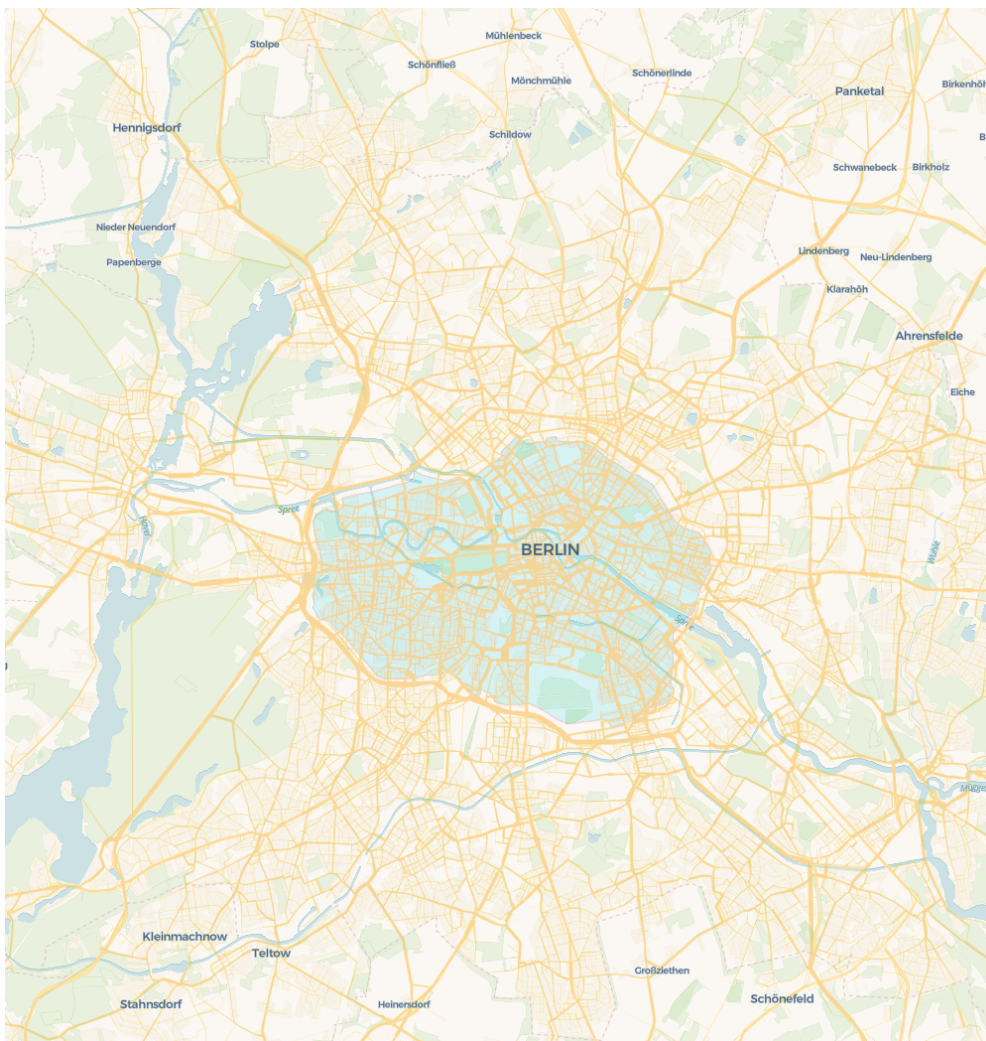




Wissenschaftliche Begleituntersuchung

Zero-Emissions-Zone (ZEZ) ab 2035 im Berliner S-Bahn-Ring

Endbericht

Berlin, 31. Dezember 2025



Impressum

Auftraggeber	Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) e. V.
Im Interesse von / Abstimmung	Berliner Klimaschutzrat
Auftragnehmer	Replan GmbH, Lohmühlenstr. 65, 12435 Berlin
Hauptautoren Methodik und wissenschaftliche Fundierung	Jaro Smirnov (Replan GmbH, Berlin; jaro@replan.city) Prof. Dr. Kai Nagel (Technische Universität Berlin; nagel@vsp.tu-berlin.de)
Mitwirkung Berechnungen, Datengrundlagen, Auswertung	Tina Rakic (Replan GmbH, Berlin; tina@replan.city) Ricardo Ewert (Technische Universität Berlin; ewert@vsp.tu-berlin.de)
Projektleitung und Arbeit am Bericht	Tim Volotskiy (Replan GmbH, Berlin; tim@replan.city)
Wissenschaftliche Begleitung Qualitätssicherung	Dr. Tilmann Schlenther Technische Universität Berlin tilmann.schlenther@gmail.com
Stand	Berlin, 31. Dezember 2025

Zitiervorschlag

Smirnov, J.; Nagel K.; Volotskiy, T.; Rakic, T.; Schlenther, T.; Ewert, R. (2026): *Wissenschaftliche Begleituntersuchung zur Einführung einer Zero-Emissions-Zone (ZEZ) im Berliner S-Bahn-Ring ab 2035. Endbericht*. Replan GmbH, Berlin.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	10
1.1. Hintergrund und Problemstellung	10
1.2. Zielsetzung und Aufgaben der Untersuchung	10
1.3. Aufbau des Berichts	11
2. Methodik	12
2.1. Gesamtansatz	12
2.2. Simulationen relaxierter Endzustände sowie für 2035	12
2.3. Modellierung der ZEZ	14
2.4. Ladeverhalten	15
2.5. Preisstand	15
2.6. Fahrzeugkosten	15
2.6.1. Privater Personenverkehr	16
2.6.1.1. Privater Personenverkehr fossil	16
2.6.1.2. Privater Personenverkehr elektrisch	16
2.6.2. Kommerzieller Verkehr	17
2.6.3. Kommerzieller PKW-Verkehr	18
2.6.3.1. Fossil	18
2.6.3.2. Elektrisch	18
2.6.4. Kommerzieller LKW-Verkehr	19
2.6.4.1. Fossil	19
2.6.4.2. Elektrisch	20
2.7. Diffusionskurve der Einführung elektrischer Fahrzeuge über die Zeit . .	20
2.7.1. Einleitung	20
2.7.2. Symbolverzeichnis	20
2.7.3. Logistisches Diffusionsmodell für elektrischen Fahrzeugen (E-FZe)	21
2.7.4. Abnehmende Diffusionskurve für Fahrzeuge mit Verbrennungs- motor	22
2.7.5. Gesamtzahl der Fahrzeuge	23
2.7.6. Superposition mehrerer Integrationskurven	24
2.7.7. Kalibrierung der Diffusionskurve und der Szenarien des Übergangs zur Elektromobilität	24
2.7.7.1. Mathematische Beschreibung der Kalibrierung der Dif- fusionskurve	25
2.7.7.2. Kalibrierungsdatensatz Berlin	26
2.8. Öffentlicher Personennahverkehr	26
3. Ergebnisse der Verkehrssimulation und der Diffusionskurven	27
3.1. Veränderungen im Modal Split	27
3.2. Technologieadaptation und Auswirkungen der ZEZ	28
3.2.1. Ausgangsdaten	28
3.2.2. Szenarien der Technologieentwicklung	28

3.2.3.	Schlussfolgerung zur Kalibrierung der Diffusionskurve	29
3.2.4.	Übergang von Neuzulassungen zur Gesamtzahl der zugelassenen Fahrzeuge	29
3.2.5.	Kalibrierung der Diffusionskurve für das Szenario ohne ZEZ . .	30
3.2.6.	Kalibrierung der Diffusionskurve für das Szenario mit ZEZ . . .	32
3.2.6.1.	Personen mit Wohnsitz innerhalb der ZEZ	32
3.2.6.2.	Personen mit Wohnsitz außerhalb der ZEZ	32
3.2.6.3.	Aggregierte Diffusionskurve (ZEZ-Szenario)	33
3.2.6.4.	Ausblick auf Treibhausgasneutralität 2045	34
3.3.	Prognose des Modal Split im Jahr 2035	34
3.4.	Kostensensitivität der E-Mobilität	36
4.	Arbeitspaket 1: Effekte auf CO₂-Emissionen im Verkehrsbereich	39
4.1.	Modellierung von Verkehrsemissionen in MATSim	39
4.1.1.	Allgemeines Konzept und Eingangsdaten	39
4.1.2.	Verwendung der Emissionsfaktoren aus HBEFA	39
4.1.3.	Ablauf der Emissionsberechnung	40
4.1.4.	Kalte und warme Emissionen	40
4.1.5.	Aggregation und Ausgabedaten	41
4.1.6.	Einschränkungen des Ansatzes	41
4.2.	Parameter des Fahrzeugbestands und der Straßeninfrastruktur für die Durchführung der Emissionssimulation	41
4.2.1.	Parametrisierung des Fahrzeugbestands	41
4.2.2.	Berücksichtigung der Straßeninfrastruktur und Verkehrszustände	42
4.2.3.	Berechnung und Aggregation der Emissionen	42
4.3.	Einordnung in bestehende Klimaschutzziele	43
4.4.	Ergebnisse der Emissionsanalyse	44
4.4.1.	Annahmen für die Analyse	44
4.4.2.	Berechnung der Anpassungsfaktoren und Skalierung der Model- lierungsergebnisse	45
4.4.3.	PKW für den privaten Verkehr im relaxierten Zustand (<i>EVrelaxiert</i> und <i>EV&ZEZrelaxiert</i>)	48
4.4.4.	Ergebnisse für private PKW im Jahr 2035 (<i>EV&ZEZ'35</i> und <i>EV'35</i>)	48
4.4.5.	Kommerzieller PKW-Verkehr im relaxierten Zustand	49
4.4.6.	Ergebnisse für kommerzieller PKW im Jahr 2035	49
4.4.7.	LKW-Verkehr im relaxierten Zustand	50
4.4.8.	Ergebnisse für Lastkraftwagen (LKW)-Verkehre im Jahr 2035 .	50
4.4.9.	Gesamtergebnis	51
4.5.	Dashboards	51
5.	Arbeitspaket 2: Enforcementregeln und Umsetzungsmechanismen	52
5.1.	Einordnung und Grundannahme zum Vollzug	52
5.2.	Vollzugsoptionen im Überblick	52
5.3.	Option A: Sichtkontrolle/Plakette und stichprobenartige Kontrollen .	52

5.4.	Option B: ANPR-/kamerabasierte Erfassung als hochautomatisierte Vollzugsarchitektur	54
5.4.1.	Mögliche Architektur des ZEZ-Durchsetzungssystems	54
5.4.1.1.	Architekturübersicht	54
5.4.1.2.	Detektion	55
5.4.1.3.	Kommunikations- und Betriebsinfrastruktur	55
5.4.2.	ANPR Back-Office	55
5.4.2.1.	Datenaufnahme und Speicherung	57
5.4.2.2.	Qualitätssicherung und manuelle Prüfung	57
5.4.2.3.	Compliance Engine	57
5.4.2.4.	Verstoßmanagement und Beweisführung	57
5.4.2.5.	Notice Processing System (NPS)	57
5.4.2.6.	Reporting, Audit und Datenschutz	57
5.4.2.7.	End-to-End-Datenfluss	58
5.5.	Analyse der rechtlichen Grundlagen	58
5.6.	Abschätzung des Verwaltungsaufwands	58
6.	Arbeitspaket 3: Kostenabschätzung der Maßnahme	60
6.1.	Gesamtwirtschaftliche Perspektive	60
6.2.	Zusammenfassung des Vorgehens	60
6.2.1.	Gewinne/Verluste der Nutzenden	60
6.2.2.	Veränderte Gewinne von (produzierenden) Firmen	60
6.2.3.	Veränderte Gewinne/Verluste staatlicher Akteure	61
6.2.4.	Externalitäten	61
6.2.5.	Zusammenfassung der Resultate	61
6.2.6.	Bezugsfall und Planfall	61
6.3.	Gewinne/Verluste im privaten Verkehr	62
6.4.	Gewinne/Verluste im kommerziellen Verkehr	63
6.4.1.	Vorgehen	63
6.4.2.	Vergleich der Ergebnisse	64
6.5.	Gewinne/Verluste von (produzierenden) Firmen	65
6.6.	Gewinne/Verluste des Staates	66
6.6.1.	Gewinne durch das Deutschlandticket	66
6.6.2.	Verluste durch entfallendes Steueraufkommen aus Benzin und Diesel	66
6.7.	Abschätzung von Investitions- und Betriebskosten einer ZEZ	67
6.7.1.	Überblick	67
6.7.2.	Genauere Überlegungen bzgl. eines Systems mit Sichtkontrolle	69
6.7.2.1.	Einführungskosten	69
6.7.2.2.	Operative Kosten	70
6.8.	Stoffliche Emissionen	70
6.8.1.	Kostensätze	70
6.8.2.	Gewinne durch CO ₂ -Reduzierung	71
6.8.3.	Gewinne durch NO _x -Reduzierung	71
6.8.4.	Weitere stoffliche Emissionen	71
6.9.	Gewinne durch Lärm-Reduzierung	72
6.9.1.	Lärmemissionen	72
6.9.2.	Lärmausbreitung	73

6.9.3. Bevölkerungsexposition	73
6.9.4. Monetarisierung der Lärmschäden	73
6.9.5. Ergebnisse	73
6.10. Reduktion von Verkehrsunfällen	74
6.11. Ökonomische Gesamtbetrachtung	74
6.12. Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen aus der Nutzen-Kosten-Analyse (NKA)	76
6.13. Sensitivität gegenüber dem CO ₂ -Kostensatz	76
7. Arbeitspaket 4: Belastungen für unterschiedliche Zielgruppen	77
7.1. Privater Verkehr	77
7.1.1. Differenzierung nach Einkommen	77
7.1.2. Differenzierung nach Mobilitätsverhalten	77
7.1.3. Instrumente zur sozialen Abfederung	78
7.2. Kommerzieller Verkehr	78
8. Arbeitspaket 5: Gestaltung und Wirkungsabschätzung von Ausnahmeregeln	80
8.1. Bewertung möglicher Ausnahmeregelungen	80
8.1.1. Handwerksbetriebe	80
8.1.2. Menschen mit Mobilitätseinschränkungen	80
8.1.3. Einsatzfahrzeuge	81
8.2. Abschätzung der Wirkungskosten	81
8.2.1. Abschätzung der Minderung der Wirksamkeit der ZEZ	81
8.2.2. Abschätzung des Missbrauchspotenzials	82
8.3. Entwicklung von Ausnahmekategorien	82
8.3.1. Handwerksbetriebe und gewerbliche Nutzung	82
8.3.2. Einsatzfahrzeuge und kritische Dienste	82
8.3.3. Menschen mit Mobilitätseinschränkungen	82
8.3.4. Zusammenfassende Bewertung	83
A. Anhang	84
A.1. Tabelle: Neuzulassungen in Berlin (Auswahl 2019–2025)	84
A.2. Neuzulassungen in Norwegen	85
A.3. Anhang: Sensitivität zum CO ₂ -Kostensatz (UBA Methodenkonvention 3.2)	86
A.3.1. Sensitivität: CO ₂ -Kostensatz nach UBA (1% Zeitpräferenzrate)	87
A.3.2. Sensitivität: mittlere CO ₂ -Kostenannahme (Mittelwert zwischen 0% und 1% PRTP)	88
A.4. Preise der kommerziellen Fahrzeuge mit Preisstand 2022	89
B. Executive Summary	96
B.1. Kostengetriebener Antriebswechsel vs. Wirkung einer ZEZ	96
B.2. CO ₂ Einsparungen	97
B.2.1. Beitrag der ZEZ zu den klimapolitischen Zielen Berlins	97
B.3. Ökonomische Bewertung	98
B.3.1. Nutzen-Kosten-Analyse	98
B.3.2. Verluste und mögliche Kompensationen	99

B.4. Kurze Zusammenfassung	99
--------------------------------------	----

Akronyme

ANPR Automatic Number Plate Recognition. 55, 56, 57, 68

ASC alternativen-spezifische Konstante. 15, 16

BVWP Bundesverkehrswegeplan. 15, 16, 17, 18, 66, 75

EV elektrisches Fahrzeug. 4, 12, 13, 14, 15, 20, 21, 22, 27, 36, 61, 63, 64, 79, 96

GV Güterverkehr. 63, 78, 79

HBEFA Handbook Emission Factors for Road Transport. 39, 40, 41, 42

LEZ Low-Emission-Zone. 68, 80, 81, 82

LKW Lastkraftwagen. 5, 13, 14, 15, 16, 17, 19, 20, 27, 50, 51, 63

LOR lebensweltlich orientierter Raum. 14

MATSim Multi-Agent Transport Simulation. 12, 15, 28, 29, 32, 39, 40, 41, 42, 60, 62

MIV motorisierter Individualverkehr. 13, 28, 35, 36, 38

NKA Nutzen-Kosten-Analyse. 60, 62, 63

NKV Nutzen-Kosten-Verhältnis. 75

NPS Notice Processing System. 55, 56

PKW Personenkraftwagen. 13, 14, 16, 17, 18, 19, 27, 28, 30, 31, 32, 36, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 63, 65

PWV Personenwirtschaftsverkehr. 63, 78, 79

PWV-S serviceorientierter Personenwirtschaftsverkehr. 78, 79

UBA Umweltbundesamt. 70

ULEZ Ultra-Low-Emission-Zone. 68, 80, 81

ZEZ Zero-Emissions-Zone. 10, 12, 13, 14, 15, 17, 27, 28, 29, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 61, 62, 63, 64, 65, 67, 69, 71, 74, 76, 77, 78, 79, 80, 82, 83

1. Einleitung

1.1. Hintergrund und Problemstellung

Der Verkehrssektor ist zentral für die Erreichung der Berliner Klimaziele für 2030 und 2045.¹ Gleichzeitig zeigen empirische Zeitreihen für Deutschland, dass die Treibhausgasemissionen des Verkehrs im Vergleich zu 1990 nur begrenzt gesunken sind.² Vor diesem Hintergrund untersucht der vorliegende Bericht, ob und in welchem Umfang eine zusätzliche landespolitische Maßnahme (Zero-Emissions-Zone (ZEZ)) gegenüber einem Referenzpfad ohne (ZEZ) einen messbaren Zusatzbeitrag zur Zielerreichung leisten kann.

Die Einführung einer Zero-Emission-Zone (ZEZ) innerhalb des Berliner S-Bahn-Rings ab 2035 wird dabei als eine potenzielle Maßnahme betrachtet, um verkehrsbedingte Emissionen zu reduzieren und zugleich weitere verkehrs- und gesundheitspolitische Ziele zu unterstützen (z. B. Reduktion fossiler Fahrten, geringere Luftschadstoffbelastung, höhere Verkehrssicherheit).

1.2. Zielsetzung und Aufgaben der Untersuchung

Gegenstand der wissenschaftlichen Begleituntersuchung ist die Analyse der Auswirkungen, Rahmenbedingungen und Folgekosten der Einführung einer ZEZ im Bereich des Berliner S-Bahn-Rings ab 2035. Ziel ist eine belastbare Entscheidungsgrundlage für Politik, Verwaltung und Öffentlichkeit, die klima-, gesundheits- und sozialpolitische Gesichtspunkte berücksichtigt.

Hierzu werden insbesondere

1. die verkehrsbedingten Emissionswirkungen der ZEZ im Vergleich zu einem Referenzszenario ohne ZEZ quantifiziert und räumlich differenziert (ZEZ-Gebiet, übriges Berliner Stadtgebiet, Umland),
2. potenzielle Umsetzungs- und Vollzugsmechanismen einschließlich organisatorischer und administrativer Implikationen diskutiert,
3. Kosten- und Verteilungswirkungen einschließlich möglicher Ausnahmeregelungen systematisch betrachtet.

Zur Bearbeitung dieser Aufgaben werden ein agentenbasierter Simulationsansatz, eine modellbasierte Abbildung der Elektrifizierungsdynamik über Diffusionskurven sowie eine Kosten- und Wirkungsanalyse genutzt.

¹Vgl. Berliner Klimaschutzziele im Klimaschutz- und Energiewendegesetz Berlin (EwG Bln) sowie die Einordnung im Berliner Energie- und Klimaschutzprogramm (BEK 2030): <https://gesetz.e.berlin.de/bsbe/document/jlr-EWendGBEV2IVZ> und <https://www.berlin.de/sen/uvk/klimaschutz/klimaschutz-in-der-umsetzung/bek-2030-umsetzung-2022-bis-2026/>.

²Umweltbundesamt (UBA): Überblick zur Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Deutschland (inkl. sektoraler Einordnung und Zeitreihenbezug seit 1990): <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland>.

1.3. Aufbau des Berichts

Der Bericht ist entlang des methodischen Vorgehens sowie der Arbeitspakete strukturiert:

- Kapitel 2 (Methodik) beschreibt den Gesamtansatz, die zugrunde gelegten Szenarien sowie die Ableitung zeitlicher Zwischenzustände aus den simulierten Endzuständen. Dazu gehören die Definition der Modellannahmen, die Einordnung der betrachteten Wirkungsbereiche sowie die Verknüpfung von Simulationsergebnissen mit Diffusions- und Skalierungslogik für den Zeithorizont bis 2035 und darüber hinaus.
- Kapitel 3 (Ergebnisse der Verkehrssimulation) dokumentiert zunächst die langfristigen Systemreaktionen in den Endzuständen, insbesondere (i) die Veränderungen im Modal Split (Abschnitt 3.1) und (ii) die Technologieadaptation im Pkw-/Lkw-Verkehr sowie deren Einbettung in Diffusionskurven (Abschnitt 3.2). Der Abschnitt zur Kalibrierung der Diffusionskurven trennt explizit zwischen Szenario ohne ZEZ, Szenario mit ZEZ sowie einer aggregierten Diffusionskurve für das ZEZ-Szenario, um konsistente Zwischenzustände und Vergleiche zu ermöglichen.
- Kapitel 4 (Analyse der Auswirkungen auf Nutzen und Kosten; Arbeitspaket 1) bewertet die Wirkungen ökonomisch und wohlfahrtstheoretisch. Enthalten sind u. a. die methodische Vorgehensweise der Nutzen-Kosten-Bilanz, die Behandlung von Wohlfahrtswirkungen und Verteilungsaspekten sowie die Quantifizierung zentraler Nutzenkomponenten (z. B. Klima- und Luftqualitätswirkungen, Unfälle und Lärm) auf Basis der in Kapitel 3 abgeleiteten Verkehrs- und Emissionsänderungen.
- Kapitel 5 (Vollzug, Ausnahmen und Verwaltungsaufwand; Arbeitspaket 2) beschreibt die Vollzugslogik als Baseline (Sichtkontrolle/Plakette plus stichprobenartige Kontrollen) und als Ausbauoption (ANPR/kamerabasierte Erfassung), inklusive der jeweils notwendigen Daten- und Back-Office-Prozesse. Darauf aufbauend wird der Verwaltungsaufwand schwerpunktmäßig über die Ausgestaltung und Abwicklung von Ausnahmen hergeleitet.
- Kapitel 6 (Umsetzungskosten; Arbeitspaket 3) stellt die Kosten der Einführung und des Betriebs der ZEZ dar (u. a. IT-/Registerprozesse, Beschilderung/Kommunikation, Kontrolle und Back-Office), konsistent zu den in Kapitel 5 beschriebenen Vollzugsvarianten.
- Kapitel 7 (Verteilung, Betroffenheiten und Flankierung; Arbeitspaket 4) behandelt die Verteilungswirkungen, die Identifikation besonders betroffener Gruppen sowie mögliche Flankierungs- und Ausnahmeregelungen zur Zielerreichung bei gleichzeitiger sozialer und wirtschaftlicher Abwägung.
- Kapitel 8 (Schlussfolgerungen und Empfehlungen; Arbeitspaket 5) fasst die Ergebnisse zusammen, leitet Schlussfolgerungen für die Ausgestaltung (inkl. Vollzugspfad und Ausnahmen) ab und diskutiert die Übertragbarkeit zentraler Befunde.

2. Methodik

2.1. Gesamtansatz

Im Projekt *ZEZ* wird ein modellbasierter Simulationsansatz zur Abbildung der Transformation des Verkehrssystems hin zu einem emissionsfreien Zielzustand angewendet. Der methodische Ausgangspunkt ist die Definition und Simulation eines Endzustands, der einen vollständig implementierten Zielrahmen repräsentiert.

Ein Endzustand beschreibt hierbei die vollständige Anpassung der Verkehrsnachfrage an geänderte Rahmenbedingungen. Im konkreten vorliegenden Fall handelt es sich bei den Änderungen der Rahmenbedingung um die Reaktion auf andere Preise (höhere Kaufpreise, niedrigere km-Preise) von E-FZe sowie um die Einführung einer ZEZ in der Innenstadt Berlins. Die Simulationen bilden folgende Endzustände ab:

1. Die Anpassung der Verkehrsnachfrage an die Einführung von EV mit von fossilen Fahrzeugen abweichenden Preisen.¹
2. Die Anpassung der Verkehrsnachfrage an die Einführung von EV (siehe oben) *und* einer ZEZ in der Innenstadt Berlins.

Da die Simulation den Endzustand abbildet, nimmt sie bezüglich der ZEZ eine Befolgungrate von 100% an.

Auf Grundlage dieser Endzustände wird eine zeitliche Diffusionsfunktion hergeleitet, welche den Übergang vom Ausgangszustand zum Zielzustand beschreibt. Diese Diffusionsfunktion dient der Ableitung zeitdiskreter Zwischenzustände (Transienten), die konsistente Entwicklungsstufen innerhalb des Transformationspfads darstellen. Die Zwischenzustände werden parametrisch aus dem Endzustand abgeleitet und nicht unabhängig modelliert.

Der gewählte Ansatz ermöglicht eine konsistente Kopplung von Zielzustand und Transformationspfad sowie die systematische Analyse zeitlicher Entwicklungseffekte. Die Simulation des Endzustands definiert dabei die strukturellen Systemparameter, während die Diffusionsfunktion die zeitliche Skalierung der Systemausprägungen steuert.

Die einzelnen methodischen Komponenten des Ansatzes werden in den folgenden Unterabschnitten beschrieben.

2.2. Simulationen relaxierter Endzustände sowie für 2035

Für die Simulation wird das open-source Framework Multi-Agent Transport Simulation (MATSim)² (Horni et al., 2016) benutzt. MATSim wird seit über 20 Jahren u.a. von der Technischen Universität Berlin kontinuierlich weiterentwickelt und gewartet. In MATSim wird die Verkehrsnachfrage in Form individueller Agenten abgebildet und jeder Zeitschritt des gesamten Tages simuliert. Solche Agenten, die die

¹siehe hierzu Abschnitt 2.5

²siehe <https://www.matsim.org>

Personenverkehrsnachfrage darstellen, verfolgen dabei einen aktivitätenbasierten Tagesplan. Das Simulationsframework integriert einen ko-evolutionären Lernalgorithmus zur Abbildung menschlichen Verhaltens mit einem physikalischen Modell des Verkehrsgeschehens unter Berücksichtigung dynamischer Daten. Zudem lässt sich die Modellierung flexibel und modular um weitere Dateninputs oder Prognoseoutputs erweitern. Typische Anwendungen sind die Berechnung von Emissionen oder Lärm (Kaddoura et al., 2017), Erreichbarkeiten und Wirkungen neuer Mobilitätsdienstleistungen (Ziemke et al., 2017) oder die Modellierung der Möglichkeiten vollständig CO₂-freien Verkehrs (Göhlich et al., 2021) und deren Diskussionen im Rahmen von partizipativen Planungsprozessen (Kreuschner et al., 2024).

Es besteht ein MATSim-Verkehrsmodell der Metropolregion Berlin, welches für wissenschaftliche Zwecke frei zugänglich ist³ (Rakow et al., 2024). Dieses Modell wird in der Version v6.4 als Basis der Simulationsarbeiten genommen. Diese Version stellt den Zustand des Verkehrssystems im Jahr 2023 dar; abweichend davon wird für den öffentlichen Verkehr ein Zustand 2024 verwendet, weil die uns verfügbaren Daten für 2023 zu viele Baustellen enthielten.

In dem Modell stehen Reisenden im **privaten Personenverkehr** die folgenden Verkehrsmittel zur Verfügung:

- **car:** Personenkraftwagen (PKW)-Fahrt als Fahrer (car)
- **ride:** PKW-Fahrt als Mitfahrer (ride)
- **pt:** Öffentlicher Personenverkehr, wie Bus, Bahn, Tram, Fähre
- **bike:** Fahrrad

In den Ergebnissen werden Wege, die als PKW-Fahrer (car) und als -Mitfahrer (ride) zurückgelegt werden, im Sinne der Darstellung des motorisierter Individualverkehr (MIV) zusammengefasst.

Der **kommerzielle Personen- und Güterverkehr** ist nach Lu et al. (2022); Ewert & Nagel (2024) auf die entsprechenden Verkehrsmittel und Fahrzeugtypen (z.B. pt, Fahrten mit LKW, Transporter, PKW, etc.) aufgeteilt, wobei alle Fahrzeugtypen zunächst fossil abgebildet sind.

Der erläuterte Zustand des Verkehrssystems wird als Basisfall definiert. Hierbei ist zu beachten, dass im Basis-Modell alle Fahrzeuge mit fossilen Fahrzeugtypen abgebildet sind. Abschnitt 2.7 erklärt die Methodik zur Bestimmung der Durchdringungsrate von E-FZe im Zeitverlauf ohne Einführung einer ZEZ.

Einschließlich des Basisfalls werden die folgenden **Simulationsszenarien** definiert:

- **Baseline:** Referenzszenario für das Projektionsjahr 2023. Es werden keine zusätzlichen Maßnahmen eingeführt.
- **EVrelaxiert:** Projektion ohne Einführung einer ZEZ. Den Agenten steht im Rahmen der Verkehrsmittelwahl die Nutzung von Elektrofahrzeugen zur Verfügung, ohne dass ein Zwang zur Nutzung von EVs besteht.
- **EV&ZEZrelaxiert:** Projektion mit Einführung einer ZEZ innerhalb des Berliner S-Bahn-Rings. Die räumliche Ausdehnung der ZEZ ist in Abbildung 2.1 dargestellt.

Den Agenten steht im Rahmen der Verkehrsmittelwahl zusätzlich die Möglichkeit zur Nutzung von Elektrofahrzeugen (EV) zu den angenommenen Preisen⁴ zur

³siehe <https://github.com/matsim-scenarios/matsim-berlin>

⁴siehe Abschnitt 2.5

Verfügung, ohne dass ein Zwang zur Nutzung von EVs besteht. Der Fahrzeugtyp entspricht dabei dem ursprünglich gewählten Fahrzeugtyp in einer elektrischen Variante (z.B. E-PKW für PKW, E-LKW für LKW, etc.).

- **EV'35:** Die Projektion für das Jahr 2035 von *EVrelaxiert* basierend auf einer Diffusionskurve. Die Diffusionskurve wird später erklärt.
- **EV&ZEZ'35:** Die Projektion für das Jahr 2035 von *EV&ZEZrelaxiert* basierend auf einer Diffusionskurve. Die Diffusionskurve wird später erklärt.

2.3. Modellierung der ZEZ

Für die Modellierung der ZEZ wird in der Simulation ganztägig die Ein-, Durch- und Ausfahrt mit Fahrzeugen mit (fossilen) Verbrennermotoren auf allen Straßenabschnitten verboten, die innerhalb der in Abbildung 2.1 liegen. Der Betrieb von E-FZe aller Fahrzeugklassen bleibt dort erlaubt, genauso wie außerhalb der ZEZ.

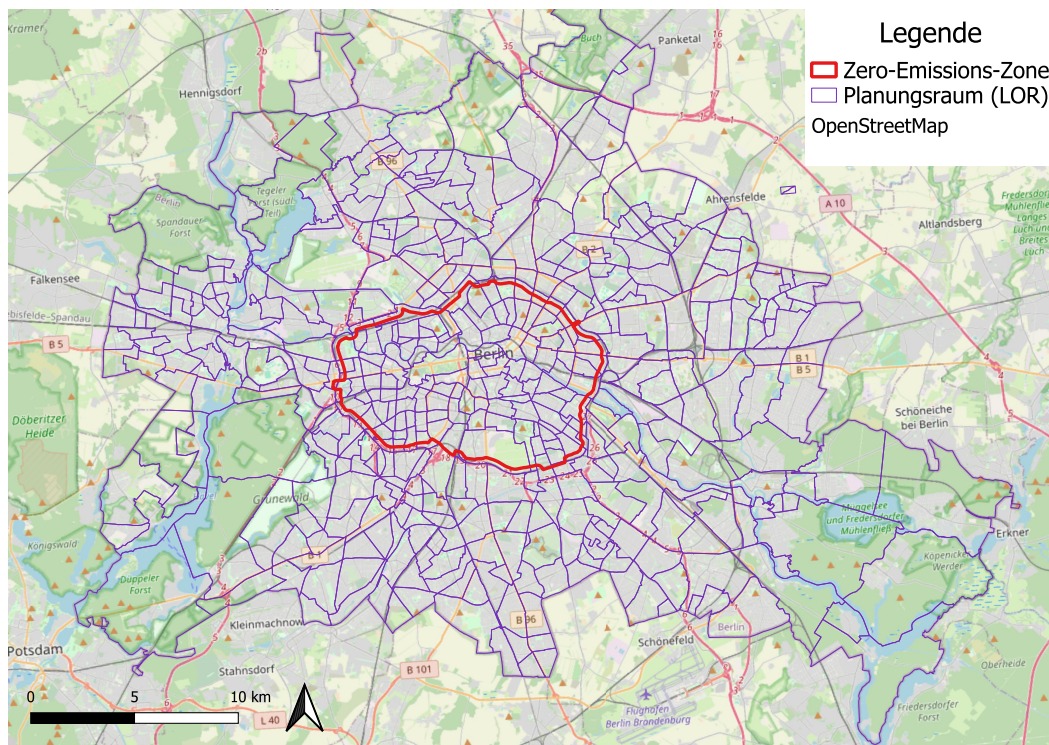


Abbildung 2.1.: Räumliche Ausdehnung der ZEZ (rot). Hierfür diente das System der lebensweltlich orientierte Räume (LORs) (lila) als Grundlage (Amt für Statistik Berlin-Brandenburg, 2025). Es wurde der Bereich des Berliner S-Bahn-Rings mit einem Versatz von 500 Metern stadteinwärts gewählt.

