einer positiven Mengenangabe, die den Zuwachs der CO₂-Emissionen ausdrückt. Diese Vorzeichenregel entspricht der Regel, wie sie bei der Veränderung des Modal Split (vgl. Abschnitt 5.1) angewendet wird.

$$(2) \quad M = \pm s_{km} \times \varepsilon_{s_{km}} \mid \{- = \text{Minderung}, + = \text{Zuwachs}\}$$

Die **Wegstrecke** s_{km} entspricht der Länge des verkürzten oder verlängerten Anteils des jeweiligen Fahrweges eines Kfz. Es wird angenommen, dass die Wirkung des Vorhabens auf die Kfz gleich ist und die Wegstrecken s_{km} daher für alle Kfz als gleichlang angesehen werden können.

Die **Gesamtmenge** \bar{M} der CO₂-Emissionen stellt sich nach (4) als Summe der Einzelmengen dar.

$$(4) \quad \bar{M} = \sum_{i=1}^{n_{Kfz}} M_i \mid \{n_{Kfz} = \text{Anzahl der Kraftfahrzeuge}\}$$

Allerdings vereinfacht sich im Falle der obigen Annahme die Summe dahingehend, dass an Stelle der einzelnen Wegstrecken s_{km_i} die Summe der verkürzten oder verlängerten Wegstrecken $\overline{s_{km}}$ nach (7) verwendet werden kann:

$$(7) \quad \bar{M} = \sum_{i=1}^{n_{Kfz}} M_i = \sum_{i=1}^{n_{Kfz}} s_{km_i} \times \varepsilon_{s_{km}} = n_{Kfz} \times s_{km} \times \varepsilon_{s_{km}}$$

$$\overline{s_{km}} = n_{Kfz} \times s_{km}$$

$$\bar{M} = \pm \overline{s_{km}} \times \varepsilon_{s_{km}} \quad (40)$$

Der streckenbezogene **Emissionsfaktor** $\varepsilon_{s_{km}}$ der Kfz variiert je nach Kraftfahrzeugtyp. So emittiert ein Lkw mehr CO₂ als ein Pkw. Die Bestimmung der Gesamtmenge der CO₂-Emissionen muss daher in Abhängigkeit der Kraftfahrzeugtypen erfolgen.

$$\bar{M} = \pm \sum_{i=1}^{n_{Typ}} \overline{s_{km_i}} \times \varepsilon_{s_{km_i}} \mid \{n_{Typ} = \text{Anzahl der Kraftfahrzeugtypen}\} \quad (41)$$

$$\overline{s_{km_i}} = n_{Kfz_i} \times s_{km} \quad (42)$$

Der streckenbezogene Emissionsfaktor $\varepsilon_{s_{km}}$ des Kfz kann je nach Lage der Wegstrecke, die innerorts (*io*), außerorts (*ao*) oder auf der Autobahn (*AB*) liegen kann, unterschiedliche Größen annehmen. Die Wegstrecke $\overline{s_{km}}$ ist dann in (7) und (40) sowie in (41) und (42) in Abhängigkeit ihrer Lage mit dem streckenspezifischen Emissionsfaktor $\varepsilon_{s_{km,io}}$, $\varepsilon_{s_{km,ao}}$ oder $\varepsilon_{s_{km,AB}}$ zu berücksichtigen, so dass sich die Menge \bar{M} der CO₂-Emissionen analog zu (13) ergibt:

$$(13) \quad \bar{M} = \pm s_{km(io,ao,AB)} \times \varepsilon_{s_{km(io,ao,AB)}} \mid \{- = \text{Minderung}, + = \text{Zuwachs}\}$$

$$\bar{M} = \pm \sum_{i=1}^{n_{Typ}} \overline{s_{km(io,ao,AB)_i}} \times \varepsilon_{s_{km(io,ao,AB)_i}} \quad (43)$$

$$\overline{s_{km(io,ao,AB)_i}} = n_{Kfz_i} \times s_{km(io,ao,AB)} \quad (44)$$

Somit gilt folgende **Fallunterscheidung**:

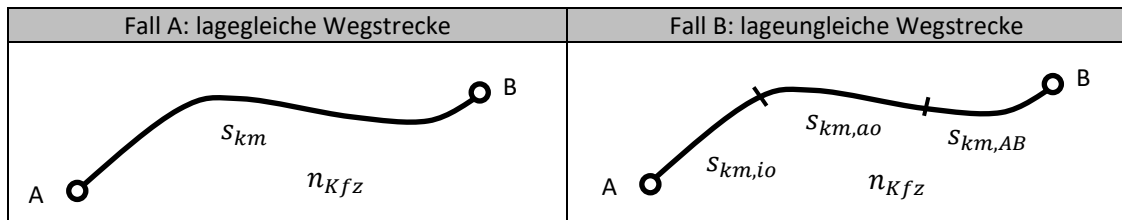


Abbildung 5: Fall der lagegleichen und lageungleichen Wegstrecken

Die Gesamtmenge \bar{M} der CO₂-Emissionen ist definiert als Tagesmenge, die noch auf den Wirkungszeitraum (siehe Abschnitt 6) zu beziehen ist. Sie ist mit (5) zu der **wirksamen Menge** \bar{M}_W der CO₂-Emissionen hochzurechnen.

$$(5) \quad \bar{M}_W = n_T \times \bar{M}$$

5.2.3 Berechnungsformeln

Schritt 1:

Für jeden Kraftfahrzeugtyp ist die Summe der von allen Kfz dieses Typs verkürzten oder verlängerten Wegstrecken zu bilden.

Dies erfolgt

- bei lagegleichen Wegstrecken nach (42):

$$(42) \quad \overline{s_{km_i}} = n_{Kfz_i} \times s_{km}$$

- bei lageungleichen Wegstrecken nach (44):

$$\overline{s_{km,io_i}} = n_{Kfz_i} \times s_{km,io} \quad (45)$$

$$\overline{s_{km,ao_i}} = n_{Kfz_i} \times s_{km,ao} \quad (46)$$

$$\overline{s_{km,AB_i}} = n_{Kfz_i} \times s_{km,AB} \quad (47)$$

- mit:

s_{km} : verkürzte oder verlängerte Wegstrecke

$s_{km,io}$: verkürzte oder verlängerte Wegstrecke in der Lage innerorts

$s_{km,ao}$: verkürzte oder verlängerte Wegstrecke in der Lage außerorts

$s_{km,AB}$: verkürzte oder verlängerte Wegstrecke in der Lage Autobahn

$\overline{s_{km}}$: Summe der verkürzten oder verlängerten Wegstrecken

$\overline{s_{km,io}}$: Summe der verkürzten oder verlängerten Wegstrecken in der Lage innerorts

$\overline{s_{km,ao}}$: Summe der verkürzten oder verlängerten Wegstrecken in der Lage außerorts

$\overline{s_{km,AB}}$: Summe der verkürzten oder verlängerten Wegstrecken in der Lage Autobahn

n_{Kfz_i} : Anzahl der Kfz des Kraftfahrzeugtyps i

Schritt 2:

In Kenntnis der Emissionsfaktoren der Kraftfahrzeugtypen ist die Menge \bar{M} der CO₂-Emissionen zu ermitteln.

Dies erfolgt

- bei lagegleichen Wegstrecken mit den streckenbezogenen Emissionsfaktoren nach (41):

$$(41) \quad \bar{M} = \sum_{i=1}^{n_{typ}} \overline{s_{km_i}} \times \varepsilon_{s_{km_i}}$$

- bei lageungleichen Wegstrecken mit den streckenspezifischen Emissionsfaktoren nach (43):

$$\bar{M} = \sum_{i=1}^{n_{typ}} \overline{s_{km,io_i}} \times \varepsilon_{s_{km,io_i}} + \overline{s_{km,ao_i}} \times \varepsilon_{s_{km,ao_i}} + \overline{s_{km,AB_i}} \times \varepsilon_{s_{km,AB_i}} \quad (48)$$

- mit:

\bar{M}	: CO ₂ -Menge der Veränderung der Verkehrsleistung
$\overline{s_{km}}$	: Summe der verkürzten oder verlängerten Wegstrecken
$\overline{s_{km,io}}$	: Summe der verkürzten oder verlängerten Wegstrecken in der Lage innerorts
$\overline{s_{km,ao}}$	: Summe der verkürzten oder verlängerten Wegstrecken in der Lage außerorts
$\overline{s_{km,AB}}$	: Summe der verkürzten oder verlängerten Wegstrecken in der Lage Autobahn
$\varepsilon_{s_{km}}$	: streckenbezogener Emissionsfaktor
$\varepsilon_{s_{km,io}}$	: streckenspezifischer Emissionsfaktor für die Wegstrecke in der Lage innerorts
$\varepsilon_{s_{km,ao}}$	: streckenspezifischer Emissionsfaktor für die Wegstrecke in der Lage außerorts
$\varepsilon_{s_{km,AB}}$	: streckenspezifischer Emissionsfaktor für die Wegstrecke in der Lage Autobahn
n_{Typ}	: Anzahl der Kraftfahrzeugtypen

Schritt 3:

Die ermittelte Gesamtmenge \bar{M} der CO₂-Emissionen der Veränderung der Verkehrsleistung entspricht der Tagesmenge. Durch Hochrechnung mit der Anzahl der wirksamen Tage nach (5) wird die wirksame Menge \bar{M}_W der CO₂-Emissionen bezogen auf den Wirkungszeitraum erhalten. Ggf. kann es anschließend noch erforderlich sein, die wirksamen Mengen der Einzelereignisse einer komplexen Verkehrsverringerung zusammenzufassen.

5.3 Verstetigung des Kraftverkehrs

5.3.1 Modellansatz

Bei der Verstetigung des Kraftverkehrs wird eine **Minderung** der CO₂-Emissionen durch die Reduzierung der Anzahl von Anhalte- und Anfahrtsvorgängen von Kfz (Halte) und durch die Verringerung der Summe der Standzeiten der Kfz mit laufendem Motor (Wartezeiten⁹) bewirkt. Bei gleichbleibendem Verkehrsaufkommen findet also eine **Verkehrsverflüssigung** für den Kraftverkehr an Knotenpunkten, an Hindernissen und Engpassstellen sowie entlang von Straßenzügen statt, die zu einer Anhebung des Verkehrszustandes¹⁰ führt.

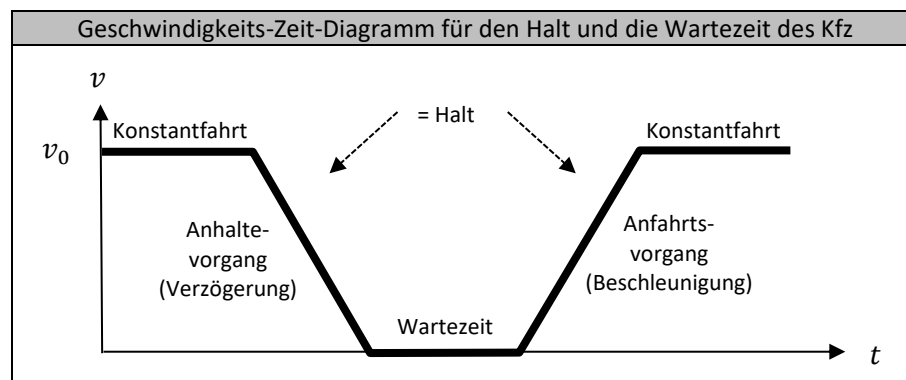


Abbildung 6: Muster für den Zyklus eines Anhalte- und Anfahrtsvorgangs

Es wird angenommen, dass sich durch die Wirkung eines Vorhabens der Verkehrsfluss für den Kraftverkehr dahingehend ändert, dass sich ein flüssigerer Verkehrsablauf einstellt oder es zu einer behinderungsfreien Fahrt kommt. Im Vergleich zum anfänglichen Referenzfall kommt es zu weniger Halten und sich verringernden Wartezeiten. Die Emissionsqualität dieser Verkehrsverflüssigung wird durch die quantitativen Merkmale des Verflüssigungsprozesses bestimmt. Neben der Anzahl der Kfz, deren Fahrt verflüssigt wird, sind der Verkehrszustand, das Geschwindigkeitsniveau und die Antriebstechnik der Kfz die bestimmenden Faktoren. Die Anzahl der Kfz kann nach der Verkehrszeit¹¹ variieren.

Konkret werden die CO₂-Emissionen der Halte und Wartezeiten eines schlechten (niedrigen) Verkehrszustandes durch solche eines besseren (höheren) Verkehrszustandes substituiert. Hierbei wird unterstellt, dass die Verkehrsmengen der substituierten Verkehrszustände gleichgroß sind. Die Gesamtmenge der CO₂-Emissionen der Verkehrsverflüssigung ergibt sich dann im Sinne einer Bilanz als gegenseitige Aufrechnung der CO₂-Mengen für den Verkehrszustand vor und den Verkehrszustand nach der Verkehrsverflüssigung.

Die Bilanz wird pro Einzelereignis und Tag gezogen und über die Anzahl der Tage, an denen die Verkehrsverflüssigung wirksam ist, auf den Wirkungszeitraum bezogen (siehe Abschnitt 6).

⁹ auch als „Leerlaufzeiten“ bezeichnet

¹⁰ vgl. Abschnitt 3, Seite 12

¹¹ vgl. Abschnitt 3, Seite 12

Als Einzelereignis gilt die orts- und zeitpunktbezogene Verkehrsverflüssigung einer Verkehrszeit. Die Verflüssigung erfolgt also im Einzelfall für eine Bezugsverkehrszeit (Haupt-, Neben- oder Schwachverkehrszeit) und einen Bezugsort (Knotenpunkt, Ereignisstelle, Straßenzug) und wirkt ab einen Bezugszeitpunkt (Zeitpunkt des Wirksamwerdens). Eine über den Einzelfall, die Verkehrszeit und den Bezugsort hinausgehende, komplexe Verkehrsverflüssigung ist in Einzelereignisse aufzulösen.

5.3.2 Modellgrundlagen

Die **Menge** M der CO₂-Emissionen des Kraftverkehrs ergibt sich als Funktion der Verbrauchsmenge B des Kraftstoffs, der verbrannt wird, und dessen CO₂-Gehalt ϱ .

$$M = f(B, \varrho) \quad (49)$$

Vorzeichenregelung: Die Verbrauchsmenge B vor der Verkehrsverflüssigung ist mit negativem Vorzeichen einzuführen und bewirkt eine negative Mengenangabe. Damit wird gedanklich angenommen, dass alle Halte und Wartezeiten des anfänglichen Verkehrszustandes entfallen und eine Minderung der CO₂-Emissionen bewirken. Die Verbrauchsmenge B nach der Verkehrsverflüssigung ist mit positivem Vorzeichen einzuführen und bewirkt eine positive Mengenangabe. Gedanklich kommen nun die im zukünftigen Verkehrszustand existierenden Halte und Wartezeiten wieder hinzu. Sie drücken einen Zuwachs der CO₂-Emissionen aus. Diese Vorzeichenregelung verwirklicht die gegenseitige Aufrechnung der CO₂-Mengen im Sinne des Modellansatzes. Von ihrer Systematik entspricht sie der Regel, wie sie bei der Veränderung des Modal Split (vgl. Abschnitt 5.1) und der Veränderung der Verkehrsleistung (vgl. Abschnitt 5.2) angewendet wird.

$$M = \pm B \times \varrho \mid \{- = \text{Minderung}, + = \text{Zuwachs}\} \quad (50)$$

Die Verbrauchsmenge B setzt sich aus dem Anteil für den Idealfall der behinderungsfreien Fahrt (Konstantfahrt) und dem vom Verkehrszustand abhängigen Anteil für die Halte und Wartezeiten (Zyklusfahrt) zusammen. Der erstgenannte Anteil ist über alle Verkehrszustände nahezu konstant und soll daher außer Acht gelassen werden, da er sich nach dem Modellansatz der gegenseitigen Aufrechnung eliminiert. Es reicht aus, lediglich die gegenüber dem Idealzustand der behinderungsfreien Fahrt durch Halte und Wartezeiten verursachte Mehrverbrauchsmenge B_{MV} für die Berechnung heranzuziehen. Von daher gilt:

$$M \stackrel{\text{def}}{=} \pm B_{MV} \times \varrho \mid \{- = \text{Minderung}, + = \text{Zuwachs}\} \quad (51)$$

Die **Gesamtmenge** \bar{M} der CO₂-Emissionen der Verkehrsverflüssigung ergibt sich als Aufrechnung der Einzelmengen für die Verkehrszustände vor der Verkehrsverflüssigung M_{vor} und nach der Verkehrsverflüssigung M_{nach} . Unter Anwendung der Vorzeichenregel für die Verbrauchsmenge B bzw. B_{MV} stellt sie sich analog zu (4) als Summe der Einzelmengen dar.

$$\bar{M} = M_{vor} + M_{nach} = \sum_{i=1}^2 M_i \quad (52)$$

Unter der Annahme, dass die Verbrauchsmenge B_{MV} eine auf die Verkehrszeit eines Tages bezogene Größe darstellt, entspricht die Gesamtmenge \bar{M} der CO₂-Emissionen der Verkehrsverflüssigung der Tagesmenge des Einzelereignisses, die noch auf den Wirkungszeitraum (siehe Abschnitt 6) zu beziehen ist. Sie ist mit (5) zu der **wirksamen Menge** \bar{M}_W der CO₂-Emissionen hochzurechnen.

$$(5) \quad \bar{M}_W = n_T \times \bar{M}$$

Die **Kraftstoffmehrverbrauchsmenge** B_{MV} eines einmal anhaltenden Kfz entsteht aus dem Kraftstoffverbrauch für den Zyklus von Anhalte- und Anfahrtsvorgang (Zyklusmehrverbrauch B_{ZMV}) und den Kraftstoffverbrauch während des Stillstandes des Kfz mit laufendem Motor (Leerlaufmehrverbrauch B_{LMV}). Der Zyklusmehrverbrauch B_{ZMV} ist abhängig von der Ausgangsgeschwindigkeit des Kfz. Seine Höhe ist Gegenstand empirischer Untersuchungen der Verkehrstechnik, aus der er entnommen werden kann (Schnabel, et al., 1997; Schnabel, et al., 2001). Somit muss er nicht durch eine fahrdynamische Berechnung bestimmt werden. Der Leerlaufmehrverbrauch B_{LMV} bestimmt sich aus der Dauer t_W der Wartezeit mit laufendem Motor und dem Leerlaufverbrauch b_L des Motors. Der Leerlaufverbrauch ist ein bekannter Wert der Fahrzeugtechnik (Grebe, 2005).

$$B_{MV} = B_{ZMV} + B_{LMV} \quad (53)$$

$$B_{LMV} = t_W \times b_L \quad (54)$$

$$B_{MV} = B_{ZMV} + t_W \times b_L \quad (55)$$

In der Regel muss ein Kfz bei seiner Fahrt mehr als einmal anhalten. In Abhängigkeit des Verkehrszustandes an dem Knotenpunkt, der Ereignisstelle oder entlang des Straßenzuges fällt eine größere Anzahl n_H von Halten pro Kilometer über die zurückgelegte Wegstrecke s_{km} an. Die Kraftstoffmehrverbrauchsmenge des Kfz ergibt sich somit als ein Vielfaches der Kraftstoffmehrverbrauchsmenge des einmal haltenden Kfz.

$$B_{MV} = n_H \times s_{km} \times (B_{ZMV} + t_W \times b_L) \quad (56)$$

Der Kraftverkehr umfasst jedoch mehr als ein Kfz. In Abhängigkeit der Verkehrszeit wird der Knotenpunkt, die Ereignisstelle oder der Straßenzug von einer bestimmaren Anzahl n_{Kfz} von Kfz passiert. Die Kraftstoffmehrverbrauchsmenge der Gesamtheit aller Kfz ergibt sich somit als ein Vielfaches der Kraftstoffmehrverbrauchsmenge des einzelnen Kfz.

$$B_{MV} = n_{Kfz} \times n_H \times s_{km} \times (B_{ZMV} + t_W \times b_L) \quad (57)$$

Die Kraftstoffmehrverbrauchsmenge der Kfz variiert je nach Kraftfahrzeugtyp. So verbraucht eine Lkw mehr Kraftstoff als ein Pkw. Die Bestimmung der Kraftstoffmehrverbrauchsmenge muss daher in Abhängigkeit der Kraftfahrzeugtypen erfolgen.

$$B_{MV} = \sum_{i=1}^{n_{Typ}} n_{Kfzi} \times n_H \times s_{km} \times (B_{ZMV_i} + t_W \times b_{L_i}) \quad (58)$$

| $\{n_{Typ} = \text{Anzahl der Kraftfahrzeugtypen}\}$

Die **Wegstrecke** s_{km} ist die Länge des Wirkungsbereichs der Verkehrsverflüssigung, also die Wegstrecke, auf der das Kfz die Zyklen der Halte und die Wartezeiten verbringt, um den Knotenpunkt, die Ereignisstelle oder den Straßenzug zu durchfahren.

5.4 Steigerung der Elektromobilität

5.4.1 Modellansatz

Bei der Steigerung der Elektromobilität wird eine **Minderung** der CO₂-Emissionen durch den Einsatz von Elektroautos¹² an Stelle von konventionellen, mit fossilen Kraftstoffen angetriebenen Kraftwagen bewirkt. Wie bei der Veränderung des Modal Split (vgl. Abschnitt 5.1) findet hier ebenfalls eine **Verkehrsverlagerung** zwischen den Verkehrsmitteln statt. So wird von einem Verkehrsmittel mit hoher spezifischer Emission zu einem Verkehrsmittel mit einer nur geringen oder keiner spezifischen Emission verlagert.

Es wird angenommen, dass die Wirkung eines Vorhabens eine intensivere Nutzung von Elektroautos zur Folge hat und im Vergleich zum anfänglichen Referenzfall zu einer Umverteilung der Verkehrsmittelwahl führt, und zwar **vom konventionellen Kraftwagen zum Elektroauto**. In Folge dessen kommt es zu weniger Fahrten mit konventionellen Kraftwagen. Die Emissionsqualität dieser Verkehrsverlagerung wird durch die quantitativen und qualitativen Merkmale des Verlagerungsprozesses bestimmt. So sind die bestimmenden Faktoren die Anzahl der Elektroautos, ihre Ausprägung – ausgedrückt in Form des Elektromobilitätsgrades – und die Gesamtlänge der mit den Elektroautos zurückgelegten Wegstrecken.

Konkret werden die CO₂-Emissionen der Wegstrecken, die mit konventionellen Kraftwagen zurückgelegt werden, durch emissionsarme oder emissionsfreie Wegstrecken der Elektroautos substituiert. Hierbei wird unterstellt, dass die substituierten Wegstrecken gleichlang sind. Die Gesamtmenge der CO₂-Emissionen der Verkehrsverlagerung ergibt sich dann als Summe der CO₂-Emissionen der die Verkehrsleistung abgebenden konventionellen Kraftwagen.

Die Summe wird pro Einzelereignis und Tag gebildet und über die Anzahl der Tage, an denen die Verkehrsverlagerung wirksam ist, auf den Wirkungszeitraum bezogen (siehe Abschnitt 6).

Als Einzelereignis gilt die orts- und zeitpunktbezogene Verkehrsverlagerung. Die Verlagerung erfolgt also im Einzelfall für einen Bezugsort (Fahrzeugstation, Ladesäulenstandort) und wirkt ab einen Bezugszeitpunkt (Zeitpunkt des Wirksamwerdens). Eine über den Einzelfall und den Bezugsort hinausgehende, komplexe Verkehrsverlagerung ist in Einzelereignisse aufzulösen.

Hinweis: Der Modellansatz berücksichtigt ausschließlich die Verkehrsverlagerung vom konventionellen Kraftwagen zum Elektroauto. Dies bewirkt eine Minderung der CO₂-Emissionen. Theoretisch ist auch die Verlagerung **vom Elektroauto zum konventionellen Kraftwagen** denkbar, bei der ein **Zuwachs** der CO₂-Emissionen erfolgen würde. Dieser Fall wird hier jedoch nicht einbezogen. Dennoch ist im Gesamtkontext des Berechnungsmodells die CO₂-Menge unter Beachtung der Regeln der Vorzeichen zu ermitteln und die Minderung der CO₂-Emissionen als negative Größe zu definieren.

¹² vgl. Abschnitt 3, Seite 11

5.4.2 Modellgrundlagen

Die **Menge** M der CO₂-Emissionen, die durch den Einsatz eines Elektroautos eingespart wird, ergibt sich nach (1) als Funktion der Wegstrecke s_{km} und dem streckenbezogenen Emissionsfaktor $\varepsilon_{s_{km}}$ des Kraftwagens, mit dem die Wegstrecke konventionell zurückgelegt worden wäre.

$$(1) \quad M = f(s_{km}, \varepsilon_{s_{km}})$$

Vorzeichenregel: In Anwendung der bestehenden Vorzeichenregel (vgl. Abschnitt 5.1 bis Abschnitt 5.3) ist die Wegstrecke s_{km} mit negativem Vorzeichen einzuführen. Sie bewirkt eine negative Mengenangabe, die als Minderung der CO₂-Emissionen definiert ist.

$$(2) \quad M = s_{km} \times \varepsilon_{s_{km}} \mid \{- = \text{Minderung}\}$$

Das Elektroauto kann von unterschiedlichem Typ sein. So kann es sich um ein Plug-In-Hybrid mit einem reduzierten Ausstoß von CO₂-Emissionen oder um ein E-Fahrzeug ohne CO₂-Ausstoß handeln. Daher ist die Ausprägung des Elektroautos über dessen Elektromobilitätsgrad η_{EM} zu berücksichtigen. Der Elektromobilitätsgrad eines Fahrzeuges gibt den prozentualen Anteil an, mit dem das Fahrzeug rein batterieelektrisch fährt und CO₂-Emissionen vermeidet.

$$M = s_{km} \times \varepsilon_{s_{km}} \times \eta_{EM} \quad (59)$$

Die **Wegstrecke** s_{km} entspricht der Länge des Fahrweges des Elektroautos. Für sie gelten die Modellgrundlagen des Abschnittes 5.1.2 bezüglich des Allgemeinfalls und der Sonderfälle 1 und 2 analog. An Stelle der einzelnen Wegstrecke ist daher die Summe $\overline{s_{km}}$ aller mit Elektroautos gleichen Typs zurückgelegten Wegstrecken nach (6), (7) oder (8) in Ansatz zu bringen¹³.

$$M = \overline{s_{km}} \times \varepsilon_{s_{km}} \times \eta_{EM} \quad (60)$$

Allgemeinfall:

$$(6) \quad \overline{s_{km}} = \sum_{i=1}^{n_{Fzg}} s_{km_i} \mid \{n_{Fzg} = \text{Anzahl der Fahrzeuge}\}$$

Sonderfall 1:

$$(7) \quad \overline{s_{km}} = n_{Fzg} \times s_{km}$$

Sonderfall 2:

$$(8) \quad \overline{s_{km}} = \sum_{i=1}^{n_S} n_{Fzgi} \times s_{km_i} \mid \{n_S = \text{Anzahl der Wegstrecken}\}$$

Bei Berücksichtigung von Elektroautos unterschiedlichen Typs sollte der einfachen Handhabbarkeit wegen der Sonderfall 2 in einzelne Wegstrecken aufgelöst und nach dem Sonderfall 1 behandelt werden.

¹³ Als Regelfall der Anwendung wird der Sonderfall 1 angenommen.

Die **Gesamtmenge** \bar{M} der CO₂-Emissionen stellt sich nach (4) als Summe der Einzelmengen der Elektroautos gleichen Typs dar.

$$(4) \quad \bar{M} = \sum_{i=1}^{n_{Typ}} M_i \mid \{n_{Typ} = \text{Anzahl der Elektroautotypen}\}$$

Die **wirksamen Menge** \bar{M}_W der CO₂-Emissionen bestimmt sich durch hochrechnen der als Tagesmenge definierten Gesamtmenge \bar{M} der CO₂-Emissionen auf den Wirkungszeitraum mit (5) (siehe Abschnitt 6).

$$(5) \quad \bar{M}_W = n_T \times \bar{M}$$

Praktikabler kann es sein, die Menge der CO₂-Emissionen nicht direkt über die Länge des zurückgelegten Fahrweges eines Elektroautos zu ermitteln, sondern aus die Anzahl der Vorgänge zur vollständigen Aufladung des Elektroautos (Ladevorgang) abzuleiten. In diesem Fall ist der Ladevorgang durch eine ihm äquivalente Wegstrecke zu substituieren. Zu Substitution des Ladevorgangs kann die **mittlere Reichweite** s_{EM} der Elektroautos herangezogen werden. Die mittlere Reichweite entspricht dem Wegstreckenäquivalent eines Ladevorgangs im Sinne einer vollständigen Aufladung des Elektroautos.

$$s_{km} \stackrel{\text{def}}{=} s_{EM} \quad (61)$$

Die Summe $\overline{s_{km}}$ aller mit Elektroautos zurückgelegten Wegstrecken bestimmt sich dann als Produkt der mittleren Reichweite und der Anzahl n_L der pro Tag anfallenden Ladevorgänge.

$$\overline{s_{km}} \stackrel{\text{def}}{=} s_{EM} \times n_L \quad (62)$$

Hierbei muss die Anzahl n_L der pro Tag anfallenden Ladevorgänge nicht zwingend den Wert einer natürlichen Zahl (1, 2, 3, 4 usw.) annehmen, sondern kann auch eine gebrochene Zahl sein, etwa wenn das Elektroauto nur zur Hälfte oder zu einem Drittel geladen wird.

Sofern der Anzahl der Ladevorgänge auf andere Bezugszeiträume als den Tag bezogen ist, so ist diese mit der Anzahl der Tage des entsprechenden Bezugszeitraums auf den Tag zu beziehen (siehe Abschnitt 6.2.1).

6 Bezugsgrößen, Umrechnungen und Variablen

6.1 Wirkungszeitraum

Die Gesamtmenge \bar{M} der CO₂-Emissionen der verkehrlichen Veränderungsprozesse nach den Abschnitten 5.1 bis 5.4 ist eine auf den Tag bezogene Größe (Tagesmenge). Sie ist noch auf den Wirkungszeitraum des Vorhabens zu beziehen.

Die wirksame Menge \bar{M}_W der CO₂-Emissionen bezogen auf den Wirkungszeitraum ergibt sich mit (5) über die Anzahl n_T der Tage, an denen der Veränderungsprozess als Einzelereignis wirkt (wirksame Zeit).

$$(5) \quad \bar{M}_W = n_T \times \bar{M}$$

Der Wirkungszeitraum beginnt mit dem Wirksamwerden des Veränderungsprozesses (Bezugszeitpunkt). Er erstreckt sich über den Zeitraum, in dem die verkehrlichen Veränderungen wirksam sind. Für die Antragstellung ist der längste Wirkungszeitraum jedoch maximal bis zum Ende der Förderperiode am 31. Dezember 2023 anzugeben.

Wirkt der Veränderungsprozess auf den **Berufsverkehr**¹⁴ oder den **Wirtschaftsverkehr**¹⁵, so bestimmt sich die wirksame Zeit aus der Anzahl der Arbeitstage (Montag bis Freitag) pro Kalenderjahr, die um die Anzahl der gesetzlichen Feiertage und die Anzahl der Tage des gesetzlichen Mindesturlaubs nach Bundesurlaubsgesetz bereinigt wird:

Jahr	Anzahl Tage Mo, Di, Mi, Do, Fr	Anzahl der durch gesetzliche Feiertage entfallenden Arbeitstage	Anzahl der Arbeitstage	Anzahl der Tage des gesetzlichen Urlaubsanspruchs	Anzahl der wirksamen Arbeitstage
2016	261	9	252	20	232
2017	260	10	250		230
2018	261	10	251		231
2019	261	10	251		231
2020	262	8	254		234
2021	261	6	255		235
2022	260	8	252		232
2023	260	10	250		230
Mittelwert	261	9	252		232

Tabelle 3: Anzahl der Arbeitstage in Sachsen-Anhalt (Schulz, 2015)

In begründeten Fällen kann auch die Anzahl der Tage des Jahres als wirksame Zeit verwendet werden, etwa dann, wenn der Veränderungsprozess ausschließlich auf den **Freizeitverkehr**¹⁶ wirkt oder er eine **allgemeine Wirkung unabhängig von dem Verkehrszweck** entfaltet.

¹⁴ vgl. Abschnitt 3, Seite 11

¹⁵ vgl. Abschnitt 3, Seite 12

¹⁶ vgl. Abschnitt 3, Seite 11

6.2 Umrechnungen

6.2.1 Umrechnung zeitraumbezogener Größen

Sind Angaben n , die zeitraumbezogene Größen darstellen, auf andere Bezugszeiträume als den Tag bezogen, so sind sie mit der Anzahl n_T der Tage des entsprechenden Bezugszeitraums auf den Tag wie folgt zu beziehen:

$$n_{Tag} = \frac{n_{Jahr}}{n_{T_{Jahr}}} = \frac{n_{Monat}}{n_{T_{Monat}}} = \frac{n_{Woche}}{n_{T_{Woche}}} \quad (63)$$

Bei der Wahl der Anzahl n_T der Tage des jeweiligen Bezugszeitraums ist zu beachten, auf welchen Verkehrszweck der Veränderungsprozess abstellt und welchem Modell der Jahreseinteilung (Arbeitsjahr, Kalenderjahr) demzufolge der Wirkungszeitraum folgt (vgl. Abschnitt 6.1). Die Anzahl der Tage der Bezugszeiträume ist wie folgt anzunehmen:

Verkehrszweck	Bezugseinheit	n_T		
		Jahr	Monat	Woche
Berufsverkehr oder Wirtschaftsverkehr	Arbeitsjahr	232	20	5
Freizeitverkehr oder verkehrszweckunabhängig	Kalenderjahr	365	30	7

Tabelle 4: Anzahl der Tage n_T der Bezugszeiträume

6.2.2 Umrechnung des Kraftstoffverbrauchs in den streckenbezogenen Emissionsfaktor

Der streckenbezogene Emissionsfaktor ε_{skm} eines Kfz wird über dessen Streckenverbrauch b_s und dem CO₂-Gehalt ϱ des Kraftstoffes ermittelt.

$$\varepsilon_{skm} = \frac{b_s}{100} \times \varrho \quad (64)$$

6.2.3 Umrechnung des streckenbezogenen in den leistungsbezogenen Emissionsfaktor

Der leistungsbezogene Emissionsfaktor $\varepsilon_{p_{km}}$ eines Verkehrsmittels des Kraftverkehrs wird über den streckenbezogenen Emissionsfaktor ε_{skm} und die Besetzungszahl N des Verkehrsmittels ermittelt.

$$\varepsilon_{p_{km}} = \frac{\varepsilon_{skm}}{N} \quad (65)$$

Die Besetzungszahl N ergibt sich aus der Besetzungskapazität K und dem Besetzungsgrad¹⁷ G des Verkehrsmittels. Die Besetzungskapazität gibt das verfügbare Platzangebot des Verkehrsmittels an und der Besetzungsgrad, wie das verfügbare Platzangebot in Prozent genutzt wird.

$$N = K \times G \quad (66)$$

¹⁷ auch als „Auslastungsgrad“ bezeichnet

6.3 Übersicht über die Bezeichnung und Verwendung der Variablen

Variable	Bezeichnung	Einheit	Verwendung
b_L	Leerlaufverbrauch	$\left[\frac{ml}{s}\right]$	b_L
b_S	Streckenverbrauch	$\left[\frac{l}{100\ km}\right]$	b_S
B	Verbrauchsmenge	[l]	$B,$ B_{MV}, B_{ZMV}, B_{LMV}
G	Besetzungsgrad	[%]	G
K	Besetzungskapazität	[P]	K
M	Menge	[g]	$M,$ $\bar{M},$ $\bar{M}_W,$ M_{vor}, M_{nach}
n_{Fzg}	Anzahl Fahrzeuge	[]	$\frac{n_{Fzg}}{n_{Fzg}}$
n_H	Anzahl Halte	$\left[\frac{1}{km}\right]$	n_H
n_{Kfz}	Anzahl Kfz	[]	n_{Kfz}
n_L	Anzahl Ladevorgänge	[]	n_L
n_P	Anzahl Personen	[]	n_P
n_S	Anzahl Wegstrecken	[]	n_S
n_T	Anzahl Tage	[]	n_T
n_{Typ}	Anzahl Kraftfahrzeugtypen oder Anzahl Elektroautotypen	[]	n_{Typ}
n_V	Anzahl Verkehrsmittel	[]	n_V
N	Besetzungszahl	$\left[\frac{P}{Fzg}\right]$	$N,$ N_{PKW}
s	Wegstrecke, mittlere Wegstrecke oder Wirkungsbereich	[km] oder $[Fzg\ km]$	$s_{km},$ $s_{km,io}, s_{km,ao}, s_{km,AB},$ $\frac{s_{OV}}{s_{km}},$ $\frac{s_{km}}{s_{km,io}, s_{km,ao}, s_{km,AB}}$ s_{EM}
t	Zeit oder Wartezeit	[s]	$t,$ t_W
v_0	Ausgangsgeschwindigkeit	$\left[\frac{km}{h}\right]$	v_0

VA	Verkehrsarbeit	$[P\ km]$	VA
VL	Verkehrsleistung	$\left[\frac{P\ km}{d}\right]$	VL
VM	Verkehrsmenge	$[P]$	VM
ε	Emissionsfaktor	$\left[\frac{g}{Fzg\ km}\right]$	ε_{skm} $\varepsilon_{skm,io}, \varepsilon_{skm,ao}, \varepsilon_{skm,AB}$
		$\left[\frac{g}{P\ km}\right]$	ε_{pkm}
η_{EM}	Elektromobilitätsgrad	$[\]$	η_{EM}
ϱ	CO ₂ -Gehalt	$\left[\frac{g}{l}\right]$	ϱ

Tabelle 5: Bezeichnung und Verwendung der Variablen des mathematischen Modells

Die Abkürzungen der physikalischen Einheiten bedeuten:

a	: Jahr,
d	: Tag,
Fzg	: Fahrzeug,
g	: Gramm,
h	: Stunde,
kg	: Kilogramm,
km	: Kilometer,
l	: Liter,
min	: Minute,
ml	: Milliliter,
P	: Person,
s	: Sekunde,
t	: Tonne,
%	: Prozent.

6.4 Übersicht über den Wertebereich der Variablen

negativer Wertebereich	positiver Wertebereich
	$b_L > 0$
	$b_S > 0$
$B < 0$ = Minderung, Wegfall	$B > 0$ = Zuwachs
	$0 \leq G \leq 1$
	$K > 0$
$M < 0$ = Minderung	$M > 0$ = Zuwachs
	$n_{Fzg} > 0$
	$n_H \geq 0$
	$n_{Kfz} > 0$
	$n_L > 0$
	$n_P > 0$
	$n_S > 0$
	$n_T > 0$
	$n_{Typ} > 0$
	$n_V > 0$
	$N > 0$
$s < 0$ = verringerte Wegstrecke	$s > 0$ = verlängerte Wegstrecke
	$t \geq 0$
	$v_0 > 0$
	$VA > 0$
$VL < 0$ = Minderung	$VL > 0$ = Zuwachs
	$VM > 0$
	$\varepsilon \geq 0$
	$0 \leq \eta_{EM} \leq 1$
	$\varrho \geq 0$

Tabelle 6: Wertebereich der Variablen des mathematischen Modells

6.5 Umrechnungsfaktoren

$$b_L \left[\frac{ml}{s} \right] = \frac{1}{3,6} \times b_L \left[\frac{l}{h} \right] \quad (67)$$

$$M[t] = 10^{-6} \times M[g] \quad (68)$$

- mit:

$$1 [l] = 10^3 [ml] = 1\,000 [ml]$$

$$1 [h] = 60 [min] = 3\,600 [s]$$

$$1 [t] = 10^3 [kg] = 1\,000 [kg] = 10^6 [g] = 1\,000\,000 [g]$$

Die Abkürzungen der physikalischen Einheiten bedeuten:

<i>g</i>	: Gramm,
<i>h</i>	: Stunde,
<i>kg</i>	: Kilogramm,
<i>l</i>	: Liter,
<i>min</i>	: Minute,
<i>ml</i>	: Milliliter,
<i>s</i>	: Sekunde,
<i>t</i>	: Tonne.

6.6 Rundung

Die Berechnung des Rückgangs der CO₂-Emissionen wird ohne Nachkommastellen geführt.

Die Eingabegrößen sind ohne Nachkommastellen einzuführen und bei den Berechnungsgrößen die Nachkommastellen abzuschneiden. Eingabe- und Berechnungsgrößen werden nicht gerundet und stets nur in ganzen Einheiten von *[km]*, *[g]* oder *[t]* benutzt und weiterverwendet.

7 Parameterwerte

7.1 Parameter für die Veränderung des Modal Split

7.1.1 Streckenbezogener Emissionsfaktor

Der streckenbezogene Emissionsfaktor ε_{skm} gibt für ein Verkehrsmittel des Kraftverkehrs die Menge der CO₂-Emissionen für eine zurückgelegte Wegstrecke von einem Kilometer Länge als Mittelwert über alle Fahrbedingungen des Kraftverkehrs¹⁸ an.

Die streckenbezogenen Emissionsfaktoren für die Verkehrsmittel des Kraftverkehrs können nach (INFRAS, 2014) für das Jahr 2015 wie folgt angenommen werden:

Verkehr	Verkehrsmittel	Kraftstoff	ε_{skm} [g/Fzg km]
Motorisierter Individualverkehr	Krad	Benzin	96,0
	Pkw	Benzin	181,9
		Diesel	154,0
		aggregiert:	167,9
öffentlicher Personenverkehr	KOM – Linienbus	Diesel	1188,2
	KOM – Reisebus	Diesel	788,7

Tabelle 7: Streckenbezogener Emissionsfaktor

7.1.2 Streckenspezifischer Emissionsfaktor

Die streckenspezifischen Emissionsfaktoren $\varepsilon_{skm,io}$, $\varepsilon_{skm,ao}$ und $\varepsilon_{skm,AB}$ geben für ein Verkehrsmittel des Kraftverkehrs die Menge der CO₂-Emissionen für eine zurückgelegte Wegstrecke von einem Kilometer Länge jeweils für die Fahrbedingungen des Kraftverkehrs¹⁸ an.