Neben dem Umstieg auf ein EV oder auf andere Verkehrsmittel für die gesamte betroffene Wegekette steht es den Agenten per Routenwahl im Verhaltensmodell frei, Wege innerhalb der ZEZ zu Fuß zurückzulegen. Dies bedeutet, dass sie bis an den Rand der ZEZ mit dem fossilen Fahrzeug fahren, es dort parken und dann verbleibende Wegeanteile innerhalb der ZEZ zu Fuß (aber nicht mit anderen Verkehrsmitteln) zurücklegen können.

2.4. Ladeverhalten

Als nicht-fossilen Fahrzeugtyp nehmen wir E-FZe an. Wir gehen davon aus, dass diese kein Laden während der Durchführung von Wegen erfordern. Heutzutage sind die Kapazitäten der Batterien mehr als ausreichend, um städtische Tagestouren im privaten Personenverkehr zu ermöglichen, ohne nachladen zu müssen. Studien zeigen, dass auch für kommerzielle (Schwerlast-) Verkehre Batteriegrößen bereits in den jüngsten Jahren ausreichend waren, um mehr als 90% der mittleren und kurzen Tagestouren *ohne Neuplanung der Routen* zurücklegen zu können (Speth & Plötz, 2024; Ewert et al., 2025a) - vorausgesetzt die Fahrzeuge können über Nacht am Depot vollgeladen werden. Ewert et al. (2025b) konnten selbst 100% der Touren für Müllentsorgung im ländlichen Raum der Vulkaneifel vollelektrisch abbilden.

Die obige Annahme bedeutet, dass wir davon ausgehen, dass Privatpersonen während Aktivitäten im Tages- und Nachtverlauf ihr Fahrzeug laden können; an einer Ladestation, die sich örtlich nahe der jeweiligen Aktivität befindet. Dementsprechend gehen wir für kommerzielle Verkehre von Depotladung während der Nacht aus. Die Touren der kommerziellen Verkehre werden entsprechend den Reichweiten der jeweilig gewählten Fahrzeugtypen geplant bzw. bei Einführung der ZEZ angepasst.

2.5. Preisstand

Die Studie verwendet Preise von 2022. Kostenparameter früherer oder späterer Jahre werden auf 2022 umgerechnet.

Auch Simulationsläufe, die sich auf die Zukunft beziehen, verwenden den Preisstand von 2022. Dies ist üblich, und zulässig, solange sich die *relativen* Preise nicht zu stark verändern. Z.B. gehen wir in dieser Studie davon aus, dass sich das Verhältnis zwischen Einkommen und Fahrzeugkosten nicht ändert. Ausnahmen werden explizit benannt; insbesondere gehen wir bei elektrischen LKWs von (im Verhältnis zum Preisniveau) zukünftig niedrigeren Preisen aus.

2.6. Fahrzeugkosten

Generell arbeitet MATSim bei Fahrzeugen mit Kosten, die pro Tag anfallen, und Kosten, welche pro Kilometer anfallen. Die täglichen Kosten modellieren die Fixkosten des Fahrzeugbesitzes. Dafür werden jährliche Kosten durch die Anzahl der Nutzungstage pro Jahr dividiert.

Offenbar impliziert dies, dass die Simulation davon ausgeht, dass die mögliche Nutzung am Stichtag über den Fahrzeugbesitz entscheidet. Das stimmt dann nicht mehr, wenn das Fahrzeug auch außerhalb der "Nutzungstage" einen Nutzen stiftet, oder vielleicht sogar hauptsächlich dadurch begründet wird. Als Resultat würde das Modell im Prinzip zunächst den Fahrzeugbesitz unterschätzen. Allerdings wird die Simulation gegen den realen Modal Split (in Bezug auf Wege) kalibriert, so dass aufgrund des obigen Arguments evtl. falsch angesetzte "Fixkosten am Stichtag" durch entsprechende alternativen-spezifische Konstanten (ASCs) kompensiert werden.

Generell richten wir uns bzgl. Fahrzeugkosten nach dem Verfahren vom Bundesverkehrswegeplan (BVWP) (Rieken et al., 2015), wobei wir die Kosten auf den Preisstand 2022 umrechnen. Wo dies notwendig ist – insbesondere im Hinblick auf elektrische

LKWs – verwenden wir neuere Erkenntnisse.

2.6.1. Privater Personenverkehr

2.6.1.1. Privater Personenverkehr fossil

Für den privaten Personenverkehr verwenden wir 5 €/Tag sowie 0,149 €/km. In beiden Fällen liegt das niedriger als die dem BVWP-Verfahren entsprechenden Werte (= “wahre” Kosten). Modell-Läufe mit den wahren Kosten führten zu deutlich zu niedrigen PKW-Anteilen, welche nur durch sehr unplausible Kalibrierungen bei anderen Verkehrsmitteln kompensiert werden konnten; wir verwenden daher beim privaten Personenverkehr “wahrgenommene” (perceived) statt wahre Kosten. Die beiden Werte ergeben sich wie folgt:

- 0,1490 €/km sind die (fossilen) Energiekosten – alle weiteren entfernungsabhängigen Kosten werden damit als nicht wahrgenommen angenommen.
- Die 5 €/Tag sind die höchstmöglichen täglichen Kosten, die immer noch nicht zu einer $ASC > 0$ führen (oder nur knapp).

2.6.1.2. Privater Personenverkehr elektrisch

Im privaten Personenverkehr berechnen wir die Kosten elektrischer Fahrzeuge wie folgt:

- Die täglichen Fixkosten werden mit 1,1 multipliziert; dies ergibt 5,5 €/Tag.
- Die variablen Kosten werden mit 0,8 multipliziert; dies ergibt 0,1192 €/km.

Dies beruht auf einem Vergleich realer Marktpreise für Fahrzeughaltung sowie offizieller Herstellerangaben zum Energieverbrauch.

Als Referenz für die monatlichen Fixkosten wird der Langzeitmietservice *FINN* herangezogen⁵. Für ein elektrisches Fahrzeug der Mittelklasse (Škoda Enyaq 85) liegen die monatlichen Kosten bei etwa 448 € für eine Fahrleistung von 1000 km, was täglichen Fixkosten von rund 14,9 €/Tag entspricht. Im Vergleich dazu betragen die Kosten für ein konventionelles Fahrzeug (Škoda Octavia Kombi 2.0) etwa 388 €/Monat bzw. 12,9 €/Tag.

Daraus ergibt sich ein Verhältnis der täglichen Fixkosten zwischen Elektrofahrzeugen und konventionellen Fahrzeugen von etwa 1,15, was bedeutet, dass Elektrofahrzeuge derzeit mit höheren Kosten der täglichen Fahrzeughaltung verbunden sind.

Unter Berücksichtigung des fortschreitenden wissenschaftlich-technischen Fortschritts, insbesondere von Skaleneffekten in der Batteriefertigung, sinkenden Kosten für elektrische Antriebssysteme sowie eines zunehmenden Wettbewerbs auf dem Markt für Elektrofahrzeuge, ist mittelfristig von einer weiteren Reduktion der Kosten elektrischer Fahrzeuge auszugehen.

Vor diesem Hintergrund wird in der vorliegenden Arbeit ein konservativ angepasster Koeffizient von 1,1 für die täglichen Fixkosten von Elektrofahrzeugen gegenüber konventionellen Fahrzeugen angenommen. Dieser Wert bildet einen plausiblen Mittelweg zwischen aktuellen Marktbeobachtungen und erwarteten zukünftigen Kostensenkungen und wird für die weitere Modellierung des privaten elektrischen Personenverkehrs verwendet.

⁵Die Preise für die Fahrzeughaltung basieren auf Angeboten des Langzeitmietservices <https://www.finn.com>.

Die variablen Kosten werden, für den privaten Verkehr, ausschließlich auf Basis der reinen Energiekosten berechnet.

Für ein konventionelles Fahrzeug (Škoda Octavia Kombi 2.0) wird ein durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch von 6 l/100 km angenommen (SkodaOctaviaWLTP). Bei einem angenommenen Kraftstoffpreis von 1,80 €/l ergeben sich damit reine Energiekosten von:

$$6 \cdot 1,80/100 = 0,11 \text{ €/km.}$$

Für das elektrische Fahrzeug (Škoda Enyaq 85) wird ein durchschnittlicher Stromverbrauch von 15 kWh/100 km gemäß WLTP-Angaben des Herstellers angenommen (SkodaEnyaqWLTP). Unter der Annahme eines realistischen Strompreises von 0,60 €/kWh (50 % Laden zu Hause, 50 % öffentliche Ladeinfrastruktur) ergeben sich reine Energiekosten von:

$$15 \cdot 0,60/100 = 0,09 \text{ €/km.}$$

Das Verhältnis der reinen variablen Energiekosten zwischen Elektrofahrzeugen und konventionellen Fahrzeugen ergibt sich somit zu:

$$\frac{0,09}{0,11} \approx 0,8.$$

Dieser Wert wird in der weiteren Modellierung des privaten Personenverkehrs als Verhältnisfaktor für die variablen Kosten verwendet.

Als *Sensitivitätsstudie* untersuchen wir zudem die Multiplikation der variablen Energiekosten mit einem Faktor von 0,95. In diesem Fall sind die Kostenunterschiede zwischen fossilen und nicht-fossilen PKWs dementsprechend geringer. Durch den geringeren Kostendruck steigen im Modell weniger Privatpersonen freiwillig auf eine elektrische Alternative um und die Wirkung einer ZEZ verstärkt sich.

2.6.2. Kommerzieller Verkehr

Basierend auf der Methodik der Erzeugung des kleinräumigen Wirtschaftsverkehrs (vgl. Ewert & Nagel, 2024) verwendet der kommerzielle Verkehr verschiedene Fahrzeugtypen. Drei Fahrzeugtypen werden dem PKW (< 3,5 t) zugeordnet, drei Fahrzeugtypen dem LKW (> 3,5 t). Die Berechnung der Kostenparameter ausgehend von den Anschaffungskosten entstammt dem BVWP (Rieken et al., 2015); für die Anschaffungskosten selber hingegen verwenden wir teilweise neuere Werte. Als Basis für die Berechnung der verbrauchabhängigen Kostenkomponente dienen für den Basisfall die Preise für Diesel von 1,55 €/l und für Strom von 0,18 €/kWh (Gnann et al., 2024).⁶ Die Kostensätze der jeweiligen Fahrzeuge sind in den entsprechenden Abschnitten dargestellt.

Bei den PKWs gibt es offenbar einen Überlapp zwischen dem privaten und dem kommerziellen Personenverkehr. Während im privaten Personenverkehr allerdings “wahrgenommene” Kosten in Anrechnung gebracht werden, werden im kommerziellen Verkehr die vollständigen Kosten berücksichtigt. Wichtige Aspekte sind:

⁶Wir verwenden hier die gleichen Preise wie Ewert et al. (2025a). Gnann et al. (2024) geben Preise an, welche sich zwischen 2020 und 2050 verändern. Während der (gewerbliche) Strompreis über die gesamte Zeit in etwa bei den obigen 0,18 €/kWh verweilt, verdoppelt sich der Preis für fossile Brennstoffe in der gleichen Periode. Der von Ewert et al. (2025a) und damit von uns gewählte Preis liegt eher am Anfang dieser Periode und daher am niedrigen Ende.

- Die Kaufkosten (“Listenpreis ohne Reifen”) werden im BVWP-Verfahren nur zur Hälfte über die Lebensdauer abgeschrieben, die andere Hälfte über die Fahrleistung; diese zweite Hälfte der Kosten wird also Teil der variablen Kosten.
- Es gibt relativ hohe “Fahrzeug-Verwaltungskosten”. Diese fallen jährlich, pro Fahrzeug und unabhängig von Fahrzeugtyp an. Sie wirken daher wie Fixkosten, und sind in der Höhe mit den Kosten der Abschreibung vergleichbar.

2.6.3. Kommerzieller PKW-Verkehr

Die spezifischen Fahrzeuge der drei PKW-Kategorien inklusive der Anschaffungskosten und der dazugehörigen Berechnung der für die Simulation benötigten Kostenparameter verwendet die Werte und die Berechnungsmethode des BVWP (Rieken et al., 2015). Anschließend werden die Werte vom Preisniveau 2012 des BVWP auf das Preisniveau 2022 der vorliegenden Studie angehoben; dafür wird der Verbraucherpreisindex des Statistischen Bundesamtes⁷ verwendet.

2.6.3.1. Fossil

- **Fahrzeug der Kategorie Kleinwagen (Golf)**
 - Tägliche Fixkosten [€]: 37,34
 - Distanzabhängige Kosten [€/km]: 0,275
 - Zeitabhängige Kosten [€/h]: 21,20
- **Fahrzeug der Kategorie ”Mittelgroß”(Caddy)**
 - Tägliche Fixkosten [€]: 39,00
 - Distanzabhängige Kosten [€/km]: 0,281
 - Zeitabhängige Kosten [€/h]: 21,20
- **Fahrzeug der Kategorie Lieferwagen/Transporter (Mercedes 313)**
 - Tägliche Fixkosten [€]: 43,77
 - Distanzabhängige Kosten [€/km]: 0,312
 - Zeitabhängige Kosten [€/h]: 21,20

Bei den zeitabhängigen Kosten handelt es sich um Lohnkosten der Fahrer:innen.

2.6.3.2. Elektrisch

Durch die andere Methodik für den kommerziellen Verkehr (s.o. Abschnitt 2.6.2) lassen sich Fixkosten/variable Kosten im kommerziellen Verkehr nicht auf einfache Weise mit den “wahrgenommenen” Kosten beim privaten Personenverkehr vergleichen, und daher auch nicht auf die gleiche Weise multiplizieren. Wir haben uns, um eine Analogie zum privaten Personenverkehr herzustellen, für folgenden Ansatz entschieden:

- Wir multiplizieren die Beschaffungskosten mit 1,1.
- Wir multiplizieren die Energiekosten mit 0,8.

Anschließend wird die Berechnung der Fahrzeugkosten lt. BVWP durchgeführt. Daraus ergeben sich folgende Kostenparameter für die kommerziell genutzten elektrischen PKWs (der Wert für die distanzabhängigen Kosten für die Sensitivitätsanalyse wird in (()) angegeben):

- **Fahrzeug der Kategorie Kleinwagen**
 - Tägliche Fixkosten [€]: (37,34→) 37,83

⁷siehe <https://www-genesis.destatis.de/datenbank/online/url/fd27adb5>

- Distanzabhängige Kosten [€/km]: (0,275→) 0,269 ((0,280))
- Zeitabhängige Kosten [€/h]: 21,20
- **Fahrzeug der Kategorie "Mittelgroß"**
 - Tägliche Fixkosten [€]: (39,00→) 39,58
 - Distanzabhängige Kosten [€/km]: (0,281→) 0,266 ((0,283))
 - Zeitabhängige Kosten [€/h]: 21,20
- **Fahrzeug der Kategorie Lieferwagen/Transporter**
 - Tägliche Fixkosten [€]: (43,77→) 44,84
 - Distanzabhängige Kosten [€/km]: (0,312→) 0,299 ((0,315))
 - Zeitabhängige Kosten [€/h]: 21,20

Im Vergleich zum privaten Verkehr ist bei Elektrifizierung der kommerziellen PKW die Verschiebung der Kosten von den variablen zu den Fixkosten weniger deutlich. Dies liegt an den o.g. Komponenten:

- Weil der Kaufpreis zur Hälfte fahrleistungs-abhängig abgeschrieben wird, kompensiert der steigende Kaufpreis die fallenden Energie-Kosten.
- Weil die jährlichen Fixkosten als recht hohen Anteil die Fahrzeugverwaltungs-kosten haben, und diese nicht ansteigen, ist auch der Anstieg der Fixkosten prozentual geringer als bei den privaten PKW.

2.6.4. Kommerzieller LKW-Verkehr

Für kommerzielle LKWs wird die gleiche Berechnungsmethodik wie bei den PKWs verwendet (Rieken et al., 2015). Allerdings werden sowohl für die fossilen als auch für die elektrischen LKWs andere Anschaffungspreise als in Rieken et al. (2015) verwendet. Diese beruhen auf eigenen Vorarbeiten (Ewert et al., 2021, 2025a) und berücksichtigen die dynamische Entwicklung im Bereich der E-LKW.

2.6.4.1. Fossil

Die Kosten der fossilen LKWs basieren auf Ewert et al. (2021, 2025a). Ausgehend von zwischen 2022 und 2024 eher gleichbleibenden nominalen Kosten wurden in beiden Studien identische Kosten für die fossilen LKWs angenommen. Für die fossilen LKWs ergibt sich damit:

- LKW 8t (Atego 818L)
 - Tägliche Fixkosten [€]: 76,30
 - Distanzabhängige Kosten [€/km]: 0,487
 - Zeitabhängige Kosten [€/h]: 21,20
- LKW 18t (TGX 18.440 XLX)
 - Tägliche Fixkosten [€]: 96,70
 - Distanzabhängige Kosten [€/km]: 0,652
 - Zeitabhängige Kosten [€/h]: 21,20
- LKW 40t (MAN TGM 18.340 BL)
 - Tägliche Fixkosten [€]: 152,12
 - Distanzabhängige Kosten [€/km]: 0,856
 - Zeitabhängige Kosten [€/h]: 24,20

2.6.4.2. Elektrisch

Bei den elektrischen LKWs beruhen die Kosten ebenfalls auf explizit konfigurierten Fahrzeugen.

- Beschaffungskosten wie in (Ewert et al., 2025a)
- Energiekosten von 0,18 €/kWh und als Sensitivitätsanalyse von 0,2138 €/kWh

Daraus ergeben sich folgende Kostenparameter für die elektrischen LKWs (der Wert für die distanzabhängigen Kosten für die Sensitivitätsanalyse wird in (()) angegeben):

- LKW 8t (Mitsubishi Fuso eCanter 9C18)
 - Tägliche Fixkosten [€]: 79,51
 - Distanzabhängige Kosten [€/km]: 0,456 ((0,485))
 - Zeitabhängige Kosten [€/h]: 21,20
- LKW 18t (Renault D Z.E)
 - Tägliche Fixkosten [€]: 131,10
 - Distanzabhängige Kosten [€/km]: 0,635 ((0,669))
 - Zeitabhängige Kosten [€/h]: 21,20
- LKW 40t (Scania BEV SZM)
 - Tägliche Fixkosten [€]: 196,63
 - Distanzabhängige Kosten [€/km]: 0,656 ((0,706))
 - Zeitabhängige Kosten [€/h]: 24,20

2.7. Diffusionskurve der Einführung elektrischer Fahrzeuge über die Zeit

2.7.1. Einleitung

Die Einführung von E-FZe ist ein zentraler Bestandteil der Dekarbonisierung des urbanen Verkehrs. Zur Beschreibung der zeitlichen Entwicklung von Innovationsprozessen wie der Elektromobilität werden in der Methodik häufig Diffusionsmodelle eingesetzt, die den Adoptionsverlauf in Form einer S-Kurve abbilden. Im Folgenden wird ein diffusionsbasierter Modellansatz vorgestellt, der auf einer logistischen S-Kurve basiert und zur Analyse der Technologieadoption im Kontext der Elektromobilität herangezogen wird.

2.7.2. Symbolverzeichnis

- t Zeit (kontinuierliche Zeitvariable).
- t_0 Zeitlicher Verschiebungsparameter der Diffusionskurve.
- r Diffusionskoeffizient (Parameter zur Beschreibung der Wachstums- bzw. Abnahmerate).
- r_i Diffusionskoeffizient der Bevölkerungsgruppe i .
- T Durchschnittliche Nutzungsdauer eines Fahrzeugs.
- T_{ev} Durchschnittliche Nutzungsdauer eines Elektrofahrzeugs.
- T_{fossil} Durchschnittliche Nutzungsdauer eines Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor.

- $T_{ev,i}$ Durchschnittliche Nutzungsdauer eines Elektrofahrzeugs in der Bevölkerungsgruppe i .
- $T_{fossil,i}$ Durchschnittliche Nutzungsdauer eines Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor in der Bevölkerungsgruppe i .
- $K_{ev,\infty}$ Grenzwert der jährlichen Neuzulassungen von Elektrofahrzeugen für $t \rightarrow \infty$.
- $K_{fossil,\infty}$ Grenzwert der jährlichen Neuzulassungen von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor für $t \rightarrow \infty$.
- K_{2023} Anzahl der Fahrzeugneuzulassungen im Basisjahr 2023.
- $K_{ev,i}$ Skalierungsparameter der Diffusionskurve für Elektrofahrzeuge in der Bevölkerungsgruppe i .
- $K_{fossil,i}$ Skalierungsparameter der Diffusionskurve für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor in der Bevölkerungsgruppe i .
- C Integrationskonstante.

2.7.3. Logistisches Diffusionsmodell für E-FZe

Zur Beschreibung der Technologieadoption wird eine logistische Funktion verwendet, die den typischen Verlauf eines technologischen Diffusionsprozesses abbildet: eine frühe Phase langsamen Wachstums, gefolgt von einer Phase beschleunigter Adoption und einer anschließenden Sättigungsphase. Die verwendete Modellgleichung für EVs lautet:

$$F(t) = \frac{K_{ev,\infty}}{1 + e^{-r(t-t_0)}}$$

Dabei beschreibt $F(t)$ die zeitabhängige Anzahl der Neuzulassungen elektrischer Fahrzeuge. Die Modellparameter sind:

- $K_{ev,\infty}$ – Zielwert für die jährliche Anzahl der Neuzulassungen elektrischer Fahrzeuge,
- r – Geschwindigkeit der Technologieadoption,
- t_0 – Wendepunkt der Kurve (Zeitpunkt maximaler Steigung).

Die Anzahl der Neuzulassungen bestimmt nicht den Fahrzeugbestand selbst, sondern nur die Änderungsrate des Bestands zum Zeitpunkt t . Der kumulative Fahrzeugbestand ergibt sich durch Integration der logistischen Funktion zu:

$$N_{zugelassen,ev}(t) = \int \frac{K_{ev,\infty}}{1 + e^{-r(t-t_0)}} dt = \frac{K_{ev,\infty}}{r} \ln(1 + e^{r(t-t_0)}) + C .$$

Wenn man annimmt, dass die Nutzungsdauer der Fahrzeuge T beträgt, dann kann die Gesamtzahl der in diesem Zeitraum zugelassenen Fahrzeuge als bestimmtes Integral über dt von t bis $t + T$ bestimmt werden, was wie folgt definiert ist:

$$Bestand_{ev}(t) = N_{zugelassen,ev}(t) - N_{entsorgt,ev}(t)$$

$$\begin{aligned}
&= \int_t^{t+T} \frac{K_{ev,\infty}}{1 + e^{-r(t-t_0)}} dt \\
&= \frac{K_{ev,\infty}}{r} \left[\ln(1 + e^{r(t-t_0)}) - \ln(1 + e^{r(t-t_0-T)}) \right] \\
Bestand_{ev}(t) &= \frac{K_{ev,\infty}}{r} \ln \left(\frac{1 + e^{r(t-t_0)}}{1 + e^{r(t-T-t_0)}} \right) .
\end{aligned}$$

Für $t \rightarrow \infty$ konvergiert das (l'Hospital etc.) gegen

$$\frac{K_{ev,\infty}}{r} \ln \left(\frac{1}{e^{-rT}} \right) = K_{ev,\infty} \cdot T .$$

Dies ist auch intuitiv plausibel: Zulassungsrate $\times$ Lebensdauer = Anzahl Fahrzeuge. Also wenn z.B. $k = 80k/y$ und $T = 13y$ (beides Werte, die weiter unten verwendet werden), dann ist der endgültige FZ-Bestand 1'040'000.

Abbildung 2.2 zeigt den *Anteil* von EV an den Neuzulassungen sowie nachlaufend am Fahrzeugbestand bei einem Koeffizienten von $r=0,5$ und $T = 13y$.

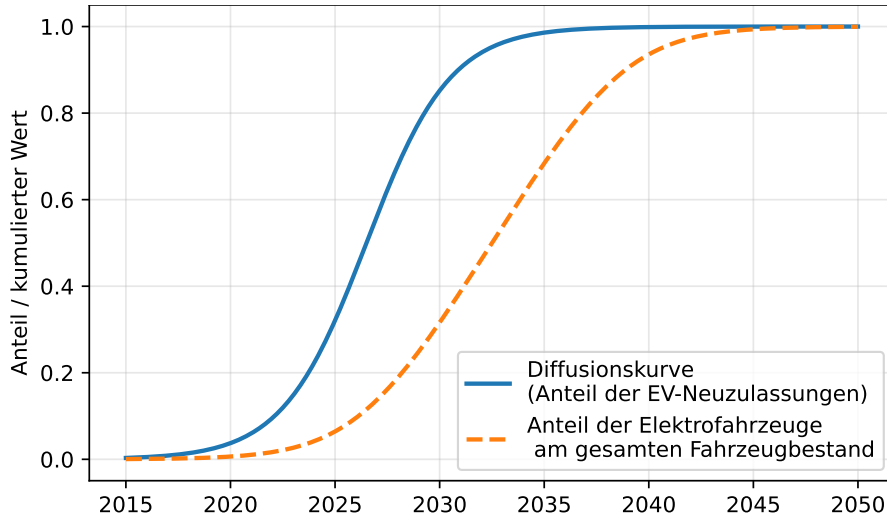


Abbildung 2.2.: Diffusionskurve der Elektrofahrzeuge

2.7.4. Abnehmende Diffusionskurve für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor

Analog zur Diffusionskurve der Elektrofahrzeuge wird für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor eine abnehmende Diffusionskurve der Neuzulassungen angenommen. Diese ist als Spiegelung der EV-Kurve definiert:

$$F_{fossil}(t) = K_{2023} - \frac{K_{2023} - K_{fossil,\infty}}{1 + e^{-r(t-t_0)}}$$

Für $t \rightarrow \infty$ konvergiert die Funktion gegen $K_{fossil,\infty}$.

Analog zur Situation bei Elektrofahrzeugen ist auch für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor das unbestimmte Integral der Neuzulassungen bei $K_{fossil,\infty} > 0$ eine monoton wachsende Funktion. Wie bei Elektrofahrzeugen ist jedoch zu berücksichtigen, dass

Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor nicht unbegrenzt genutzt werden, sondern eine endliche Lebensdauer besitzen.

Die kumulative Anzahl der insgesamt zugelassenen Fahrzeuge bis zum Zeitpunkt t wird als Integral der Neuzulassungsfunktion $F(t)$ über den Zeitraum von 0 bis t definiert und ergibt sich zu

$$N_{\text{zugelassen,fossil}}(t) = \int F(t) dt = K_{2023} \cdot t - \frac{K_{2023} - K_{\text{fossil},\infty}}{r} \ln(1 + e^{r(t-t_0)}) + C$$

Der Übergang von der Anzahl der Neuzulassungen zum tatsächlichen Fahrzeugbestand wurde bereits im Abschnitt zu Elektrofahrzeugen hergeleitet. Unter der Annahme einer konstanten mittleren Nutzungsdauer T ergibt sich der Bestand an Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor analog als Differenz zwischen den kumulierten Neuzulassungen und den um T verzögerten Außerbetriebnahmen:

$$\begin{aligned} \text{Bestand}_{\text{fossil}}(t) &= N_{\text{zugelassen,fossil}}(t) - N_{\text{entsorgt,fossil}}(t) \\ &= K_{2023}T - \frac{K_{2023} - K_{\text{fossil},\infty}}{r} \ln\left(\frac{1 + e^{r(t-t_0)}}{1 + e^{r(t-t_0-T)}}\right) \end{aligned}$$

Abbildung 2.3 zeigt den zeitlichen Verlauf des Fahrzeugbestands sowie der Neuzulassungen von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor. Der Fahrzeugbestand ergibt sich aus der Differenz zwischen den kumulierten Neuzulassungen und den außer Betrieb genommenen Fahrzeugen unter der Annahme einer konstanten durchschnittlichen Nutzungsdauer. Die Neuzulassungen folgen einer abnehmenden Diffusionskurve, die den langfristigen Rückgang von Fahrzeugen mit fossilem Antrieb widerspiegelt.

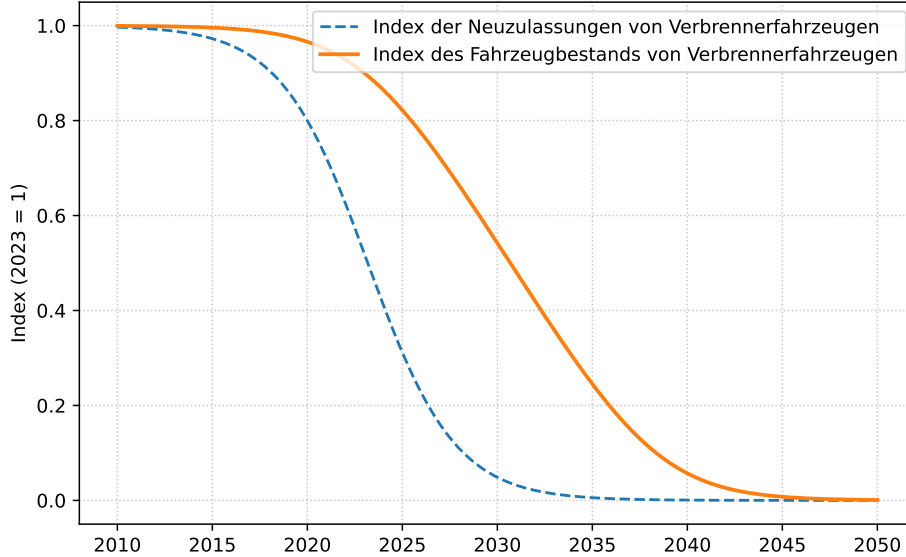


Abbildung 2.3.: Diffusionskurve der Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor

2.7.5. Gesamtzahl der Fahrzeuge

Die Gesamtzahl der sich im Umlauf befindlichen Fahrzeuge ergibt sich in diesem Modell als Summe des Bestands an Fahrzeugen mit fossilem Antrieb und Elektrofahrzeugen. Damit gilt für den Gesamtfahrzeugbestand:

$$\text{Bestand}(t) = \text{Bestand}_{\text{ev}}(t) + \text{Bestand}_{\text{fossil}}(t)$$

$$= K_{2023} T_{fossil} + \frac{K_{ev,\infty}}{r} \ln\left(\frac{1 + e^{r(t-t_0)}}{1 + e^{r(t-t_0-T_{ev})}}\right) - \frac{K_{2023} - K_{fossil,\infty}}{r} \ln\left(\frac{1 + e^{r(t-t_0)}}{1 + e^{r(t-t_0-T_{fossil})}}\right).$$

Damit beschreibt der Gesamtfahrzeugbestand die zeitliche Überlagerung des rückläufigen fossilen Fahrzeugbestands und des wachsenden Elektrofahrzeugbestands unter der Annahme einer konstanten mittleren Nutzungsdauer. Gleichzeitig geht der Gesamtbestand von $K_{fossil,\infty}$ nach $K_{ev,\infty}$ über.

2.7.6. Superposition mehrerer Integrationskurven

Bei gezielten Steuerungsmaßnahmen kann für unterschiedliche Bevölkerungsgruppen jeweils ein eigener Parametersatz kalibriert werden. Insbesondere können sich die Parameter

$$r_i, T_{fossil,i}, T_{ev,i}, K_{fossil,i}, K_{ev,i}$$

zwischen den Gruppen unterscheiden.

Der Gesamteffekt auf Stadtebene wird in diesem Fall gemäß dem Superpositionsprinzip als Summe der Beiträge aller einzelnen Gruppen modelliert:

$$N_{city}(t) = \sum_i N_i(t),$$

wobei $N_i(t)$ die jeweilige Integrationskurve der Bevölkerungsgruppe i beschreibt. Dieser Ansatz ermöglicht die Abbildung heterogener Anpassungsgeschwindigkeiten, unterschiedlicher infrastruktureller Rahmenbedingungen sowie variierender Reaktionen auf regulatorische Maßnahmen, während gleichzeitig eine einheitliche funktionale Modellstruktur beibehalten wird.

2.7.7. Kalibrierung der Diffusionskurve und der Szenarien des Übergangs zur Elektromobilität

Im Rahmen der Kalibrierung wird der Prozess für jede Agentengruppe in der Simulation in zwei Stufen durchgeführt.

In der ersten Stufe werden die Parameter r und t_0 kalibriert, die die Geschwindigkeit des Übergangs vom Kauf von Fahrzeugen mit fossilen Brennstoffen zum Kauf von Elektrofahrzeugen beschreiben. Es wird angenommen, dass die Werte von r und t_0 auf Grundlage des Zielanteils der Neuzulassungen in verschiedenen Szenarien bestimmt werden. Als Zielwert kann sowohl ein Gleichgewichtszustand aus den Simulationsergebnissen als auch ein politisch festgelegtes Ziel dienen.

In der zweiten Stufe der Kalibrierung wird dieser Schritt nur dann angewendet, wenn ein Zielwert für die Gesamtzahl der Fahrzeuge zu einem bestimmten Jahr vorliegt. In diesem Fall ist es notwendig, zusätzlich die Funktion $N_{zugelassen}(t)$ zu kalibrieren. Andernfalls wird der Parameter r aus der ersten Stufe übernommen, und die Nutzungsdauer der Fahrzeuge wird wie folgt bestimmt:

$$T = \frac{N_{zugelassen}(2023)}{K_{2023}}$$

Wenn für ein bestimmtes Jahr sowohl ein Zielwert als auch Anforderungen an das Verhältnis der Fahrzeugtypen vorliegen, wird der Parameter r zusätzlich kalibriert, ausgehend von dem in der ersten Stufe erhaltenen Wert, während die vollständige

Nutzungsdauer der Fahrzeuge T unverändert bleibt. Falls der Zielzustand nicht erreichbar ist, kann der Parameter K weiter erhöht werden, mit einer entsprechenden Nachkalibrierung von T , um die Gesamtzahl der zugelassenen Fahrzeuge konstant zu halten.

Wenn ein Zielwert für die Gesamtzahl der Fahrzeuge vorliegt und eine fallende Kurve angenommen wird, bei der die Gesamtzahl der Fahrzeuge abnimmt, wird in der zweiten Stufe die Funktion $N_{\text{zugelassen}}(t)$ kalibriert, insbesondere die vollständige Nutzungsdauer T für den Fahrzeugtyp, dessen Anteil sinkt. Dies geschieht so, dass die Zielwerte für Fahrten mit Fahrzeugen mit fossilen Brennstoffen und mit Elektrofahrzeugen erreicht werden. Dabei wird die Anpassungsgeschwindigkeit für beide Antriebsarten als gleich dem Wert r aus der steigenden Kurve angenommen.

Der physikalische Sinn dieses Ansatzes liegt darin, dass eine erzwungene Reduktion des Anteils eines bestimmten Fahrzeugtyps vor allem durch einen beschleunigten Abbau dieses Fahrzeugtyps in einer bestimmten Region erreicht wird, zum Beispiel durch den Weiterverkauf in benachbarte Städte oder Länder, was ein üblicher Mechanismus zur Verringerung der Fahrzeugzahl in einer bestimmten Zone ist.

2.7.7.1. Mathematische Beschreibung der Kalibrierung der Diffusionskurve

Die Kalibrierung der Modellparameter erfolgt durch die Lösung eines klassischen Approximationsproblems. Bei Bedarf kann der Einfluss einzelner Punkte verstärkt werden, zum Beispiel wenn es wichtig ist, dass das Modell in einem bestimmten Jahr einen vorgegebenen Wert annimmt.

Im klassischen Fall werden die Parameter aus dem Kleinste-Quadrate-Problem bestimmt:

$$\min_{r, t_0} \sum_{i=1}^N (F(t_i; r, t_0) - y_i)^2,$$

wobei t_i die beobachteten Zeitpunkte, y_i die entsprechenden beobachteten Werte und $F(t; r, t_0)$ die Modellfunktion mit den Parametern r und t_0 sind.

Hinzufügen einer weichen Bedingung Wenn das Modell in einem bestimmten Jahr (zum Beispiel 2035) nahe an einem vorgegebenen Wert liegen soll, wird ein zusätzlicher Strafterm für die Abweichung von dieser Bedingung eingeführt:

$$\min_{r, t_0} \left(\sum_{i=1}^N (F(t_i; r, t_0) - y_i)^2 + \lambda (F(2035; r, t_0) - Y_{2035})^2 \right),$$

wobei Y_{2035} der gewünschte Modellwert im Jahr 2035 und $\lambda > 0$ das Gewicht der Bedingung (ihre Stärke) ist.

Je größer λ ist, desto stärker wird die Optimierung die Kurve an den Wert im Jahr 2035 anpassen.

Interpretation Diese Erweiterung ist äquivalent zum Hinzufügen eines virtuellen Punktes

$$(t_{N+1}, y_{N+1}) = (2035, Y_{2035}),$$

aber mit einem erhöhten Gewicht λ .

Damit wird das Problem zu einer gewichteten Approximation:

$$\min_{r, t_0} \sum_{i=1}^{N+1} w_i (F(t_i; r, t_0) - y_i)^2,$$

wobei die Gewichte wie folgt definiert sind:

$$w_i = \begin{cases} 1, & i = 1, \dots, N, \\ \lambda, & i = N + 1. \end{cases}$$

2.7.7.2. Kalibrierungsdatensatz Berlin

Die Modellkalibrierung erfolgt analog zum Referenzdatensatz Norwegen durch Anpassung der logistischen S-Kurve an den beobachteten zeitlichen Verlauf. Dabei wird insbesondere die Steigung der Kurve zur Abschätzung des Adoptionsparameters r verwendet. Die Daten für Norwegen sind in Abschnitt A.2 dargestellt. Die Berliner Zulassungsdaten für den Zeitraum von 2019 bis 2025 dienen zur Kalibrierung des Diffusionsmodells im Untersuchungsraum. Als Datengrundlage werden Zeitreihen zum Anteil vollelektrischer Fahrzeuge an den Neuzulassungen herangezogen. Die für die Kalibrierung verwendeten Daten sind in Abschnitt A.1 dargestellt.

2.8. Öffentlicher Personennahverkehr

Der öffentliche Verkehr im Modell kostet 3 € pro Tag. In Rakow et al. (2024) wird dies begründet durch “which corresponds to the average cost of a yearly ticket (761 EUR) divided by 250 working days.” Wenn eine Person nur eine ÖV-Fahrt am Stichtag macht, dann geht das Modell davon aus, dass diese Einzelfahrt 3 € kostet. Wenn eine Person mehrere ÖV-Fahrten am Stichtag macht, dann geht das Modell davon aus, dass diese Person ein Jahresabo im o.g. Sinne besitzt.⁸

⁸Dies entspricht auch in etwa den Kosten des Deutschlandtickets im Jahr 2026.

3. Ergebnisse der Verkehrssimulation und der Diffusionskurven

3.1. Veränderungen im Modal Split

Wir berechnen zunächst die Veränderung des Modal Split, welche sich durch die andere Preisstruktur der E-FZe ergibt. Konkret führen wir zunächst

- im privaten Personenverkehr e-PKW als zusätzliches Verkehrsmittel ein, mit gegenüber dem konventionellen Auto höheren fixen und niedrigeren variablen Kosten; sowie
- im kommerziellen Verkehr e-PKW und e-LKW als zusätzliche Fahrzeugtypen, wie weiter oben beschrieben.

Anschließend lassen wir die Simulation darauf reagieren. Offenbar sind insbesondere für Personen und Touren mit vielen Tages-km die elektrischen FZe günstiger als die konventionellen, so dass sie umsteigen werden. Weiterhin wird es Personen geben, welche vorher mit anderen Verkehrsmitteln unterwegs waren, welche auf den elektrischen Autoverkehr umsteigen. – Fossile Fahrzeuge bleiben also insbesondere dann erhalten, wenn die Tagesfahrleistungen gering sind.

In einem zweiten Schritt führen wir dann zusätzlich die ZEZ ein. Hier ist, wie oben besprochen, die Verwendung fossiler Fahrzeuge innerhalb der Zone gar nicht mehr gestattet. Also Reaktion wird also ein Teil der weiterhin vorhandenen fossilen Fahrzeuge in elektrische "umgetauscht", während ein anderer Teil der Wege vom Auto weg auf andere Verkehrsmittel wechselt.

Die Veränderungen im Modal Split infolge der Einführung von EVs und dann zusätzlich der ZEZ sind in Tabelle 3.1 dargestellt. Alle in der Tabelle dargestellten Auswertungen werden nach dem Standort der häuslichen Aktivität (home) berechnet. Verglichen mit dem Status quo zeigen die beiden Szenarien eine deutliche Verschiebung der Verkehrsmittelwahl. Insbesondere nimmt der Anteil des fossilen motorisierten Individualverkehrs signifikant ab, während elektrische Verkehrsmittel sowie der Umweltverbund (ÖPNV, Fahrrad- und Fußverkehr) an Bedeutung gewinnen. Die Einführung einer ZEZ verstärkt diese Entwicklung und führt zu einem weiteren Rückgang fossiler Fahrten sowie zu einer höheren Nutzung des öffentlichen Verkehrs und elektrischer Fahrzeuge. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass ein potenzielles Absinken der Kosten von Elektrofahrzeugen ohne Einführung einer ZEZ zu einem um knapp einen Prozentpunkt ansteigenden PKW Anteil führt.

Demgegenüber bewirkt die Einführung einer ZEZ einen deutlichen Rückgang des PKW-Anteils auf 22,02 % und damit eine Reduktion um nahezu $24,68\% - 22,02\% = 2,66\%$ Prozentpunkte (entspricht etwa $-10,78\%$ relativ zum Szenario ohne ZEZ-Zone).

Die bisherigen Resultate beziehen sich auf die Langfristreaktion des Systems auf die Einführung von EVs bzw. auf die Einführung von EVs zusammen mit einer ZEZ. Der folgende Abschnitt 3.2 beschäftigt sich mit der Kalibrierung der Diffusionskurve.

Tabelle 3.1.: Modal Split im Status quo und in den Baseline-Szenarien für den privaten Personen-Verkehr

Modus	<i>Baseline</i>		<i>EVrelaxiert</i>		<i>EV&ZEZrelaxiert</i>	
	%	Trips (Tsd.)	%	Trips (Tsd.)	%	Trips (Tsd.)
Gesamt						
Fußverkehr	29,66	3 988	29,57	3 976	29,75	4 000
ÖPNV	27,46	3 692	27,23	3 661	28,78	3 869
Fahrrad	17,91	2 408	17,39	2 338	18,24	2 452
MIV	24,97	3 356	25,81	3 469	23,23	3 123
MIV (fossil)	24,97	3 356	11,50	1 546	6,73	905
MIV (elektrisch)	–	–	14,30	1 923	16,50	2 218
Gesamt	100,0	13 444	100,0	13 444	100,0	13 444
Berlin (= Personen, die in Berlin wohnen)						
Fußverkehr	29,71	3 798	29,62	3 787	29,80	3 810
ÖPNV	28,27	3 614	28,05	3 586	29,64	3 789
Fahrrad	18,18	2 325	17,65	2 257	18,54	2 371
MIV	23,84	3 048	24,68	3 155	22,02	2 815
MIV (fossil)	23,84	3 048	11,33	1 448	6,35	812
MIV (elektrisch)	–	–	13,35	1 707	15,67	2 003
Gesamt	100,0	12 785	100,0	12 785	100,0	12 785
ZEZ (= Personen, die innerhalb der ZEZ wohnen)						
Fußverkehr	28,52	1 043	28,36	1 037	28,58	1 045
ÖPNV	34,32	1 255	34,18	1 250	36,61	1 339
Fahrrad	22,07	807	21,41	783	23,60	863
MIV	15,09	552	16,05	587	11,21	410
MIV (fossil)	15,09	552	8,72	319	0,27	10
MIV (elektrisch)	–	–	7,33	268	10,95	400
Gesamt	100,0	3 657	100,0	3 657	100,0	3 657

Bemerkungen:

1. In *EVrelaxiert*: Die verbleibenden fossilen PKW-Fahrten von Personen, die innerhalb der ZEZ wohnen, entstehen durch Personen, die ihre PKWs dann außerhalb der ZEZ parken und auch nur außerhalb der ZEZ verwenden (siehe Abschnitt 2.3).

3.2. Technologieadaptation und Auswirkungen der ZEZ

3.2.1. Ausgangsdaten

Für die Analyse und Kalibrierung der Diffusionskurve werden die Daten aus Tabelle A.1 verwendet, die Informationen über den tatsächlichen prozentualen Anteil der Zulassungen von Elektrofahrzeugen an der Gesamtzahl der PKW enthalten. Ergänzend werden die Ergebnisse der MATSim-Simulation berücksichtigt, die in Tabelle 3.1 dargestellt sind.

3.2.2. Szenarien der Technologieentwicklung

Es werden vier Szenarien der Technologieentwicklung betrachtet, auf deren Grundlage die Parameter r und T_0 unterschiedlich kalibriert werden können.

Adaptionsszenario 1: Schneller Übergang zur Elektromobilität. In diesem

Szenario wird ein beschleunigter Übergang zu Elektrofahrzeugen angenommen. Bis zum Jahr 2035 sollen 100 % der Neuzulassungen elektrisch sein. Die Kalibrierung erfolgt auf Basis der Daten aus Tabelle A.1 unter der zusätzlichen Nebenbedingung, dass im Jahr 2035 100 % der Neuzulassungen elektrisch sind.

Adaptionsszenario 2: Beibehaltung der aktuellen Adaptionsgeschwindigkeit. In diesem Szenario wird die Adaptionsskurve auf Grundlage der Daten aus Tabelle A.1 kalibriert, ohne die Vorgabe einer Konvergenz zu 100 % Elektrofahrzeugen im Jahr 2035.

Adaptionsszenario 3: Ohne ZEZ, MATSim-Zielwerte. In diesem Szenario erfolgt die Kalibrierung auf Basis der vorhandenen empirischen Daten, wobei der Zielwert der Neuzulassungen dem Zielwert entspricht, der aus den MATSim-Ergebnissen des Szenarios 3 abgeleitet wird.

Adaptionsszenario 4: Mit ZEZ, MATSim-Zielwerte. In diesem Szenario erfolgt die Kalibrierung auf Basis der vorhandenen empirischen Daten, wobei der Zielwert der Neuzulassungen dem Zielwert entspricht, der aus den MATSim-Ergebnissen des Szenarios 2 abgeleitet wird.

Die Ergebnisse der Kalibrierung für die verschiedenen Szenarien sind in Tabelle 3.2 dargestellt.

Tabelle 3.2.: Ergebnisse der Kalibrierung für verschiedene Adaptionsszenarien

Name	r	t_0	CV	Zielwert des Anteils elektrischer Fahrzeuge
Adaptionsszenario 1	0,7	2024	0,67	1
Adaptionsszenario 2	0,3	2027	0,26	1
Adaptionsszenario 3	0,4	2023	0,2	0,58
Adaptionsszenario 4	0,3	2025	0,21	0,63

3.2.3. Schlussfolgerung zur Kalibrierung der Diffusionskurve

Auf Grundlage der Analyse der Kalibrierungsergebnisse wird vorgeschlagen, die Parameter der Adaptionsskurve aus dem Adaptionsszenario 3 als Basisszenario zu verwenden. Diese Auswahl basiert auf den folgenden Gründen:

- dem geringsten Wert des CV,
- der Übereinstimmung mit der MATSim-Simulation (Szenario *EVrelaxiert*) hinsichtlich des Anteils von Elektrofahrzeugen im Verkehrsaufkommen, welcher eine Technologieadaption ohne zusätzliche Maßnahmen abbildet.

Die resultierenden Parameter der Diffusionskurve lauten:

$$r = 0,4, \quad T_0 = 2023.$$

3.2.4. Übergang von Neuzulassungen zur Gesamtzahl der zugelassenen Fahrzeuge

Bei der Integration und dem Übergang von Neuzulassungen zur Gesamtzahl der zugelassenen Fahrzeuge ist es erforderlich, den Parameter T zu definieren. Dabei beschreibt

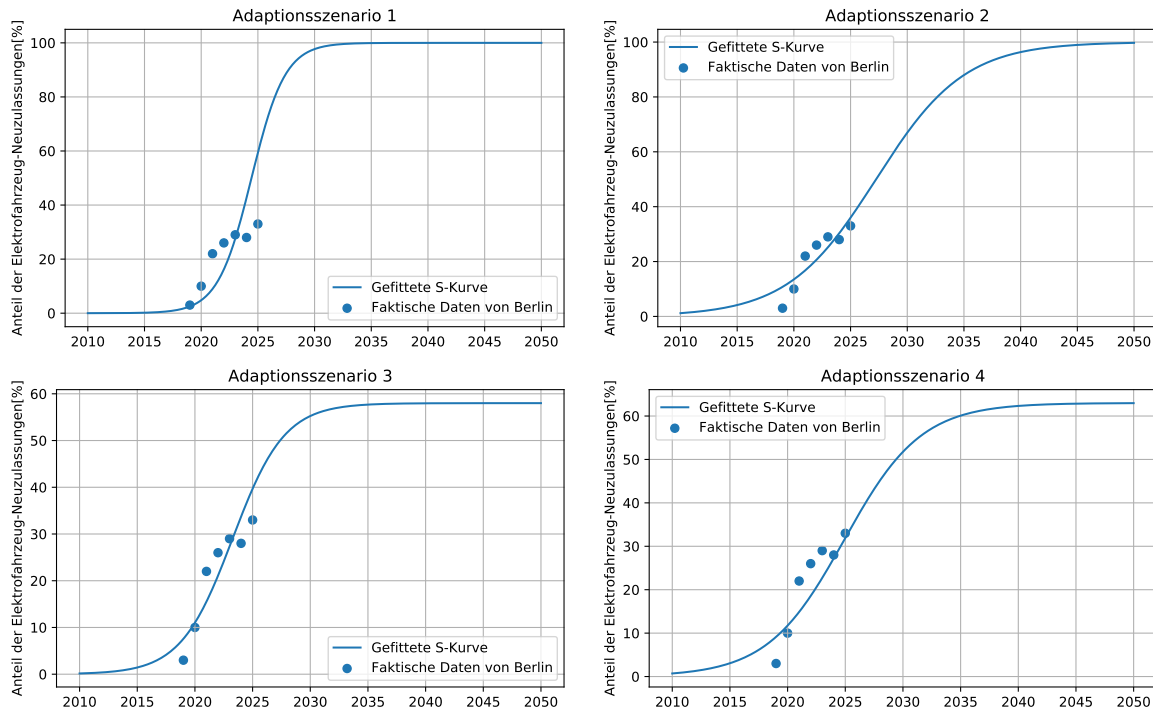


Abbildung 3.1.: Vier mögliche Adaptionsszenarien. Man beachte die unterschiedlichen Skalierungen der y-Achsen. Gewählt wurde, für die “freiwillige” Anpassung, schlussendlich Variante 3.

T_{avg} die durchschnittliche Zeitspanne zwischen der Erstzulassung eines Fahrzeugs und seiner Außerbetriebnahme in Berlin.

In Berlin sind insgesamt etwa 1,23 Mio. PKW zugelassen¹. Eine exakte Trennung zwischen privaten und kommerziellen PKW ist statistisch nicht eindeutig möglich. Als Näherung kann jedoch angenommen werden, dass der Bestand an privaten PKW bei etwa 1 Mio. Fahrzeugen liegt.

Bei einer jährlichen Anzahl von ca. 80.000 Neuzulassungen ergibt sich damit eine mittlere Verweildauer eines Fahrzeugs im Bestand von:

$$T \approx \frac{1.000.000}{80.000} \approx 12,5 \text{ Jahre} \approx 13 \text{ Jahre.}$$

Diese Abschätzung ist als grobe Näherung zu verstehen und kann als konservative Annahme interpretiert werden.

$$T_{avg} = 13 \quad K = 80.000$$

3.2.5. Kalibrierung der Diffusionskurve für das Szenario ohne ZEZ

In diesem Abschnitt wird die Diffusionskurve so parametrisiert, dass sie die langfristigen Zielanteile der Fahrten mit Elektro- bzw. fossil betriebenen PKW reproduziert, die aus den Simulationsszenarien abgeleitet wurden. Als Referenz wird das Basisjahr 2023 verwendet (Index 2023 = 1).

¹Quelle: Amt für Statistik Berlin-Brandenburg, <https://www.statistik-berlin-brandenburg.de/076-2023>

Ziel dieser Parametrierung ist es, die in den Szenarien beschriebenen Zielzustände in eine zeitlich aufgelöste Übergangsdynamik zu überführen. Dadurch kann geprüft werden, in welchem Umfang die für das Einführungsjahr 2035 angesetzten Zielwerte für Fahrten- und Fahrzeuganteile plausibel erreichbar sind. Gleichzeitig ermöglicht die Diffusionskurve die Ableitung jährlicher Zwischenwerte vom aktuellen Stand bis 2035 sowie darüber hinaus bis zum langfristigen Sättigungszustand. Die so kalibrierten Kurven werden konsistent für alle betrachteten Szenarien verwendet und erlauben damit einen direkten Vergleich über die Zeit; insbesondere kann der jahresscharfe Effekt der Einführung der ZEZ gegenüber einem Referenzpfad ohne ZEZ isoliert ausgewiesen werden.

Für das Szenario ohne Einführung einer ZEZ wird als langfristiger Zielwert der Anteil der Elektrofahrten im Gleichgewichtszustand aus dem entsprechenden Simulationsszenario übernommen. Dieser Zielwert entspricht 0,58, d. h. im langfristigen Zustand entfallen 0,58 der PKW-Fahrten auf Elektrofahrzeuge und $(1 - 0,58)$ auf fossil betriebene Fahrzeuge.

Die Kalibrierung erfolgt, indem die Sättigungswerte der Diffusionskurve für Elektro- und Fossilanteile so gewählt werden, dass die Kurve im langfristigen Zustand genau auf diesen Zielanteilen liegt. Formal werden hierfür die normierten Grenzwerte

$$K_{\text{EV}} = 0,58, \quad K_{\text{fossil}} = 1 - 0,58$$

gesetzt. Die Steilheit und der zeitliche Verlauf der Übergangsdynamik werden über die Parameter der Diffusionsfunktion (z. B. r , T_0) beschrieben; die zentrale Kalibrierbedingung ist jedoch die Übereinstimmung der langfristigen Anteile mit dem Simulationszielwert.

Die so parametrisierte Diffusionskurve für das Szenario ohne Einführung einer ZEZ ist in Abbildung 3.2 dargestellt.

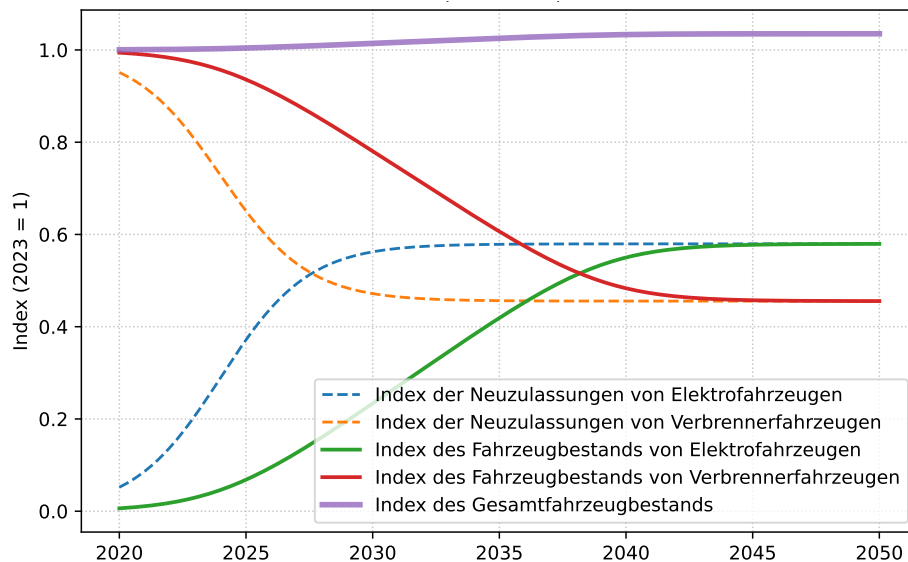


Abbildung 3.2.: Entwicklung der normierten Anteile (Index 2023 = 1) für Elektro- und fossil betriebene PKW im Szenario ohne ZEZ. Die Kalibrierung stellt sicher, dass der Elektroanteil im langfristigen Zustand gegen 0.58 strebt.

3.2.6. Kalibrierung der Diffusionskurve für das Szenario mit ZEZ

Für das ZEZ-Szenario werden die langfristigen Zielanteile aus den MATSim-Simulationsergebnissen (Tabelle 3.1) übernommen und als Randbedingungen für die Diffusionskurven verwendet. Hierzu werden zwei getrennte Diffusionskurven angesetzt, um die unterschiedlichen Dynamiken für Personen mit Wohnsitz innerhalb bzw. außerhalb der ZEZ abzubilden. Die Sättigungswerte der Anteile (Elektro vs. Fossil) werden so eingestellt, dass die Kurven im langfristigen Zustand die Zielverteilungen aus dem Simulationsszenario reproduzieren.

Im Basisszenario beträgt die Gesamtzahl der PKW-Fahrten nichtkommerzieller Agenten 2.815 Tsd. pro Tag. Davon entfallen 410 Tsd. Fahrten auf Personen mit Wohnsitz innerhalb der ZEZ und 2.405 Tsd. Fahrten auf Personen mit Wohnsitz außerhalb der ZEZ. Diese Aufteilung wird genutzt, um die Gruppen getrennt zu betrachten; innerhalb jeder Gruppe wird die Gesamtzahl der PKW-Fahrten als gegeben angenommen und lediglich zwischen Elektro- und fossil betriebenen Fahrten umverteilt.

3.2.6.1. Personen mit Wohnsitz innerhalb der ZEZ

Für Agenten mit Wohnsitz innerhalb der ZEZ zeigen die MATSim-Ergebnisse eine deutliche Reduktion des PKW-Fahrtenvolumens sowie eine nahezu vollständige Verdrängung fossil betriebener Fahrten. Im Basisszenario entfallen auf diese Gruppe 552 Tsd. PKW-Fahrten pro Tag; im ZEZ-Szenario sinkt dieser Wert auf 410 Tsd. Fahrten. Gleichzeitig ergibt sich gemäß Tabelle 3.1 im Zielzustand eine Verteilung von 98 % Elektrofahrzeug-Fahrten und 2 % fossil betriebenen Fahrten.

Die Diffusionskurve wird so kalibriert, dass (i) diese langfristige Zielverteilung (Sättigungsniveau) reproduziert wird und (ii) der Übergang zu diesem Zustand bis zum Jahr 2035 (Einführungsjahr der ZEZ) im Wesentlichen abgeschlossen ist. Dabei ist hervorzuheben, dass die bis 2035 erreichte Zielnähe nicht ausschließlich über eine steilere Diffusionsdynamik (Parameter der Kurve) abgebildet wird, sondern zusätzlich über eine beschleunigte Erneuerung des Fahrzeugbestands: In der Modellierung wird die erwartete durchschnittliche Nutzungsdauer eines Fahrzeugs von 13 auf 6,5 Jahre reduziert. Dies entspricht einem beschleunigten Ausstieg aus fossil betriebenen Fahrzeugen innerhalb der ZEZ und bildet insbesondere einen stärkeren Austausch über den Gebrauchtwagenmarkt ab.

Der Verlauf der so kalibrierten Diffusionskurve für Agenten mit Wohnsitz innerhalb der ZEZ ist in Abbildung 3.3 dargestellt.

3.2.6.2. Personen mit Wohnsitz außerhalb der ZEZ

Für Personen mit Wohnsitz außerhalb der ZEZ zeigen die Simulationsergebnisse sowohl eine Veränderung der Antriebsstruktur als auch eine Reduktion des Fahrtenvolumens. Für die Kalibrierung wird der langfristige Zielanteil der Elektrofahrten für diese Gruppe als Randbedingung übernommen. In der Implementierung wird hierfür der aus dem Simulationsszenario abgeleitete Zielwert verwendet: 0,63. Damit gilt im langfristigen Zustand:

$$K_{\text{EV}} = 0,63, \quad K_{\text{fossil}} = 1 - 0,63.$$

Die Steilheit und der Verlauf der Übergangsdynamik werden so parametrisiert, dass die beobachtete Entwicklung bis 2035 plausibel abgebildet wird, während die langfristige Sättigung die Zielverteilung aus dem Simulationsszenario reproduziert.

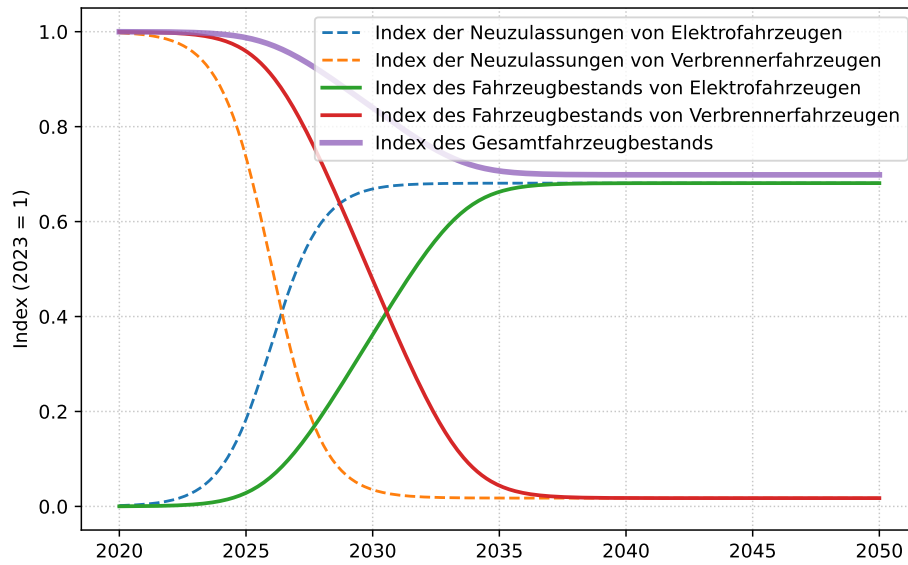


Abbildung 3.3.: Diffusionskurve (Indexdarstellung, 2023 = 1) für Agenten mit Wohnsitz innerhalb der ZEZ.

Der Verlauf der Diffusionskurve für Personen mit Wohnsitz außerhalb der ZEZ ist in Abbildung 3.4 dargestellt.

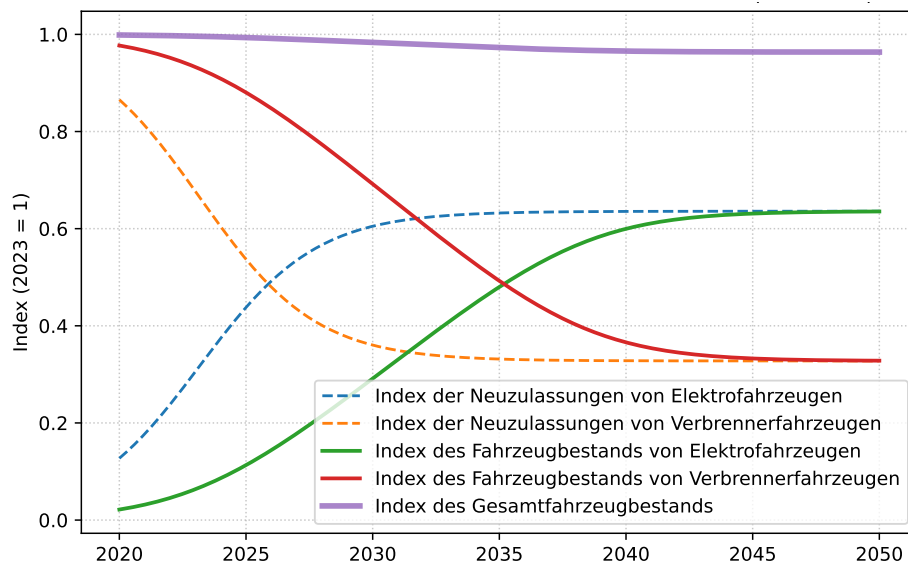


Abbildung 3.4.: Diffusionskurve (Index 2023 = 1) für Personen mit Wohnsitz außerhalb der ZEZ.

3.2.6.3. Aggregierte Diffusionskurve (ZEZ-Szenario)

Abschließend werden die beiden gruppenspezifischen Diffusionskurven (Wohnsitz innerhalb vs. außerhalb der ZEZ) zu einer aggregierten Kurve zusammengeführt. Ziel dieser Aggregation ist es, das ZEZ-Szenario auf Gesamtstadtebene konsistent mit dem Szenario ohne ZEZ vergleichen zu können. Die Aggregation erfolgt als gewichtete Kombination beider Kurven entsprechend der jeweiligen gruppenspezifischen Fahrzeugumfänge aus dem Basisszenario (vgl. Tabelle 3.1).

Der Verlauf der aggregierten Diffusionskurve für das ZEZ-Szenario ist in Abbildung 3.5 dargestellt.

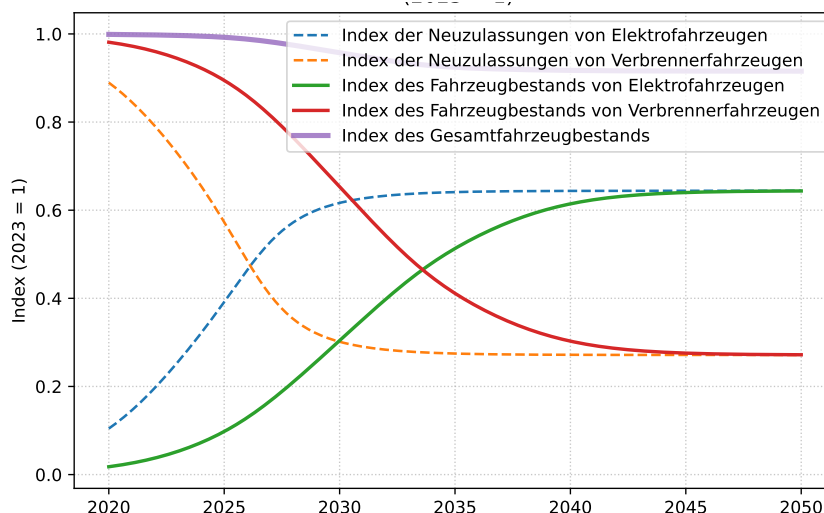


Abbildung 3.5.: Aggregierte Diffusionskurve (Index 2023 = 1) für das ZEZ-Szenario als gewichtete Kombination der Kurven für Wohnsitz innerhalb und außerhalb der ZEZ.

3.2.6.4. Ausblick auf Treibhausgasneutralität 2045

Nach derzeitiger Gesetzeslage (KSG) soll Deutschland 2045 Treibhausgas-neutral sein. Da die Dekarbonisierung z.B. des Flugverkehrs eine deutlich größere Herausforderung darstellt als diejenige des Autoverkehrs, folgt daraus, dass der Autoverkehr 2045 vollständig fossilfrei sein muss. Im Sinne unserer Simulationen entspricht dies einer modell-weiten ZEZ. Es ist davon auszugehen, dass diese Fossilfreiheit 2045 einen vergleichbaren Effekt hat wie eine ZEZ 2035, nur eben nun für das gesamte Gebiet, und 10 Jahre später.

Wir schätzen diesen Effekt wie folgt ab: Die Diffusionskurve innerhalb der ZEZ Abb. 3.3 strebt in etwa gerader Linie auf einen Anteil von null fossilen Fahrzeugen zu, um dann kurz vor 2035 eine Art “weicher Landung” durchzuführen. Wenn man in Abb. 3.4 die Diffusionskurve gedanklich ähnlich verlängert, so würde dies auf eine ähnliche “weiche Landung” kurz vor 2045 herauslaufen.

In Folge dieser Überlegungen gehen wir davon aus, dass die Treibhausgas-Neutralität 2045 noch keine wesentlichen Auswirkungen auf den Fahrzeugbestand bis 2035 haben wird.

3.3. Prognose des Modal Split im Jahr 2035

Zur Bewertung der Wirkungen im Einführungsjahr 2035 werden die modellierten langfristigen Endzustände der Szenarien *EVrelaxiert* und *EV&ZEZrelaxiert* auf das Jahr 2035 übertragen, d. h. die Zwischenzustände *EV'35* bzw. *EV&ZEZ'35* abgeleitet. Die hierfür verwendeten Diffusionskurven wurden im vorherigen Abschnitt kalibriert und ermöglichen eine konsistente Einordnung der Situation im Jahr 2035 im Verhältnis zum jeweiligen langfristigen Zielzustand.