Die streckenspezifischen Emissionsfaktoren für die Verkehrsmittel des Kraftverkehrs können auf der Grundlage von (INFRAS, 2014) für das Jahr 2015 wie folgt angenommen werden:

Verkehr	Verkehrsmittel	Kraftstoff	$\varepsilon_{skm,io}$ [g/Fzg km]	$\varepsilon_{skm,ao}$ [g/Fzg km]	$\varepsilon_{skm,AB}$ [g/Fzg km]
Motorisierter Individualverkehr	Krad	Benzin	107,3	89,4	116,2
	Pkw	Benzin	203,3	169,4	220,3
		Diesel	172,1	143,4	186,5
		aggregiert:	187,7	156,4	203,3
öffentlicher Personenverkehr	KOM – Linienbus	Diesel	1328,1	1106,7	1438,8
	KOM – Reisebus	Diesel	881,6	734,6	955,0

Tabelle 8: Streckenspezifischer Emissionsfaktor

¹⁸ Fahrten innerhalb geschlossener Ortschaften (= innerorts (io)),
Fahrten außerhalb geschlossener Ortschaften (= außerorts (ao)) und
Fahrten auf einer Kraftfahrstraße (= Autobahn (AB))
(vgl. Abschnitt 5.1.2, Seite 18)

7.1.3 Leistungsbezogener Emissionsfaktor

Der leistungsbezogene Emissionsfaktor $\varepsilon_{P_{km}}$ gibt für Verkehrsmittel des öffentlichen Personenverkehrs die Menge der CO₂-Emissionen an, die pro beförderter Person über eine Wegstrecke von einem Kilometer Länge (Personenkilometer¹⁹) entsteht.

Die leistungsbezogenen Emissionsfaktoren können für die Verkehrsmittel des öffentlichen Personenverkehrs nach (VDV, 2015 S. 10 und 12) wie folgt angenommen werden:

Verkehr	Verkehrsmittel	$\varepsilon_{P_{km}}$ [g/P km]
Nahverkehr	U-Bahn, Stadtbahn, Straßenbahn	70,6
	KOM – Linienbus	73,1
	Regionalzug	68,0
	aggregiert:	70,2
Fernverkehr	KOM – Reisebus	29,9
	Fernzug	39,8

Tabelle 9: Leistungsbezogener Emissionsfaktor

7.1.4 Mittlere Fahrtweite des öffentlichen Personenverkehrs

Die mittlere Fahrtweite $s_{\text{öV}}$ des öffentlichen Personenverkehrs ist die durchschnittliche Länge des Fahrweges von Fahrzeugen des öffentlichen Personenverkehrs. Sie ist definiert als Quotient der Summe der Fahrtweiten aller Fahrgäste und der Anzahl der Fahrgäste.

Die mittlere Fahrtweite kann nach (VDV, 2015 S. 31, 38, 41 und 43) in Abhängigkeit des Verkehrsmittels pauschal (siehe Tabelle 10) oder nach (SMWA, 2015) in Abhängigkeit der räumlichen Siedlungsstruktur siedlungsspezifisch (siehe Tabelle 11) differenziert wie folgt gewählt werden:

Verkehrsmittelspezifische Differenzierung	$s_{\text{öV}}$ [km]
U-Bahn, Stadtbahn, Straßenbahn	4,25
KOM – Linienbus	5,7
Regional- und Fernzug	36,3
aggregiert:	12,8

Tabelle 10: Mittlere Fahrtweite differenziert nach Verkehrsmittel

Siedlungsspezifische Differenzierung	$s_{\text{öV}}$ [km]
Grund-/Kleinzentrum/ländliche Gemeinde	17,7
Mittelzentrum (ab 35 000 Einwohner)	14,4
Oberzentrum (unter 500 000 Einwohner)	9,6

Tabelle 11: Mittlere Fahrtweite differenziert nach Siedlungsstruktur

¹⁹ Die Einheit Personenkilometer beschreibt die erbrachte Verkehrsarbeit (vgl. Abschnitt 5.1.2, Seite 19).

Zudem kann die mittlere Fahrtweite nach Tabelle 11 nach (SMWA, 2015) in die Fahrtweitenanteile der lageungleichen Wegstrecken (vgl. Abschnitt 5.1.2, Seite 18) wie folgt streckenspezifisch unterteilt werden:

Räumliche Siedlungsstruktur	Streckenspezifische Differenzierung		
	innerorts [%]	außerorts [%]	Autobahn [%]
Grund-/Kleinzentrum/ländliche Gemeinde	10	50	40
Mittelzentrum (ab 35 000 Einwohner)	25	40	35
Oberzentrum (unter 500 000 Einwohner)	40	30	30
aggregiert:	30	35	35

Tabelle 12: Mittlere Fahrtweitenanteile differenziert nach Siedlungsstruktur

7.1.5 Besetzungszahl des Pkw

Die Besetzungszahl N_{Pkw} gibt die Anzahl der durchschnittlich im Pkw beförderten Personen an. Je nach Verkehr nimmt sie nach (BMVI, 2015b) unterschiedliche Größen an:

Verkehr	N_{Pkw} [P/Fzg]
Berufsverkehr	1,2
Freizeitverkehr	1,9

Tabelle 13: Besetzungszahl des Pkw

Hinweis: Die Besetzungszahl N unterscheidet sich vom Besetzungsgrad G . Der Besetzungsgrad gibt an, wie das verfügbare Platzangebot in Prozent genutzt wird, und findet im Personenverkehr als Angabe für die mittlere Auslastung des Verkehrsmittels Anwendung.

7.2 Parameter für die Veränderung der Verkehrsleistung

7.2.1 Streckenbezogener Emissionsfaktor

Der streckenbezogene Emissionsfaktor ε_{skm} gibt für ein Kfz die Menge der CO₂-Emissionen für eine zurückgelegte Wegstrecke von einem Kilometer Länge als Mittelwert über alle Fahrbedingungen des Kraftverkehrs¹⁸ an.

Die streckenbezogenen Emissionsfaktoren für die Kfz können nach (INFRAS, 2014) für das Jahr 2015 wie folgt angenommen werden:

Verkehr	Kfz		Kraftstoff	ε_{skm} [g/Fzg km]
	Typ	Bezeichnung		
Motorisierter Individualverkehr	1	Krad	Benzin	96,0
	2	Pkw	Benzin	181,9
	3		Diesel	154,0
	–		aggregiert:	167,9
Leichter Nutzverkehr	4	Kleiner Lkw (bis 3,5 t)	Benzin	187,3
		Leichter Lkw (bis 7,5 t)	Diesel	214,2
			aggregiert:	213,0
Schwerer Nutzverkehr	5	Mittelschwerer Lkw (bis 12 t) Schwerer Lkw (bis 40 t)	Diesel	742,1
Öffentlicher Personenverkehr	6	KOM Linienbus Reisebus	Diesel	1188,2
			Diesel	788,7
			aggregiert:	988,4

Tabelle 14: Streckenbezogener Emissionsfaktor

7.2.2 Streckenspezifischer Emissionsfaktor

Die streckenspezifischen Emissionsfaktoren $\varepsilon_{skm,io}$, $\varepsilon_{skm,ao}$ und $\varepsilon_{skm,AB}$ geben für ein Kfz die Menge der CO₂-Emissionen für eine zurückgelegte Wegstrecke von einem Kilometer Länge jeweils für die einzelnen Fahrbedingungen des Kraftverkehrs¹⁸ an.

Die streckenspezifischen Emissionsfaktoren für die Kfz können auf der Grundlage von (INFRAS, 2014) für das Jahr 2015 wie folgt angenommen werden:

Kfz		Kraftstoff	$\varepsilon_{skm,io}$ [g/Fzg km]	$\varepsilon_{skm,ao}$ [g/Fzg km]	$\varepsilon_{skm,AB}$ [g/Fzg km]
Typ	Bezeichnung				
1	Krad	Benzin	107,3	89,4	116,2
2	Pkw	Benzin	203,3	169,4	220,3
3		Diesel	172,1	143,4	186,5
–		aggregiert:	187,7	156,4	203,3
4	Kleiner Lkw (bis 3,5 t) Leichter Lkw (bis 7,5 t)	Benzin	209,4	174,5	226,8
		Diesel	239,4	199,5	259,4
		aggregiert:	238,1	198,4	257,9
5	Mittelschwerer Lkw (bis 12 t) Schwerer Lkw (bis 40 t)	Diesel	829,5	691,2	898,6
6	KOM Linienbus Reisebus	Diesel	1328,1	1106,7	1438,8
		Diesel	881,6	734,6	955,0
		aggregiert:	1104,8	920,6	1196,8

Tabelle 15: Streckenspezifischer Emissionsfaktor

7.3 Parameter für die Verstetigung des Kraftverkehrs

7.3.1 Leerlaufverbrauch

Der Leerlaufverbrauch b_L benennt die Menge des Kraftstoffs, die ein laufender Motor ohne eingelegten Gang pro Zeiteinheit verbraucht. Der Leerlaufverbrauch ist abhängig von dem Typ, dem Hubraum und der Leerlaufdrehzahl des Motors. Als Richtgröße für den Leerlaufverbrauch gilt bei einer Leerlaufdrehzahl von 600 bis 950 U/min

a. für Benzinmotoren:

$$b_L \approx 0,35 \dots 0,45 \frac{\left[\frac{l}{h}\right]}{1000 \text{ cm}^3} \quad (\text{Grebe, 2005 S. 36})$$

b. für Dieselmotoren:

$$b_L \approx 0,20 \dots 0,25 \frac{\left[\frac{l}{h}\right]}{1000 \text{ cm}^3} \quad (\text{Grebe, 2005 S. 36})$$

Für die Kfz kann somit folgender Leerlaufverbrauch angenommen werden:

Typ	Kfz Bezeichnung	Kraftstoff	Hubraum	b_L	
				[l/h]	[ml/s]
1	Krad	Benzin	$50 \leq \text{cm}^3 \leq 250$	0,06	0,02
2	Pkw	Benzin	$1500 \leq \text{cm}^3 \leq 2500$	0,8	0,22
3		Diesel	$1500 \leq \text{cm}^3 \leq 2500$	0,5	0,14
–		aggregiert:		0,7	0,20
4	Kleiner Lkw (bis 3,5 t)	Benzin	$2000 \leq \text{cm}^3 \leq 2500$	0,9	0,26
		Diesel	$2000 \leq \text{cm}^3 \leq 2500$	0,5	0,14
	Leichter Lkw (bis 7,5 t)	Diesel	$2,5 \leq l \leq 4$	0,8	0,22
		aggregiert:		0,7	0,19
5	Mittelschwerer Lkw (bis 12 t)	Diesel	$5 \leq l \leq 8$	1,5	0,42
	Schwerer Lkw (bis 40 t)	Diesel	$8 \leq l \leq 16$	2,8	0,77
		aggregiert:		2,5	0,69
6	KOM ²⁰	Diesel	$10 \leq l \leq 13$	2,6	0,73

Tabelle 16: Leerlaufverbrauch b_L der Kfz

²⁰ Das Kfz vom Typ 6 mit der Bezeichnung KOM umfasst den Linien- und Reisebus. Die Unterscheidung nach Linien- und Reisebus ist für die Werte des Leerlauf- und des Zyklusmehrverbrauchs nicht bedeutsam.

7.3.2 Zyklusmehrverbrauch

Der Zyklusmehrverbrauch B_{ZMV} beschreibt den gegenüber der behinderungsfreien Fahrt entstehenden Kraftstoffmehrverbrauch für ein Kfz, das bei der Ausgangsgeschwindigkeit v_0 einmal anhält und den Zyklus von Anhalte- und Anfahrtsvorgang durchläuft.

Gestützt auf die Ermittlungsmethode und den Ergebnissen von (Schnabel, et al., 1997 S. 572; Schnabel, et al., 2011 S. 546) kann für die Kfz der Zyklusmehrverbrauch als Funktion der Ausgangsgeschwindigkeit wie folgt angenommen werden:

B_{ZMV} [ml]	
a. Typ 1 – Krad:	
Krad (Benzin):	$B_{ZMV} = f(v_0) = 0,0007 v_0^2 + 0,0151 v_0 - 0,0022$
b. Typ 2 und 3 – Pkw:	
Pkw (Benzin):	$B_{ZMV} = f(v_0) = 0,0048 v_0^2 + 0,0979 v_0 - 0,0143$
Pkw (Diesel):	$B_{ZMV} = f(v_0) = 0,0024 v_0^2 + 0,0481 v_0 - 0,0070$
aggregiert:	$B_{ZMV} = f(v_0) = 0,0036 v_0^2 + 0,0730 v_0 - 0,0107$
c. Typ 4 – Kleiner und leichter Lkw (Diesel):	
Kleiner Lkw:	$B_{ZMV} = f(v_0) = 0,0050 v_0^2 + 0,1017 v_0 - 0,0148$
Leichter Lkw:	$B_{ZMV} = f(v_0) = 0,0103 v_0^2 + 0,2108 v_0 - 0,0308$
aggregiert:	$B_{ZMV} = f(v_0) = 0,0076 v_0^2 + 0,1562 v_0 - 0,0228$
d. Typ 5 – Mittelschwerer und schwerer Lkw (Diesel):	
Mittelschwerer Lkw:	$B_{ZMV} = f(v_0) = 0,0172 v_0^2 + 0,3513 v_0 - 0,0513$
Schwerer Lkw:	$B_{ZMV} = f(v_0) = 0,0488 v_0^2 + 0,9984 v_0 - 0,1457$
aggregiert:	$B_{ZMV} = f(v_0) = 0,0330 v_0^2 + 0,6748 v_0 - 0,0985$
e. Typ 6 – KOM (Diesel):	
KOM ²⁰ :	$B_{ZMV} = f(v_0) = 0,0271 v_0^2 + 0,5546 v_0 - 0,0810$

Tabelle 17: Funktion für den Zyklusmehrverbrauch B_{ZMV} der Kfz

Für die Stufen der Ausgangsgeschwindigkeit ergibt sich damit folgender Zyklusmehrverbrauch

a. für den motorisierten Individualverkehr und Personenverkehr:

Ausgangs- geschwin- digkeit v_0 [km/h]	B_{ZMV} [ml]				
	Motorisierter Individualverkehr				Personen- verkehr
	Benzin	Benzin	Diesel	aggregiert:	Diesel
	Krad m = 0,2 t	Pkw m = 1,3 t ^A	Pkw m = 1,3 t ^A	Pkw m = 1,3 t ^A	KOM ²⁰ 18 t m = 15 t ^A
5	0,1	0,6	0,3	0,4	3,4
10	0,2	1,4	0,7	1,1	8,2
20	0,6	3,9	1,9	2,9	21,9
30	1,1	7,2	3,6	5,4	40,9
40	1,7	11,6	5,8	8,7	65,5
50	2,5	16,9	8,4	12,6	95,4
60	3,4	23,1	11,5	17,3	130,8
70	4,5	30,4	15,1	22,7	171,5
80	5,7	38,5	19,2	28,9	217,7
90	7,0	47,7	23,8	35,7	269,3
100	8,5	57,8	28,8	43,3	326,4
^A 50 % Beladung					

Tabelle 18: Zyklusmehrverbrauch B_{ZMV} der Kfz (Teil 1)

b. für den leichten und schweren Nutzverkehr:

Ausgangs- geschwin- digkeit v_0 [km/h]	B_{ZMV} [ml]					
	Leichter Nutzverkehr			Schwerer Nutzverkehr		
	Diesel	Diesel	aggregiert:	Diesel	Diesel	aggregiert:
	Lkw ^A 3,5 t m = 2,75 t ^E	Lkw ^B 8 t m = 5,7 t ^E	Lkw m = 4,2 t ^E	Lkw ^C 12 t m = 9,5 t ^E	Lkw ^D 38 t m = 27 t ^E	Lkw m = 18,2 t ^E
5	0,6	1,3	0,9	2,1	6,1	4,1
10	1,5	3,1	2,3	5,2	14,7	9,9
20	4,0	8,3	6,1	13,9	39,3	26,6
30	7,5	15,6	11,5	26,0	73,7	49,8
40	12,1	24,9	18,4	41,5	117,9	79,7
50	17,6	36,3	26,8	60,5	171,8	116,1
60	24,1	49,7	36,7	82,9	235,4	159,2
70	31,6	65,2	48,2	108,8	308,9	208,8
80	40,1	82,8	61,1	138,1	392,0	265,1
90	49,6	102,4	75,6	170,9	485,0	327,9
100	60,2	124,0	91,6	207,1	587,7	397,4
^A Kleiner Lkw, ^B Leichter Lkw, ^C Mittelschwerer Lkw, ^D Schwerer Lkw, ^E 50 % Beladung						

Tabelle 19: Zyklusmehrverbrauch B_{ZMV} der Kfz (Teil 2)

7.3.3 Verkehrszustand

Der Verkehrszustand²¹ spiegelt die Straßenverkehrsbedingungen wider und bestimmt für den Kraftverkehr die Ausgangsgeschwindigkeit v_0 , die Anzahl n_H der Halte pro Kilometer und die Dauer t_W der Wartezeit.

Die Straßenverkehrsbedingungen können mit Hilfe der Fahrmodi nach (Schnabel, et al., 1997 S. 576) nachgebildet werden. Danach kann die Anzahl der Halte und die Dauer der Wartezeit als Funktion der Ausgangsgeschwindigkeit wie folgt angenommen werden:

a. Anzahl der Halte n_H :

$$n_H = f(v_0) = 20,126 e^{-0,062 v_0} \mid \{v_0 \geq 10 \text{ km/h}\}$$

b. Dauer der Wartezeit t_W :

$$t_W = f(v_0) = -0,0087 v_0^2 - 0,2559 v_0 + 57,1980 \mid \{0 \text{ km/h} \leq v_0 \leq 70 \text{ km/h}\}$$

Für die Stufen der Ausgangsgeschwindigkeit leitet sich somit folgender Verkehrszustand ab:

Auswahlkriterien				Verkehrszustand			
Lage	Ausgangs- geschwin- digkeit v_0 [km/h]	Vorrück- strecke [km]	Fahrzeit- verlänge- rung [min/km]	Halte pro Kilometer n_H [1/km]	Dauer der Wartezeit t_W [s]	Bezeichnung	
innerorts	50	1,103	0	0,91	23	freier Verkehr	hoch
	45	0,809	1	1,24	28	teilgebundener Verkehr	
	40	0,593	1	1,69	33	gebundener Verkehr	::
	35	0,435	1	2,30	38		
	30	0,319	2	3,13	42	überfüllter (gestauter) Verkehr	niedrig
	25	0,234	3	4,27	45		
	20	0,172	5	5,82	49		
	15	0,126	7	7,94	51		
außerorts	10	0,092	10	10,83	54	freier Verkehr	hoch
	5	0,068	14	14,76	56		
	100	24,483	0	0,04	0	teilgebundener Verkehr	::
	90	13,171	0	0,08	0		
	80	7,085	0	0,14	0	gebundener Verkehr	niedrig
	70	3,811	0	0,26	0		
	60	2,050	0	0,49	11	überfüllter (gestauter) Verkehr	niedrig
	50	1,103	0	0,91	23		
	40	0,593	1	1,69	33		
	30	0,319	2	3,13	42		
	20	0,172	5	5,82	49	überfüllter (gestauter) Verkehr	niedrig
	10	0,092	10	10,83	54		
	5	0,068	14	14,76	56		

Tabelle 20: Verkehrszustand des Kraftverkehrs

²¹ vgl. Abschnitt 3, Seite 12

Maßgebend für die Auswahl des Verkehrszustandes ist die vor der Verkehrsverflüssigung vor Ort beobachtete und die nach der Verkehrsverflüssigung anzunehmende Ausgangsgeschwindigkeit, nach der sich die Anzahl der Halte und die Dauer der Wartezeit bestimmt.

7.3.4 CO₂-Gehalt des Kraftstoffs

Der CO₂-Gehalt q bezeichnet die Menge der CO₂-Emissionen, die bei der Verbrennung von Kraftstoff pro Stoffmenge entsteht. Der CO₂-Gehalt unterscheidet sich nach Art des Kraftstoffs.

a. CO₂-Gehalt von Benzinkraftstoff q_{Benzin} :

$$q_{Benzin} = 2\,360 \left[\frac{g}{l} \right] \quad (\text{Wikipedia, 2016f})$$

b. CO₂-Gehalt von Dieseldkraftstoff q_{Diesel} :

$$q_{Diesel} = 2\,650 \left[\frac{g}{l} \right] \quad (\text{Wikipedia, 2016c})$$

7.3.5 Fahrzeugverteilung

Die Fahrzeugverteilung stellt die Anteile der Kfz am Kraftverkehr dar.

Für den Kraftverkehr in Sachsen-Anhalt ist folgende Fahrzeugverteilung anzunehmen:

Kfz		Anteil	
Typ	Bezeichnung	separiert [%]	aggregiert [%]
1	Krafträder	1,5	1,5
2	Pkw	64,5	86,5
3		22,0	
4	Kleiner Lkw	6,0	6,5
	Leichter Lkw	0,5	
5	Mittelschwerer Lkw	2,0	5,0
	Schwerer Lkw	3,0	
6	KOM (Linien- und Reisebus)	0,5	0,5

Tabelle 21: Fahrzeugverteilung in Sachsen-Anhalt nach Fahrzeugarten²²

Soll nur die Fahrzeugverteilung der Pkw berücksichtigt werden, so ist für Sachsen-Anhalt auf der Grundlage von (Kraftfahrt-Bundesamt, 2015) folgende Verteilung anzunehmen:

Kfz		Anteil	
Typ	Bezeichnung	separiert [%]	aggregiert [%]
2	Pkw	75,0	100,0
3		25,0	

Tabelle 22: Fahrzeugverteilung der Pkw in Sachsen-Anhalt

²² abgeleitet aus der Gesamtfahrleistung der deutschen Kfz (Kraftfahrt-Bundesamt, 2014) unter Berücksichtigung der Verteilung des Bestandes an Personenkraftwagen nach Kraftstoffarten für das Land Sachsen-Anhalt (Kraftfahrt-Bundesamt, 2015)

7.4 Parameter für die Steigerung der Elektromobilität

7.4.1 Streckenbezogener Emissionsfaktor

Der streckenbezogene Emissionsfaktor ε_{skm} gibt für einen konventionellen, mit fossilen Kraftstoffen angetriebenen Kraftwagen die Menge der CO₂-Emissionen für eine zurückgelegte Wegstrecke von einem Kilometer Länge als Mittelwert über alle Fahrbedingungen des Kraftverkehrs²³ an.