Interpretation der Kurven als Indizes (Index 2023 = 1). Hier und im Folgenden werden die Diffusionskurven als Indizes relativ zum Basisjahr 2023 interpretiert. Der jeweilige Indexwert beschreibt das erreichte Niveau einer Größe im Verhältnis zu ihrem Niveau im Jahr 2023 (z. B. Elektrifizierungsniveau innerhalb des MIV oder Gesamtnutzungsniveau der Pkw-Mobilität, gemäß der Definition im Kurvenkapitel).

Dopplung als Annahme: schnelle Anpassung der Verkehrsmittelwahl. Für die Übertragung des Modal Split auf das Jahr 2035 wird angenommen, dass sich die Wahl des Verkehrsmittels an geänderte Rahmenbedingungen (Preisrelationen, Restriktionen durch ZEZ) vergleichsweise schnell anpasst, sodass im Jahr 2035 die Verteilung zwischen den Verkehrsträgern (Fußverkehr, ÖPNV, Fahrrad und MIV) bereits nahe am im Modell abgebildeten langfristigen Zielzustand liegt. Diese Annahme wird getroffen, weil (i) die Einführung einer ZEZ als harte Restriktion innerhalb des Gebiets wirkt, und (ii) der erforderliche Verhaltenswechsel (Umstieg auf andere Verkehrsmittel oder Anpassung der Pkw-Nutzung) überwiegend ohne vollständige Erneuerung des Fahrzeugbestands möglich ist. Damit wird die Veränderung des Modal Split konservativ als kurzfristig realisierbar behandelt; Trägheiten, Akzeptanz- bzw. Vermeidungsreaktionen („emotionale“ Ablehnung) sowie Umstellungsfriktionen werden nicht explizit modelliert.

Übertragung des Modal Split (MIV vs. Umweltverbund). Für die Veränderung der Anteile der Verkehrsträger wird der Index der Gesamtgröße (violette Kurve „Index des Gesamtfahrzeugbestands“) herangezogen. Wie aus Abbildung 3.2 und Abbildung 3.5 ersichtlich ist, liegt dieser Index im Jahr 2035 in beiden Fällen sehr nahe am jeweiligen Endzustandsniveau. Daher wird für die Szenarien *EV'35* und *EV&ZEZ'35* angenommen, dass die Modal-Split-Anteile der Verkehrsträger näherungsweise denjenigen der Endzustandsszenarien *EVrelaxiert* bzw. *EV&ZEZrelaxiert* entsprechen.

Aufteilung innerhalb des MIV (elektrisch vs. fossil). Die Aufteilung der MIV-Fahrten in elektrisch und fossil wird hingegen explizit über die Diffusionskurven für den Elektrifizierungsindex (grün) bzw. den fossilen Restanteil (rot) im Jahr 2035 bestimmt:

- Im Szenario *EV'35* wird die Aufteilung innerhalb des MIV aus Abbildung 3.2 abgeleitet (Indexwert 2035 relativ zum Indexwert im Endzustand), was einem Elektrifizierungsanteil innerhalb des MIV von 70,7% entspricht.
- Im Szenario *EV&ZEZ'35* wird unterschieden zwischen Berliner Einwohnern mit Wohnsitz innerhalb bzw. außerhalb der ZEZ (Abbildungen 3.3 und 3.4). Für Einwohner innerhalb der ZEZ wird im Einführungsjahr 2035 ein vollständiger Wechsel der MIV-Fahrten auf elektrische Antriebe innerhalb des Gebiets unterstellt; für Einwohner außerhalb der ZEZ ergibt sich ein Elektrifizierungsanteil von 76,39%. Die hierfür verwendeten numerischen Fortschrittsfaktoren werden in Abschnitt 4.4.2 hergeleitet und sind dort nachvollziehbar dokumentiert.

Die daraus resultierenden Modal-Split-Werte für das Jahr 2035 sind in Tabelle 3.3 dargestellt.

Tabelle 3.3.: Modal Split im Jahr 2035 (mit Aufteilung des MIV in elektrisch vs. fossil)

Verkehrsmittel / Teilmenge	Share (%)	Trips (Tsd. pro Tag)
Berlin – <i>EV</i>'35		
Fußverkehr	30	3 787
ÖPNV	28	3 586
Fahrrad	18	2 257
MIV (gesamt)	25	3 155
davon: MIV elektrisch	9	1 207
davon: MIV fossil	15	1 948
Berlin – <i>EV&ZEZ</i>'35		
Fußverkehr	30	3 810
ÖPNV	30	3 789
Fahrrad	19	2 371
MIV (gesamt)	22	2 815
davon: MIV elektrisch	13	1 625
davon: MIV fossil	9	1 190
Personen mit Wohnsitz in ZEZ – <i>EV&ZEZ</i>'35		
Fußverkehr	29	1 045
ÖPNV	37	1 339
Fahrrad	24	863
MIV (gesamt)	11	410
davon: MIV elektrisch	11	400
davon: MIV fossil	0	10

3.4. Kostensensitivität der E-Mobilität

Zur Analyse der Kostensensitivität wird neben der bisher verwendeten Absenkung der variablen Kosten von E-FZe auf 80% auch eine schwächere Absenkung auf 95% betrachtet.

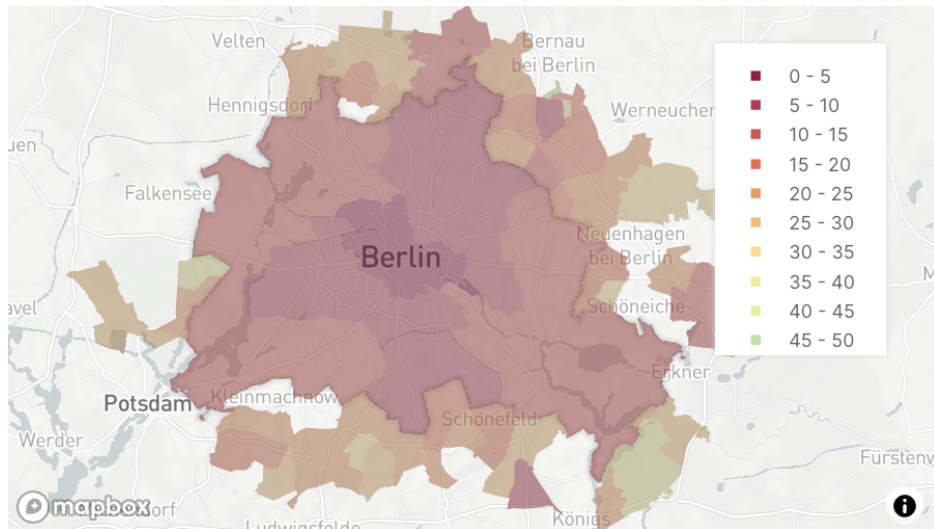
Die Reduktion der variablen Kosten von Elektrofahrzeugen führt zu einer deutlichen Verschiebung innerhalb des PKW-Segments: Der Anteil elektrisch betriebener Pkw-Fahrten steigt von 6,48 % auf 14,3 % (7,82 % Prozentpunkte), während der Anteil fossiler PKW-Fahrten entsprechend von 18,96 % auf 11,5 % zurückgeht (–7,46 % Prozentpunkte).

Darüber hinaus erhöht sich der aggregierte PKW-Anteil von 25,44 % auf 25,81 % (0,37 % Prozentpunkte), während der Anteil des öffentlichen Verkehrs leicht abnimmt. Dies deutet darauf hin, dass Kostensenkungen für Elektrofahrzeuge ohne zusätzliche restriktive Maßnahmen nicht nur die Antriebswahl beeinflussen, sondern auch einen moderaten Rebound-Effekt in der Automobilnutzung auslösen.

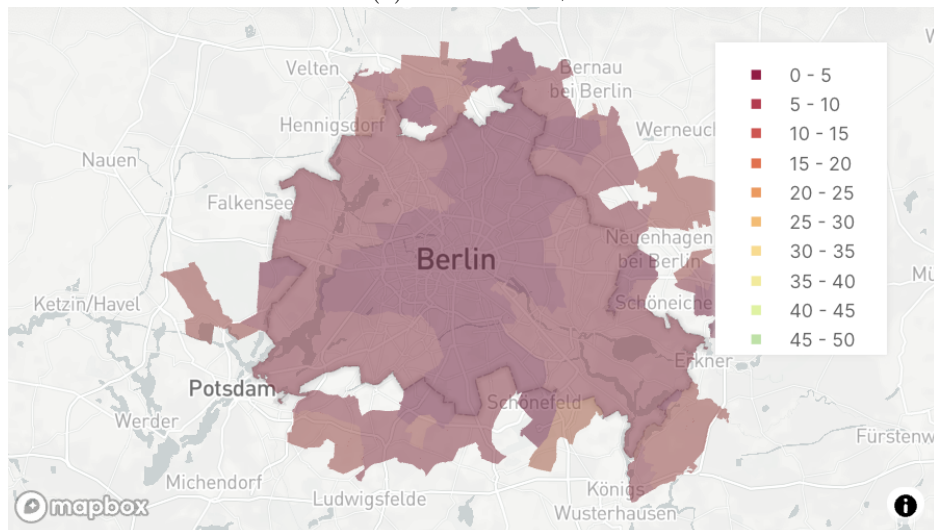
In den Abbildungen 3.6b und 3.6a wird der Unterschied in der räumlichen Verteilung des Anteils der Fahrten mit Elektrofahrzeugen in Abhängigkeit vom Kostenfaktor dargestellt.

Aus den Kartogrammen in 3.6 wird ersichtlich, dass eine Senkung der Kosten pro Kilometer insbesondere in peripheren Gebieten einen stärkeren Effekt hat, was vor allem mit den dort längeren durchschnittlichen Wegdistanzen zusammenhängt.

Nicht berücksichtigt wird in der Simulation, dass in den Außenbezirken oft auch (deutlich) preiswertere Möglichkeiten zur Senkung der Ladekosten bestehen, z.B. durch



(a) Kostenfaktor 0,8



(b) Kostenfaktor 0,95

Abbildung 3.6.: Räumliche Verteilung des Anteils von Fahrten mit Elektrofahrzeugen am gesamten Modal-Split. Ein Wert von 25 bedeutet z.B., dass in der entsprechenden Zone 25% der Wege mit Elektrofahrzeugen zurückgelegt werden.

Tabelle 3.4.: Modal-Split-Anteile für MIV- und ÖPNV-Fahrten in *EVrelaxiert*

Szenario	MIV (elektrisch) (%)	MIV (fossil) (%)	MIV (gesamt) (%)	ÖPNV (%)
Allgemeines Szenario				
Kostenfaktor 0,95	6,48	18,96	25,44	27,37
Kostenfaktor 0,8	14,30	11,50	25,81	27,23
Berlin				
Kostenfaktor 0,95	6,20	18,12	24,32	28,18
Kostenfaktor 0,8	13,35	11,33	24,68	28,05
ZEZ				
Kostenfaktor 0,95	3,78	12,04	15,82	34,15
Kostenfaktor 0,8	7,33	8,72	16,05	34,18

Heimladen sowie durch die Nutzung von Photovoltaikanlagen zur Eigenstromerzeugung. Die Simulation selber könnte dies im Prinzip berücksichtigen, allerdings müssten die entsprechenden (Landnutzungs-)Daten vorher analysiert und aufbereitet werden.

4. Arbeitspaket 1: Effekte auf CO₂-Emissionen im Verkehrsbereich

4.1. Modellierung von Verkehrsemissionen in MATSim

In MATSim ist die Modellierung von Schadstoffemissionen als eigenständiges Modul (*emissions contrib*) implementiert, das eine Abschätzung verkehrsbedingter Emissionen auf Grundlage der Ergebnisse der Verkehrssimulation ermöglicht. Der Ansatz von MATSim zur Emissionsberechnung ist *exogen zur Verkehrsdynamik*: Die Emissionen beeinflussen weder das Verhalten der Agenten noch den Ablauf der Simulation, sondern werden nachgelagert auf Basis der simulierten Verkehrsnachfrage berechnet.

Das Grundprinzip besteht darin, die von Fahrzeugen auf den Elementen des Straßennetzes zurückgelegten Distanzen mit geeigneten Emissionsfaktoren aus externen Datenquellen zu verknüpfen. Auf diese Weise stellt das Emissionsmodul eine Verbindung zwischen der mikroskopischen Simulation von Verkehrsabläufen und der makroskopischen Bewertung umweltbezogener Wirkungen her.

4.1.1. Allgemeines Konzept und Eingangsdaten

MATSim modelliert die Bewegungen der Agenten auf einem Straßennetz, das als gerichteter Graph aus Knoten und Kanten (*links*) dargestellt ist. Während der Durchführung der Verkehrssimulation wird eine Ereignisdatei (*events file*) erzeugt, in der unter anderem die Ereignisse des Einfahrens eines Fahrzeugs auf ein Netzlink sowie des Verlassens dieses Links gespeichert werden. Diese Ereignisse enthalten Informationen über den Zeitpunkt, die Fahrzeug-ID und die Link-ID.

Das Emissionsmodul nutzt diese Ereignisse als zentrale Datenquelle. Für jede Durchfahung eines Links sind dessen Länge sowie die tatsächlich benötigte Fahrzeit bekannt, wodurch die mittlere Geschwindigkeit des Fahrzeugs auf diesem Link bestimmt werden kann. Diese Geschwindigkeit dient als Grundlage für die Klassifikation der Verkehrssituation, die für die Auswahl geeigneter Emissionsfaktoren erforderlich ist.

Zusätzlich ist eine Beschreibung der Fahrzeugeigenschaften notwendig. Jedem Fahrzeug kann in MATSim ein Fahrzeugtyp zugewiesen werden, der die für die Emissionsberechnung relevanten Parameter enthält, wie Fahrzeugkategorie, Kraftstoffart und Emissionsstandard (Euro-Klasse). Diese Eigenschaften werden in der Konfiguration oder in Eingabedateien festgelegt und bleiben während der Simulation unverändert.

4.1.2. Verwendung der Emissionsfaktoren aus HBEFA

Die Emissionsberechnung in MATSim basiert auf Emissionsfaktoren aus der Handbook Emission Factors for Road Transport (HBEFA). HBEFA stellt durchschnittliche Emissionswerte in Gramm pro Kilometer für verschiedene Kombinationen aus

- Fahrzeugkategorie,
- Kraftstoffart und Emissionsstandard,

- Verkehrssituation, charakterisiert durch Geschwindigkeitsbereiche, zur Verfügung.

Die Emissionsfaktoren in MATSim hängen somit nicht von einzelnen Beschleunigungs- oder Verzögerungsvorgängen ab, sondern von der *mittleren Geschwindigkeit auf einem Link*, was dem aggregierten Charakter der HBEFA-Daten entspricht. MATSim führt keine physikalische Modellierung von Motor- oder Verbrennungsprozessen durch, sondern verwendet statistisch gemittelte Kennwerte.

4.1.3. Ablauf der Emissionsberechnung

Die Berechnung der Emissionen erfolgt im Rahmen der Nachverarbeitung der Simulationsergebnisse oder während deren sequenzieller Verarbeitung. Für jede Linkdurchführung werden die folgenden Schritte durchgeführt:

1. **Bestimmung der mittleren Geschwindigkeit**

Die mittlere Geschwindigkeit wird als Quotient aus der Linklänge und der für die Durchführung benötigten Zeit berechnet.

2. **Klassifikation der Verkehrssituation**

Die ermittelte Geschwindigkeit wird den in HBEFA definierten Verkehrssituationsklassen (z. B. freier Verkehrsfluss, gesättigter Verkehr) zugeordnet. Diese Klassifikation ist diskret und basiert auf vorgegebenen Geschwindigkeitsschwellen.

3. **Auswahl der Emissionsfaktoren**

Auf Grundlage der Fahrzeugeigenschaften und der identifizierten Verkehrssituation werden die entsprechenden Emissionsfaktoren für jede Schadstoffkomponente aus den HBEFA-Tabellen ausgewählt.

4. **Berechnung der linkbezogenen Emissionen**

Die Emissionen werden als Produkt aus Emissionsfaktor (g/km) und Linklänge (km) berechnet. Die Berechnung erfolgt getrennt für jede Schadstoffart.

Das Ergebnis ist eine quantitative Abschätzung der Emissionen, die einer konkreten Linkdurchführung eines bestimmten Fahrzeugs zugeordnet ist.

4.1.4. Kalte und warme Emissionen

Das Emissionsmodul unterscheidet zwischen Emissionen bei betriebswarmem Motor (*warm emissions*) und Emissionen beim Kaltstart (*cold-start emissions*). Kaltstartemissionen werden für die Anfangsphase einer Fahrt berücksichtigt, in der der Motor seine Betriebstemperatur noch nicht erreicht hat. Hierzu werden Informationen über den Beginn der Fahrt sowie über die mit kaltem Motor zurückgelegte Wegstrecke verwendet, entsprechend der Methodik von HBEFA.

MATSim modelliert den Erwärmungsprozess des Motors nicht explizit; Kaltstartemissionen werden vielmehr als additive Korrektur zu den warmen Emissionen auf Basis vordefinierter Parameter berücksichtigt.

4.1.5. Aggregation und Ausgabedaten

Die berechneten Emissionen können entlang verschiedener Dimensionen aggregiert werden:

1. nach Netzkanten,
2. nach Zeitintervallen,
3. nach Schadstoffarten,
4. nach Fahrzeugkategorien.

Die Ausgabedaten liegen in der Regel als Emissionsereignisse oder als aggregierte Tabellen vor und können für weiterführende Analysen, Visualisierungen oder die Kopplung mit externen Luftqualitätsmodellen genutzt werden. MATSim selbst beschränkt sich dabei auf die Berechnung von Emissionsmengen und modelliert weder die Ausbreitung der Schadstoffe noch deren gesundheitliche Wirkungen.

4.1.6. Einschränkungen des Ansatzes

Der Emissionsansatz in MATSim ist als *anwendungsorientiertes Bewertungsinstrument* zu verstehen. Die Genauigkeit der Ergebnisse hängt maßgeblich von der Qualität der verwendeten Emissionsfaktoren sowie von der Repräsentativität der simulierten Geschwindigkeiten für reale Verkehrsbedingungen ab. Die detaillierte Fahrdynamik auf Ebene einzelner Beschleunigungs- und Bremsvorgänge wird nicht berücksichtigt, ebenso wenig wie die Berechnung lokaler Schadstoffkonzentrationen.

4.2. Parameter des Fahrzeugbestands und der Straßeninfrastruktur für die Durchführung der Emissionssimulation

Die Berechnung verkehrsbedingter Emissionen in MATSim auf Basis der HBEFA-Methodik erfordert eine konsistente Parametrisierung sowohl des im Modell abgebildeten Fahrzeugbestands als auch der Eigenschaften der Straßeninfrastruktur. Diese Parameter bilden die zentrale Schnittstelle zwischen der Verkehrssimulation und der Emissionsbewertung.

4.2.1. Parametrisierung des Fahrzeugbestands

Für die Anwendung der HBEFA-Methodik werden ausschließlich jene Fahrzeugtypen berücksichtigt, für die eine eindeutige Zuordnung zu den HBEFA-Emissionsparametern möglich ist. In MATSim erfolgt diese Zuordnung über fahrzeugspezifische Attribute, die jedem Fahrzeugtyp fest zugewiesen werden. Dazu gehören insbesondere:

- `HbfaEmissionsConcept`,
- `HbfaSizeClass`,
- `HbfaTechnology`,
- `HbfaVehicleCategory`.

Nur Fahrzeugtypen, für die diese Attribute vollständig definiert sind und die einer in HBEFA enthaltenen Fahrzeugkategorie entsprechen, werden in der Emissionsberechnung berücksichtigt. Fahrzeugtypen, die explizit der Kategorie `NON_HBEFA_VEHICLE` zugeordnet sind oder für die keine HBEFA-Parameter definiert sind, gehen nicht in die Emissionsberechnung nach der HBEFA-Methodik ein. Dies betrifft insbesondere

elektrisch betriebene Fahrzeuge, für die in der verwendeten HBEFA-Version keine direkten Emissionsfaktoren für den Fahrbetrieb definiert sind.

Die Zuordnung der im Modell verwendeten Fahrzeugtypen zu den entsprechenden HBEFA-Parametern ist in Tabelle 4.1 dargestellt und stellt die Grundlage für die konsistente Berechnung der Emissionen im Simulationsmodell dar.

Tabelle 4.1.: HBEFA-Parameter der verwendeten Fahrzeugtypen

Vehicle ID	Type	Hbefa Emissions Concept	Hbefa Size Class	Hbefa Vehicle Category
car		petrol (4S)	average	PASSENGER_CAR
electric_car		electric	–	NON_HBEFA_VEHICLE
electric_freight		electric	–	NON_HBEFA_VEHICLE
electric_ride		electric	–	NON_HBEFA_VEHICLE
electric_truck		electric	–	NON_HBEFA_VEHICLE
freight		diesel	average	HEAVY_GOODS_VEHICLE
golf1.4		petrol (4S)	average	PASSENGER_CAR
heavy40t		diesel	average	HEAVY_GOODS_VEHICLE
light8t		diesel	average	LIGHT_COMMERCIAL_VEHICLE
medium18t		diesel	average	HEAVY_GOODS_VEHICLE
mercedes313		diesel	average	LIGHT_COMMERCIAL_VEHICLE
vwCaddy		diesel	average	PASSENGER_CAR

4.2.2. Berücksichtigung der Straßeninfrastruktur und Verkehrszustände

Neben der Parametrisierung des Fahrzeugbestands ist die Beschreibung der Straßeninfrastruktur von zentraler Bedeutung für die Emissionsberechnung. Das Straßennetz wird in MATSim durch gerichtete Netzwerkelemente (*Links*) repräsentiert, denen unter anderem eine Länge sowie eine zulässige Geschwindigkeit zugewiesen sind. Während der Simulation werden für jedes Fahrzeug und jeden Link-Durchlauf die tatsächlich benötigte Fahrzeit und die zurückgelegte Strecke erfasst.

Auf Grundlage dieser Informationen wird für jeden einzelnen Link-Durchlauf eine mittlere Geschwindigkeit bestimmt. Diese mittlere Geschwindigkeit bildet die Basis für die Zuordnung einer Verkehrssituation gemäß der HBEFA-Klassifikation. Eine explizite Modellierung einzelner Fahrdynamiken auf Sub-Link-Ebene erfolgt dabei nicht.

Die für die Emissionsberechnung relevanten Parameter der Straßeninfrastruktur, einschließlich der Klassifikation der Straßentypen und der zugehörigen Geschwindigkeitsniveaus, sind in Tabelle 4.2 zusammengefasst.

4.2.3. Berechnung und Aggregation der Emissionen

Die Emissionsberechnung erfolgt auf Ebene einzelner Fahrzeugdurchfahrten von Netzwerkelementen als Produkt aus der Länge des befahrenen Links und dem zugeordneten Emissionsfaktor. Die Berechnung wird ausschließlich für jene Fahrzeugbewegungen durchgeführt, die innerhalb des Stadtgebiets von Berlin stattfinden.

Die resultierenden Emissionswerte werden nach Verkehrstypen aggregiert. Dabei werden die folgenden Kategorien unterschieden:

Tabelle 4.2.: Parameter der Straßeninfrastruktur für die Emissionsberechnung

Straßentyp	Raumtyp	Funktion	V_{max} [km/h]
cycleway	URB	Access	30
living_street	URB	Access	30, 50
path	URB	Access	30
service	URB	Access	30
residential	URB	Access	30, 40, 50
unclassified	URB	Access	30, 40, 50
secondary	URB	Distr	50, 60, 70, 80
secondary_link	URB	Distr	50, 80
tertiary	URB	Local	50, 60
unclassified	URB	Local	60
primary	URB	Trunk-City	50, 60, 70, 80
primary_link	URB	Trunk-City	50, 60, 70
trunk	URB	Trunk-City	50, 60, 70, 80
trunk_link	URB	Trunk-City	50, 60, 70, 80
unclassified	URB	Trunk-City	80
primary	URB	Trunk-Nat.	90, 100, 110
primary_link	URB	Trunk-Nat.	100
motorway	URB	MW-Nat.	80, 100, 120, 130
motorway_link	URB	MW-Nat.	80, 100, 120, 130
unclassified	URB	MW-Nat.	100

- car,
- truck,
- freight.

Die Aggregation erfolgt getrennt nach diesen Verkehrstypen und ermöglicht eine differenzierte Analyse der emissionsrelevanten Beiträge einzelner Verkehrssegmente innerhalb des Untersuchungsgebiets.

4.3. Einordnung in bestehende Klimaschutzziele

Abstimmung und Erweiterung zur MAUS-Studie. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde die MAUS-Studie (*Maßnahmenorientiertes Umwelt-, Luftschadstoff- und Klima-Qualitätsmanagement im Straßenverkehr Berlins*) berücksichtigt, wie sie im Juni 2025 durch die VMZ Berlin vorgestellt wurde. Ziel des Projekts MAUS ist der Aufbau eines integrierten digitalen Zwillings von Verkehr und Umwelt für den straßengebundenen Verkehr im Land Berlin. Dieser digitale Zwilling soll als Grundlage für das Monitoring, die Analyse sowie die Bewertung verkehrs- und umweltrelevanter Maßnahmen dienen.

Die Studie ist konzeptionell auf ein makroskopisches, hochaggregiertes Verkehrsmodell ausgerichtet. Die verkehrliche Modellierung erfolgt für mehrere Jahresscheiben im Zeitraum von 2019 bis 2030 und dient insbesondere der strategischen Bewertung unterschiedlicher verkehrspolitischer Szenarien, wie beispielsweise Kiezblocks, Umweltzonen, City-Maut, Parkraumbewirtschaftung, Maßnahmen des großräumigen Verkehrsmanagements sowie der Förderung des Umweltverbundes. Als Modellierungsumgebung kommt die Software *PTV Visum* zum Einsatz, womit der Fokus der Studie auf

übergeordneten, strategischen Fragestellungen und vergleichenden Szenarioanalysen liegt.

Ergänzend zur verkehrlichen Modellierung umfasst die MAUS-Studie ein Umweltmodul zur Berechnung strecken- und abschnittsbezogener Emissionen und Immissionen (u. a. PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$, NO_2 und CO_2). Dabei werden benutzerdefinierte Flottenzusammensetzungen sowie meteorologische Randbedingungen berücksichtigt. Die Ergebnisse sollen aggregiert ausgewertet und über geeignete Visualisierungs- und Reportinginstrumente bereitgestellt werden.

Zum Zeitpunkt der Erstellung des vorliegenden Berichts befindet sich die MAUS-Studie noch in der Umsetzungsphase und ist noch nicht abgeschlossen. Eine Validierung, detaillierte Überprüfung oder inhaltliche Fortschreibung der in der MAUS-Studie vorgesehenen Ergebnisse ist daher derzeit nicht möglich. Die in dieser Arbeit hergestellten Bezüge zur MAUS-Studie basieren ausschließlich auf den zum Berichtszeitpunkt verfügbaren Präsentationsunterlagen und besitzen entsprechend einen vorläufigen Charakter.

4.4. Ergebnisse der Emissionsanalyse

Die Ergebnisse der Szenarien im relaxierten Zustand eignen sich nicht direkt zur Bewertung der Emissionsänderungen durch die Einführung der ZEZ. Der relaxierte Zustand beschreibt einen langfristigen Endzustand des Systems, während diese Untersuchung die Situation im Einführungsjahr 2035 betrachtet. Das Jahr 2035 ist damit das zentrale Bezugsjahr der Analyse.

Um die Modellierungsergebnisse auf 2035 zu übertragen, werden die Werte aus dem relaxierten Zustand auf das Jahr 2035 skaliert. Dies erfolgt über Korrekturfaktoren (aus der Diffusionskurve), die Aggregation der Fahrten in vordefinierte Fahrtgruppen sowie zusätzliche Annahmen, die im Folgenden erläutert werden.

4.4.1. Annahmen für die Analyse

Die folgenden Annahmen wurden für die Analyse in diesem Abschnitt getroffen:

- Die Emissionen (z. B. CO_2 , NO_x , PM) werden fahrtenbasiert ausgewertet, d. h. für jede einzelne Fahrt von Start- zu Zielpunkt berechnet und anschließend aggregiert.
- Die Aggregation der Emissionsdaten erfolgt nicht nach dem Wohnort der Agenten, sondern anhand der Start- und Zielpunkte der Fahrten. Damit werden insbesondere Fahrten berücksichtigt, die zwar außerhalb der ZEZ starten oder enden, aber in die ZEZ hineinführen (oder umgekehrt) und somit von den ZEZ-Regeln betroffen sind. Für jedes Szenario werden drei Fahrtgruppen unterschieden:
 - Fahrten des privaten PKW-Verkehrs von/nach/innerhalb der ZEZ (Fahrtgruppe A),
 - Fahrten des privaten PKW-Verkehrs von/nach/innerhalb von Berlin unter Ausschluss der ZEZ (Fahrtgruppe B),
 - Fahrten des privaten PKW-Verkehrs von/nach/innerhalb von Berlin insgesamt (Fahrtgruppe C).

Fahrtgruppe C entspricht der Gesamtheit aller Fahrten mit Start/Ziel in Berlin und ist damit die Vereinigung der Fahrtgruppen A und B, d. h. $C = A \cup B$ bzw. $C = A + B$ in der Aggregation.

- Fahrten, die außerhalb Berlins beginnen und außerhalb Berlins enden, werden aus der Analyse ausgeschlossen. Der Fokus liegt auf der Abschätzung der Emissionsdifferenz durch die Einführung der ZEZ innerhalb Berlins. Eine Plausibilitätsprüfung anhand beispielhafter Routen zeigt zudem, dass solche Fahrten typischerweise nicht durch das ZEZ-Gebiet führen.
- Fahrten, die das ZEZ-Gebiet queren könnten, ohne dass Start- oder Zielpunkt innerhalb der ZEZ liegt (z. B. Durchgangsfahrten innerhalb Berlins), werden nicht der Fahrtgruppe Fahrten des privaten PKW-Verkehrs von/nach/innerhalb der ZEZ (Fahrtgruppe A) zugeordnet, sondern der Fahrtgruppe Fahrten des privaten PKW-Verkehrs von/nach/innerhalb von Berlin unter Ausschluss der ZEZ (Fahrtgruppe B). Diese Annahme ist konservativ und kann den positiven Effekt der ZEZ leicht unterschätzen.
- Die Emissionen einer Fahrt werden in voller Länge berücksichtigt, auch wenn Teile der Route außerhalb der administrativen Stadtgrenzen Berlins liegen. Dies stellt eine konsistente, fahrtenbasierte Bilanzierung sicher; zudem ist der Anteil sehr langer Fahrten (z. B. > 40 km) klein, sodass die potenzielle Verzerrung für den Vergleich der Szenarien begrenzt ist.
- Zur Abbildung der Marktdiffusion von Elektrofahrzeugen wird je nach Szenario eine unterschiedliche Elektrifizierungsdynamik angenommen:
 - Szenario ***EV&ZEZ'35***: Für die Fahrtgruppe Fahrten des privaten PKW-Verkehrs von/nach/innerhalb der ZEZ (Fahrtgruppe A) wird angenommen, dass die Fahrten im Jahr 2035 vollständig elektrisch durchgeführt werden. Für die Fahrtgruppe Fahrten des privaten PKW-Verkehrs von/nach/innerhalb von Berlin unter Ausschluss der ZEZ (Fahrtgruppe B) wird ein Adoptionsniveau gemäß der Diffusionskurve für die Berliner Einwohner angesetzt.
 - Szenario ***EV'35***: Für alle Fahrten in Berlin (Fahrten des privaten PKW-Verkehrs von/nach/innerhalb von Berlin insgesamt (Fahrtgruppe C)) wird ein einheitliches Adoptionsniveau gemäß der Diffusionskurve für die Berliner Einwohner im Jahr 2035 angesetzt.
- Für beide Diffusionskurven wird derselbe Adoptionsparameter r verwendet. Unterschiede im Technologieadoptionsgrad im Jahr 2035 ergeben sich damit aus der angenommenen Elektrifizierungsdynamik und nicht aus unterschiedlichen r -Werten. Unterschiede für Personen, die regelmäßig in Berlin fahren, aber außerhalb wohnen, werden in dieser Auswertung vernachlässigt.

4.4.2. Berechnung der Anpassungsfaktoren und Skalierung der Modellierungsergebnisse

Für die Bewertung der Wirkungen im Einführungsjahr 2035 werden die modellierten Endzustände der Szenarien *EVrelaxiert* und *EV&ZEZrelaxiert* auf das Jahr 2035

zurückskaliert. Dazu wird ein faktorbasiertes Verfahren verwendet, das auf den zuvor kalibrierten Diffusionskurven basiert.

Hier und im Folgenden werden die Diffusionskurven als Indizes interpretiert: Die grüne Kurve beschreibt den Index der Elektrifizierung relativ zum Basisjahr 2023 (Index 2023 = 1). Praktisch entspricht dies dem Verhältnis eines Elektrifizierungsniveaus (z. B. EV-Fahrten bzw. EV-Anteil gemäß der im Kurvenkapitel verwendeten Definition) zum entsprechenden Niveau im Jahr 2023.

Fortschrittsfaktor bis 2035. Für jedes Endzustandsszenario $s \in \{EVrelaxiert, EV\&ZEZrelaxiert\}$ wird ein Fortschrittsfaktor definiert, der angibt, welcher Anteil des Übergangs vom Basisjahr 2023 bis zum Endzustand des Szenarios bis 2035 erreicht ist. Da sich die Werte je nach Fahrtgruppe unterscheiden, verwenden wir die Notation $I_{t,g}^s$ bzw. $p_{t,g}^s$, wobei t das Jahr und $g \in \{A, B, C\}$ die Fahrtgruppe bezeichnet:

$$p_{2035,g}^s = \frac{I_{2035,g}^s}{I_{\text{End},g}^s}.$$

Dabei ist $I_{2035,g}^s$ der aus der Diffusionskurve abgelesene Indexwert im Jahr 2035 und $I_{\text{End},g}^s$ der asymptotische Zielwert (Endzustand) derselben Kurve (jeweils für Szenario s und Fahrtgruppe g).