Der streckenbezogene Emissionsfaktor für die konventionellen, mit fossilen Kraftstoffen angetriebenen Kraftwagen ist nach (INFRAS, 2014) für das Jahr 2015 wie folgt anzunehmen:

Verkehr	Verkehrsmittel	Kraftstoff	ε_{skm} [g/Fzg km]
Motorisierter Individualverkehr	Pkw	aggregiert:	167,9

Tabelle 23: Streckenbezogener Emissionsfaktor

7.4.2 Elektromobilitätsgrad

Der Elektromobilitätsgrad η_{EM} gibt für Elektroautos den prozentualen Anteil an, mit dem das Elektroauto rein batterieelektrisch fährt und CO₂-Emissionen vermeidet.

Der Elektromobilitätsgrad kann wie folgt angenommen werden:

Typ	Elektroauto		η_{EM} [%]
	Bezeichnung	CO ₂ -Klasse [g/Fzg km]	
1	E-Fahrzeug	0	1
2	Plug-In-Hybrid	≤ 50	0,85
3	Plug-In Hybrid	51 bis 100	0,55
4	Plug-In-Hybrid	101 bis 167,9	0,20

Tabelle 24: Elektromobilitätsgrad η_{EM} der Elektroautos

7.4.3 Mittlere Reichweite der Elektroautos

Die mittlere Reichweite s_{EM} der Elektroautos ist die durchschnittliche Länge des möglichen Fahrgeweges eines vollständig aufgeladenen E-Fahrzeugs.

Gestützt auf die Übersicht zu am Markt verfügbaren Elektroautos von (Zadek, 2015) ist die mittlere Reichweite wie folgt anzunehmen:

$$s_{EM} = 154,7 \text{ [Fzg km]}$$

²³ Fahrten innerhalb geschlossener Ortschaften (= innerorts (io)),
Fahrten außerhalb geschlossener Ortschaften (= außerorts (ao)) und
Fahrten auf einer Kraftfahrstraße (= Autobahn (AB))
(vgl. Abschnitt 5.1.2, Seite 18)

8 Rechenschema

8.1 Rechenschema für die Veränderung des Modal Split

Eingabegröße		Parameter	Berechnungsgröße
Verlagerung vom Individualverkehr zum ÖPNV			
Pkw	Sonderfall 1: gleichlange Wegstrecken		nach (33): \bar{M}
	Anzahl Pkw: n_{FzgPkw}	nach Tabelle 7: ε_{skmpkw}	nach (19): M_{Pkw}
	Wegstrecke: $\pm s_{kmpkw}$	nach Tabelle 13: N_{Pkw}	nach (23): VL_{Pkw}
	Sonderfall 2: unterschiedlich lange Wegstrecken (Alternative)		
	Anzahl Pkw: n_{FzgPkw_i} für $i = 1$ bis n_S	nach Tabelle 7: ε_{skmpkw}	nach (20): M_{Pkw}
	Wegstrecken: $\pm s_{kmpkw_i}$ für $i = 1$ bis n_S	nach Tabelle 13: N_{Pkw}	nach (24): VL_{Pkw}
	Sonderfall 3: umfangreiche Wegstrecken (Alternative)		
	Anzahl Pkw: $\overline{n_{FzgPkw}}$	nach Tabelle 7: ε_{skmpkw}	nach (21): M_{Pkw}
	Wegstrecke: $\pm s_{\delta v}$ nach Tabelle 10 oder Tabelle 11	nach Tabelle 13: N_{Pkw}	nach (25): VL_{Pkw}
	Sonderfall 4: lageungleiche Wegstrecken (Alternative)		
Fußgänger	Anzahl Pkw: n_{FzgPkw}	nach Tabelle 8: $\varepsilon_{skm,iopkw}$ $\varepsilon_{skm,aopkw}$ $\varepsilon_{skm,ABPkw}$	nach (22): M_{Pkw}
	Wegstrecke: $\pm s_{km,iopkw}$ $\pm s_{km,aopkw}$ $\pm s_{km,ABPkw}$ ggf. nach Tabelle 12	nach Tabelle 13: N_{Pkw}	nach (26): VL_{Pkw}
Fahrrad	Anzahl Fahrräder: $\overline{n_{FzgRad}}$	–	nach (27): $M_{Rad} \stackrel{!}{=} 0$
	mittlere Fahrtweite: $\pm s_{kmRad}$		nach (28): VL_{Rad}
Fußgänger	Anzahl Fußgänger: $\overline{n_{FzgFuß}}$	–	nach (29): $M_{Fuß} \stackrel{!}{=} 0$
	mittlere Fußwegweite: $\pm s_{kmFuß}$		nach (30): $VL_{Fuß}$

Linienbus	–	aus Tabelle 9: ε_{PkmBus}	nach (31): VL_{Bus} nach (32): M_{Bus}	
Wirkungszeitraum				
	Anzahl wirksame Tage: n_T	–	–	nach (5): \bar{M}_W

Tabelle 25: Rechenschema für die Veränderung des Modal Split (Teil ÖPNV)

Eingabegröße		Parameter	Berechnungsgröße	
Verlagerung vom ÖPNV zum Individualverkehr				
Linienbus	abgebende Verkehrsleistung: $\pm VL_{Bus}$	aus Tabelle 9: ε_{PkmBus}	nach (32): M_{Bus}	nach (33): \bar{M}
	aufnehmende Verkehrsleistung: $\pm VL_{Pkw} \subseteq VL_{Bus}$	nach Tabelle 7: ε_{skmpkw}	nach (35): $\overline{n_{FzgPkw}}$	
Pkw	Wegstrecke: $S_{\ddot{O}V}$ nach Tabelle 10 oder Tabelle 11	nach Tabelle 13: N_{Pkw}	nach (21): M_{Pkw}	
	aufnehmende Verkehrsleistung: $\pm VL_{Rad} \subseteq VL_{Bus}$	—	nach (37): $\overline{n_{FzgRad}}$	
Fahrrad	mittlere Fahrtweite: S_{kmRad}		nach (27): $M_{Rad} \stackrel{!}{=} 0$	
	aufnehmende Verkehrsleistung: $\pm VL_{Fu\beta} \subseteq VL_{Bus}$	—	nach (39): $\overline{n_{FzgFu\beta}}$	
Fußgänger	mittlere Fahrtweite: $S_{kmFu\beta}$		nach (29): $M_{Fu\beta} \stackrel{!}{=} 0$	
	Wirkungszeitraum			
	Anzahl wirksame Tage: n_T	—	—	nach (5): \bar{M}_W

Tabelle 26: Rechenschema für die Veränderung des Modal Split (Teil IV)

8.2 Rechenschema für die Veränderung der Verkehrsleistung

Eingabegröße	Parameter	Berechnungsgröße	
Fall A: lagegleiche Wegstrecken			
verkürzte/verlängerte Wegstrecke: $\pm s_{km}$	nach Tabelle 14: $\varepsilon_{s_{km}i}$ für $i = 1$ bis 6^{24}	nach (42): $\overline{s_{km}i}$ für $i = 1$ bis 6^{24}	nach (41): \bar{M}
Anzahl Kfz: n_{Kfzi} für $i = 1$ bis 6^{24}			
Fall B: lageungleiche Wegstrecken			
verkürzte/verlängerte Wegstrecke: $\pm s_{km,io}$ $\pm s_{km,ao}$ $\pm s_{km,AB}$	nach Tabelle 15: $\varepsilon_{s_{km,io}i}$ $\varepsilon_{s_{km,ao}i}$ $\varepsilon_{s_{km,AB}i}$ für $i = 1$ bis 6^{24}	nach (45): $\overline{s_{km,io}i}$ nach (46): $\overline{s_{km,ao}i}$ nach (47): $\overline{s_{km,AB}i}$ für $i = 1$ bis 6^{24}	nach (48): \bar{M}
Anzahl Kfz: n_{Kfzi} für $i = 1$ bis 6^{24}			
Wirkungszeitraum			
Anzahl wirksame Tage: n_T	—	—	nach (5): \bar{M}_W

Tabelle 27: Rechenschema für die Veränderung der Verkehrsleistung

²⁴ i = Kraftfahrzeugtyp nach Tabelle 14 (vgl. Seite 48)

8.3 Rechenschema für die Verstetigung des Kraftverkehrs

Eingabegröße	Parameter	Berechnungsgröße
Verkehrszustand vor der Verkehrsverflüssigung		
modellierter Verkehrszustand: v_0 alternativ: v_0 n_H t_W	nach Tabelle 20: n_H t_W nach Tabelle 17 oder Tabelle 18 und Tabelle 19: B_{ZMV_i} für $i = 1$ bis 6^{25}	nach (57): $-B_{MV_i}$ für $i = 1$ bis 6^{25} nach (51): M_i für $i = 1$ bis 6^{25}
Anzahl Kfz: n_{Kfz_i} für $i = 1$ bis 6^{25}	nach Tabelle 16: b_{L_i} für $i = 1$ bis 6^{25}	
Wirkungsbereich: s_{km}	–	
Verkehrszustand nach der Verkehrsverflüssigung		
modellierter Verkehrszustand: v_0 alternativ: v_0 n_H t_W	nach Tabelle 20: n_H t_W nach Tabelle 17 oder Tabelle 18 und Tabelle 19: B_{ZMV_i} für $i = 1$ bis 6^{25}	nach (57): $+B_{MV_i}$ für $i = 1$ bis 6^{25} nach (51): M_i für $i = 1$ bis 6^{25}
Anzahl Kfz: n_{Kfz_i} für $i = 1$ bis 6^{25}	nach Tabelle 16: b_{L_i} für $i = 1$ bis 6^{25}	
Wirkungsbereich: s_{km}	–	
Wirkungszeitraum		
Anzahl wirksame Tage: n_T	–	–
		nach (5): \bar{M}_W

Tabelle 28: Rechenschema für die Verstetigung des Kraftverkehrs

²⁵ i = Kraftfahrzeugtyp nach Tabelle 16 (vgl. Seite 49)

8.4 Rechenschema für die Steigerung der Elektromobilität

Eingabegröße	Parameter	Berechnungsgröße
Sonderfall 1: gleichlange Wegstrecken		
Anzahl Fahrzeuge: n_{Fzg_i} für $i = 1$ bis 4^{26}	nach Tabelle 23: ε_{skmpkw}	nach (7): $\overline{s_{km_i}}$ für $i = 1$ bis 4^{26}
Wegstrecke: $-s_{km_i}$ für $i = 1$ bis 4^{26}	nach Tabelle 24: η_{EM_i} für $i = 1$ bis 4^{26}	nach (60): M_i für $i = 1$ bis 4^{26}
Sonderfall 2: unterschiedlich lange Wegstrecken (Alternative) Hinweis: bei nur einem Elektroautotyp!		
Anzahl Fahrzeuge: n_{Fzg_i} für $i = 1$ bis n_s	nach Tabelle 23: ε_{skmpkw}	nach (8): $\overline{s_{km}}$
Wegstrecke: $-s_{km_i}$ für $i = 1$ bis n_s	nach Tabelle 24: η_{EM}	nach (60): M
Fall 3: Anzahl der Ladevorgänge (Alternative)		
Anzahl Ladevorgänge: n_{L_i} für $i = 1$ bis 4^{26}	nach Tabelle 23: ε_{skmpkw} nach Tabelle 24: η_{EM_i} für $i = 1$ bis 4^{26} nach 7.4.3: s_{EM}	nach (62): $\overline{s_{km_i}}$ für $i = 1$ bis 4^{26} nach (60): M_i für $i = 1$ bis 4^{26}
Wirkungszeitraum		
Anzahl wirksame Tage: n_T	–	nach (5): \overline{M}_W

nach (4):

$$\overline{M} = \sum_{i=1}^4 M_i$$

für $i = 1$ bis 4^{26}

Tabelle 29: Rechenschema für die Steigerung der Elektromobilität

²⁶ i = Elektroautotypen nach Tabelle 24 (vgl. Seite 54)

9 Anwendungsbeispiele

9.1 Anwendungsbeispiele für die Veränderung des Modal Split

9.1.1 Beispiel 1: Verlagerung vom Individualverkehr zum ÖPNV

Die Gebietskörperschaft „Mobilo“ beabsichtigt in einem Vorhaben ihr Fahrgastinformationssystem ab dem 1. Januar 2018 um ein System zur Anschlusssicherung für die Busverbindungen zur Landeshauptstadt zu erweitern. In einer vorgeschalteten Untersuchung hat sie ermittelt, dass bei einer sicheren Anschlussverbindung 30 Kraftwagen fahrende Personen aus den Ortsteilen von „Mobilo“ für ihren Weg zur Arbeitsstätte in der Landeshauptstadt dauerhaft ihren Kraftwagen stehen lassen und auf Linienbusse umsteigen würden. Die Gebietskörperschaft „Mobilo“ ist 30 km von der Landeshauptstadt entfernt.

Hinweis:

Für die Berechnung des Rückgangs der CO₂-Emissionen ist das Rechenschema für die Veränderung des Modal Split (vgl. Abschnitt 8.1, Tabelle 25) anzuwenden. Das Beispiel entspricht dem dortigen Fall 1: gleichlange, lagegleiche Wegstrecken.

Eingabegrößen:

Anzahl der Fahrzeuge: $n_{Fzg\ Pkw} = 30 \mid \mid$.

Wegstrecke: $s_{km\ Pkw} = 2 \times 30 = 60 \left| \frac{Fzg\ km}{d} \right|$ pro Pkw.

Die Angabe zur Wegstrecke bezieht sich bereits auf den Bezugszeitraum eines Tages. Ihre Umrechnung auf den Tag ist somit nicht erforderlich.

Vorzeichenregel:

- die Wegstrecke $s_{km\ Pkw}$ ist mit negativem Vorzeichen einzuführen;
- die Verkehrsleistung VL_{Bus} ist mit positivem Vorzeichen einzuführen.

Parameter:

Für das Verkehrsmittel Pkw:

- streckenbezogener Emissionsfaktor: $\varepsilon_{s_{km\ Pkw}} = 167,9 \left| \frac{g}{Fzg\ km} \right|$ nach Tabelle 7;
- Besetzungszahl des Pkw: $N_{Pkw} = 1,2 \left| \frac{P}{Fzg} \right|$ nach Tabelle 13.

Für das Verkehrsmittel Linienbus:

- leistungsbezogener Emissionsfaktor: $\varepsilon_{P_{km_{Bus}}} = 73,1 \left| \frac{g}{P \text{ km}} \right|$ nach Tabelle 9.

Berechnungsgrößen:

Die Menge M der CO₂-Emissionen des Verkehrsmittels Pkw ergibt sich nach (19) unter Beachtung der Vorzeichenregel:

$$M_{Pkw} = n_{Fzg_{Pkw}} \times s_{km_{Pkw}} \times \varepsilon_{s_{km_{Pkw}}} = 30 \times -60 \times 167,9 = -302\,220 \left| -\frac{Fzg \text{ km}}{d} \frac{g}{Fzg \text{ km}} \right|.$$

Die Verkehrsleistung VL des Verkehrsmittels Pkw ergibt sich nach (23):

$$VL_{Pkw} = N_{Pkw} \times n_{Fzg_{Pkw}} \times s_{km_{Pkw}} = 1,2 \times 30 \times -60 = -2\,160 \left| \frac{P}{Fzg} - \frac{Fzg \text{ km}}{d} \right|.$$

Die Verkehrsleistung VL des Verkehrsmittels Linienbus ergibt sich nach (31) unter Beachtung der Vorzeichenregel:

$$VL_{Bus} = VL_{Pkw} = +2\,160 \left| \frac{P \text{ km}}{d} \right|.$$

Die Menge M der CO₂-Emissionen des Verkehrsmittels Linienbus ergibt sich nach (32):

$$M_{Bus} = VL_{Bus} \times \varepsilon_{P_{km_{Bus}}} = 2\,160 \times 73,1 = 157\,896 \left| \frac{P \text{ km}}{d} \frac{g}{P \text{ km}} \right|.$$

Die Gesamtmenge \bar{M} der CO₂-Emissionen ergibt sich nach (33):

$$\bar{M} = M_{Pkw} + M_{Bus} = -302\,220 + 157\,896 = -144\,324 \left| \frac{g}{d} \right|.$$

Die Berechnung der wirksamen Menge \bar{M}_W der CO₂-Emissionen erfolgt nach (5). Bei dem Verkehr der Pkw und Linienbusse handelt es sich um Berufsverkehr. Somit ist nach Tabelle 4 das Arbeitsjahr Bezugseinheit und die Anzahl der Arbeitstage urlaubsbereinigt nach Tabelle 3, Spalte 6 zu berücksichtigen:

$$n_T = n_{T_{2018}} + \dots + n_{T_{2023}} = 231 + \dots + 230 = 1\,393 |d|,$$

$$\bar{M}_W = n_T \times \bar{M} = 1\,393 \times -144\,324 = -201\,043\,332 \left| \frac{d \text{ g}}{d} \right|.$$

Die Menge \bar{M}_W ist mit (68) von der Einheit $[g]$ in die Einheit $[t]$ umzurechnen:

$$\bar{M}_W = 10^{-6} \times \bar{M}_W = 10^{-6} \times -201\,043\,332 = -201[t].$$

Ergebnis:

Mit dem Vorhaben können die CO₂-Emissionen im Wirkungszeitraum vom 1. Januar 2018 bis zum 31. Dezember 2023 in einem Umfang von 201 Tonnen reduziert werden.

9.1.2 Beispiel 2: Verlagerung vom Individualverkehr zum ÖPNV

Die Gebietskörperschaft „Mobilo“ beabsichtigt in einem Vorhaben ihr Fahrgastinformationssystem ab dem 1. Januar 2018 um ein System zur Anschlusssicherung für die Busverbindungen zur Landeshauptstadt zu erweitern. In einer vorgeschalteten Untersuchung hat sie ermittelt, dass bei einer sicheren Anschlussverbindung 30 Kraftwagen fahrende Personen aus den Orten von „Mobilo“ für ihren Weg zur Arbeitsstätte in der 30 km entfernten Landeshauptstadt dauerhaft ihren Kraftwagen stehen lassen und auf Linienbusse umsteigen würden. Sie alle fahren ein Teilstück auf der Landstraße, nehmen dann für 25 km die Autobahn und fahren zum Schluss 3 km innerhalb der Landeshauptstadt.

Hinweis:

Für die Berechnung des Rückgangs der CO₂-Emissionen ist das Rechenschema für die Veränderung des Modal Split (vgl. Abschnitt 8.1, Tabelle 25) anzuwenden. Das Beispiel entspricht dem dortigen Fall 4: gleichlange, lageungleiche Wegstrecken.

Eingabegrößen:

Anzahl der Fahrzeuge: $n_{Fzg\ Pkw} = 30 \mid \mid$.

Wegstrecke: $S_{km,io\ Pkw} = 2 \times 3 = 6 \left| \frac{Fzg\ km}{d} \right|$ pro Pkw;

$S_{km,ao\ Pkw} = 2 \times 2 = 4 \left| \frac{Fzg\ km}{d} \right|$ pro Pkw;

$S_{km,AB\ Pkw} = 2 \times 25 = 50 \left| \frac{Fzg\ km}{d} \right|$ pro Pkw.

Die Angaben zu den Wegstrecken beziehen sich bereits auf den Bezugszeitraum eines Tages. Ihre Umrechnung auf den Tag ist somit nicht erforderlich.

Vorzeichenregel:

- die Wegstrecken $S_{km\ Pkw}$ sind mit negativen Vorzeichen einzuführen;
- die Verkehrsleistung VL_{Bus} ist mit positivem Vorzeichen einzuführen.

Parameter:

Für das Verkehrsmittel Pkw:

- streckenspezifischer Emissionsfaktor: $\varepsilon_{S_{km,io\ Pkw}} = 187,7 \left| \frac{g}{Fzg\ km} \right|$ nach Tabelle 8;

$\varepsilon_{S_{km,ao\ Pkw}} = 156,4 \left| \frac{g}{Fzg\ km} \right|$ nach Tabelle 8;

$\varepsilon_{S_{km,AB\ Pkw}} = 203,3 \left| \frac{g}{Fzg\ km} \right|$ nach Tabelle 8;

- Besetzungszahl des Pkw: $N_{Pkw} = 1,2 \left| \frac{P}{Fzg} \right|$ nach Tabelle 13.

Für das Verkehrsmittel Linienbus:

- leistungsbezogener Emissionsfaktor: $\varepsilon_{P_{kmBus}} = 73,1 \left| \frac{g}{P \ km} \right|$ nach Tabelle 9.