Skalierung beliebiger Kenngrößen. Für eine beliebige Kenngröße X (z. B. Emissionen, Kostenkomponenten, Fahrtenmengen) wird der Wert im Jahr 2035 als lineare Interpolation zwischen dem Basisjahr 2023 und dem Endzustand des jeweiligen Szenarios bestimmt:

$$X_{2035,g}^s = X_{2023,g} + p_{2035,g}^s \cdot (X_{\text{End},g}^s - X_{2023,g}).$$

Damit gilt: bei $p_{2035,g}^s = 0$ folgt $X_{2035,g}^s = X_{2023,g}$, bei $p_{2035,g}^s = 1$ folgt $X_{2035,g}^s = X_{\text{End},g}^s$. Falls X nicht fahrtgruppenspezifisch ausgewertet wird, kann der Index g entsprechend weggelassen werden.

Fahrtgruppen und Zuordnung zu Szenarien. Für die Emissionsauswertung werden die Fahrten nach Start- und Zielbezug (statt Wohnort) in drei Fahrtgruppen eingeteilt (siehe Abschnitt 4.4.1):

- Fahrten des privaten PKW-Verkehrs von/nach/innerhalb der ZEZ (Fahrtgruppe A)
- Fahrten des privaten PKW-Verkehrs von/nach/innerhalb von Berlin unter Ausschluss der ZEZ (Fahrtgruppe B),
- Fahrten des privaten PKW-Verkehrs von/nach/innerhalb von Berlin insgesamt (Fahrtgruppe C). Diese Gruppe entspricht per Definition der Summe aus A und B.

Die Fortschrittsfaktoren $p_{2035,g}^s$ werden je nach Szenario und Fahrtgruppe wie folgt festgelegt:

- *EV'35*:
 - Fahrten des privaten PKW-Verkehrs von/nach/innerhalb von Berlin insgesamt (Fahrtgruppe C): Der Fortschritt wird aus der gesamtstädtischen Diffusionskurve ohne Unterscheidung nach Wohnsitz abgeleitet, d. h. es wird der Quotient $I_{2035,C}^{EVrelaxiert} / I_{\text{End},C}^{EVrelaxiert}$ aus Abbildung 3.2 gebildet.

- *EV&ZEZ'35*:
 - Fahrten des privaten PKW-Verkehrs von/nach/innerhalb der ZEZ (Fahrgruppe A): Für 2035 wird ein vollständiger Umstieg innerhalb der ZEZ angenommen, d. h. $p_{2035,A}^{EV\&ZEZrelaxiert} = 1$.
 - Fahrten des privaten PKW-Verkehrs von/nach/innerhalb von Berlin unter Ausschluss der ZEZ (Fahrgruppe B): Der Fortschritt wird aus der Diffusionskurve der Einwohner mit Wohnsitz außerhalb der ZEZ abgeleitet, d. h. es wird der Quotient $I_{2035,B}^{EV\&ZEZrelaxiert} / I_{End,B}^{EV\&ZEZrelaxiert}$ aus Abbildung 3.4 gebildet.

Numerische Ableitung der Faktoren aus den Diffusionskurven. Für *EVrelaxiert* wird aus Abbildung 3.4 abgelesen:

$$I_{2035,B}^{EV\&ZEZrelaxiert} \approx 0,48, \quad I_{End,B}^{EV\&ZEZrelaxiert} \approx 0,63,$$

woraus folgt:

$$p_{2035,B}^{EV\&ZEZrelaxiert} = \frac{I_{2035,B}^{EV\&ZEZrelaxiert}}{I_{End,B}^{EV\&ZEZrelaxiert}} = \frac{0,48}{0,63} = 76,39\%.$$

Für *EVrelaxiert* (Fahrgruppe C) wird aus Abbildung 3.2 abgelesen:

$$I_{2035,C}^{EVrelaxiert} \approx 0,41, \quad I_{End,C}^{EVrelaxiert} \approx 0,58,$$

woraus folgt:

$$p_{2035,C}^{EVrelaxiert} = \frac{I_{2035,C}^{EVrelaxiert}}{I_{End,C}^{EVrelaxiert}} = \frac{0,41}{0,58} = 70,7\%.$$

Übersicht der Technologieadoptionsgrade in 2035. Die so abgeleiteten Fortschrittsfaktoren sind in Tabelle 4.3 zusammengefasst.

Tabelle 4.3.: Fortschrittsfaktoren $p_{2035,g}^s$ nach Fahrgruppen in den betrachteten Szenarien. Die Fortschrittsfaktoren geben an, wie weit die ‘freiwillige’ Elektrifizierung bis 2035 für die jeweiligen Fahrgruppen fortgeschritten ist.

Szenario (Endzustand)	$p_{2035,A}$	$p_{2035,B}$	$p_{2035,C}$
<i>EV&ZEZrelaxiert</i>	100,0%	76,39%	–
<i>EVrelaxiert</i>	–	–	70,7%

Interpretation für die 2035-Szenarien. Für *EV&ZEZ'35* wird damit angenommen, dass Fahrten mit Bezug zur ZEZ (Fahrgruppe A) bereits im Einführungsjahr 2035 vollständig elektrisch erfolgen. Für Fahrten in Berlin außerhalb der ZEZ (Fahrgruppe B) ergibt sich ein Adoptionsniveau gemäß 76,39% . Für *EV'35* wird für alle Fahrten innerhalb Berlins (Fahrgruppe C) ein einheitliches Adoptionsniveau gemäß 70,7% angesetzt.

4.4.3. PKW für den privaten Verkehr im relaxierten Zustand (*EVrelaxiert* und *EV&ZEZrelaxiert*)

Die Ergebnisse der Emissionsmengen im Szenario des relaxierten Zustands werden in Tabelle 4.4, Tabelle 4.5 und Tabelle 4.6 dargestellt. Dabei wird zwischen Fahrten innerhalb der ZEZ und solchen außerhalb unterschieden, da sich die Emissionsprofile in diesen beiden Bereichen deutlich unterscheiden. Diese Differenzierung ist notwendig, um die unterschiedlichen Ausgangsbedingungen für die spätere Anpassung an das Zieljahr 2035 korrekt abzubilden.

Tabelle 4.4.: Emissionen für Fahrten des privaten PKW-Verkehrs von/nach/innerhalb von Berlin insgesamt (Fahrgruppe C) pro Tag

	<i>Baseline</i>	<i>EV&ZEZrelaxiert</i>	<i>EVrelaxiert</i>
CO ₂ [t]	5065,62	1292,10	2028,04
NO _x [t]	13,13	3,36	5,17
PM [t]	0,12	0,03	0,05
CO [t]	51,27	13,50	20,11
HC [t]	2,51	0,69	1,12
SO ₂ [t]	0,02	0,01	0,01

Tabelle 4.5.: Emissionen für Fahrten des privaten PKW-Verkehrs von/nach/innerhalb der ZEZ (Fahrgruppe A) pro Tag

	<i>Baseline</i>	<i>EV&ZEZrelaxiert</i>	<i>EVrelaxiert</i>
CO ₂ [t]	1331,20	67,50	674,06
NO _x [t]	3,35	0,18	1,68
PM [t]	0,03	0,00	0,02
CO [t]	12,41	0,72	6,18
HC [t]	0,66	0,02	0,36
SO ₂ [t]	0,01	0,00	0,00

Tabelle 4.6.: Emissionen für Fahrten des privaten PKW-Verkehrs von/nach/innerhalb von Berlin unter Ausschluss der ZEZ (Fahrgruppe B) pro Tag

	<i>Baseline</i>	<i>EV&ZEZrelaxiert</i>	<i>EVrelaxiert</i>
CO ₂ [t]	3734,41	1224,61	1353,98
NO _x [t]	9,78	3,18	3,49
PM [t]	0,09	0,03	0,03
CO [t]	38,86	12,79	13,94
HC [t]	1,85	0,67	0,76
SO ₂ [t]	0,02	0,01	0,01

4.4.4. Ergebnisse für private PKW im Jahr 2035 (*EV&ZEZ'35* und *EV'35*)

Die Methode zur Skalierung auf das Zieljahr 2035 ist im Unterabschnitt 4.4.2 ausführlich beschrieben. Die dafür verwendeten Umrechnungsfaktoren und ihre Werte sind in Tabelle 4.3 dargestellt.

Die daraus resultierenden Emissionsdaten unter Berücksichtigung der beschriebenen Methodik und Skalierungsfaktoren sind in Tabelle 4.7, Tabelle 4.9 und Tabelle 4.8 zusammengefasst.

Tabelle 4.7.: Emissionen für Fahrten des privaten PKW-Verkehrs von/nach/innerhalb von Berlin insgesamt (Fahrtgruppe C) im Jahr 2035 pro Tag

	<i>EV&ZEZ'35</i>	<i>EV'35</i>	Δ (ohne – mit)
CO ₂ [t]	1884,67	2918,05	1033,38
NO _x [t]	4,92	7,50	2,58
PM [t]	0,04	0,07	0,02
CO [t]	19,66	29,24	9,58
HC [t]	0,97	1,53	0,56
SO ₂ [t]	0,009	0,014	0,01

Tabelle 4.8.: Emissionen für Fahrten des privaten PKW-Verkehrs von/nach/innerhalb der ZEZ (Fahrtgruppe A) im Jahr 2035 pro Tag

	<i>EV&ZEZ'35</i>	<i>EV'35</i>	Δ (ohne – mit)
CO ₂ [t]	67,50	890,92	823,42
NO _x [t]	0,18	2,23	2,05
PM [t]	0,00	0,02	0,02
CO [t]	0,72	8,24	7,52
HC [t]	0,02	0,46	0,44
SO ₂ [t]	0,000	0,004	0,004

Tabelle 4.9.: Emissionen für Fahrten des privaten PKW-Verkehrs von/nach/innerhalb von Berlin unter Ausschluss der ZEZ (Fahrtgruppe B) im Jahr 2035 pro Tag

	<i>EV&ZEZ'35</i>	<i>EV'35</i>	Δ (ohne – mit)
CO ₂ [t]	1817,17	2051,44	234,27
NO _x [t]	4,74	5,33	0,60
PM [t]	0,04	0,05	0,01
CO [t]	18,94	21,24	2,30
HC [t]	0,95	1,08	0,13
SO ₂ [t]	0,009	0,010	0,001

4.4.5. Kommerzieller PKW-Verkehr im relaxierten Zustand

Die Daten zum kommerzielle PKW, sind in der Tabelle 4.10 dargestellt.

4.4.6. Ergebnisse für kommerzieller PKW im Jahr 2035

Die Skalierung der Werte für kommerzielle PKWs erfolgt analog zum Vorgehen in Unterabschnitt 4.4.4. Die Berechnungsergebnisse sind in Tabelle 4.11 dargestellt.

Tabelle 4.10.: Emissionen für kommerziellen PKW mit Fahrten von/nach/innerhalb Berlin pro Tag

	<i>Baseline</i>	<i>EV&ZEEZrelaxiert</i>	<i>EVrelaxiert</i>
CO ₂ [t]	4447,22	892,49	1425,75
NO _x [t]	11,58	2,18	3,27
PM [t]	0,14	0,03	0,04
CO [t]	47,06	10,53	17,11
HC [t]	1,12	0,20	0,43
SO ₂ [t]	0,02	0,00	0,01

Tabelle 4.11.: Emissionen für kommerziellen PKW mit Fahrten von/nach/innerhalb Berlin im Jahr 2035 pro Tag

	<i>EV&ZEEZ'35</i>	<i>EV'35</i>	Δ (ohne – mit)
CO ₂ [t]	1455,91	2311,04	855,14
NO _x [t]	3,78	5,71	1,93
PM [t]	0,05	0,07	0,03
CO [t]	16,11	25,89	9,78
HC [t]	0,32	0,64	0,31
SO ₂ [t]	0,007	0,011	0,00

4.4.7. LKW-Verkehr im relaxierten Zustand

Für den LKW-Verkehr werden im Folgenden die Ergebnisse für die Unendlich-Szenarien dargestellt (Tabelle 4.12).

Tabelle 4.12.: Emissionen für kommerziellen LKW-Verkehr mit Fahrten von/nach/innerhalb Berlin pro Tag

	<i>Baseline</i>	<i>EV&ZEEZrelaxiert</i>	<i>EVrelaxiert</i>
CO ₂ [t]	2172,28	600,14	1032,16
NO _x [t]	6,31	1,79	2,82
PM [t]	0,10	0,03	0,04
CO [t]	1,36	0,35	0,66
HC [t]	0,09	0,02	0,04
SO ₂ [t]	0,01	0,00	0,01

4.4.8. Ergebnisse für LKW-Verkehre im Jahr 2035

Die Überführung der Werte auf das Jahr 2035 erfolgt analog zum Vorgehen beim kommerziellen PKW-Verkehr. Die Ergebnisse dieser Umrechnung sind in der Tabelle 4.13 dargestellt.

Wie gegen Ende von Abschnitt 6.4 diskutiert, führt die Einführung der ZEEZ zu einem starken Rückgang der Anzahl von LKW innerhalb der ZEEZ und damit auch zu einer deutlichen Reduktion der Emissionen in diesem Bereich. Außerhalb der ZEEZ bleibt die Nutzung von LKW dagegen weitgehend auf dem Ausgangsniveau.

Tabelle 4.13.: Emissionen für kommerziellen LKW-Verkehr mit Fahrten von/nach/innerhalb Berlin im Jahr 2035 pro Tag

	<i>EV&ZEZ'35</i>	<i>EV'35</i>	Δ (ohne – mit)
CO ₂ [t]	841,72	1366,21	524,49
NO _x [t]	2,47	3,84	1,37
PM [t]	0,04	0,06	0,02
CO [t]	0,50	0,87	0,36
HC [t]	0,03	0,06	0,02
SO ₂ [t]	0,004	0,007	0,00

4.4.9. Gesamtergebnis

Die gesamte Veränderung über alle Emissionstypen und alle Verkehrsmittelarten ist in der Tabelle 4.14 dargestellt.

Tabelle 4.14.: Gesamte Emissionsänderung nach Verkehrsmittelarten pro Tag

	PKW-privat	PKW-kommerziell	LKW	Summe
CO ₂ [t]	1.033,38	855,14	524,49	2.413,01
NO _x [t]	2,58	1,93	1,37	5,89
PM [t]	0,02	0,03	0,02	0,07
CO [t]	9,58	9,78	0,36	19,72
HC [t]	0,56	0,31	0,02	0,9
SO ₂ [t]	0,01	0	0	0,01

4.5. Dashboards

Für die Analyse der Ergebnisse der Szenarien Baseline, EVrelaxiert und EV&ZEZrelaxiert wurden interaktive Dashboards bereitgestellt. Der Zugriff erfolgt aus Vertraulichkeitsgründen passwortgeschützt und wird auf Anfrage individuell vergeben. Eine Übersicht der verfügbaren Dashboards ist in Tabelle 4.15 dargestellt.

Um Zugriff zu erhalten, senden Sie bitte eine E-Mail von Ihrer dienstlichen E-Mail-Adresse mit dem Betreff *ZEZ-Zugriff* an zez@replan.city. Sie erhalten anschließend personalisierte Zugangsdaten sowie direkte Links zu den Dashboards. Die Zugangsdaten sind projektbezogen und können bei Bedarf widerrufen werden.

Tabelle 4.15.: Übersicht der Dashboards

Name des Dashboards	Szenarien	Anmerkung
Modal Split	<i>Baseline</i> <i>EVrelaxiert</i> (Distanzkosten: 0,8 / 0,95) <i>EV&ZEZrelaxiert</i> (Distanzkosten: 0,8 / 0,95)	Analyse der Verkehrsmittelaufteilung nach Bezirken. Wichtig: Im Modal-Split-Dashboard zuerst den Filter „District“ setzen, um doppelte Ergebnisse zu vermeiden.
Cost-Benefit-Analyse	Vergleich <i>EVrelaxiert</i> vs. <i>EV&ZEZrelaxiert</i>	Für die Subpopulation <i>person</i> verwenden.

5. Arbeitspaket 2: Enforcementregeln und Umsetzungsmechanismen

5.1. Einordnung und Grundannahme zum Vollzug

Für die ZEZ in Berlin wird im Folgenden ein kosteneffizienter Vollzugsansatz als Baseline zugrunde gelegt: Sichtkontrolle/Plakette in Kombination mit stichprobenartigen Kontrollen. Dieser Ansatz ist insbesondere dann naheliegend, wenn die ZEZ primär als ordnungsrechtliches Instrument ohne laufende Gebühren ausgestaltet wird und somit die laufenden Vollzugskosten möglichst gering gehalten werden sollen. Eine vollautomatisierte kamerabasierte Erfassung (ANPR) wird nicht als Standardannahme, sondern als Option B (hochautomatisiert) betrachtet. Sie kann als Eskalations- bzw. Ausbaupfad dienen, falls sich in der Praxis zeigt, dass die Compliance mit der Baseline-Variante nicht ausreicht oder falls zusätzliche Anforderungen (z. B. höhere Kontrollintensität, differenziertere Regeln, Skalierung) dies erfordern.

Die nachfolgenden Unterabschnitte beschreiben zunächst die Baseline-Variante (Option A) und anschließend die ANPR-Variante (Option B) als mögliche Erweiterung.

5.2. Vollzugsoptionen im Überblick

Im Bericht werden zwei Vollzugsoptionen unterschieden:

- **Option A (Baseline, kosteneffizient):** Sichtkontrolle/Plakette + stichprobenartige Kontrollen (mobil/stationär), unterstützt durch einfache digitale Prozesse (Registrierung, Ausnahmegenehmigungen, Stichprobenverwaltung).
- **Option B (Ausbau, hochautomatisiert):** ANPR-/kamerabasierte Erfassung mit automatisierter Prüfung, Back-Office-Prozessen, Bußgeld-/NPS-Anbindung, Auditierung und erweitertem Reporting.

5.3. Option A: Sichtkontrolle/Plakette und stichprobenartige Kontrollen

Die Baseline-Variante setzt auf eine **eindeutige Kennzeichnung zulässiger Fahrzeuge** (z. B. Plakette oder digitaler Berechtigungsnachweis) und auf **stichprobenartige Kontrollen** durch den Vollzugsdienst. Der Ansatz minimiert Investitionen in stationäre Erfassungstechnik und verlagert den Schwerpunkt auf klare Regeln, praxistaugliche Nachweise und effiziente Verwaltungsprozesse.

Status quo in Berlin: Umweltzone als praxiserprobter Vollzugsmechanismus
Berlin verfügt bereits über einen etablierten und praxiserprobten Vollzugsmechanismus im Rahmen der **Umweltzone** (Innenstadt innerhalb des inneren S-Bahn-Rings).¹ Zum

¹<https://www.berlin.de/sen/uvk/umwelt/luft/luftreinhaltung/umweltzone/>

Befahren der Umweltzone ist eine **grüne Plakette** (oder eine gültige Ausnahmegenehmigung) erforderlich.² Die Plakette ist sichtbar an der Windschutzscheibe anzubringen und erleichtert die Kontrolle im Straßenraum.³ Ohne grüne Plakette oder Ausnahmegenehmigung in der Umweltzone zu fahren oder zu parken ist eine Ordnungswidrigkeit und kostet in Berlin **100 Euro Bußgeld**.

Ausnahmen und Verwaltungsprozess Für Fahrzeuge, die die Anforderungen nicht erfüllen, sind **Ausnahmegenehmigungen** über ein standardisiertes Verwaltungsverfahren möglich (befristet, mit definierten Voraussetzungen und Nachweispflichten).⁴ Damit existieren in Berlin bereits zentrale Bausteine, die auch für eine ZEZ benötigt werden: ein kontrollfähiger Berechtigungsnachweis, klare Abgrenzung des Gebietes sowie ein administratives Verfahren für Ausnahmen und Sonderfälle.⁵

Übertragbarkeit auf die ZEZ (Baseline) und absehbarer Erweiterungsbedarf Der Vollzug der Umweltzone erfolgt in der Praxis stichprobenartig; der Mechanismus ist damit im Berliner Alltag grundsätzlich verankert. Gleichzeitig ist eine ZEZ im Vergleich zur Umweltzone **inhaltlich und organisatorisch anspruchsvoller** (höhere politische Sichtbarkeit, potenziell komplexere Regeln und Ausnahmen, höhere Anforderungen an Compliance). Vor diesem Hintergrund ist es wahrscheinlich, dass die heutigen Vollzugskapazitäten der Umweltzone **ausgebaut werden müssen** (z. B. zusätzliche Kontrollressourcen, stärkere Digitalisierung der Ausnahmeverwaltung, Schwerpunktkontrollen).

Kernelemente

- **Nachweislogik:** Sichtbarer Nachweis (Plakette) bzw. digitaler Nachweis, der bei Kontrolle vorgezeigt werden kann; klare Abgrenzung betroffener Fahrzeugklassen und Zeiträume.
- **Kontrollregime:** Stichprobenkontrollen an typischen Einfahrten/Hotspots sowie mobile Kontrollen innerhalb der Zone; risikobasiert (z. B. nach Tageszeit, Wochentag, bekannten Umgehungsrouten).
- **Ausnahmen/Permits:** Schlanke digitale Beantragung und Prüfung für definierte Ausnahmegruppen; Nachweispflichten und Befristung, um Missbrauch zu begrenzen.
- **Sanktionierung:** Standardisiertes Verfahren für Verwarnung/Bußgeld bei Verstößen, inkl. Widerspruchsprozess.

Stärken und Grenzen Option A ist kosteneffizient und kurzfristig umsetzbar, erreicht aber typischerweise eine geringere und weniger gleichmäßige Kontrollintensität als vollautomatisierte Systeme. Bei komplexeren Regelwerken, hohen Missbrauchsraten oder dem Ziel sehr hoher Compliance kann eine Erweiterung Richtung Option B sinnvoll werden.

²<https://www.berlin.de/sen/uvk/umwelt/luft/luftreinhaltung/umweltzone/allgemeines/>

³<https://www.berlin.de/sen/uvk/umwelt/luft/luftreinhaltung/umweltzone/fahrzeug-plakette/>

⁴<https://service.berlin.de/dienstleistung/326521/>

⁵https://www.berlin.de/sen/uvk/_assets/umwelt/luft/luftreinhaltung/umweltzone/umweltzone_info_ausl_touristen.pdf

5.4. Option B: ANPR-/kamerabasierte Erfassung als hochautomatisierte Vollzugsarchitektur

Die nachfolgende Architektur beschreibt eine mögliche Ausbauvariante mit automatisierter Erfassung (ANPR). Sie ist nicht als Baseline-Annahme zu verstehen, sondern als Option zur Erhöhung der Kontrollintensität und zur Skalierung bei komplexeren Regeln oder bei unzureichender Compliance unter Option A.

Vereinfachte Fahrzeugklassifizierung über das E-Kennzeichen Für eine pragmatische und gut kommunizierbare Vollzugslogik könnte die Zuordnung „elektrisch vs. fossil“ im ersten Schritt über das **E-Kennzeichen** erfolgen (Kennbuchstabe „E“ am amtlichen Kennzeichen). Das E-Kennzeichen dient nach dem Elektromobilitätsgesetz⁶ als sichtbare Kennzeichnung elektrisch betriebener Fahrzeuge und ist in Deutschland etabliert.⁷

Dabei ist zu beachten: Ein E-Kennzeichen erhalten nicht nur batterieelektrische Fahrzeuge, sondern auch Brennstoffzellenfahrzeuge sowie von außen aufladbare Plug-in-Hybride, sofern sie die gesetzlichen Kriterien erfüllen (u. a. ≤ 50 g CO₂/km oder elektrische Mindestreichweite von mindestens 40 km).⁸ Für eine ZEZ, die inhaltlich auf Zero Emissions abzielt, wäre deshalb in einem ANPR-Back-Office typischerweise eine nachgelagerte registerbasierte Plausibilisierung sinnvoll (z. B. Unterscheidung BEV/FCEV vs. PHEV über Fahrzeugregisterdaten), während das E-Kennzeichen als einfacher, robuster Erstfilter genutzt werden kann.

Zusätzlich ist der regulatorische Trend relevant: In der politischen und steuerlichen Ausgestaltung werden die Anforderungen an Plug-in-Hybride tendenziell verschärft bzw. Privilegien kritisch überprüft (u. a. Diskussion zur weiteren Begünstigung im Rahmen des EmoG; strengere Kriterien in angrenzenden Regelwerken).⁹ Dies spricht dafür, dass die Rolle von Plug-in-Hybriden innerhalb der „E-Kennzeichen-Flotte“ perspektivisch eher abnimmt und eine ZEZ-Vollzugslogik langfristig noch stärker auf echte Nullemissionsfahrzeuge ausgerichtet werden kann.

5.4.1. Mögliche Architektur des ZEZ-Durchsetzungssystems

Diese Sektion beschreibt die Gesamtarchitektur eines technischen Systems zur Durchsetzung von ZEZ. Die Architektur folgt einem mehrschichtigen Ansatz und deckt den vollständigen End-to-End-Prozess ab – von der Erfassung eines Fahrzeugs im Straßenraum bis zur administrativen Bearbeitung von Verstößen.

5.4.1.1. Architekturübersicht

Das ZEZ-Durchsetzungssystem besteht aus logisch getrennten, aber eng gekoppelten Schichten, die jeweils klar definierte Verantwortlichkeiten haben:

- Detektion

⁶<https://www.gesetze-im-internet.de/emog/>

⁷<https://service.berlin.de/dienstleistung/327084/>

⁸<https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/auto-kaufen-verkaufen/kfz-zulassung/elektro-auto-kennzeichen/>

⁹https://www.bmv.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/emog-Berichterstattung-2021.pdf?__blob=publicationFile

- Kommunikations- und Betriebsinfrastruktur
- Zentrale Automatic Number Plate Recognition (ANPR)-Back-Office-Systeme
- Notice Processing System (NPS)
- Reporting-, Audit- und Datenschutzkomponenten

Diese modulare Struktur ermöglicht Skalierbarkeit, Betriebssicherheit sowie die Anpassung an unterschiedliche regulatorische Anforderungen von ZEZ.

5.4.1.2. Detektion

Der Detection Layer ist für die primäre Erfassung von Fahrzeugen im oder am Rand der Umweltzone verantwortlich. Er stellt den Einstiegspunkt aller Durchsetzungsprozesse dar.

Die Architektur unterstützt mehrere gleichwertige Erfassungskanäle:

- **Stationäre ANPR-Infrastruktur** Feste Kamerastandorte an Ein- und Ausfahrten der Zone sowie innerhalb der Zone zur kontinuierlichen automatisierten Kennzeichenerfassung.
- **Mobile ANPR-Systeme** Fahrzeuge oder temporäre Installationen mit ANPR-Kameras zur flexiblen, bedarfsgesteuerten Kontrolle in Bereichen ohne feste Infrastruktur.
- **Manuelle Kontrolle durch Inspektoren** Fuß- oder fahrzeugbasierte Inspektoren mit mobilen Endgeräten zur visuellen Kontrolle, Fotoerfassung und manuellen Eingabe von Kennzeichen.

Alle Erfassungskanäle erzeugen einheitliche *Vehicle Observation Records* (VOR), die Zeitstempel, Standortinformationen, Kennzeichen, Beweismaterial (Bild/Video) sowie Metadaten zur Erfassungsqualität enthalten.

5.4.1.3. Kommunikations- und Betriebsinfrastruktur

Diese Schicht stellt die sichere und zuverlässige Übertragung der Beobachtungsdaten vom Detection Layer zum zentralen Back-Office sicher.

Zu den Hauptfunktionen gehören:

- gesicherte Datenübertragung (mobil oder leitungsgebunden),
- lokale Zwischenspeicherung bei Netzunterbrechungen,
- Überwachung des Betriebszustands der Erfassungseinrichtungen (Device Monitoring).

5.4.2. ANPR Back-Office

Das ANPR Back-Office bildet das funktionale Kernsystem der Architektur. Es verarbeitet die eingehenden Beobachtungsdaten und entscheidet über die Konformität eines Fahrzeugs mit den ZEZ-Regeln.

Die Hauptkomponenten sind:

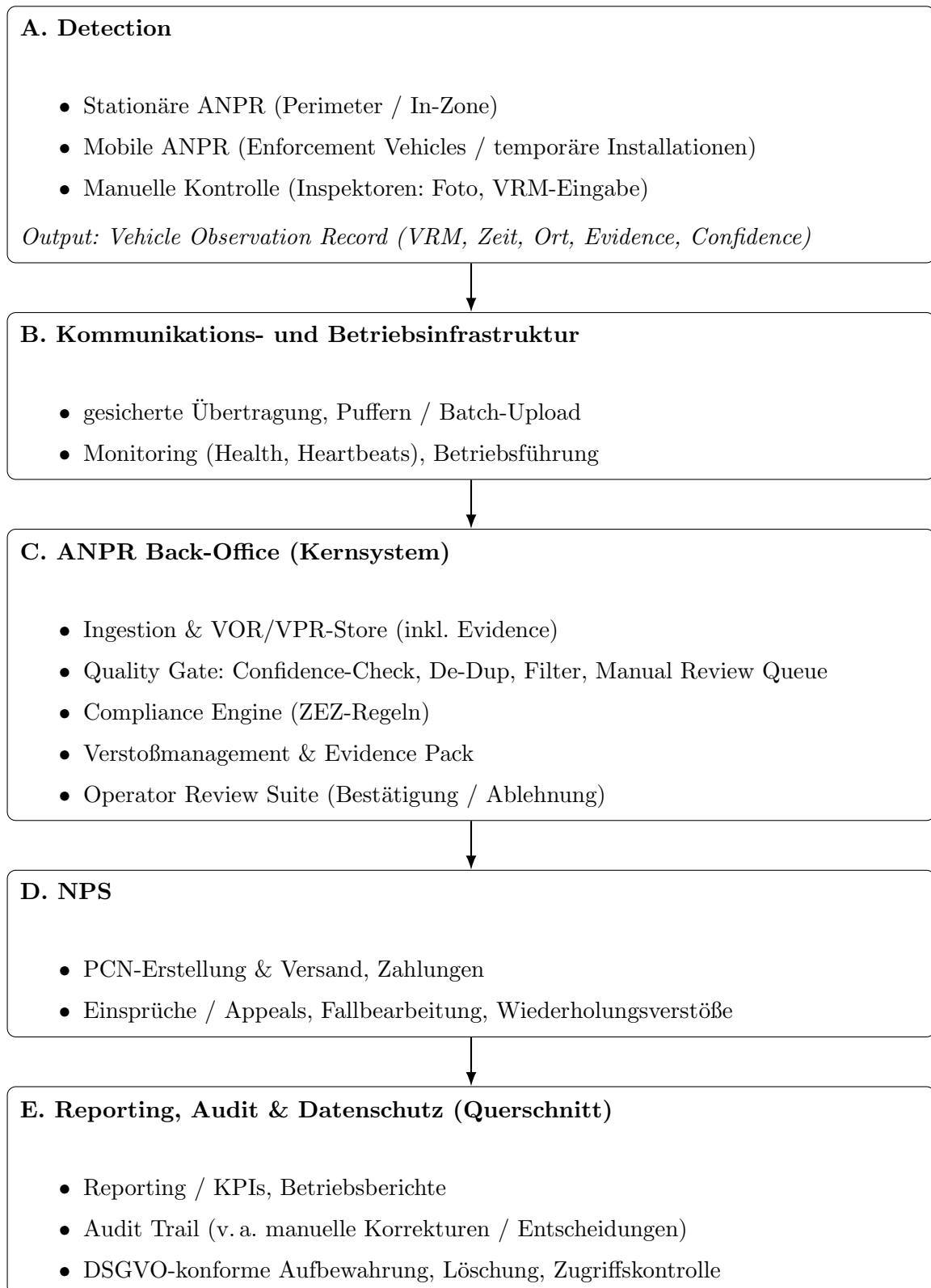


Abbildung 5.1.: Gesamtarchitektur eines LEZ-/ZEZ-Durchsetzungssystems (logische Schichten und Datenflüsse).

5.4.2.1. Datenaufnahme und Speicherung

Empfang und persistente Speicherung aller Vehicle Observation Records inklusive der zugehörigen Beweisdaten.

5.4.2.2. Qualitätssicherung und manuelle Prüfung

Automatische Bewertung der Erkennungsqualität. Datensätze mit unzureichender Sicherheit werden einer manuellen Prüfschnittstelle zugewiesen, in der autorisierte Operatoren Kennzeichen validieren oder korrigieren können.

5.4.2.3. Compliance Engine

Regelbasierte Prüfung, ob ein Fahrzeug die geltenden Anforderungen erfüllt. Hierzu werden externe Datenquellen angebunden, insbesondere:

- nationale Fahrzeugregister,
- Datenbanken für Ausnahmen und Sondergenehmigungen,
- ggf. lokale Genehmigungsregister.

Die Compliance Engine ist parametrisierbar und unterstützt ZEZ-Regelwerke.

5.4.2.4. Verstoßmanagement und Beweisführung

Erstellung konsolidierter Verstoßdatensätze inklusive vollständiger Beweispakete zur Übergabe an nachgelagerte Systeme.

5.4.2.5. Notice Processing System (NPS)

Das Notice Processing System ist für die administrative Abwicklung bestätigter Verstöße verantwortlich. Es umfasst insbesondere:

- Erstellung und Versand von Bußgeldbescheiden (Penalty Charge Notices),
- Zahlungsabwicklung,
- Bearbeitung von Einsprüchen und Rechtsmitteln,
- Verwaltung von Wiederholungsverstößen.

Das NPS ist logisch vom ANPR Back-Office getrennt, jedoch eng integriert.

5.4.2.6. Reporting, Audit und Datenschutz

Querschnittlich über alle Schichten hinweg werden folgende Funktionen bereitgestellt:

- Betriebs- und Management-Reporting,
- Audit-Trails für manuelle Eingriffe und Entscheidungen,
- Umsetzung von Datenschutz- und Aufbewahrungsrichtlinien gemäß geltendem Recht (z. B. DSGVO).

5.4.2.7. End-to-End-Datenfluss

Der typische Prozessablauf ist wie folgt:

1. Erfassung eines Fahrzeugs durch einen der Detection-Kanäle,
2. Übertragung der Beobachtungsdaten an das Back-Office,
3. Qualitätsprüfung und ggf. manuelle Verifikation,
4. Regelbasierte Compliance-Prüfung,
5. Bestätigung eines Verstoßes,
6. Übergabe an das Notice Processing System zur weiteren Bearbeitung.

Diese Architektur stellt eine robuste, skalierbare und rechtssichere Grundlage für den Betrieb von ZEZ-Durchsetzungssystemen dar.