Berechnungsgrößen:

Die Menge M der CO₂-Emissionen des Verkehrsmittels Pkw ergibt sich nach (22) unter Beachtung der Vorzeichenregel:

$$\begin{aligned}
 M_{Pkw} &= \left(n_{Fzg \ Pkw} \times S_{km,io \ Pkw} \times \varepsilon_{S_{km,io \ Pkw}} \right) + \left(n_{Fzg \ Pkw} \times S_{km,ao \ Pkw} \times \varepsilon_{S_{km,ao \ Pkw}} \right) \\
 &\quad + \left(n_{Fzg \ Pkw} \times S_{km,AB \ Pkw} \times \varepsilon_{S_{km,AB \ Pkw}} \right) \\
 &= (30 \times -6 \times 187,7) + (30 \times -4 \times 156,4) + (30 \times -50 \times 203,3) \\
 &= -357\,504 \left| -\frac{Fzg \ km}{d} \frac{g}{Fzg \ km} \right|.
 \end{aligned}$$

Die Verkehrsleistung VL des Verkehrsmittels Pkw ergibt sich nach (26):

$$\begin{aligned}
 VL_{Pkw} &= N_{Pkw} \times n_{Fzg \ Pkw} \times \left(S_{km,io \ Pkw} + S_{km,ao \ Pkw} + S_{km,AB \ Pkw} \right) \\
 &= 1,2 \times 30 \times -(6 + 4 + 50) = -2\,160 \left| \frac{P}{Fzg} - \frac{Fzg \ km}{d} \right|.
 \end{aligned}$$

Die Verkehrsleistung VL des Verkehrsmittels Linienbus ergibt sich nach (31) unter Beachtung der Vorzeichenregel:

$$VL_{Bus} = VL_{Pkw} = +2\,160 \left| \frac{P \ km}{d} \right|.$$

Die Menge M der CO₂-Emissionen des Verkehrsmittels Linienbus ergibt sich nach (32):

$$M_{Bus} = VL_{Bus} \times \varepsilon_{P_{kmBus}} = 2\,160 \times 73,1 = 157\,896 \left| \frac{P \ km}{d} \frac{g}{P \ km} \right|.$$

Die Gesamtmenge \bar{M} der CO₂-Emissionen ergibt sich nach (33):

$$\bar{M} = M_{Pkw} + M_{Bus} = -357\,504 + 157\,896 = -199\,608 \left| \frac{g}{d} \right|.$$

Die Berechnung der wirksamen Menge \bar{M}_W der CO₂-Emissionen erfolgt nach (5). Bei dem Verkehr der Pkw und Linienbusse handelt es sich um Berufsverkehr. Somit ist nach Tabelle 4 das Arbeitsjahr Bezugseinheit und die Anzahl der Arbeitstage urlaubsbereinigt nach Tabelle 3, Spalte 6 zu berücksichtigen:

$$n_T = n_{T2018} + \dots + n_{T2023} = 231 + \dots + 230 = 1\,393 \ |d|,$$

$$\bar{M}_W = n_T \times \bar{M} = 1\,393 \times -199\,608 = -278\,053\,944 \left[\frac{d\,g}{d} \right].$$

Die Menge \bar{M}_W ist mit (68) von der Einheit $[g]$ in die Einheit $[t]$ umzurechnen:

$$\bar{M}_W = 10^{-6} \times \bar{M}_W = 10^{-6} \times -201\,043\,332 = -278[t].$$

Ergebnis:

Mit dem Vorhaben können die CO₂-Emissionen im Wirkungszeitraum vom 1. Januar 2018 bis zum 31. Dezember 2023 in einem Umfang von 278 Tonnen reduziert werden.

9.1.3 Beispiel 3: Verlagerung vom Individualverkehr zum ÖPNV

Die Gebietskörperschaft „Mobilo“ beabsichtigt in einem Vorhaben ihr Fahrgastinformationssystem ab dem 1. Januar 2018 um ein System zur Anschlusssicherung für die Busverbindungen zur Landeshauptstadt zu erweitern. In einer vorgeschalteten Untersuchung hat sie ermittelt, dass bei einer sicheren Anschlussverbindung 30 Kraftwagen fahrende Personen aus den Ortsteilen von „Mobilo“ für ihren Weg zur Arbeitsstätte in der Landeshauptstadt dauerhaft ihren Kraftwagen stehen lassen und auf Linienbusse umsteigen würden. 7 Kraftwagen kommen aus dem Ortsteil A und fahren täglich 25 km einfache Entfernung zur Landeshauptstadt. 11 Kraftwagen kommen aus dem Ortsteil B mit 29 km und 12 Kraftwagen aus dem Ortsteil C mit 34 km einfacher Entfernung zur Landeshauptstadt.

Hinweis:

Für die Berechnung des Rückgangs der CO₂-Emissionen ist das Rechenschema für die Veränderung des Modal Split (vgl. Abschnitt 8.1, Tabelle 25) anzuwenden. Das Beispiel entspricht dem dortigen Fall 2: verschiedene, unterschiedlich lange Wegstrecken.

Anzahl der Wegstrecken: $n_s = 3$ Wegstrecken.

Eingabegrößen:

Anzahl der Fahrzeuge: $n_{Fzg_{Pkw_1}} = 7 \mid |;$

$n_{Fzg_{Pkw_2}} = 11 \mid |;$

$n_{Fzg_{Pkw_3}} = 12 \mid |.$

Wegstrecke: $s_{km_{Pkw_1}} = 2 \times 25 = 50 \left| \frac{Fzg \ km}{d} \right|$ pro Pkw₁;

$s_{km_{Pkw_2}} = 2 \times 29 = 58 \left| \frac{Fzg \ km}{d} \right|$ pro Pkw₂;

$s_{km_{Pkw_3}} = 2 \times 34 = 68 \left| \frac{Fzg \ km}{d} \right|$ pro Pkw₃;

Die Angaben zu den Wegstrecken beziehen sich bereits auf den Bezugszeitraum eines Tages. Ihre Umrechnung auf den Tag ist somit nicht erforderlich.

Vorzeichenregel:

- die Wegstrecken $s_{km_{Pkw_i}}$ sind mit negativen Vorzeichen einzuführen;
- die Verkehrsleistung VL_{Bus} ist mit positivem Vorzeichen einzuführen.

Parameter:

Für das Verkehrsmittel Pkw:

- streckenbezogener Emissionsfaktor: $\varepsilon_{s_{kmPkw}} = 167,9 \left| \frac{g}{Fzg \text{ km}} \right|$ nach Tabelle 7;
- Besetzungszahl des Pkw: $N_{Pkw} = 1,2 \left| \frac{P}{Fzg} \right|$ nach Tabelle 13.

Für das Verkehrsmittel Linienbus:

- leistungsbezogener Emissionsfaktor: $\varepsilon_{P_{kmBus}} = 73,1 \left| \frac{g}{P \text{ km}} \right|$ nach Tabelle 9.

Berechnungsgrößen:

Die Menge M der CO₂-Emissionen des Verkehrsmittels Pkw ergibt sich nach (20) unter Beachtung der Vorzeichenregel:

$$\begin{aligned} M_{Pkw} &= \left(n_{FzgPkw_1} \times s_{kmPkw_1} \times \varepsilon_{s_{kmPkw}} \right) + \dots + \left(n_{FzgPkw_3} \times s_{kmPkw_3} \times \varepsilon_{s_{kmPkw}} \right) \\ &= (7 \times -50 \times 167,9) + (12 \times -58 \times 167,9) + (12 \times -68 \times 167,9) \\ &= -302\,891 \left| -\frac{Fzg \text{ km}}{d} \frac{g}{Fzg \text{ km}} \right|. \end{aligned}$$

Die Summe $\overline{s_{kmPkw}}$ aller mit dem Pkw zurückgelegten Wegstrecken ergibt sich nach (8):

$$\begin{aligned} \overline{s_{kmPkw}} &= \left(n_{Fzg_1} \times s_{km_1} \right) + \dots + \left(n_{Fzg_3} \times s_{km_3} \right) \\ &= (7 \times -50) + (11 \times -58) + (12 \times -68) = -1\,804 \left| -\frac{Fzg \text{ km}}{d} \right|. \end{aligned}$$

Die Verkehrsleistung VL des Verkehrsmittels Pkw ergibt sich nach (24):

$$VL_{Pkw} = N_{Pkw} \times \overline{s_{kmPkw}} = 1,2 \times -1\,804 = -2\,164 \left| \frac{P}{Fzg} \frac{Fzg \text{ km}}{d} \right|.$$

Die Verkehrsleistung VL des Verkehrsmittels Linienbus ergibt sich nach (31) unter Beachtung der Vorzeichenregel:

$$VL_{Bus} = VL_{Pkw} = +2\,164 \left| \frac{P \text{ km}}{d} \right|.$$

Die Menge M der CO₂-Emissionen des Verkehrsmittels Linienbus ergibt sich nach (32):

$$M_{Bus} = VL_{Bus} \times \varepsilon_{P_{kmBus}} = 2\,164 \times 73,1 = 158\,188 \left| \frac{P \text{ km}}{d} \frac{g}{P \text{ km}} \right|.$$

Die Gesamtmenge \bar{M} der CO₂-Emissionen ergibt sich nach (33):

$$\bar{M} = M_{Pkw} + M_{Bus} = -302\,891 + 158\,188 = -144\,703 \left| \frac{g}{d} \right|.$$

Die Berechnung der wirksamen Menge \bar{M}_W der CO₂-Emissionen erfolgt nach (5). Bei dem Verkehr der Pkw und Linienbusse handelt es sich um Berufsverkehr. Somit ist nach Tabelle 4 das Arbeitsjahr Bezugseinheit und die Anzahl der Arbeitstage urlaubsbereinigt nach Tabelle 3, Spalte 6 zu berücksichtigen:

$$n_T = n_{T_{2018}} + \dots + n_{T_{2023}} = 231 + \dots + 230 = 1\,393 \left| d \right|,$$

$$\bar{M}_W = n_T \times \bar{M} = 1\,393 \times -144\,703 = -201\,571\,279 \left| \frac{d \cdot g}{d} \right|.$$

Die Menge \bar{M}_W ist mit (68) von der Einheit $[g]$ in die Einheit $[t]$ umzurechnen:

$$\bar{M}_W = 10^{-6} \times \bar{M}_W = 10^{-6} \times -201\,571\,279 = -201 \left| t \right|.$$

Ergebnis:

Mit dem Vorhaben können die CO₂-Emissionen im Wirkungszeitraum vom 1. Januar 2018 bis zum 31. Dezember 2023 in einem Umfang von 201 Tonnen reduziert werden.

9.1.4 Beispiel 4: Verlagerung vom Individualverkehr zum ÖPNV

Die Gebietskörperschaft „Mobilo“ beabsichtigt in einem Vorhaben ihr Fahrgastinformationssystem ab dem 1. Januar 2018 um ein System zur Anschlusssicherung für die Busverbindungen zur Landeshauptstadt zu erweitern. In einer vorgeschalteten Untersuchung hat sie ermittelt, dass bei einer sicheren Anschlussverbindung 30 Kraftwagen fahrende Personen aus den Ortsteilen von „Mobilo“ für ihren Weg zur Arbeitsstätte in der Landeshauptstadt dauerhaft ihren Kraftwagen stehen lassen und auf Linienbusse umsteigen würden. 7 Kraftwagen fahrende Personen kommen aus dem Ortsteil A und fahren täglich 25 km einfache Entfernung zur Landeshauptstadt, davon 20 km auf der Landstraße und 5 km innerhalb der Landeshauptstadt. 11 Kraftwagen kommen aus dem Ortsteil B mit 29 km und 12 Kraftwagen aus dem Ortsteil C mit 34 km einfacher Entfernung zur Landeshauptstadt. Beide Gruppen fahren ein Teilstück auf der Landstraße, nehmen dann für 25 km die Autobahn und fahren zum Schluss 3 km innerhalb der Landeshauptstadt.

Hinweis:

Bei dem Beispiel handelt es sich um eine komplexe Verkehrsverlagerung, die zu ihrer Berechnung in Einzelereignisse aufzulösen ist. Der Einzelfall ist auf einen Bezugsort, in diesem Beispiel die jeweilige Ortsverbindung „Ortsteil A – Landeshauptstadt“, „Ortsteil B – Landeshauptstadt“ und „Ortsteil C – Landeshauptstadt“, zu beziehen. Für die Berechnung des Rückgangs der CO₂-Emissionen ist im Einzelfall das Rechenschema für die Veränderung des Modal Split (vgl. Abschnitt 8.1, Tabelle 25) anzuwenden. Das Beispiel entspricht dem dortigen Fall 4: gleichlange, lageungleiche Wegstrecken. Anschließend sind die Einzelergebnisse zusammenzufassen.

Anzahl der Wegstrecken: $n_s = 3$ Wegstrecken.

Eingabegrößen:

Anzahl der Fahrzeuge: $n_{Fzg\ p_{kw_1}} = 7 \mid \mid$;

$n_{Fzg\ p_{kw_2}} = 11 \mid \mid$;

$n_{Fzg\ p_{kw_3}} = 12 \mid \mid$.

Wegstrecke:

	$S_{km,io\ p_{kw}}$	$S_{km,ao\ p_{kw}}$	$S_{km,AB\ p_{kw}}$	Einheit
p_{kw_1}	$2 \times 5 = 10$	$2 \times 20 = 40$	$2 \times 0 = 0$	$\left| \frac{Fzg\ km}{d} \right|$
p_{kw_2}	$2 \times 3 = 6$	$2 \times 1 = 2$	$2 \times 25 = 50$	
p_{kw_3}	$2 \times 3 = 6$	$2 \times 6 = 12$	$2 \times 25 = 50$	

Tabelle 30: Länge der lageungleichen Wegstrecken im Beispiel 4

Die Angaben zu den Wegstrecken beziehen sich bereits auf den Bezugszeitraum eines Tages. Ihre Umrechnung auf den Tag ist somit nicht erforderlich.

Vorzeichenregel:

- die Wegstrecken $s_{km\,pkw}$ sind mit negativen Vorzeichen einzuführen;
- die Verkehrsleistungen VL_{Bus} ist mit positivem Vorzeichen einzuführen.

Parameter:

Für das Verkehrsmittel Pkw:

- streckenspezifischer Emissionsfaktor: $\varepsilon_{s_{km,io\,pkw}} = 187,7 \left| \frac{g}{Fzg\,km} \right|$ nach Tabelle 8;
 $\varepsilon_{s_{km,ao\,pkw}} = 156,4 \left| \frac{g}{Fzg\,km} \right|$ nach Tabelle 8;
 $\varepsilon_{s_{km,AB\,pkw}} = 203,3 \left| \frac{g}{Fzg\,km} \right|$ nach Tabelle 8;
- Besetzungszahl des Pkw: $N_{pkw} = 1,2 \left| \frac{P}{Fzg} \right|$ nach Tabelle 13.

Für das Verkehrsmittel Linienbus:

- leistungsbezogener Emissionsfaktor: $\varepsilon_{p_{km,Bus}} = 73,1 \left| \frac{g}{P\,km} \right|$ nach Tabelle 9.

Berechnungsgrößen:

Die Menge M der CO₂-Emissionen des Verkehrsmittels Pkw ergibt sich nach (22) unter Beachtung der Vorzeichenregel:

$$M_{pkw_i} = \left(n_{Fzg\,pkw_i} \times s_{km,io\,pkw_i} \times \varepsilon_{s_{km,io\,pkw}} \right) + \left(n_{Fzg\,pkw_i} \times s_{km,ao\,pkw_i} \times \varepsilon_{s_{km,ao\,pkw}} \right) + \left(n_{Fzg\,pkw_i} \times s_{km,AB\,pkw_i} \times \varepsilon_{s_{km,AB\,pkw}} \right);$$

$$M_{pkw_1} = (7 \times -10 \times 187,7) + (7 \times -40 \times 156,4) + (7 \times -0 \times 203,3) = -56\,931;$$

$$M_{pkw_2} = (11 \times -6 \times 187,7) + (11 \times -2 \times 156,4) + (11 \times -50 \times 203,3) = -127\,644;$$

$$M_{pkw_3} = (12 \times -6 \times 187,7) + (12 \times -12 \times 156,4) + (12 \times -50 \times 203,3) = -158\,016;$$

$$M_{pkw} = M_{pkw_1} + M_{pkw_2} + M_{pkw_3} = -342\,591 \left| -\frac{Fzg\,km}{d} \frac{g}{Fzg\,km} \right|.$$

Die Verkehrsleistung VL des Verkehrsmittels Pkw ergibt sich nach (26):

$$VL_{pkw_i} = N_{pkw} \times n_{Fzg\,pkw_i} \times \left(s_{km,io\,pkw_i} + s_{km,ao\,pkw_i} + s_{km,AB\,pkw_i} \right);$$

$$VL_{Pkw_1} = 1,2 \times 7 \times -(10 + 40 + 0) = -420;$$

$$VL_{Pkw_2} = 1,2 \times 11 \times -(6 + 2 + 50) = -765;$$

$$VL_{Pkw_3} = 1,2 \times 12 \times -(6 + 12 + 50) = -979;$$

$$VL_{Pkw} = VL_{Pkw_1} + VL_{Pkw_2} + VL_{Pkw_3} = -2\,164 \left| \frac{P}{Fzg} - \frac{Fzg \text{ km}}{d} \right|.$$

Die Verkehrsleistung VL des Verkehrsmittels Linienbus ergibt sich nach (31) unter Beachtung der Vorzeichenregel:

$$VL_{Bus} = VL_{Pkw} = +2\,164 \left| \frac{P \text{ km}}{d} \right|.$$

Die Menge M der CO₂-Emissionen des Verkehrsmittels Linienbus ergibt sich nach (32):

$$M_{Bus} = VL_{Bus} \times \varepsilon_{Pkm_{Bus}} = 2\,164 \times 73,1 = 158\,188 \left| \frac{P \text{ km}}{d} \frac{g}{P \text{ km}} \right|.$$

Die Gesamtmenge \bar{M} der CO₂-Emissionen ergibt sich nach (33):

$$\bar{M} = M_{Pkw} + M_{Bus} = -342\,591 + 158\,188 = -184\,403 \left| \frac{g}{d} \right|.$$

Die Berechnung der wirksamen Menge \bar{M}_W der CO₂-Emissionen erfolgt nach (5). Bei dem Verkehr der Pkw und Linienbusse handelt es sich um Berufsverkehr. Somit ist nach Tabelle 4 das Arbeitsjahr Bezugseinheit und die Anzahl der Arbeitstage urlaubsbereinigt nach Tabelle 3, Spalte 6 zu berücksichtigen:

$$n_T = n_{T_{2018}} + \dots + n_{T_{2023}} = 231 + \dots + 230 = 1\,393 |d|,$$

$$\bar{M}_W = n_T \times \bar{M} = 1\,393 \times -184\,403 = -256\,873\,379 \left| \frac{d \text{ g}}{d} \right|.$$

Die Menge \bar{M}_W ist mit (68) von der Einheit $[g]$ in die Einheit $[t]$ umzurechnen:

$$\bar{M}_W = 10^{-6} \times \bar{M}_W = 10^{-6} \times -256\,873\,379 = -256[t].$$

Ergebnis:

Mit dem Vorhaben können die CO₂-Emissionen im Wirkungszeitraum vom 1. Januar 2018 bis zum 31. Dezember 2023 in einem Umfang von 256 Tonnen reduziert werden.

9.1.5 Beispiel 5: Verlagerung vom Individualverkehr zum ÖPNV

Die Stadt „Gesundes Klima“ ist ein Mittelzentrum mit 38 000 Einwohnern. Sie beabsichtigt im Linienbussystem ihrer Stadt für die Bürgerinnen und Bürger ein elektronisches Kartensystem einzuführen, das die Anzahl der Fahrten mit dem ÖPNV registriert. Die Bürgerinnen und Bürger der Stadt sollen zukünftig keine gedruckten Fahrscheine mehr benötigen und sich auch nicht im Vorhinein für eine Jahres-, Monats-, Wochen- oder sonstige Zeitkarte entscheiden müssen. Das Kartensystem soll für die Reisenden den jeweils günstigsten Preis ermitteln und diesen monatlich einziehen. In einer Befragung haben 600 Personen erklärt, unter diesen Bedingungen das ÖPNV-Angebot für die Fahrten zur Arbeit ein halbes Jahr lang zu testen. 540 Personen würden ihren Pkw gegen den ÖPNV tauschen. Sie fahren in einfacher Entfernung 8 bis 20 km zur Arbeit durch die Stadt. 60 Personen bewegen sich bisher mit dem Fahrrad fort. Im Durchschnitt legen sie zur Arbeit 6 km einfache Entfernung zurück.

Hinweis:

Für die Berechnung des Rückgangs der CO₂-Emissionen ist das Rechenschema für die Veränderung des Modal Split (vgl. Abschnitt 8.1, Tabelle 25) anzuwenden. Das Beispiel entspricht dem dortigen Fall 3: umfangreiche Wegstrecken.

Eingabegrößen:

Anzahl der Fahrzeuge: $n_{Fzg_{Pkw}} = 540 \mid |$;

$$n_{Fzg_{Rad}} = 60 \mid |.$$

Wegstrecke: $s_{\ddot{O}V} = 2 \times 14,4 = 28,8 \left| \frac{Fzg \text{ km}}{d} \right|$ nach Tabelle 11 pro Pkw;

$$s_{km_{Rad}} = 2 \times 6 = 12 \left| \frac{P \text{ km}}{d} \right| \text{ pro Fahrrad.}$$

Die Angaben zu den Wegstrecken beziehen sich bereits auf den Bezugszeitraum eines Tages. Ihre Umrechnung auf den Tag ist somit nicht erforderlich.

Vorzeichenregel:

- die Wegstrecken $s_{\ddot{O}V}$ und $s_{km_{Rad}}$ sind mit negativen Vorzeichen einzuführen;
- die Verkehrsleistung VL_{Bus} ist mit positivem Vorzeichen einzuführen.

Parameter:

Für das Verkehrsmittel Pkw:

- streckenbezogener Emissionsfaktor: $\varepsilon_{s_{km_{Pkw}}} = 167,9 \left| \frac{g}{Fzg \text{ km}} \right|$ nach Tabelle 7;

- Besetzungszahl des Pkw: $N_{Pkw} = 1,2 \left| \frac{P}{Fzg} \right|$ nach Tabelle 13.

Für das Verkehrsmittel Linienbus:

- leistungsbezogener Emissionsfaktor: $\varepsilon_{P_{kmBus}} = 73,1 \left| \frac{g}{P \text{ km}} \right|$ nach Tabelle 9.

Berechnungsgrößen:

Die Menge M der CO₂-Emissionen des Verkehrsmittels Pkw ergibt sich nach (21) unter Beachtung der Vorzeichenregel:

$$\begin{aligned} M_{Pkw} &= \overline{n_{Fzg_{Pkw}}} \times s_{\dot{O}V} \times \varepsilon_{S_{kmPkw}} \\ &= 540 \times -28,8 \times 167,9 = -2\,611\,180 \left| -\frac{Fzg \text{ km}}{d} \frac{g}{Fzg \text{ km}} \right|. \end{aligned}$$

Die Verkehrsleistung VL des Verkehrsmittels Pkw ergibt sich nach (25):

$$VL_{Pkw} = N_{Pkw} \times \overline{n_{Fzg_{Pkw}}} \times s_{\dot{O}V} = 1,2 \times 540 \times -28,8 = -18\,662 \left| \frac{P}{Fzg} - \frac{Fzg \text{ km}}{d} \right|.$$

Die Menge M der CO₂-Emissionen des Verkehrsmittels Fahrrad ergibt sich nach (27):

$$M_{Rad} = 0 \left| \frac{g}{d} \right|.$$

Die Verkehrsleistung VL des Verkehrsmittels Fahrrad ergibt sich nach (28) unter Beachtung der Vorzeichenregel:

$$VL_{Rad} = \overline{n_{Fzg_{Rad}}} \times s_{kmRad} = 60 \times -12 = -720 \left| -\frac{P \text{ km}}{d} \right|.$$

Die Verkehrsleistung VL des Verkehrsmittels Linienbus ergibt sich nach (31) unter Beachtung der Vorzeichenregel:

$$VL_{Bus} = VL_{Pkw} + VL_{Rad} = -18\,662 + -720 = +19\,382 \left| \frac{P \text{ km}}{d} \right|.$$

Die Menge M der CO₂-Emissionen des Verkehrsmittels Linienbus ergibt sich nach (32):

$$M_{Bus} = VL_{Bus} \times \varepsilon_{P_{kmBus}} = 19\,382 \times 73,1 = 1\,416\,824 \left| \frac{P \text{ km}}{d} \frac{g}{P \text{ km}} \right|.$$

Die Gesamtmenge \bar{M} der CO₂-Emissionen ergibt sich nach (33):

$$\bar{M} = M_{Pkw} + M_{Bus} = -2\,611\,180 + 1\,416\,824 = -1\,194\,356 \left| \frac{g}{d} \right|.$$

Die Berechnung der wirksamen Menge \bar{M}_W der CO₂-Emissionen erfolgt nach (5). Bei dem Verkehr der Pkw, Fahrräder und Linienbusse handelt es sich um Berufsverkehr. Somit ist nach Tabelle 4 das Arbeitsjahr Bezugseinheit und die Anzahl der Arbeitstage urlaubsbereinigt nach Tabelle 3, Spalte 6 zu berücksichtigen:

$$n_T = \frac{1}{2} \times n_{T_{\text{Mittelwert}}} = \frac{1}{2} \times 232 = 116 \text{ [d]},$$

$$\bar{M}_W = n_T \times \bar{M} = 116 \times -1\,194\,356 = -138\,545\,296 \left[\frac{\text{d g}}{\text{d}} \right].$$

Die Menge \bar{M}_W ist mit (68) von der Einheit [g] in die Einheit [t] umzurechnen:

$$\bar{M}_W = 10^{-6} \times \bar{M}_W = 10^{-6} \times -138\,545\,273 = -138[t].$$

Ergebnis:

Mit dem Vorhaben können die CO₂-Emissionen im Wirkungszeitraum von einem halben Jahr in einem Umfang von 138 Tonnen reduziert werden.

9.2 Anwendungsbeispiele für die Veränderung der Verkehrsleistung

9.2.1 Beispiel 6: Aufbau eines Parkleitsystems für öffentliche Pkw-Stellplätze

Die Stadt „Gesundes Klima“ bewirtschaftet ihre Parkplätze und Parkhäuser bislang ohne Veröffentlichung der Belegungsinformationen. Während unter der Woche die Stellplatzsuche kein Problem ist, entsteht an den Wochentagen Freitag und Samstag sowie zur Weihnachtszeit stets ein zusätzlicher Parksuchverkehr. Um den Umfang des Parksuchverkehrs in der Stadt zu reduzieren, plant die Stadtverwaltung ein Parkleitsystem zu entwickeln und zum 1. Januar 2018 einzuführen. Das Parkleitsystem soll über das Angebot freier Stellplätze mittels Navigations-App und in Echtzeit informieren. Von den 2 000 öffentlichen Stellplätzen werden 500 Plätze nicht so intensiv genutzt wie die Übrigen. Deswegen sollen Personen, die einen Stellplatz suchen, zu diesen Stellplätzen gelenkt werden. Es wird davon ausgegangen, dass an 150 Tagen im Jahr, an denen die Stadt stark befahren wird, Pkw zu diesen Stellplätzen gelenkt werden können und dadurch Wegstrecken von durchschnittlich 3 km pro Pkw eingespart werden können. In der Stadt werden die öffentlichen Stellplätze im Durchschnitt von 4 Pkw pro Tag aufgesucht.

Hinweis:

Für die Berechnung des Rückgangs der CO₂-Emissionen ist das Rechenschema für die Veränderung der Verkehrsleistung (vgl. Abschnitt 8.2, Tabelle 27) anzuwenden. Das Beispiel entspricht dem dortigen Fall A: lagegleiche Wegstrecken.

Anzahl der Kraftfahrzeugtypen: $n_{Typ} = 1$ Typ.

Art des Kraftfahrzeugtyps²⁷: $Typ = 2 \vee 3 = \text{Pkw} - \text{aggregiert}$.

Eingabegrößen:

Wegstrecke: $s_{km} = 3 \left| \frac{Fzg \text{ km}}{d} \right|$ pro Pkw.

Anzahl der Kfz: $n_{Kfz \text{ Pkw}} = 500 \times 4 \times 150 = 300\,000 \left| \frac{\text{Stellplatz}}{d} \frac{d}{\text{Stellplatz a}} \right|$.

Die Angabe zur Anzahl der Kfz bezieht sich auf einen anderen Bezugszeitraum als den Tag und ist nach (63) auf den Tag zu beziehen. Bei dem Parksuchverkehr der Stadt „Gesundes Klima“ handelt es sich um Freizeit- oder verkehrszweckunabhängigen Verkehr, so dass nach Tabelle 4 das Jahr mit $n_T = 365$ Tage anzusetzen ist.

Anzahl der Kfz: $n_{Kfz \text{ Tag}} = \frac{n_{Kfz \text{ Jahr}}}{n_{T \text{ Jahr}}} = \frac{300\,000}{365} = 821 \left| \frac{a}{a \text{ d}} \right|$.

Vorzeichenregel: Die Wegstrecke s_{km} ist mit negativem Vorzeichen einzuführen.

²⁷ Kraftfahrzeugtyp nach Tabelle 14 (vgl. Seite 48)

Parameter:

Streckenbezogener Emissionsfaktor: $\varepsilon_{s_{km} P_{kw}} = 167,9 \left| \frac{g}{Fzg \text{ km}} \right|$ nach Tabelle 14.

Berechnungsgrößen:

Die Summe $\overline{s_{km} P_{kw}}$ aller verkürzten Wegstrecken der Pkw ergibt sich nach (42) unter Beachtung der Vorzeichenregel:

$$\overline{s_{km} P_{kw}} = n_{Kfz P_{kw}} \times s_{km} = 821 \times -3 = -2\,463 \left| -\frac{Fzg \text{ km}}{d} \right|.$$

Die Menge \bar{M} der CO₂-Emissionen für den Kraftfahrzeugtyp Pkw ergibt sich nach (41):

$$M_{Pkw} = \overline{s_{km} P_{kw}} \times \varepsilon_{s_{km} P_{kw}} = -2\,463 \times 167,9 = -413\,537 \left| \frac{Fzg \text{ km}}{d} \frac{g}{Fzg \text{ km}} \right|.$$

Die Gesamtmenge \bar{M} der CO₂-Emissionen ergibt sich nach (41):

$$\bar{M} = M_{Pkw} = -413\,537 \left| \frac{g}{d} \right|.$$

Die Berechnung der wirksamen Menge \bar{M}_W der CO₂-Emissionen erfolgt nach (5). Bei dem Parksuchverkehr handelt es sich um Freizeit- oder verkehrszweckunabhängigen Verkehr. Somit ist nach Tabelle 4 das Kalenderjahr Bezugseinheit und die Anzahl der Tage mit 365 pro Jahr zu berücksichtigen:

$$n_T = 6 \times 365 = 2\,190 |d|,$$

$$\bar{M}_W = n_T \times \bar{M} = 2\,190 \times -413\,537 = -905\,646\,030 \left| \frac{d \text{ g}}{d} \right|.$$

Die Menge \bar{M}_W ist mit (68) von der Einheit $[g]$ in die Einheit $[t]$ umzurechnen:

$$\bar{M}_W = 10^{-6} \times \bar{M}_W = 10^{-6} \times -905\,646\,030 = -905 |t|.$$

Ergebnis:

Mit dem Vorhaben können die CO₂-Emissionen im Wirkungszeitraum vom 1. Januar 2018 bis zum 31. Dezember 2023 in einem Umfang von 905 Tonnen reduziert werden.

9.2.2 Beispiel 7: Einrichtung eines Verkehrsdienstes für die Umgehungsstraße

Die Kreisstadt „Historische Stadt“ wird durch eine Ringstraße vom Durchgangsverkehr entlastet. Leider kommt es auf der Ringstraße an 5 Tagen im Monat in Folge von Unfällen oder hohem Verkehrsaufkommen im Berufsverkehr zu Staus. Das Verkehrsamt der Stadt hat deswegen Routen identifiziert, die bei Staus oder starkem Verkehrsaufkommen auf der Ringstraße temporär als Richtungsfahrbahnen geöffnet werden sollen, damit Teilverkehre zu einem Gewerbegebiet und dem städtischen Klinikum abgeleitet werden. Zur Steuerung dieser Richtungsfahrbahnen beabsichtigt das Verkehrsamt zum 1. Januar 2019 ein Verkehrsdienst einzurichten, der den Stau detektiert und die Richtungsfahrbahn regelt. Das Gewerbegebiet und das Klinikum werden täglich von 3 000 Kfz angefahren. Durch die Richtungsfahrbahnen würde zukünftig nicht nur die Ringstraße in ihrem weiteren Verlauf entlastet werden, sondern sich auch der Weg der Kfz um 2 km verkürzen.

Hinweis:

Für die Berechnung des Rückgangs der CO₂-Emissionen ist das Rechenschema für die Veränderung der Verkehrsleistung (vgl. Abschnitt 8.2, Tabelle 27) anzuwenden. Das Beispiel entspricht dem dortigen Fall A: lagegleiche Wegstrecken.

Anzahl der Kraftfahrzeugtypen: $n_{Typ} = 1$ Typ.

Art des Kraftfahrzeugtyps²⁸: $Typ = 2 \vee 3 = \text{Pkw} - \text{aggregiert}$.

Eingabegrößen:

Wegstrecke: $s_{km} = 2 \left| \frac{Fzg \text{ km}}{d} \right|$ pro Pkw.

Anzahl der Kfz: $n_{Kfz \text{ Pkw}} = 3\,000 \times 5 \times 12 = 180\,000 \left| -\frac{d}{d \text{ Monat}} \frac{\text{Monat}}{a} \right|$.

Die Angabe zur Anzahl der Kfz bezieht sich auf einen anderen Bezugszeitraum als den Tag und ist nach (63) auf den Tag zu beziehen. Bei dem Verkehr der Kreisstadt „Historische Stadt“ handelt es sich um Berufsverkehr, so dass nach Tabelle 4 das Jahr mit $n_T = 232$ Tage anzusetzen ist.

Anzahl der Kfz: $n_{Kfz \text{ Tag}} = \frac{n_{Kfz \text{ Jahr}}}{n_{T \text{ Jahr}}} = \frac{180\,000}{232} = 775 \left| -\frac{a}{a \text{ d}} \right|$.

Vorzeichenregel: Die Wegstrecke s_{km} ist mit negativem Vorzeichen einzuführen.

²⁸ Kraftfahrzeugtyp nach Tabelle 14 (vgl. Seite 48)

Parameter:

Streckenbezogener Emissionsfaktor: $\varepsilon_{s_{km} P_{kw}} = 167,9 \left| \frac{g}{Fzg \text{ km}} \right|$ nach Tabelle 14.

Berechnungsgrößen:

Die Summe $\overline{s_{km} P_{kw}}$ aller verkürzten Wegstrecken der Pkw ergibt sich nach (42) unter Beachtung der Vorzeichenregel:

$$\overline{s_{km} P_{kw}} = n_{Kfz P_{kw}} \times s_{km} = 775 \times -2 = -1\,550 \left| -\frac{Fzg \text{ km}}{d} \right|.$$

Die Menge \bar{M} der CO₂-Emissionen für den Kraftfahrzeugtyp Pkw ergibt sich nach (41):

$$M_{Pkw} = \overline{s_{km} P_{kw}} \times \varepsilon_{s_{km} P_{kw}} = -1\,550 \times 167,9 = -260\,245 \left| \frac{Fzg \text{ km}}{d} \frac{g}{Fzg \text{ km}} \right|.$$

Die Gesamtmenge \bar{M} der CO₂-Emissionen ergibt sich nach (41):

$$\bar{M} = M_{Pkw} = -260\,245 \left| \frac{g}{d} \right|.$$

Die Berechnung der wirksamen Menge \bar{M}_W der CO₂-Emissionen erfolgt nach (5). Bei dem Verkehr handelt es sich um Berufsverkehr. Somit ist nach Tabelle 4 das Arbeitsjahr Bezugseinheit und die Anzahl der Arbeitstage urlaubsbereinigt nach Tabelle 3, Spalte 6 zu berücksichtigen:

$$n_T = n_{T_{2019}} + \dots + n_{T_{2023}} = 231 + \dots + 230 = 1\,162 |d|,$$

$$\bar{M}_W = n_T \times \bar{M} = 1\,162 \times -260\,245 = -302\,404\,690 \left| \frac{d \text{ g}}{d} \right|.$$

Die Menge \bar{M}_W ist mit (68) von der Einheit [g] in die Einheit [t] umzurechnen:

$$\bar{M}_W = 10^{-6} \times \bar{M}_W = 10^{-6} \times -302\,404\,690 = -302 |t|.$$

Ergebnis:

Mit dem Vorhaben können die CO₂-Emissionen im Wirkungszeitraum vom 1. Januar 2019 bis zum 31. Dezember 2023 in einem Umfang von 302 Tonnen reduziert werden.

9.3 Anwendungsbeispiele für die Verstetigung des Kraftverkehrs

9.3.1 Beispiel 8: Einführung eines dynamischen Fahrstreifenmanagements

Auf der Einfallsstraße der kreisfreien Stadt „Alte Residenz“ kommt es auf einem Teilstück von 3 km Länge im morgendlichen Berufsverkehr stadteinwärts zu einem überfüllten (gestauten) Verkehr. Dann bewegen sich 1 200 Pkw im Stop-and-go und einer Geschwindigkeit von 15 km/h in die Stadt. Deswegen plant das Verkehrsamt eine Anlage zum dynamischen Fahrstreifenmanagement einzuführen, die eine zeitweise Aktivierung eines der stadtauswärts führenden Fahrstreifen für den einfallenden Verkehr ermöglicht. Berechnungen haben ergeben, dass auf der Einfallsstraße mit einem weiteren Fahrstreifen der Zustand des teilgebundenen Verkehrs mit einer Geschwindigkeit von 40 km/h erreicht werden kann.

Hinweis:

Für die Berechnung des Rückgangs der CO₂-Emissionen ist das Rechenschema für die Verstetigung des Kraftverkehrs (vgl. Abschnitt 8.3, Tabelle 28) anzuwenden.

Anzahl der Kraftfahrzeugtypen: $n_{Typ} = 2$ Typen.

Art der Kraftfahrzeugtypen²⁹: $Typ_1 = 2 = \text{Pkw - Benzin};$

$Typ_2 = 3 = \text{Pkw - Diesel}.$

Eingabegrößen:

Verkehrszustand³⁰:

- vor der Verkehrsverflüssigung: innerorts, überfüllter (gestauter) Verkehr, $v_{0vor} = 15 \left| \frac{km}{h} \right|;$
- nach der Verkehrsverflüssigung: innerorts, teilgebundener Verkehr, $v_{0nach} = 40 \left| \frac{km}{h} \right|.$

Anzahl der Kfz: $n_{Kfz} = 1\,200 \left| \frac{d}{d} \right|$ in der für Sachsen-Anhalt typischen Fahrzeugverteilung³¹;

$$n_{Kfz_1} = 0,75 \times 1\,200 = 900 \left| \frac{d}{d} \right| \text{ Pkw - Benzin};$$

$$n_{Kfz_2} = 0,25 \times 1\,200 = 300 \left| \frac{d}{d} \right| \text{ Pkw - Diesel}.$$

Wegstrecke: $s_{km} = 3 \left| \frac{km}{d} \right|.$

²⁹ Kraftfahrzeugtyp nach Tabelle 16 (vgl. Seite 49)

³⁰ Verkehrszustand nach Tabelle 20 (vgl. Seite 52)

³¹ Fahrzeugverteilung nach Tabelle 22 (vgl. Seite 53)

Die Angaben beziehen sich bereits auf den Bezugszeitraum eines Tages. Ihre Umrechnung auf den Tag ist somit nicht erforderlich.

Vorzeichenregel: Die Kraftstoffmehrverbrauchsmenge $B_{MV_{vor}}$ vor der Verkehrsverflüssigung ist mit negativem Vorzeichen einzuführen, die Kraftstoffmehrverbrauchsmenge $B_{MV_{nach}}$ nach der Verkehrsverflüssigung mit positivem Vorzeichen.

Parameter:

Für den Verkehrszustand vor der Verkehrsverflüssigung:

- Halte pro Kilometer: $n_{H_{vor}} = 7,94 \left| \frac{1}{km} \right|$ nach Tabelle 20;
- Dauer der Wartezeit: $t_{W_{vor}} = 51 \text{ |s|}$ nach Tabelle 20;
- Zyklusmehrverbrauch: $B_{ZMV_{1_{vor}}} = 2,5 \text{ |ml|}$ für das Kfz vom Typ 2 nach Tabelle 17;
 $B_{ZMV_{2_{vor}}} = 1,2 \text{ |ml|}$ für das Kfz vom Typ 3 nach Tabelle 17.

Für den Verkehrszustand nach der Verkehrsverflüssigung:

- Halte pro Kilometer: $n_{H_{nach}} = 1,69 \left| \frac{1}{km} \right|$ nach Tabelle 20;
- Dauer der Wartezeit: $t_{W_{nach}} = 33 \text{ |s|}$ nach Tabelle 20;
- Zyklusmehrverbrauch: $B_{ZMV_{1_{nach}}} = 11,6 \text{ |ml|}$ für das Kfz vom Typ 2 nach Tabelle 18;
 $B_{ZMV_{2_{nach}}} = 5,8 \text{ |ml|}$ für das Kfz vom Typ 3 nach Tabelle 18.

Leerlaufverbrauch:

- für das Kfz vom Typ 2: $b_{L_1} = 0,22 \left| \frac{ml}{s} \right|$ nach Tabelle 16;
- für das Kfz vom Typ 3: $b_{L_2} = 0,14 \left| \frac{ml}{s} \right|$ nach Tabelle 16.

CO₂-Gehalt des Kraftstoffs:

- für den Benzinkraftstoff: $\varrho_1 = 10^{-3} \times 2\,360 = 2,360 \left| \frac{g}{ml} \right|$ nach Abschnitt 7.3.4;
- für den Dieselmkraftstoff: $\varrho_2 = 10^{-3} \times 2\,650 = 2,650 \left| \frac{g}{ml} \right|$ nach Abschnitt 7.3.4.