5.5. Analyse der rechtlichen Grundlagen

Die rechtliche Zulässigkeit der Einführung einer ZEZ sowie der damit verbundenen Ausnahmeregelungen wird im Rahmen dieses Arbeitspakets nicht erneut geprüft. Aufgrund der aktuellen Rechtsprechung, insbesondere des Urteils des Landesverfassungsgerichts zum Volksentscheid „Berlin autofrei“, sowie vorliegender juristischer Gutachten bestehen belastbare rechtliche Grundlagen für eine plausible Ausgestaltung der ZEZ durch Teileinziehung landeseigener Straßen und deren differenzierte Wiederfreigabe. Arbeitspaket 5 fokussiert daher auf die inhaltliche Ausgestaltung möglicher Ausnahmeregelungen, deren verkehrliche und wirtschaftliche Wirkungskosten sowie auf die Analyse potenzieller Fehl- und Missbrauchsanreize.

5.6. Abschätzung des Verwaltungsaufwands

Unter der in diesem Bericht als Baseline empfohlenen Vollzugslogik (Plakette bzw. sicht-/prüfbarer Berechtigungsnachweis in Kombination mit stichprobenartigen Kontrollen) entsteht der zusätzliche laufende Verwaltungsaufwand typischerweise weniger durch die Kontrollen selbst, sondern vor allem durch die Ausgestaltung und Administration von Ausnahmen. Die Kontrolle der Einhaltung erfolgt im Berliner Status quo der Umweltzone im ruhenden Verkehr durch die bezirklichen Ordnungsämter,¹⁰ während Kontrollen im fließenden Verkehr in der Praxis im Rahmen regulärer Polizeikontrollen stattfinden.¹¹ Damit verlagert sich der wesentliche, dauerhafte Verwaltungsaufwand auf die Ausnahmeprozesse (Antragsannahme, Prüfung, Bescheiderteilung, Fristenmanagement, Registerpflege sowie Bearbeitung von Rückfragen und Widersprüchen).¹²

¹⁰https://www.berlin.de/vak/_assets/ordnungsaeamter.pdf

¹¹<https://www.welt.de/regionales/berlin/article2413869/Umweltzone-Berlin-jagt-Plakette-Suender-jetzt-per-Video.html>

¹²<https://service.berlin.de/dienstleistung/326521/>

Erfahrungen aus bestehenden Umwelt- und Zufahrtsbeschränkungssystemen zeigen, dass der Verwaltungsaufwand für Ausnahmeregelungen maßgeblich durch deren Ausgestaltung bestimmt wird und weniger durch die Größe der Zone selbst. In Stockholm wird der administrative Aufwand u. a. dadurch begrenzt, dass bestimmte Fahrzeugkategorien automatisch von der Abgabe ausgenommen sind (z. B. Einsatzfahrzeuge), während andere Ausnahmen an klar definierte Nachweise und standardisierte Antragsverfahren geknüpft sind (z. B. für Fahrzeuge im Zusammenhang mit einem Behinderten-Parkausweis).¹³¹⁴ Individuelle Einzelfallprüfungen können damit auf klar umrissene Fallgruppen fokussiert werden.

Auch in London (Ultra Low Emission Zone, ULEZ) erfolgt die Verwaltung von Ausnahmen und Ermäßigungen überwiegend digital und registerbasiert. Für bestimmte Gruppen (z. B. Fahrzeuge mit Disability-Tax-Class im UK-Register) gelten Erleichterungen, teils ohne separate Registrierung; für Fahrzeuge mit Zulassung außerhalb des UK kann eine Registrierung erforderlich sein.¹⁵ Zeitlich befristete oder projektbezogene Ausnahmen verursachen typischerweise einen höheren Bearbeitungsaufwand und sollten daher restriktiv eingesetzt werden.

Das Beispiel Mailand (Area C) zeigt hingegen, dass eine stark differenzierte und kurzfristig nutzbare Ausnahme- und Tagespasslogik zwar eine hohe Flexibilität bietet, jedoch mit einem erhöhten administrativen Aufwand für Antragsbearbeitung, Zahlungsabwicklung, Kontrolle und nachträgliche Klärung von Verstößen verbunden ist.¹⁶¹⁷

Für die ZEZ lässt sich ableiten, dass der Verwaltungsaufwand beherrschbar bleibt, sofern Ausnahmeregelungen möglichst pauschal, dauerhaft und digital abbildbar ausgestaltet werden. Zeitlich befristete, nutzerspezifische oder projektbezogene Ausnahmen sollten auf ein notwendiges Minimum begrenzt werden, da sie den Verwaltungsaufwand überproportional erhöhen und zugleich das Risiko von Fehlanwendungen und Missbrauch steigern.

¹³<https://www.transportstyrelsen.se/sv/vagtrafik/fordon/skatter-och-avgifter/trangselenskatt/undantag-fran-trangselenskatt/>

¹⁴<https://www.skatteverket.se/servicelankar/otherlanguages/englishengelska/individualsandemployees/congestiontax/applicationforexemptionfromtaxliabilityforcongestiontax.4.48cfd212185efbb440b1705.html>

¹⁵<https://tfl.gov.uk/modes/driving/ultra-low-emission-zone/discounts-and-exemptions>

¹⁶<https://www.comune.milano.it/en/servizi/mobilita/area-c-esenzioni-e-deroghe-per-operatori-sociali-e-sanitari>

¹⁷<https://areac.atm-mi.it/areac/IWeb/Activation.aspx>

6. Arbeitspaket 3: Kostenabschätzung der Maßnahme

6.1. Gesamtwirtschaftliche Perspektive

Eine ökonomische Bewertung enthält typischerweise folgende Komponenten:

1. Gewinne/Verluste durch Nutzende
2. Veränderte Gewinne von (produzierenden) Firmen
3. Gewinne/Verluste des Staates
4. Externalitäten

Zu 1.: Hierunter fallen z.B. Zeitgewinne oder -verluste. Diese werden oft separat gerechnet für den “verbleibenden” (1a) vs. den “verlagerten” (1b) Verkehr. Der verbleibende Verkehr benutzt im Planfall das gleiche Verkehrsmittel wie im Bezugsfall, der verlagerte Verkehr ein anderes.

Zu 2.: Hierunter fallen z.B. veränderte Gewinne von Fahrzeug-Herstellern.

Zu 3.: Hierunter fallen z.B. Fahrgeldeinnahmen im öffentlichen Verkehr oder Einnahmen durch die Energiesteuer (ehem. Mineralölsteuer), aber auch zusätzliche Kosten, z.B. im öffentlichen Verkehr.

Zu 4.: Hierunter fallen z.B. Belastungen der Umwelt durch Klimagase, Schadstoffe oder Lärm.

6.2. Zusammenfassung des Vorgehens

6.2.1. Gewinne/Verluste der Nutzenden

Wie in Abschnitt 6.3 genauer beschrieben, ergeben sich die Gewinne/Verluste der Nutzenden direkt aus der MATSim-Scoring-Funktion. Diese Gewinne/Verluste können dort für jeden synthetischen Reisenden separat ausgewiesen und anschließend nach beliebigen Kriterien, z.B. Einkommen oder Heimatbezirk, aggregiert werden, vgl. Kapitel 7.

6.2.2. Veränderte Gewinne von (produzierenden) Firmen

Bei den Veränderungen von produzierenden Firmen verwenden wir die sogenannte wettbewerbliche Approximation, welche besagt, dass im Wettbewerb stehende Firmen lediglich Normalgewinne, jedoch keine darüber hinausgehenden “ökonomischen Gewinne” erzielen. Veränderungen bei den Normalgewinnen werden in der Nutzen-Kosten-Analyse (NKA) nicht ausgewiesen, da davon ausgegangen wird, dass beteiligtes Kapital und beteiligte Personen anderswo Normalgewinne in gleicher Höhe erzielen würden. Direkte verkehrliche Gewinne/Verluste (z.B. durch schnellere/langsamere/teurere/preiswertere Anfahrten zu Kund:innen) weisen wir bei den Zeitgewinnen/-verlusten aus. Veränderungen z.B. bei Verkehrsunternehmen weisen wir bei den staatlichen Akteuren aus, selbst wenn die faktische Rechtsform von Verkehrsunternehmen eine privatwirt-

schaftliche sein sollte.

6.2.3. Veränderte Gewinne/Verluste staatlicher Akteure

Bei den Veränderungen staatlicher Akteure weisen wir veränderte Fahrgeld- sowie Steuereinnahmen aus. Im Prinzip müssten hier auch Veränderungen bei den Ausgaben, z.B. bzgl. Straßeninstandhaltung oder ÖV Ausbau, ausgewiesen werden; wir gehen aber davon aus, dass hier keine Veränderungen stattfinden werden – oder wenigstens keine Veränderungen über das hinaus, was ohnehin bereits geplant ist.

6.2.4. Externalitäten

Bei den Externalitäten weisen wir die monetarisierten Veränderungen von Klimagasen, (sonstigen) Luftschadstoffen, Lärm sowie Unfällen aus.

6.2.5. Zusammenfassung der Resultate

Die Teilresultate werden schlussendlich in Abschnitt 6.11 zusammengefasst. Dort eingehende Werte werden in den folgenden Abschnitten **wie hier gezeigt** markiert.

6.2.6. Bezugsfall und Planfall

Im Prinzip vergleichen wir die Szenarien *EV'35* (Bezugsfall) mit *EV&ZEZ'35* (Planfall). Allerdings liegen für diese Szenarien, weil wir sie parametrisiert betrachten, keine mikroskopischen Simulationsläufe vor. Ähnlich wie in Kapitel 4 berechnen wir die Resultate aus den vorliegenden Simulationsläufen *EVrelaxiert* und *EV&ZEZrelaxiert*. Dies geschieht wie folgt:

- Für den **privaten Verkehr** gilt folgendes:
 - Bei *EV'35* handelt es sich im wesentlichen um *EVrelaxiert*, außer dass ca. 30% der “freiwilligen” Umstellung von fossil nach elektrisch noch nicht stattgefunden hat (s. Abb. 3.2).
 - Derjenige Teil dieser 30%, welcher durch die ZEZ betroffen ist, wird diese Umstellung unter dem Einfluss der ZEZ zeitlich vorziehen. Dieser Personenkreis wird anschließend *preiswerter* unterwegs sein; dies wäre im Sinne der Methodik ein ökonomischer Gewinn. Es ist allerdings fraglich, ob man dies wirklich als ökonomischen Gewinn ausweisen sollte, weil die betroffenen Personen ja z.B. ein noch relativ neues fossiles Fahrzeug besitzen könnten, was in der langfristigen Betrachtung nicht berücksichtigt wird. In unserer Methodik wird für diesen Personenkreis *weder* ein Gewinn *noch* ein Verlust ausgewiesen.
 - Diejenigen synthetischen Personen, die durch die ZEZ ‘zwangsweise’ umstellen (auf für sie teureres EV, oder auf andere Verkehrsmittel) sind in *EV'35* und *EVrelaxiert* die gleichen. (*)
- Beim **kommerziellen Verkehr** gehen wir davon aus, dass die kommerziellen Akteure die kostengünstigste Lösung wählen, und daher 2035 dort, wo es sich lohnt, vollständig umgestellt haben.

- Bzgl. **(produzierender) Firmen** rechnen wir ohnehin nicht mit gesamtwirtschaftliche relevanten Effekten.
- Die Gewinne durch das Deutschlandticket hängen nur von der Verkehrsmittelwahl ab. Diese ist 2035 aber bereits weitgehend relaxiert, siehe den Gesamtfahrzeugbestand in Abbildung 3.2 (**). Durch die ZEZ verursachte Verluste bei der Mineralölsteuer sind zwischen $EV^{\&ZEZ}_{relaxiert}$ und $EV^{\&ZEZ'}_{35}$ identisch, siehe (*) oben.
- Bei **stofflichen Emissionen** verwenden wir die Methodik aus Kapitel 4.
- **Lärm** hängt nur von der Verkehrsmittelwahl ab, und diese ist 2035 bereits weitgehend relaxiert, siehe (**) oben.

6.3. Gewinne/Verluste im privaten Verkehr

In MATSim werden Gewinne/Verluste der Nutzenden zusammenhängend durch die sogenannte Scoring Funktion (Nutzenfunktion) der synthetischen Personen ausgedrückt, in der Einheit “utils”; individuelle Verbesserungen oder Verschlechterungen ergeben sich als Differenz im Score. Jede Person sucht individuell nach einer guten Lösung im verkehrlichen Möglichkeitsraum. Dies berücksichtigt individuelle Problemlagen und -lösungen besser, als es die klassische (auf Start-Ziel-Flüsse orientierte) Verkehrsmodellierung leistet. Die individuelle Scoring-Funktion berücksichtigt z.B. individuell unterschiedlichen Zeitdruck, oder die Tatsache, dass eine vollständige Abschaffung des Autos (wegen der Einsparung bei den Fixkosten) deutlich mehr bringt als der Verzicht bei nur einem Weg.

Ein wichtiger Aspekt der verwendeten Nutzenfunktion ist, dass sie einkommensabhängig ist. Dies wird umgesetzt über eine einkommensabhängige Umrechnung von Geld in Nutzen – weniger einkommensschwache Personen gewinnen aus zusätzlichem Geld (z.B. durch die Abschaffung eines Autos) mehr Nutzen als einkommensstarke. Wenn man dieser Umrechnung umgekehrt verwendet, dann können damit Nutzendifferenzen in Geld umgerechnet werden; dies ist die Zahlungsbereitschaft einer jeden Person für die untersuchte Maßnahme. Wenn die Person durch die Maßnahme schlechter gestellt wird, dann ist diese Zahlungsbereitschaft negativ.¹ Im Bereich der NKA ist es üblich, aus der Addition dieser individuellen Zahlungsbereitschaften die Zahlungsbereitschaft der Bevölkerung für eine Maßnahme zu berechnen. Durch die hier gewählte einkommensabhängige Form der Nutzenfunktion hat das allerdings zur Folge, dass die Zahlungsbereitschaft der wohlhabenderen Bevölkerung stärker ist dies die der weniger wohlhabenden Bevölkerung – und somit die wohlhabende Bevölkerung in der NKA ein überproportionales Gewicht hat. In Abschnitt 7.1.1 diskutieren wir dies.

Tabelle 6.1 zeigt die Ergebnisse für die Gesamtbevölkerung. Die durchschnittliche monetäre Wirkung pro Person und Tag liegt bei knapp 14 Cent pro Tag. Man könnte zunächst argumentieren, dass dies eine relativ kleine Belastung ist, welche für das wichtige Ziel der CO₂-Reduzierung akzeptabel sein sollte. Weiterhin wird durch den Mittelwert verdeckt, dass die Wirkungen sehr unterschiedlich verteilt sind: Nur Personen, welche im Bezugsfall mit Auto das Gebiet der ZEZ befahren, sind betroffen.

¹Wir verzichten hier, wie bei NKAs üblich, auf eine Unterscheidung zwischen willingness-to-pay und willingness-to-accept.

Schlussendlich geht die Simulation davon aus, dass nur Personen betroffen sind, welche nicht bereits aus eigenem Kalkül auf nicht-fossile Fahrzeuge gewechselt sind. Eine Einführung einer ZEZ würde diese Freiwilligkeit in einen Zwang umwandeln und damit vielleicht Widerstand herausfordern. Für den Rest von Kapitel 6 werden wir solche Überlegungen allerdings ausblenden, um mit anderen NKA-Verfahren vergleichbar zu bleiben. Belastungen für unterschiedliche Zielgruppen werden in Kapitel 7 aufgegriffen.

Tabelle 6.1.: Zahlungsbereitschaft der Gesamtbevölkerung (von Berlin) pro Tag für die ZEZ. Eine negative Zahlungsbereitschaft bedeutet eine Wohlfahrtseinbuße in dieser Komponente.

	Zahlungsbereitschaft gesamt [EUR]	ins- ... pro Person [EUR]
mit ZEZ-Zone vs ohne ZEZ-Zone	-505k	-0,1356

6.4. Gewinne/Verluste im kommerziellen Verkehr

6.4.1. Vorgehen

Zur Bewertung des Finanzmodells für den kommerziellen Verkehr werden alle kommerziellen Fahrten betrachtet, die von/nach/innerhalb Berlins stattfinden. Die Kilometer, Touren und Stunden werden in Euro umgerechnet. Dabei wird angenommen, dass eine Tour eine Schicht und einem Fahrzeug entspricht; eine Tour kann während einer Schicht das selbe oder auch unterschiedliche Depots mehrfach anfahren. Die verwendeten Kostensätze sind in Tabelle 6.2 dargestellt.

Tabelle 6.2.: Kostenparameter für verschiedene Fahrzeugtypen.

Typ	Art	Tag [€]	Std [€]	km [€]
Personenwirtschaftsverkehr (PWV)	PKW fossil	37,34	21,2	0,275
PWV	PKW electric	37,83	21,2	0,269
PWV Service	PKW fossil	39,00	21,2	0,281
PWV Service	PKW electric	39,58	21,2	0,266
Güterverkehr (GV)	PKW fossil	43,77	21,2	0,312
GV	PKW electric	44,84	21,2	0,299
GV	LKW electric	79,51	21,2	0,456
GV	LKW fossil	76,30	21,2	0,487

Die Bewertung der Verluste erfolgt auf Basis des Endzustands im stabilen Gleichgewicht. Da der Investitionszyklus im kommerziellen Verkehr typischerweise deutlich unter zehn Jahren liegt, gehen wir davon aus, dass betroffene Unternehmen die Notwendigkeit der Umstrukturierung antizipieren und ihre Fahrzeugflotten entsprechend schneller anpassen. Die in der Analyse ausgewiesenen Verluste im kommerziellen Verkehr sind folglich als Verluste im relaxierten Endzustand zu interpretieren und stellen eine konservative Abschätzung der tatsächlichen ökonomischen Auswirkungen dar.

Für die Analyse der finanziellen Auswirkungen werden folgende Szenarien verglichen:

- *Baseline* – Referenzzustand, Fahrzeugwahl auf Basis des Optimierungsmodells, aber *ohne* E-FZe.

- *EVrelaxiert* – Fahrzeugwahl auf Basis des Optimierungsmodells, mit E-FZe.
- *EV&ZEZrelaxiert* – Fahrzeugwahl auf Basis des Optimierungsmodells, mit E-FZe, unter Berücksichtigung des ZEZ-Constraints.

Die Ergebnisse sind in den Tabellen 6.3 bis 6.5 dargestellt.

6.4.2. Vergleich der Ergebnisse

Tabelle 6.3.: Finanzielle Kennzahlen – Szenario *Baseline*, pro Tag

	Kommerzieller PKW	LKW
Touren	151 552	26 631
Stopps	833 817	169 983
Ø Kosten/Fahrt [€]	3 525	893
Kosten Fahrten [€]	16 027 715	4 554 063
Tageskosten [€]	5 932 240	2 031 920
Ø Kosten/Tour [€]	4 830	8 243
Gesamtkosten [€]	21 959 955	6 585 984
Summe [€]		28 545 938

Tabelle 6.4.: Finanzielle Kennzahlen – Szenario *EVrelaxiert* pro Tag

	Kommerzieller PKW	LKW
Touren	130 854	25 297
Stopps	808 686	175 316
Ø Kosten/Fahrt [€]	3 620	5 804
Kosten Fahrten [€]	14 210 495	4 404 875
Tageskosten [€]	5 177 670	1 975 988
Ø Kosten/Tour [€]	4 938	8 407
Gesamtkosten [€]	19 388 165	6 380 863
Summe [€]		25 769 028

Tabelle 6.5.: Finanzielle Kennzahlen – Szenario *EV&ZEZrelaxiert*, pro Tag

	Kommerzieller PKW	LKW
Touren	140 753	24 331
Stopps	810 752	157 684
Ø Kosten/Fahrt [€]	3 632	5 538
Kosten Fahrten [€]	15 338 732	4 043 031
Tageskosten [€]	5 598 028	1 920 641
Ø Kosten/Tour [€]	4 958	8 169
Gesamtkosten [€]	20 936 760	5 963 672
Summe [€]		26 900 432

Wie man sieht, erwartet unser Modell durch die Möglichkeit der Elektrifizierung (Szenario 1 → Szenario *EVrelaxiert*) erhebliche Kostensenkungen. Dies entspricht auch

unseren vorherigen Studien (z.B. Winkler et al., 2022). Der Grund, warum die Transformation nicht mit höherer Geschwindigkeit “von selbst” stattfindet, liegt an den Rahmenbedingungen, insbesondere die Unklarheit bzgl. des zu erwartenden Preisabstands zwischen fossiler und elektrischer Energiebereitstellung.

Allerdings verbleiben auch in Szenario *EVrelaxiert* (Tabelle 6.4), insbesondere bei den PKWs, fossile Fahrzeuge in der Flotte. Diese lohnen sich insbesondere für kurze Touren, bei denen die Fixkosten eine stärkere Rolle spielen – dies betrifft z.B. Pflegedienste, bei denen die Fahrten immer nur kurze Zeiten und damit kurze Wege zwischen den Arbeitseinsätzen ausmachen. Die ZEZ (Tabelle 6.5) zwingt dann einige dieser Touren auf elektrische Fahrzeuge, und macht diese Touren damit teurer.

Weiterhin nehmen die Kosten für die LKWs durch Einführung der ZEZ sogar ab. Dieses kontraintuitive Resultat ergibt sich dadurch, dass ein Teil der LKW-Touren nun durch Lieferwagen (die formal zu den PKWs gehören) ausgeführt wird. Die Kosten bei den LKWs gehen also nach unten, aber die Kosten bei den PKWs steigen dafür an.

Insgesamt ergeben sich bei Szenario *EVrelaxiert* im Vergleich zu Szenario *EVrelaxiert* höhere Kosten und somit ein **Verlust von 1131 Tsd Eu/Tag**.

Es stellt sich die Frage, ob diese Kosten nicht aus der generellen Kostensenkung durch die Elektrifizierung “abgezweigt” werden könnten – also ob Berlin bei den kommerziellen PKWs ausgehend von ca. 21,96 Mio Eu (Tabelle 6.3) die Kosten nicht auf ca. 19,39 Mio Eu (Tabelle 6.4) sondern nur auf ca. 20,94 Mio Eu (Tabelle 6.5) reduzieren sollte – z.B. dadurch, dass Fördermaßnahmen zur Elektrifizierung kommerzieller Unternehmen nur gewährt werden, wenn dadurch die *gesamte* Flotte des Unternehmens umgestellt würde. Da die Beurteilung dieser Sachverhalte außerhalb unserer Expertise liegt, weisen wir in der zusammenfassenden Betrachtung in Tabelle 6.16 die oben genannten **erhöhten Kosten von 1131 Tsd Eu/Tag** in voller Höhe aus.

Tabelle 6.6.: Kostenunterschiede im Vergleich zu Szenario *EVrelaxiert* pro Tag. Positive Werte bedeuten Kostenerhöhungen, also Wohlfahrtseinbußen.

	Kommerzieller PKW [Tsd. €]	LKW [Tsd. €]	Summe [Tsd. €]
Szenario <i>EV&ZEZrelaxiert</i> zu Szenario <i>EVrelaxiert</i>	1549	-417	1131

6.5. Gewinne/Verluste von (produzierenden) Firmen

Hierunter fallen z.B. Verluste durch den Verkauf von weniger Energie oder weniger Autos, oder Gewinne durch den Verkauf von mehr Fahrrädern.

In einer wettbewerblichen Volkswirtschaft kann man näherungsweise davon ausgehen, dass Unternehmen keine Gewinne machen, weil diese weitere Firmen anziehen würden, was dann insgesamt zu einer Preissenkung führen. Dies bedeutet *nicht*, dass nicht z.B. Kapitalbesitzer hohe Renditen oder Unternehmenschefs hohe Gehälter erwirtschaften – es bedeutet nur, dass diese eventuell “anderswo” (bei anderen Verkehrsmitteln oder sogar in anderen Sektoren) erwirtschaftet würden.

Mit diesem wettbewerblichen Ansatz kann man näherungsweise davon ausgehen, dass bei produzierenden Firmen durch verkehrliche Verlagerung *in der Summe* **keine gesamtwirtschaftlich relevanten Effekte** auftreten. Dieser Ansatz ist im angelsächsischen

Bereich üblich, und wird von uns hier übernommen.

6.6. Gewinne/Verluste des Staates

Anders als im Wettbewerb stehende Firmen passt der Staat sein Angebot nicht an veränderte Nachfrage an: Z.B. wird eine Straße bei weniger Nachfrage nicht gleich schmaler gemacht, oder die Frequenz des öffentlichen Verkehrs wird nicht gleich reduziert. Daher werden im BVWP-Verfahren die Veränderungen der Einnahmen und die Veränderungen der Produktionskosten separat berechnet. Veränderungen der Einnahmen ergeben sich im hier vorliegenden ZEZ-Projekt vor allem durch erhöhte Fahrgeldeinnahmen im ÖV, sowie durch reduzierte Energiesteuer (ehem. Mineralölsteuer)-Einnahmen bei Kfz. Diese weisen wir näherungsweise aus. Allerdings bleiben die Fahrgeld-Einnahmen in Berlin, während die Energiesteuereinnahmen an den Bund gehen. Die gesamtwirtschaftliche Analyse des BVWP blendet dies aus; für die politische Entscheidungsfindung im Land Berlin kann dies dennoch relevant sein.

An dieser Stelle müsste man eigentlich die veränderten Kosten gegenrechnen: Kosten der Angebotsausweitung im öffentlichen Verkehr; eingesparte Kosten bei der Straßenwartung. Dies geht über das hier vorliegende Projekt hinaus. Es ist auch deshalb kaum leistbar, weil eine Angebotsausweitung im öffentlichen Verkehr ohnehin vorgesehen ist. Bei einer solchen Betrachtung würden die aus einer ZEZ resultierenden zusätzlichen Fahrgeldeinnahmen einfach nur zu einer Finanzierung einer solchen Angebotsausweitung beitragen, und könnten uneingeschränkt als positive Nutzen verbucht werden.²

6.6.1. Gewinne durch das Deutschlandticket

Szenarien mit einer ZEZ-Zone erhöhen die Nutzung des ÖPNV um 1,6 Prozentpunkte (Tabelle 3.3), was einer Steigerung von 5,7 % entspricht. Im Jahr 2023 wurden in Berlin rund 710 Tsd. Deutschlandtickets verkauft.³

Die Einführung einer ZEZ-Zone kann zusätzlich etwa 40.500 Deutschlandtickets generieren, was einem zusätzlichen Erlös von nahezu 2.500.000 EUR pro Monat (rund **30 Mio. EUR pro Jahr**) entspricht.

6.6.2. Verluste durch entfallendes Steueraufkommen aus Benzin und Diesel

Die kraftstoffbezogenen Steuereinnahmen aus Benzin und Dieselmotorkraftstoff setzen sich aus der Energiesteuer, der nationalen CO₂-Bepreisung nach dem Brennstoffemissionshandelsgesetz sowie der Mehrwertsteuer zusammen. Diese Abgaben werden auf

²Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die Standardisierte Bewertung zwar die erhöhten Fahrgeldeinnahmen als positiven Nutzen rechnet, die reduzierten Energiesteuereinnahmen aber *nicht* als negativen Nutzen. Dies ist aus unserer Sicht nicht richtig: Wenn man den “Schmerz” von (Steuer- oder Fahrgeld-)Zahlungen auf seiten der Nutzer berücksichtigt, dann muss man auch die “Freude” der entsprechenden Einnahmen beim Staat berücksichtigen. Oder man berücksichtigt es konsistent auf beiden Seiten nicht (als sogenannte “Transfers”). Die rule-of-half, welche in der Standardisierten Bewertung verwendet wird, berücksichtigt “automatisch” diesen “Schmerz” der Zahlungen, und auch der MATSim-Score tut dies. Solange die Werte nur ausgewiesen werden, macht dies keinen Unterschied; sehr wohl aber, sobald Nutzen und Kosten ins Verhältnis gesetzt werden.

³Vgl. Tagesspiegel: Fast 800.000 verkaufte Abos in der Hauptstadt – in welchen Bezirken die meisten Deutschlandtickets gekauft werden.

Bundesebene erhoben; eine amtliche regionale Aufschlüsselung nach Bundesländern erfolgt nicht⁴. Zur Abschätzung der auf Berlin entfallenden Einnahmen wird daher ein verbrauchsbasierter Ansatz verwendet.

Das bundesweite Steueraufkommen aus Benzin und Diesel beläuft sich auf insgesamt rund 35–40 Mrd. € pro Jahr. Aufgrund eines unterdurchschnittlichen motorisierten Individualverkehrs, geringerer jährlicher Fahrleistungen, eines hohen Anteils des Umweltverbundes sowie einer vergleichsweise niedrigen Dieselquote im Pkw-Verkehr liegt der Kraftstoffverbrauch in Berlin deutlich unter dem Bundesdurchschnitt

Der Anteil Berlins am bundesweiten Verbrauch von Benzin und Diesel wird konservativ auf etwa 2,0–2,5 % geschätzt⁵. Daraus ergibt sich ein dem Berliner Kraftstoffverbrauch zurechenbares jährliches Steueraufkommen in der Größenordnung von rund 700–900 Mio. €. Für die nachfolgende Szenarienbetrachtung wird ein mittlerer Referenzwert von 800 Mio. € als heutiges Aufkommen angesetzt.

Vor dem Hintergrund eines fortschreitenden Übergangs zur Elektromobilität ist bis zum Jahr 2035 von einem strukturell bedingten Rückgang dieses Steueraufkommens auszugehen. Ohne Einführung einer Zero-Emission-Zone (ZEZ) wird das heutige Aufkommen aus Benzin und Diesel voraussichtlich auf etwa ein Viertel des aktuellen Niveaus sinken. Bei Einführung einer ZEZ ab 2035 ist von einer weitergehenden Reduktion auszugehen (Tabelle 6.7).

Tabelle 6.7.: Szenarienbasierte Abschätzung des entfallenden Steueraufkommens aus Benzin und Diesel bis 2035 (absolute Werte)

Szenario	Steueraufkommen (Mio. €/Jahr)	Einnahmenverlust ggü. heute (Mio. €)	Zusätzlicher Verlust durch ZEZ (Mio. €)
Status quo	800	–	–
Ohne ZEZ (2035)	≈ 200	≈ 600	–
Mit ZEZ (2035)	≈ 160	≈ 640	≈ 40

Im Vergleich der Szenarien zeigt sich, dass der überwiegende Teil des Einnahmenrückgangs bereits unabhängig von der Einführung einer ZEZ eintritt. Die Einführung der ZEZ führt zu einem zusätzlichen fiskalischen Effekt von rund **–40 Mio. € pro Jahr**.

6.7. Abschätzung von Investitions- und Betriebskosten einer ZEZ

6.7.1. Überblick

Ein zentraler Erfolgsfaktor von Umweltzonen und Zonen mit Zufahrtsbeschränkung oder -bepreisung ist ein wirksames und rechtssicheres Kontroll- und Durchsetzungssystem. Neben der technischen Machbarkeit spielen insbesondere die Investitions- und Betriebskosten eine entscheidende Rolle bei der Auswahl des geeigneten Enforcement-Ansatzes.

Internationale Erfahrungen zeigen, dass sich die Kosten je nach Systemarchitektur, räumlicher Ausdehnung, rechtlichem Rahmen sowie dem Grad der Automatisierung

⁴Bundesministerium der Finanzen: Einnahmestruktur des Bundeshaushalts.

⁵UBA / DLR: Kraftstoffverbrauch und Emissionen im urbanen Verkehr.

erheblich unterscheiden. In vielen Fällen umfassen die angegebenen Implementierungskosten nicht nur die eigentlichen Kontrollsysteme (z. B. Kameras und IT), sondern auch begleitende Maßnahmen wie Beschilderung, Öffentlichkeitsarbeit, Personalaufbau und Projektmanagement.

Für urbanen Bereiche in Europa stellen kamerabasierte Automatic Number Plate Recognition (ANPR)-Systeme den derzeitigen Standard für die Durchsetzung von (Low-Emission-Zone (LEZ)- und Congestion-)Charging-Regimen dar. Die Investitionskosten variieren stark in Abhängigkeit von der Größe des Gebiets, der Anzahl der Kontrollpunkte und dem Integrationsgrad mit bestehenden Verwaltungs- und Fahrzeugregistern. Großskalige Systeme wie London oder Stockholm weisen hohe Einmalkosten auf, profitieren jedoch von Skaleneffekten und hoher Automatisierung. Kleinere Städte oder nachträgliche Erweiterungen bestehender Systeme (z. B. Gothenburg) können deutlich kostengünstiger umgesetzt werden. Alternative Architekturen, etwa mit On-Board-Units, sind mit sehr hohen Initialkosten verbunden und eignen sich primär für landesweite oder hochintegrierte Anwendungen.

Tabelle 6.8 gibt einen Überblick über ausgewählte internationale Beispiele für Kontroll- und Durchsetzungsmechanismen in LEZ- und Congestion-Charging-Systemen.

Tabelle 6.8.: Vergleich der Kosten von Kontroll- und Durchsetzungsmechanismen

Stadt / System	Kontrollmechanismus	CAPEX (Implementierung)	OPEX (Betrieb)	Bemerkungen
London ULEZ (Erweiterung 2021)	ANPR-Kameras, Back-Office	ca. £115 Mio	nicht separat ausgewiesen	Umfasst Kamerainfrastruktur, IT-Systeme und Projektumsetzung (London Authority, 2021)
Stockholm Congestion Tax	ANPR-Portale, zentrale IT	ca. 173 Mio. EUR	ca. 20 Mio. EUR/Jahr	Implementierung inkl. erstem Betriebsjahr; laufende Kosten für Betrieb und Wartung (Eliasson, 2009)
Gothenburg Congestion Tax	ANPR (Systemerweiterung)	ca. €76 Mio	nicht ausgewiesen	Kostenvorteile durch Nutzung bestehender Systemarchitektur (Börjesson, 2014)

Die Kosten für die Einrichtung eines technischen Kontrollsystems (z. B. stationäre

Kameras, automatische Kennzeichenerkennung, IT-Infrastruktur sowie laufender Betrieb) sind in der Regel hoch und können den direkten ökonomischen Nutzen aus der Reduktion der CO₂-Emissionen übersteigen. Im Falle von Charging-Systemen lassen sich diese Kosten durch die Erhebung von Zufahrtsgebühren kompensieren. Das Konzept einer ZEZ sieht jedoch keine Gebühren für die Einfahrt in die Zone vor, so dass keine finanzielle Kompensation für Investitions- und Betriebskosten technischer Kontrollmaßnahmen gegeben ist. Vor diesem Hintergrund erscheint die Nutzung eines Systems zur visuellen Identifikation von Fahrzeugen (Plakette), analog zur bestehenden Umweltzone in Berlin, als die ökonomisch und administrativ sinnvolle Option zur Kontrolle der ZEZ, ergänzt durch stichprobenartige Kontrollen durch Ordnungsamt und Polizei.