Berechnungsgrößen:

Die Kraftstoffmehrverbrauchsmenge B_{MV} ergibt sich nach (57) unter Beachtung der Vorzeichenregel:

- vor der Verkehrsverflüssigung:

$$B_{MV_{i_{vor}}} = n_{Kfz_i} \times n_{H_{vor}} \times s_{km} \times (B_{ZMV_{i_{vor}}} + t_{W_{vor}} \times b_{Li});$$

$$B_{MV_{1_{vor}}} = 900 \times 7,94 \times 3 \times (2,5 + 51 \times 0,22) = -294\,129 \left| -\frac{km}{d} \left(\frac{ml}{d} + \frac{s}{s} \frac{ml}{s} \right) \right|;$$

$$B_{MV_{2_{vor}}} = 300 \times 7,94 \times 3 \times (1,2 + 51 \times 0,14) = -59\,597 \left| -\frac{km}{d} \left(\frac{ml}{d} + \frac{s}{s} \frac{ml}{s} \right) \right|;$$

- nach der Verkehrsverflüssigung:

$$B_{MV_{i_{nach}}} = n_{Kfz_i} \times n_{H_{nach}} \times s_{km} \times (B_{ZMV_{i_{nach}}} + t_{W_{nach}} \times b_{Li});$$

$$B_{MV_{1_{nach}}} = 900 \times 1,69 \times 3 \times (11,6 + 33 \times 0,22) = +86\,058 \left| -\frac{km}{d} \left(\frac{ml}{d} + \frac{s}{s} \frac{ml}{s} \right) \right|;$$

$$B_{MV_{2_{nach}}} = 300 \times 1,69 \times 3 \times (5,8 + 33 \times 0,14) = +15\,848 \left| -\frac{km}{d} \left(\frac{ml}{d} + \frac{s}{s} \frac{ml}{s} \right) \right|.$$

Die Menge M der CO₂-Emissionen ergibt sich nach (51):

- vor der Verkehrsverflüssigung:

$$M_{1_{vor}} = B_{MV_{1_{vor}}} \times q_1 = -294\,129 \times 2,360 = -694\,144 \left| \frac{ml}{d} \frac{g}{ml} \right|;$$

$$M_{2_{vor}} = B_{MV_{2_{vor}}} \times q_2 = -59\,597 \times 2,650 = -157\,932 \left| \frac{ml}{d} \frac{g}{ml} \right|;$$

- nach der Verkehrsverflüssigung:

$$- \quad M_{1_{nach}} = B_{MV_{1_{nach}}} \times q_1 = 86\,058 \times 2,360 = 203\,096 \left| \frac{ml}{d} \frac{g}{ml} \right|;$$

$$- \quad M_{2_{nach}} = B_{MV_{2_{nach}}} \times q_2 = 15\,848 \times 2,650 = 41\,997 \left| \frac{ml}{d} \frac{g}{ml} \right|.$$

Die Gesamtmenge \bar{M} der CO₂-Emissionen ergibt sich nach (52):

$$\bar{M} = \sum_{i=1}^{2 \times 2} M_i = -694\,144 - 157\,932 + 203\,096 + 41\,997 = -606\,983 \left| \frac{g}{d} \right|.$$

Die Berechnung der wirksamen Menge \bar{M}_W der CO₂-Emissionen erfolgt nach (5). Bei dem Verkehr handelt es sich um Berufsverkehr. Somit ist nach Tabelle 4 das Arbeitsjahr Bezugseinheit und die Anzahl der Arbeitstage urlaubsbereinigt nach Tabelle 3, Spalte 6 zu berücksichtigen:

$$n_T = n_{T_{2018}} + \dots + n_{T_{2023}} = 231 + \dots + 230 = 1\,393 \text{ [d]},$$

$$\bar{M}_W = n_T \times \bar{M} = 1\,393 \times -606\,983 = -845\,527\,319 \left[\frac{\text{d} \cdot \text{g}}{\text{d}} \right].$$

Die Menge \bar{M}_W ist mit (68) von der Einheit [g] in die Einheit [t] umzurechnen:

$$\bar{M}_W = 10^{-6} \times \bar{M}_W = 10^{-6} \times -845\,527\,319 = -845 \text{ [t]}.$$

Ergebnis:

Mit dem Vorhaben können die CO₂-Emissionen im Wirkungszeitraum vom 1. Januar 2018 bis zum 31. Dezember 2023 in einem Umfang von 845 Tonnen reduziert werden.

9.4 Anwendungsbeispiele für die Steigerung der Elektromobilität

9.4.1 Beispiel 9: Aufbau einer Ladesäule für die kommunale Flotte

Im Zuge eines Vorhabens ist beabsichtigt, den Aufbau einer Ladesäule für das Aufladen von Elektroautos vorzunehmen. Die Ladesäule soll zum 1. Januar 2018 den Betrieb aufnehmen. An ihr soll die Flotte der Verwaltung der Gebietskörperschaft „Grüne Stadt“ bestehend aus 10 reinen Batterieelektrofahrzeugen mit einer wöchentlichen Fahrleistung von 150 km pro Fahrzeug aufgeladen werden.

Hinweis:

Für die Berechnung des Rückgangs der CO₂-Emissionen ist das Rechenschema für die Steigerung der Elektromobilität (vgl. Abschnitt 8.4, Tabelle 29) anzuwenden. Das Beispiel entspricht dem dortigen Fall 1: gleichlange Wegstrecken.

Anzahl der Elektroautotypen: $n_{Typ} = 1$ Typ.

Art des Elektroautotyps³²: $Typ = 1 = \text{E-Fahrzeug}$.

Eingabegrößen:

Anzahl der Fahrzeuge: $n_{Fzg} = 10$ | | Elektroautos vom Typ 1.

Wegstrecke: $s_{km} = 150$ |Fzg km| pro Woche und Elektroauto.

Die Angabe zur Wegstrecke bezieht sich auf einen anderen Bezugszeitraum als den Tag und ist nach (63) auf den Tag zu beziehen. Bei dem Verkehr der Flotte der Verwaltung der Gebietskörperschaft „Grüne Stadt“ handelt es sich um Wirtschaftsverkehr, so dass nach Tabelle 4 die Woche mit $n_T = 5$ Arbeitstage anzusetzen ist.

Wegstrecke: $s_{kmTag} = \frac{s_{kmWoche}}{n_{TWoche}} = \frac{150}{5} = 30$ |Fzg km| pro Elektroauto.

Vorzeichenregel: Die Wegstrecke s_{km} ist mit negativem Vorzeichen einzuführen.

Parameter:

Streckenbezogener Emissionsfaktor: $\varepsilon_{s_{km}pkw} = 167,9$ | $\frac{g}{Fzg km}$ | nach Tabelle 23.

Elektromobilitätsgrad für das Elektroauto vom Typ 1: $\eta_{EM} = 1$ | | nach Tabelle 24.

³² Elektroautotyp nach Tabelle 24 (vgl. Seite 54)

Berechnungsgrößen:

Die Summe $\overline{s_{km}}$ aller mit den Elektroautos zurückgelegten Wegstrecken ergibt sich nach (7) unter Beachtung der Vorzeichenregel:

$$\overline{s_{km}} = n_{Fzg} \times s_{km} = 10 \times -30 = -300 \left| -\frac{Fzg \text{ km}}{d} \right|.$$

Die Menge M der CO₂-Emissionen der Elektroautos ergibt sich nach (60):

$$M = \overline{s_{km}} \times \varepsilon_{s_{km}} \times \eta_{EM} = -300 \times 167,9 \times 1 = -50\,370 \left| \frac{Fzg \text{ km}}{d} \frac{g}{Fzg \text{ km}} \right|.$$

Die Gesamtmenge \overline{M} der CO₂-Emissionen ergibt sich nach (4):

$$\overline{M} = M = -50\,370 \left| \frac{g}{d} \right|.$$

Die Berechnung der wirksamen Menge \overline{M}_W der CO₂-Emissionen erfolgt nach (5). Bei dem Verkehr der Flotte handelt es sich um Wirtschaftsverkehr. Somit ist nach Tabelle 4 das Arbeitsjahr Bezugseinheit und die Anzahl der Arbeitstage urlaubsbereinigt nach Tabelle 3, Spalte 6 zu berücksichtigen:

$$n_T = n_{T_{2018}} + \dots + n_{T_{2023}} = 231 + \dots + 230 = 1\,393 |d|,$$

$$\overline{M}_W = n_T \times \overline{M} = 1\,393 \times -50\,370 = -70\,165\,410 \left| \frac{d \text{ g}}{d} \right|.$$

Die Menge \overline{M}_W ist mit (68) von der Einheit $[g]$ in die Einheit $[t]$ umzurechnen:

$$\overline{M}_W = 10^{-6} \times \overline{M}_W = 10^{-6} \times -70\,165\,410 = -70 |t|.$$

Ergebnis:

Mit dem Vorhaben können die CO₂-Emissionen im Wirkungszeitraum vom 1. Januar 2018 bis zum 31. Dezember 2023 in einem Umfang von 70 Tonnen reduziert werden.

Alternative:

Beeinflusst die Urlaubzeit die Fahrleistung der Flotte nicht und beträgt die wöchentliche Fahrleistung der Flotte zur Urlaubszeit ebenfalls 150 km pro Fahrzeug, so kann die Anzahl der Arbeitstage urlaubsunbereinigt nach Tabelle 3, Spalte 4 berücksichtigt werden:

$$n_T = n_{T_{2018}} + \dots + n_{T_{2023}} = 251 + \dots + 250 = 1\,513 |d|,$$

$$\overline{M}_W = n_T \times \overline{M} = 1\,513 \times -50\,370 = -76\,209\,810 \left| \frac{d \text{ g}}{d} \right|,$$

$$\overline{M}_W = 10^{-6} \times \overline{M}_W = 10^{-6} \times -76\,209\,810 = -76 |t|.$$

In diesem Fall können die CO₂-Emissionen um 76 Tonnen reduziert werden.

9.4.2 Beispiel 10: Aufbau einer Ladesäule für die bürgerliche Nutzung

Im Zuge eines Vorhabens ist beabsichtigt, den Aufbau einer Ladesäule für das Aufladen von Elektroautos vorzunehmen. Die Ladesäule soll zum 1. Januar 2018 den Betrieb aufnehmen und den Bürgerinnen und Bürgern der Gebietskörperschaft „Grüne Stadt“ zur Verfügung stehen. Eine Bedarfsermittlung hat ergeben, dass in der Stadt 31 reine Batterieelektrofahrzeuge und 15 Hybridelektrofahrzeuge der Emissionsklasse 51 bis 100 g/Fzg km vorhanden sind, die allesamt hauptsächlich für die Fahrt zur Arbeitsstätte in der 30 km entfernten Kreisstadt genutzt werden und die an der Ladesäule aufgeladen werden sollen.

Hinweis:

Für die Berechnung des Rückgangs der CO₂-Emissionen ist das Rechenschema für die Steigerung der Elektromobilität (vgl. Abschnitt 8.4, Tabelle 29) anzuwenden. Das Beispiel entspricht dem dortigen Fall 1: gleichlange Wegstrecken.

Anzahl der Elektroautotypen: $n_{Typ} = 2$ Typen.

Art der Elektroautotypen³³: $Typ_1 = 1 = \text{E-Fahrzeug}$;

$Typ_2 = 3 = \text{Plug-In-Hybrid - 51 bis 100 [g/Fzg km]}$.

Eingabegrößen:

Anzahl der Fahrzeuge: $n_{Fzg_1} = 31$ | | Elektroautos vom Typ 1;

$n_{Fzg_2} = 15$ | | Elektroautos vom Typ 3.

Wegstrecke: $s_{km_1} = 2 \times 30 = 60 \left| \frac{\text{Fzg km}}{d} \right|$ pro Elektroauto vom Typ 1;

$s_{km_2} = 2 \times 30 = 60 \left| \frac{\text{Fzg km}}{d} \right|$ pro Elektroauto vom Typ 3.

Die Angaben zu den Wegstrecken beziehen sich bereits auf den Bezugszeitraum eines Tages. Ihre Umrechnung auf den Tag ist somit nicht erforderlich.

Vorzeichenregel: Die Wegstrecken s_{km_i} sind mit negativen Vorzeichen einzuführen.

Parameter:

Streckenbezogener Emissionsfaktor: $\varepsilon_{s_{km} P_{kw}} = 167,9 \left| \frac{\text{g}}{\text{Fzg km}} \right|$ nach Tabelle 23.

Elektromobilitätsgrad:

- für das Elektroauto vom Typ 1: $\eta_{EM_1} = 1$ | | nach Tabelle 24;

³³ Elektroautotyp nach Tabelle 24 (vgl. Seite 54)

- für das Elektroauto vom Typ 3: $\eta_{EM_2} = 0,55$ | | nach Tabelle 24.

Berechnungsgrößen:

Die Summe $\overline{s_{km}}$ aller mit den Elektroautos zurückgelegten Wegstrecken ergibt sich nach (7):

- für das Elektroauto vom Typ 1:

$$\overline{s_{km_1}} = n_{Fzg_1} \times s_{km_1} = 31 \times -60 = -1\,860 \left| -\frac{Fzg\ km}{d} \right|;$$

- für das Elektroauto vom Typ 3:

$$\overline{s_{km_2}} = n_{Fzg_2} \times s_{km_2} = 15 \times -60 = -900 \left| -\frac{Fzg\ km}{d} \right|.$$

Die Menge M der CO₂-Emissionen der Elektroautos ergibt sich nach (60):

- für das Elektroauto vom Typ 1:

$$M_1 = \overline{s_{km_1}} \times \varepsilon_{s_{km}} \times \eta_{EM_1} = -1\,860 \times 167,9 \times 1 = -312\,294 \left| \frac{Fzg\ km}{d} \frac{g}{Fzg\ km} \right|;$$

- für das Elektroauto vom Typ 3:

$$M_2 = \overline{s_{km_2}} \times \varepsilon_{s_{km}} \times \eta_{EM_2} = -900 \times 167,9 \times 0,55 = -83\,110 \left| \frac{Fzg\ km}{d} \frac{g}{Fzg\ km} \right|.$$

Die Gesamtmenge \overline{M} der CO₂-Emissionen ergibt sich nach (4):

$$\overline{M} = M_1 + M_2 = -312\,294 - 83\,110 = -395\,404 \left| \frac{g}{d} \right|.$$

Die Berechnung der wirksamen Menge \overline{M}_W der CO₂-Emissionen erfolgt nach (5). Bei dem Verkehr der Elektroautos handelt es sich um Berufsverkehr. Somit ist nach Tabelle 4 das Arbeitsjahr Bezugseinheit und die Anzahl der Arbeitstage urlaubsbereinigt nach Tabelle 3, Spalte 6 zu berücksichtigen:

$$n_T = n_{T_{2018}} + \dots + n_{T_{2023}} = 231 + \dots + 230 = 1\,393 |d|,$$

$$\overline{M}_W = n_T \times \overline{M} = 1\,393 \times -395\,404 = -550\,797\,772 \left| \frac{d\ g}{d} \right|.$$

Die Menge \overline{M}_W ist mit (68) von der Einheit $[g]$ in die Einheit $[t]$ umzurechnen:

$$\overline{M}_W = 10^{-6} \times \overline{M}_W = 10^{-6} \times -550\,797\,772 = -550 |t|.$$

Ergebnis:

Mit dem Vorhaben können die CO₂-Emissionen im Wirkungszeitraum vom 1. Januar 2018 bis zum 31. Dezember 2023 in einem Umfang von 550 Tonnen reduziert werden.

9.4.3 Beispiel 11: Aufbau eines Mobilitätsportals für das Mobilitätsmanagement

Die Gebietskörperschaft „Grüne Stadt“ möchte ihre Elektroautos stärker ausnutzen und sie ab dem 1. Juli 2017 den örtlichen Sportvereinen an den Wochenenden zur Verfügung stellen. Zu diesem Zweck beabsichtigt sie, im Zuge eines Vorhabens ein Mobilitätsportal einzurichten, über das die Nutzung der Elektroautos organisiert werden kann. Die Stadt verfügt über 10 reine Batterieelektrofahrzeuge und hat dazu eine Nutzungsanalyse angefertigt. Die Fahrzeuge könnten jeweils an den Wochenenden für 4 Besuche eines Turnierplatzes in der 20 km entfernten Nachbarstadt, für 5 Besuche einer Sportstätte in der 35 km entfernten Kreisstadt und für 3 Besuche einer Schwimmhalle in der 60 km entfernten Landeshauptstadt eingesetzt werden.

Hinweis:

Für die Berechnung des Rückgangs der CO₂-Emissionen ist das Rechenschema für die Steigerung der Elektromobilität (vgl. Abschnitt 8.4, Tabelle 29) anzuwenden. Das Beispiel entspricht dem dortigen Fall 2: verschiedene, unterschiedlich lange Wegstrecken. Die Voraussetzung der Existenz von nur einem Elektroautotyp ist für die Anwendung von Fall 2 gegeben!

Anzahl der Elektroautotypen: $n_{Typ} = 1$ Typ.

Art des Elektroautotyps³⁴: $Typ = 1 = \text{E-Fahrzeug}$.

Anzahl der Wegstrecken: $n_s = 3$ Wegstrecken.

Eingabegrößen:

Anzahl der Fahrzeuge: $n_{Fzg_1} = 4$ | | Elektroautos vom Typ 1 auf s_{km_1} ;

$n_{Fzg_2} = 5$ | | Elektroautos vom Typ 1 auf s_{km_2} ;

$n_{Fzg_3} = 3$ | | Elektroautos vom Typ 1 auf s_{km_3} .

Wegstrecke: $s_{km_1} = 2 \times 20 = 40 \left| \frac{Fzg \text{ km}}{d} \right|$ pro Elektroauto vom Typ 1;

$s_{km_2} = 2 \times 35 = 70 \left| \frac{Fzg \text{ km}}{d} \right|$ pro Elektroauto vom Typ 1;

$s_{km_3} = 2 \times 60 = 120 \left| \frac{Fzg \text{ km}}{d} \right|$ pro Elektroauto vom Typ 1.

Die Angaben zu den Wegstrecken beziehen sich bereits auf den Bezugszeitraum eines Tages. Ihre Umrechnung auf den Tag ist somit nicht erforderlich.

Vorzeichenregel: Die Wegstrecken s_{km_i} sind mit negativen Vorzeichen einzuführen.

³⁴ Elektroautotyp nach Tabelle 24 (vgl. Seite 54)

Parameter:

Streckenbezogener Emissionsfaktor: $\varepsilon_{s_{km}pkw} = 167,9 \left| \frac{g}{Fzg \text{ km}} \right|$ nach Tabelle 23.

Elektromobilitätsgrad für das Elektroauto vom Typ 1: $\eta_{EM} = 1$ | | nach Tabelle 24.

Berechnungsgrößen:

Die Summe $\overline{s_{km}}$ aller mit den Elektroautos zurückgelegten Wegstrecken ergibt sich nach (8):

$$\begin{aligned}\overline{s_{km}} &= (n_{Fzg_1} \times s_{km_1}) + \dots + (n_{Fzg_3} \times s_{km_3}) \\ &= (4 \times -40) + (5 \times -70) + (3 \times -120) = -870 \left| -\frac{Fzg \text{ km}}{d} \right|.\end{aligned}$$

Die Menge M der CO₂-Emissionen der Elektroautos ergibt sich nach (60):

$$M = \overline{s_{km}} \times \varepsilon_{s_{km}} \times \eta_{EM} = -870 \times 167,9 \times 1 = -146\,073 \left| \frac{Fzg \text{ km}}{d} \frac{g}{Fzg \text{ km}} \right|.$$

Die Gesamtmenge \overline{M} der CO₂-Emissionen ergibt sich nach (4):

$$\overline{M} = M = -146\,073 \left| \frac{g}{d} \right|.$$

Die Berechnung der wirksamen Menge \overline{M}_W der CO₂-Emissionen erfolgt nach (5). Bei dem Verkehr der Elektroautos handelt es sich um Freizeitverkehr nur am Wochenende. Somit ist nach Tabelle 4 das Kalenderjahr Bezugseinheit und die Anzahl der Tage daraus für ein halbes Jahr (2017) und sechs ganze Jahre (2018 bis 2023) abzuleiten:

$$n_T = 6,5 \times \frac{n_{T_{Jahr}}}{n_{T_{Woche}}} = 6,5 \times \frac{365}{7} = 338|d|,$$

$$\overline{M}_W = n_T \times \overline{M} = 338 \times -146\,073 = -49\,372\,674 \left| \frac{d \cdot g}{d} \right|.$$

Die Menge \overline{M}_W ist mit (68) von der Einheit $[g]$ in die Einheit $[t]$ umzurechnen:

$$\overline{M}_W = 10^{-6} \times \overline{M}_W = 10^{-6} \times -49\,372\,674 = -49 \text{ |t|}.$$

Ergebnis:

Mit dem Vorhaben können die CO₂-Emissionen im Wirkungszeitraum vom 1. Juli 2017 bis zum 31. Dezember 2023 in einem Umfang von 49 Tonnen reduziert werden.

9.4.4 Beispiel 12: Aufbau einer Ladesäule für die bürgerliche Nutzung

Im Zuge eines Vorhabens ist beabsichtigt, den Aufbau einer Ladesäule für das Aufladen von Elektroautos vorzunehmen. Die Ladesäule soll zum 1. Januar 2018 den Betrieb aufnehmen und den Bürgerinnen und Bürgern der Gebietskörperschaft „Grüne Stadt“ zur Verfügung stehen. Eine Bedarfsermittlung hat ergeben, dass in der Stadt 31 reine Batterieelektrofahrzeuge und 15 Hybridelektrofahrzeuge der Emissionsklasse 51 bis 100 g/Fzg km vorhanden sind, die allesamt hauptsächlich für die Fahrt zur Arbeitsstätte genutzt werden und die an der Ladesäule aufgeladen werden sollen. Die Bedarfsermittlung hat weiter ergeben, dass von den reinen Batterieelektrofahrzeugen täglich 12 Fahrzeuge und von den Hybridelektrofahrzeugen täglich 6 Fahrzeuge aufgeladen werden müssen.