6.7.2. Genauere Überlegungen bzgl. eines Systems mit Sichtkontrolle

6.7.2.1. Einführungskosten

Die Kosten für die Organisation der ZEZ können als vergleichbar mit den Kosten für die Einführung der Umweltzone in Berlin angenommen werden. Laut einem Artikel in der *Welt* wurden 557 Verkehrsschilder installiert.

Die Kosten für die Installation von Verkehrsschildern in Berlin können analog zu den Kosten in München abgeschätzt werden. Laut dem Entwurf der 9. Fortschreibung des Luftreinhalteplans München Landeshauptstadt München (2024) belaufen sich die geschätzten Kosten für Beschilderung inklusive Montage auf rund 75.000 Euro (Preisstand 2024). Dies entspricht etwa 351 Verkehrsschildern und damit durchschnittlichen Kosten von rund 214 Euro pro Schild (Preise 2024) bzw. etwa 200 Euro pro Schild bei Preisen von 2022.

Bei Kosten von 200 Euro pro Schild inklusive Montage an bestehenden Konstruktionen ergibt sich ein Investitionsvolumen von:

$$557 \times 200 = 111 \text{ k Euro.}$$

Zusätzliche Kosten hängen von der Art der Identifikation ab. Im Prinzip gibt es das “E-Kennzeichen” für elektrische Fahrzeuge. Allerdings ist es auch erhältlich für Plug-in-Hybride, bei denen die tatsächlich eingesparte Menge CO₂ unklar ist. Weiterhin kostet das “Umtauschen” des Nummernschildes auf ein E-Nummernschild ca. 50 bis 60 Eu; solange also nicht die meisten E-FZe nicht ohnehin mit einem solchen Nummernschild ausgestattet sind, entstehen hier erhebliche gesamtgesellschaftliche Kosten.

Aus diesen Gründen sollte die Einführung einer Plakette in Betracht gezogen werden. Falls zusätzliche Plaketten eingeführt werden, kostet eine Plakette etwa 15 Euro.⁶ Für die ZEZ müssten etwa 700.000 Plaketten erworben werden, was einmalige Kosten von

$$1.100.000 \times 15 = 16,5 \text{ Mio Euro}$$

verursachen würde. Die Zahl von 1,1 Mio. Plaketten stellt eine Näherung dar. Sie ergibt sich aus der Annahme, dass in Berlin insgesamt etwa 1,5 Mio. Fahrzeuge zugelassen sind und davon rund 70 % elektrisch werden müssen. Daraus folgt eine Anzahl von etwa 1,1 Mio. betroffener Fahrzeuge.

Insgesamt ergibt sich damit ein initiales Investitionsvolumen von 16,61 Mio Eu. Verteilt auf 10 Jahre effektive Lebensdauer (vgl. Abschnitt 6.11) wären dies **1661 k Eu/Jahr**.

⁶<https://www.berlin.de/tourismus/infos/1760452-1721039-umweltzone.html>

6.7.2.2. Operative Kosten

Wird als Identifikationsmittel ausschließlich das bestehende E-Kennzeichen verwendet, entstehen keine zusätzlichen operativen Kosten. Bei Verwendung von Plaketten kann die Anzahl der Fahrzeuge, für die jährlich eine Plakette erforderlich ist, anhand der Tabellen in den Dokumenten FZ 5.1 und FZ 5.3 bestimmt werden⁷.

Im Jahr 2023 betrug die Anzahl der Neuzulassungen 103.342 Fahrzeuge, hinzu kamen 182.631 Ummeldungen. Insgesamt ergibt sich damit eine Anzahl von rund 286.000 Fahrzeuge pro Jahr.

Unter der Annahme, dass etwa 70 % dieser Fahrzeuge eine entsprechende Plakette benötigen, ergibt sich eine jährliche Anzahl von rund:

$$286.000 \times 0,7 \approx 200.000$$

neu auszugebenden Plaketten pro Jahr. In diesem Fall betragen die jährlichen operativen Kosten rund 3 Mio. Euro.

Bei Nutzung von E-Kennzeichen könnten diese Kosten entfallen, wenn bei der Zulassung gleich E-Kennzeichen verwendet würden. Allerdings bekommen, wie oben angesprochen, auch Plug-in-Hybride ein solches Kennzeichen.

Da die Kontrolle der Umweltzone bereits durch die Polizei erfolgt, entstehen durch die Einführung der ZEZ-Zone keine zusätzlichen Kontrollkosten.

Wir gehen im folgenden von **3 Mio Eu/Jahr** aus.

6.8. Stoffliche Emissionen

6.8.1. Kostensätze

Zur Monetarisierung der durch Verkehrsmaßnahmen verursachten Emissionsreduktionen von CO₂ und NO_x werden die Kostensätze der Methodenkonvention 3.2 des Umweltbundesamt (UBA) herangezogen (Matthey et al., 2024). Diese Kostensätze repräsentieren bundesweit gültige Durchschnittswerte der externen Kosten pro emittierter Tonne und umfassen insbesondere Gesundheitsfolgekosten, Schäden an Biodiversität, Ernteverluste sowie Materialschäden.

Für CO₂ werden Klimakosten auf Basis einer Zeitpräferenzrate von 0 % angesetzt. Die NO_x-Kosten beziehen sich auf den Verkehrssektor im urbanen Raum und spiegeln vor allem die gesundheitlichen Auswirkungen der lokalen Luftschadstoffbelastung wider.

Für die Ableitung der CO₂-Kosten für das Jahr 2035 wird eine lineare Approximation zwischen den in der Methodenkonvention ausgewiesenen Werten für 2030 und 2050 vorgenommen. Hierzu wird zum Wert für 2030 ein Viertel der Differenz zwischen den Werten für 2050 und 2030 addiert, was rechnerisch $940 + 140 \cdot 0,25 = 975$ EU/t ergibt. Da alle Kostensätze des UBA in Preisen des Jahres 2024 angegeben sind, werden sie zur Anpassung an das Preisniveau des Jahres 2022 mit dem Inflationsfaktor für zwei Jahre von 0,924 multipliziert.⁸

⁷Kraftfahrt-Bundesamt (KBA): https://www.kba.de/DE/Statistik/Produktkatalog/produkte/Fahrzeuge/fz5_nua_uebersicht.html?nn=835828

⁸<https://www.destatis.de/EN/Themes/Economy/Prices/Consumer-Price-Index/Tables/Consumer-prices-12-divisions.html>

Tabelle 6.9.: Angesetzte Kostensätze für Emissionen nach UBA

Schadstoff	Kontext / Kategorie	Kostensatz [€/t]
CO ₂	Klimakosten (0 % Zeitpräferenz)	901
NO _x	Verkehr, Stadt (transport city)	38.808
PM10	–	60.799
CO	–	0
HC	–	554
SO ₂	–	36.221

6.8.2. Gewinne durch CO₂-Reduzierung

Die tägliche Reduktion der CO₂-bedingten Kosten für Fahrten von/nach/innerhalb Berlins ist in der folgenden Tabelle 6.10 dargestellt.

Tabelle 6.10.: Tägliche Reduktion der CO₂-Kosten nach Verkehrsmittelarten

Verkehrsmittel	Einsparung pro Tag [Tsd. €]
PKW-privat	931,07
PKW-kommerziell	770,47
LKW	472,55
Gesamt	2.174,09

6.8.3. Gewinne durch NO_x-Reduzierung

Die Reduktion der durch NO_x-Emissionen verursachten Kosten ist in der folgenden Tabelle 6.11 dargestellt.

Tabelle 6.11.: Einsparung der NO_x-Kosten nach Verkehrsmittelarten

Verkehrsmittel	Einsparung pro Tag [Tsd. €]
PKW-privat	100,12
PKW-kommerziell	74,9
LKW	53,17
Gesamt	228,19

6.8.4. Weitere stoffliche Emissionen

PM₁₀ Die Einführung der ZEZ-Zone hat nur einen geringen Einfluss auf die Partikelmenge (Tabelle 6.12), da nur ein kleiner Teil der Partikel durch die Verbrennung von Kraftstoff entsteht, während der größte Teil durch den Abrieb von Reifen und Bremsbelägen verursacht wird.

HC und SO₂ Bei HC und SO₂ ergeben sich zwar deutliche Reduktionen durch die Einführung der ZEZ, aber deren Monetarisierungen (Tabelle 6.13, Tabelle 6.14) leisten keinen erheblichen Beitrag.

Tabelle 6.12.: Reduktion der PM₁₀-Kosten nach Verkehrsmittelarten

Verkehrsmittel	Einsparung pro Tag [Tsd. €]
PKW-privat	1,22
PKW-kommerziell	1,82
LKW	1,22
Gesamt	4,26

Tabelle 6.13.: Reduktion der HC-Kosten nach Verkehrsmittelarten

Verkehrsmittel	Einsparung pro Tag [Tsd. €]
PKW-privat	0,31
PKW-kommerziell	0,17
LKW	0,01
Gesamt	0,49

Tabelle 6.14.: Reduktion der SO₂-Kosten nach Verkehrsmittelarten

Verkehrsmittel	Einsparung pro Tag [Tsd. €]
PKW-privat	0,18
PKW-kommerziell	0,14
LKW	0,11
Gesamt	0,43

Zusammenfassung bzgl. weiterer stofflicher Emissionen Die Berücksichtigung dieser drei Emissionskomponenten macht daher (ca.) **5,18 k Eu/Tag** aus.

6.9. Gewinne durch Lärm-Reduzierung

Die Bewertung der Schäden durch Straßenverkehrslärm basiert auf einem dynamischen, activity-based Ansatz, der die räumlich-zeitliche Verteilung der Bevölkerung sowie deren tägliche Mobilität berücksichtigt. Die Methodik lehnt sich an den in Kad-doura et al. (2017) vorgeschlagenen Ansatz an und umfasst vier zentrale Schritte:

1. Berechnung der Lärmemissionen,
2. Berechnung der Lärmausbreitung,
3. Bewertung der Bevölkerungsexposition und
4. Monetarisierung der Lärmschäden.

6.9.1. Lärmemissionen

Die Lärmemissionen werden für jedes Straßensegment und jedes Zeitintervall auf Grundlage der deutschen Richtlinie RLS-90 berechnet. Der Emissionspegel hängt von der Verkehrsmenge, dem Anteil schwerer Nutzfahrzeuge sowie der zulässigen Höchstgeschwindigkeit ab. Die Berechnungen erfolgen mit stündlicher Auflösung, und das Ergebnis wird als äquivalenter Dauerschallpegel in dB(A) angegeben.

6.9.2. Lärmausbreitung

Die Lärmausbreitung wird an vordefinierten Empfangspunkten bestimmt, die gleichmäßig über das Untersuchungsgebiet verteilt sind. Für jeden Empfangspunkt wird der Beitrag aller Straßensegmente innerhalb eines definierten Radius berücksichtigt. Dabei werden Dämpfungseffekte durch Entfernung sowie geometrische Eigenschaften einbezogen. Die einzelnen Beiträge werden energetisch summiert, um den gesamten Lärmpegel an jedem Punkt und in jedem Zeitintervall zu bestimmen.

6.9.3. Bevölkerungsexposition

Die Bevölkerungsexposition wird auf Basis einer activity-based Verkehrsnachfragemodellierung bestimmt. Jeder Person werden die Orte ihrer Aktivitäten (z. B. Wohnen, Arbeit, Ausbildung) sowie die jeweilige Aufenthaltsdauer im Tagesverlauf zugeordnet. In jedem Zeitintervall werden die Personen dem nächstgelegenen Empfangspunkt zugewiesen, der ihrem aktuellen Aufenthaltsort entspricht. Die Exposition wird als Anzahl von Nachfrageeinheiten ausgedrückt, welche den Zeitanteil repräsentieren, in dem sich Personen unter Lärmeinwirkung an einem bestimmten Punkt befinden.

6.9.4. Monetarisierung der Lärmschäden

Die Lärmschäden werden durch die Verknüpfung von Lärmpegeln und Bevölkerungsexposition mithilfe einer Schadensfunktion berechnet, wie sie in den deutschen *Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen* (EWS) vorgeschlagen wird. Für jeden Empfangspunkt j und jedes Zeitintervall t ergibt sich der Schaden zu:

$$C_{j,t} = \begin{cases} c_T \cdot N_{j,t} \cdot 2^{0.1(I_{j,t} - I_t^{\min})}, & \text{falls } I_{j,t} \geq I_t^{\min}, \\ 0, & \text{falls } I_{j,t} < I_t^{\min}, \end{cases}$$

wobei $I_{j,t}$ den Lärmpegel, $N_{j,t}$ die Anzahl der exponierten Nachfrageeinheiten, $I_t^{\min}$ den zeitabhängigen Schwellenwert und c_T den monetären Kostensatz pro Zeiteinheit bezeichnet. Die Schwellenwerte sind in den Abend- und Nachtstunden niedriger, was die erhöhte Lärmempfindlichkeit der Bevölkerung in diesen Zeiträumen widerspiegelt. Die jährlichen Basiswerte der Lärmschäden werden gemäß den EWS-Empfehlungen angesetzt und auf das in dieser Studie verwendete Preisniveau 2022 umgerechnet. Der Gesamtschaden durch Lärm ergibt sich aus der Aggregation über alle Empfangspunkte und Zeitintervalle. Dieser Ansatz ermöglicht es, die tageszeitliche Dynamik der Bevölkerungsaktivitäten zu berücksichtigen und Lärmauswirkungen nicht nur am Wohnort, sondern auch an Arbeits- und Ausbildungsorten zu bewerten.

6.9.5. Ergebnisse

Nach der Analyse des Noise-Szenarios haben wir folgende Ergebnisse erhalten: Im *EV&ZEErelaxiert* beträgt der Wert 988 Tsd. EUR pro Tag, während er im *EVrelaxiert* 1032 Tsd. EUR pro Tag erreicht.

Die Werte aus den Baseline-Szenarien werden für das Jahr 2035 nicht zusätzlich fortgeschrieben, da gemäß der Diffusionskurve sowie den Werten in den Tabellen 3.3 und 3.1 die Werte für 2035 den Baseline-Szenarien mit den entsprechenden Maßnahmen entsprechen; zudem hängt das Lärmniveau bei Geschwindigkeiten über 30 km/h von der Modal Split ab.

Der Unterschied zwischen beiden Szenarien beträgt **44 Tsd. EUR/Tag**.

Tabelle 6.15.: Ergebnisse der Analyse der Noise-Szenarien

Szenario	Wert pro Tag [<i>EU</i> ₂₀₂₂]
<i>EV&ZEZrelaxiert</i>	988 Tsd. EUR
<i>EVrelaxiert</i>	1032 Tsd. EUR
Differenz pro Tag	44 Tsd. EUR

6.10. Reduktion von Verkehrsunfällen

Derzeit liegen keine direkt passenden Daten zu den volkswirtschaftlichen Kosten von Verkehrsunfällen speziell für Berlin vor. Für ganz Deutschland wurden entsprechende Daten jedoch von der Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht: Die volkswirtschaftlichen Kosten von Verkehrsunfällen beliefen sich auf 37,16 Mrd. Euro pro Jahr.⁹ Für eine grobe Abschätzung kann der Anteil der Verkehrsunfälle in Berlin an allen Verkehrsunfällen in Deutschland herangezogen werden. Im Jahr 2023 wurden in Berlin rund 134 000 Verkehrsunfälle registriert,¹⁰ während die Gesamtzahl der Verkehrsunfälle in Deutschland im selben Jahr 2 519 525 betrug.¹¹ Damit ergibt sich für Berlin ein Anteil von

$$\frac{134\,000}{2\,519\,525} \approx 0,0532 \approx 5,3\%.$$

Unter der Annahme, dass sich die volkswirtschaftlichen Kosten proportional zur Anzahl der Unfälle verteilen, ergeben sich für Berlin jährliche Unfallkosten von rund

$$37,16 \text{ Mrd. Euro} \times 5,3\% \approx 2 \text{ Mrd. Euro}.$$

Mit der Einführung der ZEZ kommt es zwar zu einem Rückgang der Autonutzung, dieser fällt jedoch deutlich geringer aus als zunächst angenommen. Die Gesamtzahl der Autofahrten sinkt von 42.216.381 ohne ZEZ auf 41.118.232 mit ZEZ, was einer Reduktion von rund 3 % entspricht.

Ausgehend vom Rückgang der Autonutzung um etwa 3 % kann daher angenommen werden, dass durch die Einführung der ZEZ-Zone eine Reduktion der unfallbedingten Kosten in der Größenordnung von etwa **60 Mio. Euro** pro Jahr erreicht werden könnte.

6.11. Ökonomische Gesamtbetrachtung

Wir fassen unsere Resultate bzgl. der ökonomischen Bewertung der ZEZ in Tabelle 6.16 zusammen. Die Tabelle weist die *zusätzlichen* Veränderungen aus gegenüber den

⁹Bundesanstalt für Straßenwesen: *Volkswirtschaftliche Kosten von Straßenverkehrsunfällen*, verfügbar unter: https://www.bast.de/DE/Publikationen/Statistik/Unfaelle/volkswirtschaftliche_kosten.pdf?__blob=publicationFile&v=2.

¹⁰Berlin.de: *Police presents Berlin road safety report 2023*, verfügbar unter: <https://www.berlin.de/en/news/8739674-5559700-police-presents-berlin-road-safety-repor.en.html>.

¹¹Statistisches Bundesamt (Destatis): *Verkehrsunfälle 2023*, verfügbar unter: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Verkehrsunfaelle/Tabellen/unfaelle-verunglueckte-.html>.

Veränderungen, die ohnehin wegen der fortschreitenden Elektrifizierung (im “1.1/0.8”-Szenario) zu erwarten sind. Die letzten beiden Spalten enthalten die monetarisierten Veränderungen pro Tag bzw. pro Jahr. Die Tabelle wiederholt die Werte aus den Abschnitten 6.3 bis 6.8; Werte, die ursprünglich pro Tag angegeben sind, werden mit 350 multipliziert; Werte, die ursprünglich pro Jahr angegeben sind, werden durch 350 dividiert.

Tabelle 6.16.: Ökonomische Interpretation

Gewinne(+)/Verluste(–) ...	[Tsd Eu/day]	[Mio Eu/yr]
... durch Investitionen für die ZEZ	-6	-2
... durch die Betriebskosten der ZEZ	-9	-3
... der Nutzenden	-505	-177
... des kommerziellen Verkehrs (Pkw, Lkw)	-1131	-396
... von Firmen	0	0
... durch Mehreinnahmen ÖV-Tickets	86	30
... durch Mindereinnahmen Energiesteuer	-114	-40
... durch Reduktion CO ₂ -Ausstoß von privaten Pkw	931	326
... durch Reduktion NO _x -Ausstoß von privaten Pkw	100	35
... durch Reduktion CO ₂ -Ausstoß von komm. Pkw	770	270
... durch Reduktion NO _x -Ausstoß von komm. Pkw	75	26
... durch Reduktion CO ₂ -Ausstoß von komm. Lkw	473	166
... durch Reduktion NO _x -Ausstoß von komm. Lkw	53	19
... durch weitere stoffliche Emissionen	5	2
... durch Veränderung Lärm	44	15
... durch Veränderung Unfälle	171	60
Summe	943	331
Summe der Nutzen durch CO ₂ -Einsparungen	2174	762

Die Maßnahme hat insgesamt einen positiven Nutzen. Die großen positiven Beiträge stammen, wie intendiert, von den CO₂-Einsparungen (insgesamt 762 Mio Eu/Jahr). Große negative Beiträge entstehen durch Zeitverluste und Kostenerhöhungen beim privaten Verkehr (–177 Mio Eu/Jahr) und Kostenerhöhungen beim kommerziellen Verkehr (–396 Mio Eu/Jahr). Die Kostenerhöhungen entstehen in beiden Fällen durch den “erzwungenen” E-FZ-Kauf, welcher sich bei kleinen Tageslaufleistungen finanziell nicht lohnt.

Bzgl. der Einnahmen/Ausgaben des Staates kompensieren sich die Verluste bei der Mineralölsteuer in etwa mit den Gewinnen bei den Fahrgeldeinnahmen. Aus Berliner Sicht ist dabei festzustellen, dass erstere beim Bund anfallen, während letztere in Berlin verbleiben.

Ein Nutzen-Kosten-Verhältnis (NKV) im Sinne des BVWP kann hier nicht ausgewiesen werden, da hier keine (wesentlichen) Investitionskosten entstehen, durch die dividiert werden kann.

6.12. Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen aus der Nutzen-Kosten-Analyse (NKA)

Insgesamt kann folgendes konstatiert werden:

1. Die Maßnahme hat einen positiven Gesamtnutzen.
2. Die Maßnahme hat einen deutlichen negativen Nutzen bei Reisezeiten (für privaten Verkehr) und bei monetären Reisekosten (privater und kommerzieller Verkehr). Die monetären Kosten entstehen durch die “erzwungene” Umstellung auf E-Mobilität selbst in Fällen, wo sich das finanziell nicht lohnt.
3. Die eingesparten CO₂-Kosten überkompensieren diese negativen Nutzen.
4. Die Maßnahme wäre ein Beitrag in Richtung ‘lebenswerte Stadt’ (Reduktion Lärm, Reduktion Schadstoffe über CO₂ hinaus, Reduktion Unfälle), selbst wenn diese positiven Nutzen allein (also ohne die CO₂-Komponente) die negativen Nutzen nach Punkt 2 nicht aufwiegen.

Auf eine Aufsummerierung über mehrere Jahre, verbunden mit einer entsprechenden Diskontierung, verzichten wir an dieser Stelle, da die Lebensdauer der Maßnahme schlecht abschätzbar ist: Zum einen wirkt die ZEZ bereits vor 2035, da sich der Fahrzeugpark schneller umstellt als ohne ZEZ. Andererseits muss nach derzeitiger Gesetzeslage der gesamte Verkehr 2045 klimaneutral sein, so dass die *zusätzliche* Wirkung einer ZEZ ab dann nicht mehr vorhanden sein wird.

Wenn man die Diffusionskurven aus Abschnitt 2.7 durch eine Raute annähert, dann könnte man die Wirkung der ZEZ über ihre gesamte (sinnvolle) Lebensdauer zu

$$\text{Wirkung/Jahr} \times 20 \text{ Jahre}/2$$

abschätzen, also die Jahreswerte aus Tabelle 6.16 mit 10 multiplizieren. Aus diesem Blickwinkel betrachtet würde die Maßnahme über ihre Lebensdauer den Gegenwert von $10 \text{ J} \times 762 \text{ Mio Eu/J} = 7620 \text{ Mio Eu CO}_2$ einsparen, was ca. 8,5 Mio t CO₂ entspricht. Dafür würde man vermutlich auf deutliche Widerstände wegen der Reisezeit- sowie monetären Reisekosten-Verluste treffen.

6.13. Sensitivität gegenüber dem CO₂-Kostensatz

Der Gesamtnutzen wird maßgeblich durch die monetarisierten CO₂-Einsparungen bestimmt (vgl. Tabelle 6.16). Daraus folgt, dass die absolute Höhe des ausgewiesenen Nettonutzens sensitiv gegenüber dem zugrunde gelegten CO₂-Kostensatz (sowie ggf. Systemgrenzen wie TTW/WTW und Preisstand) ist. Die Richtung der Aussage (positiver Nettoeffekt) ist in der vorliegenden Konstellation plausibel; die Höhe ist als annahmenabhängig zu interpretieren und bietet sich für Sensitivitätsdarstellungen an (s. Anhang A.3).

7. Arbeitspaket 4: Belastungen für unterschiedliche Zielgruppen

7.1. Privater Verkehr

7.1.1. Differenzierung nach Einkommen

In Abschnitt 6.3 haben wir die aufsummierte Zahlungsbereitschaft als Kriterium für die Gewinne/Verluste im privaten Verkehr verwendet. In Tabelle 7.1 weisen wir nun zusätzlich die jeweiligen Werte für die 10% einkommensstärkste und die 10% einkommensschwächste Bevölkerung aus. Wie in Abschnitt 6.3 bedeuten negative Werte Wohlfahrtsverluste für den betroffenen Gruppen.

Tabelle 7.1.: Wohlfahrtsveränderungen pro Tag für unterschiedliche Bevölkerungsgruppen. Die Werte für die Gesamtbevölkerung sind identisch mit denjenigen in Tabelle 6.1.

Zahlungsbereitschaft gesamt [EUR]	ins- ... pro Person [EUR]
Gesamtbevölkerung:	
-505k	-0,1356
10 % einkommensstärkste Bevölkerung:	
-195k	-0,4860
10 % einkommensschwächste Bevölkerung:	
-0,039k	-0,0001

Es ist sofort auffällig, dass das einkommensschwächste Dezil fast keine Wohlfahrtsverluste hat, während das einkommensstärkste Dezil fast 40% (=195/505) der Verluste bei den Zahlungsbereitschaften trägt. Dies ist dadurch erklärt, dass das einkommensschwächste Dezil im Modell auch ohne ZEZ kaum bis gar nicht Auto fährt, und daher durch die ZEZ nicht betroffen ist. Hingegen hat das einkommensstärkste Dezil den höchste Auto-Anteil, und damit die höchsten Verluste.

Es sei an dieser Stelle auch kurz darauf hingewiesen, dass die hier verwendete aufsummierte Zahlungsbereitschaft nur *eine* Möglichkeit ist, individuelle Nutzenfunktionen zu aggregieren; für eine Diskussion siehe z.B. Wikipedia (accessed 2026-01-24). Für das vorliegende Projekt ergibt sich durch andere (typische) Aggregationen keine andere Interpretation, so dass darauf verzichtet wird.

7.1.2. Differenzierung nach Mobilitätsverhalten

Weiterhin zeigt die Simulation deutliche Unterschiede nach Mobilitätsverhalten. Bevölkerungsgruppen, die derzeit keine Autofahrer sind, verlieren durch diese Maßnahme

im Durchschnitt fast nichts. Der durchschnittliche Wohlstandsverlust beträgt etwa 0.03 Cent pro Person und Tag.

Demgegenüber ergibt sich für aktive Autofahrerinnen und Autofahrer eine durchschnittliche Wohlfahrtseinbuße von rund 30 Cent pro Person und Tag. Diese Differenzierung entspricht der intendierten Lenkungswirkung der Maßnahme, bei der der motorisierte Individualverkehr belastet wird.

7.1.3. Instrumente zur sozialen Abfederung

Die Analyse der Verteilungswirkungen zeigt, dass für einkommensschwache Bevölkerungsgruppen keine relevanten negativen Effekte durch die Einführung der ZEZ auftreten. Die monetarisierten Wohlfahrtswirkungen liegen für diese Gruppen auf einem sehr niedrigen Niveau und sind praktisch vernachlässigbar.

Für einkommensstarke Bevölkerungsgruppen lassen sich zwar negative monetäre Effekte feststellen, diese fallen jedoch ebenfalls gering aus und bewegen sich im Bereich weniger Cent pro Person und Tag. Aus sozialpolitischer Sicht stellen diese Effekte keine substantielle Mehrbelastung dar. Vor diesem Hintergrund ergibt sich für private Haushalte insgesamt kein Bedarf an zusätzlichen spezifischen Unterstützungs- oder Kompensationsmaßnahmen.

7.2. Kommerzieller Verkehr

Für den kommerziellen Verkehr sind die Auswirkungen der ZEZ hingegen ausgeprägter (siehe Abschnitt 6.4). Insbesondere für dienstleistungsbezogenen Personenverkehr ergeben sich monetarisierte Wohlfahrtseinbußen.

Zur Analyse der Auswirkungen der Einführung einer ZEZ auf verschiedene Geschäftsbereiche wurden die Fahrten des kommerziellen Verkehrs in folgende Kategorien unterteilt:

- **Personenwirtschaftsverkehr (PWV)**
- **serviceorientierter Personenwirtschaftsverkehr (PWV-S)**
- **Güterverkehr (GV)**

PWV-S umfasst reine Dienstleistungsfahrten im Personenwirtschaftsverkehr, d. h. Fahrten ohne relevanten Güteranteil, die prinzipiell auch mit anderen Verkehrsmitteln (z. B. ÖV oder Fahrrad) zurückgelegt werden könnten; typische Anlässe sind etwa Kundentermine sowie der Besuch von Messen oder Kongressen (Steinmeyer, 2007). PWV umfasst Fahrten des Personenwirtschaftsverkehrs mit Güteranteil, beispielsweise Verkehre von Handwerkern oder Beschäftigten im Kundendienst, die für ihre Tätigkeit Werkzeug und Ersatzteile mitführen (Steinmeyer, 2007).

Die Ergebnisse des Kostenvergleichs für die Szenarien mit (Szenario *EV&ZEZrelaxiert*) und ohne ZEZ (Szenario *EVrelaxiert*) sind in Tabelle 7.2 dargestellt.

Wie aus den Ergebnissen ersichtlich ist, hat die Einführung der ZEZ die geringsten Auswirkungen auf den GV. Dies ist eine wichtige Beobachtung, da im Kostenstrukturmodell von Logistik- und Lieferdiensten die Transportkosten einen signifikanten Anteil an den Gesamtausgaben ausmachen.

Demgegenüber ist der Personenwirtschaftsverkehr (PWV und PWV-S) stärker betroffen. In diesen Segmenten werden oft nur deutlich kürzere Tagesstrecken gefahren, so

Tabelle 7.2.: Vergleich der Gesamtkosten: Szenario *EV&ZEEZrelaxiert*(mit ZEEZ) vs. Szenario *EVrelaxiert*(ohne ZEEZ) für den kommerziellen Verkehr nach Gruppen, Mio. EU

	PWV	PWV-S	GV
Szenario <i>EV&ZEEZrelaxiert</i> (mit ZEEZ)	5,91	10,88	10,10
Szenario <i>EVrelaxiert</i> (ohne ZEEZ)	5,64	10,27	9,86
Differenz	0,28	0,61	0,24
Relative Differenz	5 %	6 %	2 %

dass sich die Umstellung auf E-FZe finanziell nicht lohnt. Hier führt also erst die Einführung der einer ZEEZ zur Umstellung, bei gleichzeitigen finanziellen Verlusten. Gleichzeitig ist zu berücksichtigen, dass für Unternehmen in Deutschland bereits bestehende Instrumente zur Unterstützung des Übergangs zur Elektromobilität zur Verfügung stehen. Dazu zählen insbesondere steuerliche Abschreibungsmöglichkeiten, betriebliche Steuervergünstigungen sowie weitere fiskalische Anreize für elektrisch betriebene Fahrzeuge. Diese bestehenden Maßnahmen wirken kompensierend und tragen dazu bei, die durch die ZEEZ entstehenden Belastungen für den kommerziellen Verkehr zumindest teilweise abzufedern.

8. Arbeitspaket 5: Gestaltung und Wirkungsabschätzung von Ausnahmeregelungen

8.1. Bewertung möglicher Ausnahmeregelungen

Die Einführung von ZEZ/LEZ erfordert eine sorgfältige Abwägung zwischen ökologischer Wirksamkeit und sozialer sowie funktionaler Verträglichkeit. Internationale Erfahrungen zeigen, dass Ausnahmeregelungen ein zentrales Instrument darstellen, um unverhältnismäßige Belastungen einzelner Nutzergruppen zu vermeiden, ohne die grundsätzlichen Klimaschutz- und Luftqualitätsziele zu gefährden.

Im Folgenden werden mögliche Ausnahmeregelungen für ausgewählte Zielgruppen analysiert. Die Analyse stützt sich auf die Erfahrungen der London-wide ULEZ, die Systeme der Verkehrs- und Umweltabgaben in Stockholm und Göteborg sowie auf den schottischen Leitfaden zu LEZ London Authority (2021); Eliasson (2009); Börjesson (2014); Scotland (2021).

8.1.1. Handwerksbetriebe

Handwerksbetriebe sind in besonderem Maße auf den Einsatz von leichten Nutzfahrzeugen angewiesen, deren durchschnittliche Nutzungsdauer häufig über der von privaten Personenkraftwagen liegt. Eine kurzfristige Anpassung an strenge Emissionsanforderungen kann insbesondere für kleine und mittlere Betriebe erhebliche wirtschaftliche Belastungen verursachen.

Die London-wide ULEZ sah daher zeitlich befristete Ausnahmeregelungen für kleine Unternehmen und selbstständige Handwerksbetriebe vor. Diese Ausnahmen waren als Übergangsinstrumente ausgestaltet und wurden durch Förderprogramme zur Flottenerneuerung ergänzt London Authority (2021). Ziel war es, Anpassungskosten abzufedern und gleichzeitig einen klaren zeitlichen Rahmen für den Übergang zu emissionsärmeren Fahrzeugen vorzugeben.

Demgegenüber verfolgen die schwedischen Systeme in Stockholm und Göteborg einen restriktiveren Ansatz. Dort werden Ausnahmen für gewerbliche Nutzer nur in sehr begrenztem Umfang gewährt. Stattdessen wird auf frühzeitige Kommunikation, hohe Planungssicherheit sowie ökonomische Anreize zur schrittweisen Erneuerung des Fahrzeugbestands gesetzt Eliasson (2009); Börjesson (2014).

Der schottische Leitfaden zu Low Emission Zones betont ausdrücklich, dass dauerhafte Ausnahmen für Unternehmen nicht mit den Zielen von Umweltzonen vereinbar sind. Zulässig sind lediglich zeitlich klar befristete und zweckgebundene Ausnahmen, die an einen nachvollziehbaren Transformationspfad gekoppelt sind Scotland (2021).

8.1.2. Menschen mit Mobilitätseinschränkungen

Für Menschen mit Mobilitätseinschränkungen stellt der motorisierte Individualverkehr häufig eine notwendige Voraussetzung für gesellschaftliche Teilhabe dar. Ein-

schränkungen des Fahrzeugzugangs können daher zu erheblichen Nachteilen in der Alltagsmobilität führen und soziale Ungleichheiten verstärken.