Hinweis:

Für die Berechnung des Rückgangs der CO₂-Emissionen ist das Rechenschema für die Steigerung der Elektromobilität (vgl. Abschnitt 8.4, Tabelle 29) anzuwenden. Das Beispiel entspricht dem dortigen Fall 3: Anzahl der Ladevorgänge.

Anzahl der Elektroautotypen: $n_{Typ} = 2$ Typen.

Art der Elektroautotypen³⁵: $Typ_1 = 1 = \text{E-Fahrzeug}$;

$Typ_2 = 3 = \text{Plug-In-Hybrid - 51 bis 100 [g/Fzg km]}$.

Eingabegrößen:

Anzahl der Ladevorgänge: $n_{L_1} = 12$ | | für die Elektroautos vom Typ 1;

$n_{L_2} = 6$ | | für die Elektroautos vom Typ 3.

Die Angaben zur Anzahl der Ladevorgänge beziehen sich bereits auf den Bezugszeitraum eines Tages. Ihre Umrechnung auf den Tag ist somit nicht erforderlich.

Vorzeichenregel: Die Wegstrecke s_{EM} ist mit negativem Vorzeichen einzuführen.

Parameter:

Streckenbezogener Emissionsfaktor: $\varepsilon_{s_{km} PKW} = 167,9 \left| \frac{g}{Fzg \text{ km}} \right|$ nach Tabelle 23.

Elektromobilitätsgrad:

- für das Elektroauto vom Typ 1: $\eta_{EM_1} = 1$ | | nach Tabelle 24;

- für das Elektroauto vom Typ 3: $\eta_{EM_2} = 0,55$ | | nach Tabelle 24.

³⁵ Elektroautotyp nach Tabelle 24 (vgl. Seite 54)

Mittlere Reichweite der Elektroautos: $s_{EM} = 154,7 \left| \frac{\text{Fzg km}}{d} \right|$ nach Abschnitt 7.4.3.

Berechnungsgrößen:

Die Summe $\overline{s_{km}}$ aller mit den Elektroautos zurückgelegten Wegstrecken ergibt sich nach (62):

- für das Elektroauto vom Typ 1:

$$\overline{s_{km_1}} = s_{EM} \times n_{L_1} = -154,7 \times 12 = -1\,856 \left| \frac{\text{Fzg km}}{d} \right|;$$

- für das Elektroauto vom Typ 3:

$$\overline{s_{km_2}} = s_{EM} \times n_{L_2} = -154,7 \times 6 = -928 \left| \frac{\text{Fzg km}}{d} \right|.$$

Die Menge M der CO₂-Emissionen der Elektroautos ergibt sich nach (60):

- für das Elektroauto vom Typ 1:

$$M_1 = \overline{s_{km_1}} \times \varepsilon_{s_{km}} \times \eta_{EM_1} = -1\,856 \times 167,9 \times 1 = -311\,622 \left| \frac{\text{Fzg km}}{d} \frac{g}{\text{Fzg km}} \right|;$$

- für das Elektroauto vom Typ 3:

$$M_2 = \overline{s_{km_2}} \times \varepsilon_{s_{km}} \times \eta_{EM_2} = -928 \times 167,9 \times 0,55 = -85\,696 \left| \frac{\text{Fzg km}}{d} \frac{g}{\text{Fzg km}} \right|.$$

Die Gesamtmenge \overline{M} der CO₂-Emissionen ergibt sich nach (4):

$$\overline{M} = M_1 + M_2 = -311\,622 + -85\,696 = -397\,318 \left| \frac{g}{d} \right|.$$

Die Berechnung der wirksamen Menge \overline{M}_W der CO₂-Emissionen erfolgt nach (5). Bei dem Verkehr der Elektroautos handelt es sich um Berufsverkehr. Somit ist nach Tabelle 4 das Arbeitsjahr Bezugseinheit und die Anzahl der Arbeitstage urlaubsbereinigt nach Tabelle 3, Spalte 6 zu berücksichtigen:

$$n_T = n_{T_{2018}} + \dots + n_{T_{2023}} = 231 + \dots + 230 = 1\,393 |d|,$$

$$\overline{M}_W = n_T \times \overline{M} = 1\,393 \times -397\,318 = -553\,463\,974 \left| \frac{d \cdot g}{d} \right|.$$

Die Menge \overline{M}_W ist mit (68) von der Einheit $[g]$ in die Einheit $[t]$ umzurechnen:

$$\overline{M}_W = 10^{-6} \times \overline{M}_W = 10^{-6} \times -553\,463\,974 = -553 |t|.$$

Ergebnis:

Mit dem Vorhaben können die CO₂-Emissionen im Wirkungszeitraum vom 1. Januar 2018 bis zum 31. Dezember 2023 in einem Umfang von 553 Tonnen reduziert werden.

10 Abkürzungsverzeichnis

CO ₂	Kohlenstoffdioxid
E-Fahrzeug.....	Reines Batterieelektrofahrzeug
HVZ	Hauptverkehrszeit
IV	Individualverkehr
IVS.....	Intelligente Verkehrssysteme
Kfz.....	Kraftfahrzeug
KOM	Kraftomnibus
Krad	Kraftrad
Lkw	Lastkraftwagen
MIV	Motorisierter Individualverkehr
Nkw	Nutzkraftwagen
NMIV	Nichtmotorisierter Individualverkehr
NVZ.....	Nebenverkehrszeit
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
Pkw	Personenkraftwagen
Plug-In-Hybrid	(von außen aufladbares) Hybridelektrofahrzeug
SVZ.....	Schwachverkehrszeit

11 Symbolverzeichnis

|	.....	Abgrenzungszeichen; trennt Formel und ihrer Bedingungen
| ]	.....	Gaußklammer (Abrundungsfunktion)
[ ]	.....	eckige Klammer; beinhaltet die Angabe der physikalischen Einheit
| |	.....	gerade Klammer; beinhaltet die Rechnung mit den physikalischen Einheiten
{ }	.....	geschweifte Klammer; beinhaltet die Bedingungen einer Formel
f	.....	Funktion
$f(x)$	.....	Funktionswert
\pm	.....	plus oder minus
+	.....	plus (Addition)
-	.....	minus (Subtraktion)
\times	.....	mal (Multiplikation)
$\frac{x}{y}$	.....	geteilt (Division)
Σ	.....	Summe von (Summenbildung)
$\stackrel{\text{def}}{=}$	.....	wird definiert als
$\stackrel{!}{=}$	.....	hinweisendes ist gleich
\equiv	.....	identisch mit
<	.....	kleiner
\leq	.....	kleiner gleich
>	.....	größer
\geq	.....	größer gleich
\wedge	.....	logisches Und
\vee	.....	logisches Oder
\subseteq	.....	Teilmenge von oder gleich

12 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: CO ₂ -Äquivalente nach dem zweiten Sachstandsbericht des IPCC	10
Tabelle 2: Übersicht der verkehrlichen Veränderungsprozesse	14
Tabelle 3: Anzahl der Arbeitstage in Sachsen-Anhalt	39
Tabelle 4: Anzahl der Tage n_T der Bezugszeiträume	40
Tabelle 5: Bezeichnung und Verwendung der Variablen des mathematischen Modells	42
Tabelle 6: Wertebereich der Variablen des mathematischen Modells	43
Tabelle 7: Streckenbezogener Emissionsfaktor	45
Tabelle 8: Streckenspezifischer Emissionsfaktor	45
Tabelle 9: Leistungsbezogener Emissionsfaktor	46
Tabelle 10: Mittlere Fahrtweite differenziert nach Verkehrsmittel	46
Tabelle 11: Mittlere Fahrtweite differenziert nach Siedlungsstruktur	46
Tabelle 12: Mittlere Fahrtweitenanteile differenziert nach Siedlungsstruktur	47
Tabelle 13: Besetzungszahl des Pkw	47
Tabelle 14: Streckenbezogener Emissionsfaktor	48
Tabelle 15: Streckenspezifischer Emissionsfaktor	48
Tabelle 16: Leerlaufverbrauch b_L der Kfz	49
Tabelle 17: Funktion für den Zyklusmehrverbrauch B_{ZMV} der Kfz	50
Tabelle 18: Zyklusmehrverbrauch B_{ZMV} der Kfz (Teil 1)	51
Tabelle 19: Zyklusmehrverbrauch B_{ZMV} der Kfz (Teil 2)	51
Tabelle 20: Verkehrszustand des Kraftverkehrs	52
Tabelle 21: Fahrzeugverteilung in Sachsen-Anhalt nach Fahrzeugarten	53
Tabelle 22: Fahrzeugverteilung der Pkw in Sachsen-Anhalt	53
Tabelle 23: Streckenbezogener Emissionsfaktor	54
Tabelle 24: Elektromobilitätsgrad η_{EM} der Elektroautos	54
Tabelle 25: Rechenschema für die Veränderung des Modal Split (Teil ÖPNV)	56
Tabelle 26: Rechenschema für die Veränderung des Modal Split (Teil IV)	56
Tabelle 27: Rechenschema für die Veränderung der Verkehrsleistung	57
Tabelle 28: Rechenschema für die Verstetigung des Kraftverkehrs	58
Tabelle 29: Rechenschema für die Steigerung der Elektromobilität	59

13 Literaturverzeichnis

BMVI. 2014a. Individualverkehr. *Forschungs-Informationssystem des BMVI für Verkehr und Mobilität*. [Online] 9. August 2014a. [Zitat vom: 16. Februar 2016.]

<http://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/148976/?clsId0=0&clsId1=0&clsId2=0&clsId3=0>.

—, **2015a.** Motorisierter Individualverkehr. *Forschungs-Informationssystem des BMVI für Verkehr und Mobilität*. [Online] 26. August 2015a. [Zitat vom: 16. Februar 2016.]

<http://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/25653/?clsId0=0&clsId1=0&clsId2=0&clsId3=0>.

—, **2010.** Nichtmotorisierter Verkehr. *Forschungs-Informationssystem des BMVI für Verkehr und Mobilität*. [Online] 3. Mai 2010. [Zitat vom: 16. Februar 2016.]

<http://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/287766/?clsId0=0&clsId1=0&clsId2=0&clsId3=0>.

—, **2015b.** Pkw-Besetzungsgrad bei der privaten Autonutzung. *Forschungs-Informationssystem des BMVI für Verkehr und Mobilität*. [Online] 9. April 2015b. [Zitat vom: 31. März 2016.]

<http://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/79638/>.

—, **2014b.** Verkehr und Mobilität-Verkehr in Zahlen. *Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur*. [Online] September 2014b. [Zitat vom: 9. Mai 2016.]

http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/verkehr-in-zahlen-pdf.zip?__blob=publicationFile.

—, **2014b.** Verkehrsleistung. *Forschungs-Informationssystem des BMVI für Verkehr und Mobilität*. [Online] 23. Mai 2014b. [Zitat vom: 16. Februar 2016.]

<http://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/314745/?clsId0=0&clsId1=0&clsId2=0&clsId3=0>.

Duden. 2016a. Kraftfahrzeug. *Duden - Willkommen im Bereich Sprachwissen*. [Online] 2016a. [Zitat vom: 25. Februar 2016.] <http://www.duden.de/rechtschreibung/Kraftfahrzeug>.

—, **2016b.** Kraftrad. *Duden - Willkommen im Bereich Sprachwissen*. [Online] 2016b. [Zitat vom: 25. Februar 2016.] <http://www.duden.de/suchen/dudenonline/Kraftrad>.

—, **2016c.** Kraftverkehr. *Duden - Willkommen im Bereich Sprachwissen*. [Online] 2016c. [Zitat vom: 25. Februar 2016.] <http://www.duden.de/rechtschreibung/Kraftverkehr>.

—, **2016d.** Verkehrsmittel. *Duden - Willkommen im Bereich Sprachwissen*. [Online] 2016d. [Zitat vom: 15. März 2016.] <http://www.duden.de/suchen/dudenonline/Verkehrsmittel>.

Europäische Kommission. 2015. EU transport in figures - Statistical Pocketbook 2015. *European Commission - Transport - Publications*. [Online] 2015. [Zitat vom: 11. März 2016.] <http://ec.europa.eu/transport/facts-fundings/statistics/doc/2015/pocketbook2015.pdf>.

— **2010.** EUROPA 2020 - Eine Strategie für intelligentes, nachhaltiges und integratives Wachstum. *Europa 2020*. [Online] 3. März 2010. [Zitat vom: 27. Januar 2016.] <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2010:2020:FIN:DE:PDF>.

Grebe, Uwe D. 2005. Weiterentwicklung des Ottomotors. *Vorlesung TU Wien SS 2005*. [Online] 10. November 2005. [Zitat vom: 1. März 2016.] http://www.reitz-net.de/bilder/Entw_otto_motor.pdf.

GutWetter Verlag. 2016a. Kohlendioxidäquivalent. *Online-Magazin Klimaretter.Info*. [Online] 2016a. [Zitat vom: 15. Januar 2016.] <http://www.klimaretter.info/tipps-klima-lexikon/10978-kohlendioxidaequivalent-co2-aequivalent>, 15.01.2016.

— **2016b.** Treibhausgase. *Online-Magazin Klimaretter.Info*. [Online] 2016b. [Zitat vom: 15. Januar 2016.] <http://www.klimaretter.info/tipps-klima-lexikon/1897-treibhausgase-anthropogene?catid=117%3At>.

INFRAS. 2014. HBEFA 3.2. *HBEFA - Handbook Emission Factors for Road Transport*. [Online] 17. Juli 2014. [Zitat vom: 31. März 2016.] <http://www.hbefa.net/d/index.html>.

KlimAktiv. 2016. Äquivalent. *KlimAktiv*. [Online] 2016. [Zitat vom: 1. Januar 2016.] <http://www.klima-aktiv.de/lexikon-43.html>.

Kraftfahrt-Bundesamt. 2015. Bestand an Pkw am 1. Januar 2015 nach ausgewählten Kraftstoffarten. *Kraftfahrt-Bundesamt - Umwelt*. [Online] 2015. [Zitat vom: 8. März 2016.] http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Umwelt/2014_b_umwelt_dusl_absolut.html?nn=663524.

— **2014.** Verkehr in Kilometern der deutschen Kraftfahrzeuge im Jahr 2014. *Kraftfahrt-Bundesamt - Verkehr in Kilometern*. [Online] 2014. [Zitat vom: 8. März 2016.] http://www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/VerkehrKilometer/verkehr_in_kilometern_node.html.

Land Sachsen-Anhalt. 2017b. Grundsätze über die Gewährung von Zuweisungen zur Förderung der Forschung, Einführung und Nutzung intelligente Verkehrssysteme, RdErl. des MLV vom 28.11.2016 – 37-30604/IVS. *Ministerialblatt für das Land Sachsen-Anhalt*. 31. Januar 2017b, 3, S. 73-78.

— **2018.** Operationelles Programm (OP) des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE). *Das Portal des Landes Sachsen-Anhalt*. [Online] 12. September 2018. [Zitat vom: 29. November 2018.] https://europa.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Bibliothek/Politik_und_Verwaltung/StK/Europa/ESI-Fonds-Neu_2017/Dokumente/EFRE/OP_EFRE/18_09_12_OP_EFRE_Stand_clean.pdf.

—. **2017a.** Richtlinien über die Gewährung von Zuwendungen zur Förderung der Forschung, Einführung und Nutzung intelligenter Verkehrssysteme, RdErl. des MLV vom 28.11.2016 – 37-30604/IVS. *Ministerialblatt für das Land Sachsen-Anhalt*. 30. Januar 2017a, 3, S. 67-73.

Schnabel, Werner und Lohse, Dieter. 2011. *Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2011. Bd. 1. ISBN: 978-3-7812-1815-4.

—. **1997.** *Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung*. Berlin : Verlag für Bauwesen GmbH, 1997. Bd. 1. ISBN 3-345-00566-2.

Schnabel, Werner, Lätzsch, Lothar und Brückner, Norbert. 2001. Kraftstoffverbrauch im Straßenverkehr. *Straßenverkehrstechnik*. 2001, 12, S. 584-595.

Schulz, Holger. 2015. Anzahl der Arbeitstage berechnen. *Schnelle Online-Hilfe*. [Online] 2015. [Zitat vom: 15. Dezember 2015.] <http://www.schnelle-online.info/Arbeitstage-berechnen.html>.

SMWA. 2015. *Methodik der CO₂e-Berechnung für Verkehrsinfrastrukturmaßnahmen, Berechnungstool Telematik - Änderung des Modal Split, nicht veröffentlicht*. Dresden : Sächsisches Staatsministerium für Wirtschaft, Arbeit und Verkehr, 2015.

Umweltbundesamt. 2015a. Kohlendioxid. *Das UBA | Umweltbundesamt*. [Online] 24. August 2015a. [Zitat vom: 15. Januar 2016.] <http://www.umweltbundesamt.de/service/glossar/c>.

—. **2015b.** Treibhausgas. *Das UBA | Umweltbundesamt*. [Online] 24. August 2015b. [Zitat vom: 15. Januar 2016.] <http://www.umweltbundesamt.de/service/glossar/t?tag=Treibhausgas#alphabet>.

VCD. 2007. Klimawandel und Verkehr – Informationen und Lösungswege. *VCD, der ökologische Verkehrsclub – für eine umweltfreundliche Mobilität*. [Online] 2007. [Zitat vom: 14. April 2016.] https://www.vcd.org/fileadmin/user_upload/Redaktion/Publikationsdatenbank/Klimafreundliche_Mobilitaet/VCD_Materialien_Klimawandel_und_Verkehr_2007.pdf.

VDV. 2015. Jahresbericht & Statistik. *Verband Deutscher Verkehrsunternehmen - VDV*. [Online] September 2015. [Zitat vom: 31. März 2016.] <https://www.vdv.de/statistik-2014.pdf?forced=true>.

Wiesinger, Johannes. 2016. Kraftfahrzeuge - Definition und Einteilung. *Kfztech.de - Kraftfahrzeugtechnik aus erster Hand*. [Online] 2016. [Zitat vom: 25. Februar 2016.] <http://www.kfztech.de/kfztechnik/kraftfahrzeuge.htm>.

Wikipedia. 2016a. Automobil. *Wikipedia - Die freie Enzyklopädie*. [Online] 2016a. [Zitat vom: 25. Februar 2016.] <https://de.wikipedia.org/wiki/Automobil>.

—. **2016b.** Berufsverkehr. *Wikipedia - Die freie Enzyklopädie*. [Online] 2016b. [Zitat vom: 23. März 2016.] <https://de.wikipedia.org/wiki/Berufsverkehr>.

- . **2016c.** Dieselkraftstoff. *Wikipedia – Die freie Enzyklopädie*. [Online] 2016c. [Zitat vom: 1. März 2016.] <https://de.wikipedia.org/wiki/Dieselmkraftstoff>.
- . **2016d.** Kraftverkehr. *Wikipedia - Die freie Enzyklopädie*. [Online] 2016d. [Zitat vom: 25. Februar 2016.] <https://de.wikipedia.org/wiki/Kraftverkehr>.
- . **2016e.** Motor. *Wikipedia – Die freie Enzyklopädie*. [Online] 2016e. [Zitat vom: 15. März 2016.] <https://de.wikipedia.org/wiki/Motor>.
- . **2016f.** Motorbenzin. *Wikipedia – Die freie Enzyklopädie*. [Online] 2016f. [Zitat vom: 1. März 2016.] <https://de.wikipedia.org/wiki/Motorenbenzin>.
- . **2016g.** Personenbeförderung. *Wikipedia - Die freie Enzyklopädie*. [Online] 2016g. [Zitat vom: 23. März 2016.] <https://de.wikipedia.org/wiki/Personenverkehr>.
- . **2016h.** Treibhauspotential. *Wikipedia – Die freie Enzyklopädie*. [Online] 2016h. [Zitat vom: 15. Januar 2016.] <https://de.wikipedia.org/wiki/Treibhauspotential>.
- . **2016i.** Verkehrsleistung. *Wikipedia - Die freie Enzyklopädie*. [Online] 2016i. [Zitat vom: 16. Februar 2016.] <https://de.wikipedia.org/wiki/Verkehrsleistung>.
- . **2016j.** Verkehrsmittel. *Wikipedia - Die freie Enzyklopädie*. [Online] 2016j. [Zitat vom: 15. März 2016.] <https://de.wikipedia.org/wiki/Verkehrsmittel>.
- . **2016k.** Verkehrszeiten. *Wikipedia - Die freie Enzyklopädie*. [Online] 2016k. [Zitat vom: 26. Februar 2016.] <https://de.wikipedia.org/wiki/Verkehrszeiten>.
- . **2016l.** Wirtschaftsverkehr. *Wikipedia - Die freie Enzyklopädie*. [Online] 2016l. [Zitat vom: 23. März 2016.] <https://de.wikipedia.org/wiki/Wirtschaftsverkehr>.
- Zadek, Hartmut. 2015.** *Anwendungen der Elektromobilität in Verkehr und Logistik*. Magdeburg : Otto-von-Guericke-Universität, 2015.