In der London-wide ULEZ bestehen individuelle Ausnahmeregelungen für Personen mit anerkannten Mobilitätseinschränkungen, unter anderem in Form verlängerter Übergangsfristen und personenbezogener Befreiungen für speziell angepasste Fahrzeuge London Authority (2021). Auch in den schwedischen Systemen in Stockholm und Göteborg existieren vergleichbare individuelle Befreiungsmöglichkeiten, die an klare administrative Kriterien gebunden sind Eliasson (2009); Börjesson (2014).

Der schottische LEZ-Guidance verfolgt einen explizit sozial orientierten Ansatz. Er erkennt an, dass Menschen mit Mobilitätseinschränkungen häufig mehr Zeit für den Umstieg auf emissionsarme Fahrzeuge benötigen und dass in bestimmten Fällen langfristige oder faktisch dauerhafte Ausnahmeregelungen verhältnismäßig sein können, sofern diese personenbezogen, überprüfbar und transparent ausgestaltet sind Scotland (2021).

8.1.3. Einsatzfahrzeuge

Einsatzfahrzeuge wie Rettungsdienste, Feuerwehr, Polizei sowie Fahrzeuge kritischer Infrastrukturen nehmen in allen betrachteten Systemen eine Sonderstellung ein. Ihre uneingeschränkte Einsatzfähigkeit besitzt Vorrang vor umweltpolitischen Steuerungszielen.

Entsprechend sind Einsatzfahrzeuge sowohl in der London-wide ULEZ als auch in den Systemen in Stockholm und Göteborg vollständig von Umweltzonenbeschränkungen und Gebühren ausgenommen London Authority (2021); Eliasson (2009); Börjesson (2014). Diese Ausnahmen gelten dauerhaft und unabhängig von der Emissionsklasse der Fahrzeuge.

Der schottische Leitfaden zu LEZ bestätigt diesen Ansatz ausdrücklich und stellt klar, dass Umweltzonen nicht als Instrument zur kurzfristigen Emissionsregulierung öffentlicher Einsatzflotten geeignet sind. Die ökologische Transformation dieser Fahrzeugbestände soll vielmehr über langfristige Beschaffungs- und Investitionsstrategien erfolgen Scotland (2021).

8.2. Abschätzung der Wirkungskosten

Der internationale Vergleich zeigt, dass die tatsächliche Wirkung maßgeblich von Umfang, Dauer und Zielgenauigkeit der Ausnahmen abhängt.

8.2.1. Abschätzung der Minderung der Wirksamkeit der ZEZ

Zeitlich und personell klar begrenzte Ausnahmeregelungen, wie sie insbesondere für Handwerksbetriebe und Menschen mit Mobilitätseinschränkungen vorgesehen sind, führen in der Regel nur zu einer begrenzten Minderung der Emissions- und Verkehrsreduktion. Der Erfahrungsbericht zur London-wide ULEZ zeigt, dass ein Großteil der betroffenen Fahrzeughalter innerhalb weniger Jahre auf emissionsärmere Fahrzeuge umgestiegen ist, sodass die langfristige Umweltwirkung der Maßnahme erhalten blieb London Authority (2021).

Auch die Erfahrungen aus Stockholm und Göteborg deuten darauf hin, dass restriktive, gut kommunizierte Ausnahmepolitiken mit stabilen und nachhaltigen Emissionsmin-

derungen vereinbar sind Eliasson (2009); Börjesson (2014).

8.2.2. Abschätzung des Missbrauchspotenzials

Das Missbrauchspotenzial von Ausnahmeregelungen hängt wesentlich von deren Ausgestaltung ab. Pauschale oder unbefristete Ausnahmen erhöhen das Risiko strategischer Fahrzeuganmeldungen oder Zweckentfremdungen. Demgegenüber reduzieren personenbezogene, antragsbasierte und zeitlich befristete Ausnahmen das Missbrauchspotenzial erheblich.

Der schottische LEZ-Guidance empfiehlt ausdrücklich transparente, überprüfbare und individuell begründete Ausnahmeregelungen, um Fehlanreize zu minimieren und die Glaubwürdigkeit von Umweltzonen zu sichern Scotland (2021).

8.3. Entwicklung von Ausnahmekategorien

Auf Grundlage der vorangegangenen Analyse werden Ausnahmekategorien vorgeschlagen, die klar abgegrenzt, administrativ handhabbar und auf das notwendige Minimum beschränkt sind. Ziel ist es, die ökologische Wirksamkeit der ZEZ nicht zu untergraben und gleichzeitig funktional notwendige sowie sozial begründete Ausnahmen zu ermöglichen.

8.3.1. Handwerksbetriebe und gewerbliche Nutzung

Unternehmen verfügen über einen Anpassungszeitraum von bis zu zehn Jahren bis zur vollständigen Wirksamkeit der Zone. Dieser Zeitraum ist ausreichend, um die Einführung der ZEZ in der Investitions- und Finanzplanung zu berücksichtigen. Dauerhafte Ausnahmen für Handwerksbetriebe sind daher nicht vorgesehen.

Für Bau-, Montage- und sonstige temporär eingesetzte Spezialfahrzeuge sollen zeitlich und räumlich klar begrenzte Ausnahmegenehmigungen vorgesehen werden. Diese Genehmigungen sind ausschließlich für konkret benannte Fahrten zwischen definierten Herkunfts- und Zielorten zu erteilen und zeitlich strikt zu befristen. Eine pauschale oder wiederkehrende Ausnahme ist auszuschließen.

8.3.2. Einsatzfahrzeuge und kritische Dienste

Aufgrund ihrer zentralen Bedeutung für die öffentliche Sicherheit und Daseinsvorsorge sind Einsatzfahrzeuge dauerhaft von den Zugangsbeschränkungen der ZEZ auszunehmen. Diese Ausnahmen gelten unabhängig von der Emissionsklasse der Fahrzeuge.

Die Umstellung der Fahrzeugflotten von Rettungsdiensten, Feuerwehr, Polizei und weiteren kritischen Diensten soll nicht über restriktive Zonenregelungen erfolgen, sondern im Rahmen städtischer Beschaffungs-, Förder- und Betreiberstrategien. Die Verantwortung für den Emissionsabbau liegt damit auf der Ebene der kommunalen Politik und der jeweiligen Trägerorganisationen.

8.3.3. Menschen mit Mobilitätseinschränkungen

Für Menschen mit dauerhaften Einschränkungen des Bewegungsapparates sind permanente Ausnahmeregelungen vorzusehen, da der motorisierte Individualverkehr für diese Gruppe häufig unverzichtbar ist.

Um Missbrauch zu vermeiden, ist die Anzahl der pro Person erteilten Ausnahme genehmigungen strikt zu begrenzen. Die Ausnahme ist personenbezogen auszugestalten und auf das tatsächlich genutzte Fahrzeug zu beschränken. Mehrfachgenehmigungen oder fahrzeugunabhängige Ausnahmen sind auszuschließen.

8.3.4. Zusammenfassende Bewertung

Die vorgeschlagenen Ausnahmekategorien folgen dem Prinzip der funktionalen Notwendigkeit und der sozialen Verhältnismäßigkeit. Durch klare zeitliche, räumliche und personenbezogene Begrenzungen wird sichergestellt, dass Ausnahmen die Wirksamkeit der ZEZ nur in minimalem Umfang beeinträchtigen und zugleich administrativ kontrollierbar bleiben.

A. Anhang

A.1. Tabelle: Neuzulassungen in Berlin (Auswahl 2019–2025)

Tabelle A.1.: Neuzulassungen Elektro		
Jahr	Elektro	Anteil Elektro
2019	2588	0,033
2020	4951	0,097
2021	8737	0,221
2022	10479	0,259
2023	14710	0,289
2024	10247	0,281
2025	11201	0,328

Quelle: <https://www.statistik-berlin-brandenburg.de/115-2025>

A.2. Neuzulassungen in Norwegen

Tabelle A.2.: Neuzulassungen in Norwegen

Jahr	Quartal	BEV (%)	Jahr	Quartal	BEV (%)
2012	Q1	2,3	2018	Q1	41,0
2012	Q2	2,7	2018	Q2	45,5
2012	Q3	3,1	2018	Q3	48,9
2012	Q4	3,6	2018	Q4	50,3
2013	Q1	5,1	2019	Q1	55,2
2013	Q2	6,0	2019	Q2	57,8
2013	Q3	6,8	2019	Q3	60,1
2013	Q4	7,5	2019	Q4	61,5
2014	Q1	12,1	2020	Q1	65,4
2014	Q2	13,5	2020	Q2	68,2
2014	Q3	14,8	2020	Q3	71,0
2014	Q4	15,9	2020	Q4	73,1
2015	Q1	17,5	2021	Q1	75,6
2015	Q2	19,2	2021	Q2	78,9
2015	Q3	20,5	2021	Q3	81,2
2015	Q4	22,1	2021	Q4	83,0
2016	Q1	23,0	2022	Q1	84,7
2016	Q2	25,4	2022	Q2	86,5
2016	Q3	27,8	2022	Q3	88,1
2016	Q4	29,5	2022	Q4	89,4
2017	Q1	31,2	2023	Q1	90,8
2017	Q2	33,8	2023	Q2	92,0
2017	Q3	36,1	2023	Q3	93,2
2017	Q4	38,4	2023	Q4	94,0

A.3. Anhang: Sensitivität zum CO₂-Kostensatz (UBA Methodenkonvention 3.2)

Motivation und Vorgehen. Die UBA-Methodenkonvention 3.2 empfiehlt explizit, neben der Hauptrechnung mit 0% Zeitpräferenzrate (PRTP) eine Sensitivitätsanalyse mit einem alternativen CO₂-Kostensatz bei 1% Zeitpräferenzrate durchzuführen. In dieser Sensitivität wird ausschließlich der CO₂-Kostensatz variiert; alle übrigen Annahmen und Ergebnisgrößen der Nutzen-Kosten-Analyse bleiben unverändert. Die physischen Emissionsreduktionen sind daher identisch; es ändert sich nur deren Monetarisierung. Zusätzlich wird eine mittlere CO₂-Kostenannahme als Mittelwert zwischen 0% und 1% PRTP ausgewiesen.

Herleitung der alternativen CO₂-Kostensätze für 2035. Für die Variante mit 1% Zeitpräferenzrate werden die in der Methodenkonvention ausgewiesenen Kostensätze zwischen 2030 und 2050 linear auf 2035 interpoliert. Analog zur Hauptrechnung werden die Werte anschließend auf das Preisniveau 2022 umgerechnet. Daraus ergibt sich für 2035 ein alternativer CO₂-Kostensatz von 360 €₂₀₂₄/t CO₂ und somit 333 €₂₀₂₂/t CO₂. Der mittlere Kostensatz ergibt sich als arithmetischer Mittelwert zwischen dem Kostensatz der Hauptrechnung (0% PRTP) und dem alternativen Kostensatz (1% PRTP), jeweils in Preisstand 2022.

A.3.1. Sensitivität: CO₂-Kostensatz nach UBA (1% Zeitpräferenzrate)

Tabelle A.3.: Ökonomische Interpretation (Sensitivität: CO₂-Kostensatz nach UBA, 1% Zeitpräferenz)

Gewinne(+)/Verluste(-) ...	[Tsd Eu/day]	[Mio Eu/yr]
... durch Investitionen für die ZEZ	-6	-2
... durch die Betriebskosten der ZEZ	-9	-3
... der Nutzenden	-505	-177
... des kommerziellen Verkehrs (Pkw, Lkw)	-1131	-396
... von Firmen	0	0
... durch Mehreinnahmen ÖV-Tickets	86	30
... durch Mindereinnahmen Energiesteuer	-114	-40
... durch Reduktion CO ₂ -Ausstoß von privaten Pkw	344	120
... durch Reduktion NO _x -Ausstoß von privaten Pkw	100	35
... durch Reduktion CO ₂ -Ausstoß von komm. Pkw	285	100
... durch Reduktion NO _x -Ausstoß von komm. Pkw	75	26
... durch Reduktion CO ₂ -Ausstoß von komm. Lkw	175	61
... durch Reduktion NO _x -Ausstoß von komm. Lkw	53	19
... durch weitere stoffliche Emissionen	5	2
... durch Veränderung Lärm	44	15
... durch Veränderung Unfälle	171	60
Summe	-427	-150
Summe der Nutzen durch CO ₂ -Einsparungen	804	281
Summe (ohne kommerziellen Verkehr)	116	40
Summe der Nutzen durch CO ₂ -Einsparungen (ohne kommerziellen Verkehr)	344	120

Interpretation. Gegenüber der Hauptrechnung sinkt der monetarisierte Klimanutzen proportional zum reduzierten CO₂-Kostensatz. Damit verschiebt sich die monetäre Gesamtbewertung in Richtung der negativen Beiträge aus Reisezeitverlusten und monetären Reisekosten. Alle nicht-klimatischen Komponenten bleiben unverändert und sind insofern robust gegenüber der CO₂-Bewertung.

A.3.2. Sensitivität: mittlere CO₂-Kostenannahme (Mittelwert zwischen 0% und 1% PRTP)

Tabelle A.4.: Ökonomische Interpretation (Sensitivität: mittlere CO₂-Kostenannahme als Mittelwert zwischen 0% und 1% PRTP)

Gewinne(+)/Verluste(-) ...	[Tsd Eu/day]	[Mio Eu/yr]
... durch Investitionen für die ZEZ	-6	-2
... durch die Betriebskosten der ZEZ	-9	-3
... der Nutzenden	-505	-177
... des kommerziellen Verkehrs (Pkw, Lkw)	-1131	-396
... von Firmen	0	0
... durch Mehreinnahmen ÖV-Tickets	86	30
... durch Mindereinnahmen Energiesteuer	-114	-40
... durch Reduktion CO ₂ -Ausstoß von privaten Pkw	638	223
... durch Reduktion NO _x -Ausstoß von privaten Pkw	100	35
... durch Reduktion CO ₂ -Ausstoß von komm. Pkw	528	185
... durch Reduktion NO _x -Ausstoß von komm. Pkw	75	26
... durch Reduktion CO ₂ -Ausstoß von komm. Lkw	324	113
... durch Reduktion NO _x -Ausstoß von komm. Lkw	53	19
... durch weitere stoffliche Emissionen	5	2
... durch Veränderung Lärm	44	15
... durch Veränderung Unfälle	171	60
Summe	259	90
Summe der Nutzen durch CO ₂ -Einsparungen	1490	521
Summe (ohne kommerziellen Verkehr) Summe (ohne kommerziellen Verkehr)	410	143
Summe der Nutzen durch CO ₂ -Einsparungen (ohne kommerziellen Verkehr)	638	223

Interpretation. Bei der mittleren CO₂-Kostenannahme liegen die monetarisierten Klimanutzen und damit die Gesamtsumme erwartungsgemäß zwischen den Ergebnissen der Hauptrechnung (0% PRTP) und der 1%-Sensitivität. Auch hier bleiben alle nicht-klimatischen Komponenten unverändert; die Unterschiede resultieren ausschließlich aus der Monetarisierung der identischen physischen CO₂-Einsparungen.

A.4. Preise der kommerziellen Fahrzeuge mit Preisstand 2022

				Elektro				Elektro				Elektro	
	Datenquelle	FE-Bericht BVWP 2030, Tabelle 8-32				FE-Bericht BVWP 2030, Tabelle 8-37		FE-Bericht BVWP 2030, Tabelle 8-37		FE-Bericht BVWP 2030, Tabelle 8-37			
	FzgTyp	Golf 1.4 Trendline		Golf 1.4 Trendline (EV Faktor 1.1 Beschaffung, DistFct ggü. ICEV)		VW Caddy		VW Caddy (EV Faktor 1.1 Beschaffung, DistFct ggü. ICEV)		2.8 bis 3.5 t (Mercedes 313)			
	Modell			DistFct	DistFct			DistFct	DistFct	Mercedes 313		DistFct	DistFct
	Antrieb	benzin		0.80.95		diesel		0.80.95		Diesel		0.80.95	
	Nutzung	kommerziell	kommerziell	kommerziell	kommerziell	kommerziell	kommerziell	kommerziell	kommerziell	kommerziell	kommerziell	kommerziell	kommerziell
	gw'lich vs ...	gw'lich	financial	financial	financial	gw'lich	financial	financial	financial	gw'lich	financial	financial	financial
Datenjahr (Fahrzeug-Chassis)		2012				2012				2012			
Basisjahr für Berechnungsparameter (Kosten ohne Chassis)		2012				2012				2012			
Zieljahr		2022				2022				2022			
Inflationsfaktor (Fahrzeug-Chassis zu Basisjahr)		1.0000000				1.0000000				1.0000000			
Inflationsfaktor (Kosten zu Zieljahr)		1.2017448				1.2017448				1.2017448			
Chassis Kaufjahr						20200				37190			
Chassis inflationiert auf 2012						20200				37190			
Batteriekosten (wenn Elektro)													
Listenpreis ohne Bereifung		16975											
Bereifung		431				389				845			
Nutzungsdauer	a	12				12				12			
Fahrleistung	km/a	11896				18398				25139			
Reifenlaufleistung		50000				52000				64000			
Einsatzzeit	h/a	2000				2000				2000			
Einsatztage	d/a	250				250				250			
Versicherung (Kasko+Haftpflicht	Eu/a												
Kfz-Steuer	Eu/a												
Halber Kaufpreis mit Bereifung	Eu	8487.50				10100.00				18595.00			
Halber Kaufpreis ohne Bereifung	Eu	8272.00				9905.50				18172.50			
Halbe Zinsen (1.7% hardcoded)	Eu/a	144.29				171.70				316.12			
Halbe Abschreibung (o.B.)	Eu/a	689.33				825.46				1514.38			
Unterstellung	Eu/a	403				530.00				530.00			
Summe1 Vorhaltungskosten	Eu/a	1236.62				1527.16				2360.49			
Mandated vehicle checks	Eu/a												
Vehicle administration costs	Eu/a	5291				5291.00				5291.00			
Summe Vorhaltungskosten	Eu/a	6527.62				6818.16				7651.49			
Summe Vorhaltungskosten inflationiert auf 2022	Eu/d	26.1131.38	31.0737.34			27.2732.77	32.4539.00			30.6136.78	36.4243.77		
Fahrleistungsabh. Abschreibung	Eu/100km	5.79				4.49				6.02			
Reifenverschleiß	Eu/100km	0.86				0.75				1.32			
Reparatur etc.	Eu/100km	7.48				6.86				6.86			
Summe Betriebskostengrundwert (ohne Lohn, Energie)	Eu/100km	14.1416.99	16.8220.22	17.5321.07	17.5321.07	12.0914.53	14.3917.30	14.9417.95	14.9417.95	14.2017.07	16.9020.31	17.6421.19	17.6421.19
Lohnkosten inflationiert auf 2022	Eu/Fz-h	17.6421.20	17.6421.20	17.6421.20	17.6421.20	17.6421.20	17.6421.20	17.6421.20	17.6421.20	17.6421.20	17.6421.20	17.6421.20	17.6421.20
Verbrauch spez. Kosten	l/100km bzw kWh/100 Eu/l bzw Eu/kWh	50.71	51.55			7.000.71	10.851.55	8.68	10.31	7.000.71	10.851.55	8.68	10.31
Energie nicht inflationiert, weil schon Zielzeitraum (2022)	Eu/100km ca.	3.35	7.31	5.85	6.95	4.97	10.85	8.68	10.31	4.97	10.85	8.68	10.31
Kosten-je-Distanz inflationiert	Eu/100km-	17.4920.34	24.1427.53		26.9228.01	17.4919.50	25.2428.15		26.6328.26	17.4922.04	27.7531.16		29.8731.50
VARIABLEN													
Fixkosten (inflationiert)	Eu/d	31.38	37.34	37.83	37.83	32.77	39.00	39.58	39.58	36.78	43.77	44.84	44.84
variable (Distanz) (inflationiert)	Eu/m	0.000203	0.000275	0.000269	0.000280	0.000195	0.000281	0.000266	0.000283	0.000220	0.000312	0.000299	0.000315
variable (Zeit) (inflationiert)	Eu/s	0.00589	0.00589	0.00589	0.00589	0.00589	0.00589	0.00589	0.00589	0.00589	0.00589	0.00589	0.00589
variable Zeit) (inflationiert) pro Stunde	Eu/h		21.20	21.20	21.20		21.20	21.20	21.20		21.20	21.20	21.20

				Stand 2024						Stand 2024		
	Datenquelle	Daten aus FE-Bericht zum BVWP 2030, Tabelle 8-38		Kosteninfos It Fachgebiet MPM			Daten aus FE-Bericht zum BVWP 2030, Tabelle 8-38			Kosteninfos It Fachgebiet MPM		
	FzgTyp	LKW 8t Diesel		LKW 8t Elektro			LKW 18t Diesel			LKW 18t Elektro		
	Modell	Atego 818L / TGL 12.220 BL		Mitsubishi Fuso eCanter 9C18		EnergyCosts Fct	TXG 18.440 XLX			Renault D Z.E		EnergyCosts Fct
	Antrieb	Diesel		Elektro		1.19	Diesel			Elektro		1.19
	Nutzung	kommerziell	kommerziell	kommerziell	kommerziell	kommerziell	kommerziell	kommerziell	kommerziell	kommerziell	kommerziell	
	gw'lich vs. ...	netto (vwlich)	brutto (betriebsw	netto (vwlich)	brutto (betriebsw	brutto (betriebsw.)	netto (vwlich)	brutto (betriebsw	netto (vwlich)	brutto (betriebsw	brutto (betriebsw.)	
Datenjahr (Fahrzeug-Chassis)			2012		2024			2012		2024		
Basisjahr für Berechnungsparameter (Kosten ohne Chassis)			2012		2012			2012		2012		
Zieljahr			2022		2022			2022		2022		
Inflationsfaktor (Fahrzeug-Chassis zu Basisjahr)		2012 -> 2012	1.0000000	2024 -> 2012	0.7686505		2012 -> 2012	1.0000000	2024 -> 2012	0.7686505		
Inflationsfaktor (Kosten zu Zieljahr)		2012 -> 2022	1.2017448	2012 -> 2022	1.2017448		2012 -> 2022	1.2017448	2012 -> 2022	1.2017448		
			Listenpreis inkl. Batterie					Listenpreis inkl. Batterie				
Chassis Kaufjahr		48475.00	48475.00	79168.00	79168.00		86200.00	86200.00	218823.00	218823.00		
Chassis inflationiert auf 2012		48475.00	48475.00	60852.52	60852.52		86200.00	86200.00	168198.40	168198.40		
Batteriekosten (wenn Elektro)												
Listenpreis ohne Bereifung		48475.00	48475.00	60852.52	60852.52		86200.00	86200.00	218823.00	218823.00		
Bereifung		1512.00	1512.00	1512.00	1512.00		2892.00	2892.00	2892.00	2892.00		
Nutzungsdauer	a	11.00	11.00	11.00	11.00		11.00	11.00	11.00	11.00		
Fahrleistung	km/a	25893.00	25893.00	25893.00	25893.00		45151.00	45151.00	45151.00	45151.00		
Reifenauflistung		61994.00	61994.00	61994.00	61994.00		135000.00	135000.00	135000.00	135000.00		
Einsatzzeit	h/a	2039.00	2039.00	2039.00	2039.00		2282.00	2282.00	2282.00	2282.00		
Einsatztage	d/a	250.00	250.00	250.00	250.00		250.00	250.00	250.00	250.00		
Versicherung (Kasko+Haftpflicht	Eu/a		4882.00 [1]		4882.00			6729.00 [2]		6729.00		
Kfz-Steuer	Eu/a		410.00		410.00			665.00		665.00		
Halber Kaufpreis mit Bereifung	Eu	24237.50	24237.50	30426.26	30426.26		43100.00	43100.00	109411.50	109411.50		
Halber Kaufpreis ohne Bereifung	Eu	23481.50	23481.50	29670.26	29670.26		41654.00	41654.00	107965.50	107965.50		
Halbe Zinsen (1.7% hardcoded)	Eu/a	412.04	412.04	517.25	517.25		732.70	732.70	1860.00	1860.00		
Halbe Abschreibung (o.B.)	Eu/a	2134.68	2134.68	2697.30	2697.30		3786.73	3786.73	9815.05	9815.05		
Unterstellung	Eu/a	928.00	928.00	928.00	928.00		1096.00	1096.00	1096.00	1096.00		
Summe1 Vorhaltungskosten	Eu/a	3474.72	8766.72	4142.54	9434.54		5615.43	13009.43	12771.04	20165.04		
Mandated vehicle checks	Eu/a											
Vehicle administration costs	Eu/a	7107.00	7107.00	7107.00	7107.00		7107.00	7107.00	7107.00	7107.00		
Summe Vorhaltungskosten	Eu/a	10581.72	15873.72	11249.54	16541.54		12722.43	20116.43	19878.04	27272.04		
Summe Vorhaltungskosten	Eu/d	42.33	63.49	45.00	66.17	66.17	50.89	80.47	79.51	109.09	109.09	
inflationiert auf 2022		50.87	76.30	54.08	79.51	79.51	61.16	96.70	95.55	131.10	131.10	
Fahrleistungsabh. Abschreibung	Eu/100km	8.24	8.24	10.42	10.42		8.39	8.39	21.74	21.74		
Reifenverschleiß	Eu/100km	2.44	2.44	2.44	2.44		2.14	2.14	2.14	2.14		
Reparatur etc.	Eu/100km	12.37	12.37	12.37	12.37		14.02	14.02	14.02	14.02		
Summe Betriebskostengrundwert (ohne Lohn, Energie)	Eu/100km	23.05	23.05	25.23	25.23	25.23	24.55	24.55	37.90	37.90	37.90	
inflationiert auf 2022		27.70	27.70	30.32	30.32	30.32	29.50	29.50	45.55	45.55	45.55	
Lohnkosten	Eu/Fz-h	17.64	17.64	17.64	17.64	17.64	17.64	17.64	17.64	17.64	17.64	
inflationiert auf 2022		21.20	21.20	21.20	21.20	21.20	21.20	21.20	21.20	21.20	21.20	
Verbrauch	l/100km bzw kWh/100	13.57 [4]	13.57	85.00	85.00		23.00 [5]	23.00	100.00	100.00		
spez. Kosten	Eu/l bzw Eu/kWh	0.71	1.55	0.18	0.18	0.2138	0.71	1.55	0.18	0.18	0.21	
Energie	Eu/100km ca.	9.64	21.04	15.44	15.30	18.17	16.33	35.65	18.16	18.00	21.38	
nicht inflationiert, weil schon Zielzeitraum (2022)												
Kosten-je-Distanz	Eu/100km	32.69	44.09	40.66	40.53		40.88	60.20	56.06	55.90		
inflationiert		37.34	48.74	45.75	45.62	48.48	45.83	65.15	63.71	63.55	66.92	
VARIABLEN												
Fixkosten (inflationiert)	Eu/d	50.87	76.30	54.08	79.51	79.51	61.16	96.70	95.55	131.10	131.10	
variable (Distanz) (inflationiert)	Eu/m	0.000373	0.000487	0.000458	0.000456	0.000485	0.000458	0.000652	0.000637	0.000635	0.000669	
variable (Zeit) (inflationiert)	Eu/s	0.00589	0.00589	0.00589	0.00589	0.00589	0.00589	0.00589	0.00589	0.00589	0.00589	
variable (Zeit) (inflationiert) pro Stunde	Eu/h		21.20		21.20	21.20		21.20		21.20	21.20	

		Daten aus FE-Bericht zum BVWP 2030, Tabelle 8-				Stand 2024		
	Datenquelle					Kosteninfos lt Fachgebiet MPM		
	FzgTyp	LKW 40t Diesel (zusammengesetzt aus FZ + Anhänger!)				LKW 40t Elektro		
	Modell	MAN TGM 18.34	Anhänger 7.75m	Summe	Summe	Scania BEV SZM		EnergyCosts Fct
	Antrieb	Diesel				Elektro		1.19
	Nutzung	kommerziell	kommerziell	kommerziell	kommerziell	kommerziell	kommerziell	kommerziell
	gw'lich vs ...	netto (vwlich)				netto (vwlich)	brutto (betriebsw	brutto (betriebsw
Datenjahr (Fahrzeug-Chassis)					2012			2024
Basisjahr für Berechnungsparameter (Kosten ohne Chassis)					2012			2012
Zieljahr					2022			2022
Inflationfaktor (Fahrzeug-Chassis zu Basisjahr)					1.0000000	2024 -> 2012	0.7686505	
Inflationfaktor (Kosten zu Zieljahr)					1.2017448	2012 -> 2022	1.2017448	
						Listenpreis inkl. Batterie		
Chassis Kaufjahr		68500	24500			344271	344271	
Chassis inflationiert auf 2012		68500	24500			264624	264624	
Batteriekosten (wenn Elektro)								
Listenpreis ohne Bereifung		68500	24500			264624	264624	
Bereifung		2892	1828			4720	4720	
Nutzungsdauer	a	11	11			11	11	
Fahrleistung	km/a	80024	45179			80024	80024	
Reifenlaufleistung		133000	190000			133000	133000	
Einsatzzeit	h/a	3000	2620			3000	3000	
Einsatztage	d/a	250	250			250	250	
Versicherung (Kasko+Haftpflicht	Eu/a						7296	
Kfz-Steuer	Eu/a						1336	
Halber Kaufpreis mit Bereifung	Eu	34250	12250			132312	132312	
Halber Kaufpreis ohne Bereifung	Eu	32804	11336			129952	129952	
Halbe Zinsen (1.7% hardcoded)	Eu/a	582.25	208.25	790.50	790.50	2249.30	2249.30	
Halbe Abschreibung (o.B.)	Eu/a	2982.18	1030.55	4012.73	4012.73	11813.82	11813.82	
Unterstellung	Eu/a	1096.00	1096.00	2192.00	2192.00	2192.00	2192.00	
Summe1 Vorhaltungskosten	Eu/a	4660.43	2334.80	6995.23	15627.23	16255.13	24887.13	
Mandated vehicle checks	Eu/a							
Vehicle administration costs	Eu/a	8069.00	7950.00	16019.00	16019.00	16019.00	16019.00	
Summe Vorhaltungskosten	Eu/a	12729.43	10284.80	23014.23	31646.23	32274.13	40906.13	
Summe Vorhaltungskosten	Eu/d	50.92	41.14	92.06	126.58	129.10	163.62	163.62
inflationiert auf 2022		61.19	49.44	110.63	152.12	155.14	196.63	196.63
Fahrleistungsabh. Abschreibung	Eu/100km	3.73	2.28	6.01	6.01	14.76	14.76	
Reifenverschleiß	Eu/100km	2.17	0.96	3.14	3.14	3.55	3.55	
Reparatur etc.	Eu/100km	12.44	1.34	13.78	13.78	13.78	13.78	
Summe Betriebskostengrundwert (ohne Lohn, Energie)	Eu/100km	18.34	4.58	22.92	22.92	32.09	32.09	32.09
inflationiert auf 2022		22.04	5.51	27.55	27.55	38.57	38.57	38.57
Lohnkosten	Eu/Fz-h	20.14 [3]			20.14	20.14	20.14	20.14
inflationiert auf 2022		24.20	0.00	0.00	24.20	24.20	24.20	24.20
Verbrauch	l/100km bzw kWh/100	37.45 [6]		37.45	37.45	150.00	150.00	
spez. Kosten	Eu/l bzw Eu/kWh	0.71		0.71	1.55	0.18	0.18	0.21
Energie	Eu/100km ca.	26.59	0.00	26.59	58.05	27.24	27.00	32.06
nicht inflationiert, weil schon Zielzeitraum (2022)								
Kosten-je-Distanz	Eu/100km-	44.93	4.58	49.51	80.97	59.33	59.09	
inflationiert		48.63	5.51	54.14	85.60	65.81	65.57	70.63

Literaturverzeichnis

- Amt für Statistik Berlin-Brandenburg. Lebensweltlich orientierte Räume. 2025. URL <https://www.berlin.de/sen/sbw/stadtdaten/stadtwissen/sozialraumorientierte-planungsgrundlagen/lebensweltlich-orientierte-raeume/>. Letzter Zugriff am: 06. Dezember 2025.
- Börjesson, M. The congestion tax in Gothenburg. Tech. Rep. 2014:25, Centre for Transport Studies, 2014. URL <https://www.transportportal.se/swopec/CTS2014-25.pdf>. Accessed: 2025-12-17.
- Eliasson, J. The Stockholm congestion charges: An overview. 2009. URL <https://transportportal.se/swopec/cts2014-7.pdf>. Accessed: 2025-12-17.
- Ewert, R., K. Martins-Turner, A. Grahle, A. Syré, D. Göhlich, & K. Nagel. Showing the cost benefits for commercial electric vehicles – case study of battery electric vehicles in urban food distribution. *Transportation Research Procedia*, 86, 532, 2025a. doi:10.1016/j.trpro.2025.04.067. Presented at EWGT 2024 conference.
- Ewert, R., K. Martins-Turner, C. Thaller, & K. Nagel. Using a route-based and vehicle type specific range constraint for improving vehicle routing problems with electric vehicles. *Transportation Research Procedia*, 52, 517, 2021. doi:10.1016/j.trpro.2021.01.061. Presented at 23rd EURO Working Group on Transportation Meeting, EWGT 2020, 16-18 September 2020, Paphos, Cyprus. See also VSP WP 20-12, see <http://www.vsp.tu-berlin.de/publications>.
- Ewert, R., P. C. Minh Nguyen, & K. Nagel. Showing the feasibility of electric waste collection vehicles in rural areas: A case study in the vulkaneifel district, germany. *Procedia Computer Science*, 257, 980, 2025b. doi:10.1016/j.procs.2025.03.126. The 16th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies Networks (ANT)/ the 8th International Conference on Emerging Data and Industry 4.0 (EDI40).
- Ewert, R. & K. Nagel. Agentenbasierte modellierung des kleinräumigen wirtschaftsverkehrs. In *Proceedings of Heureka 2024*. Forschungsgesellschaft für Straßen-und Verkehrswesen, 2024.
- Gnann, T., D. Speth, M. Krail, & M. Wietschel. *Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3*. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, 2024. doi:10.24406/publica-2641.
- Göhlich, D., K. Nagel, A. M. Syré, A. Grahle, K. Martins-Turner, R. Ewert, R. Miranda Jahn, & D. Jefferies. Integrated approach for the assessment of strategies for the decarbonization of urban traffic. *Sustain. Sci. Pract. Policy*, 13(2), 839, 2021. doi:10.3390/su13020839.

- Horni, A., K. Nagel, & K. W. Axhausen, eds. *The Multi-Agent Transport Simulation MATSim*. Ubiquity, London, 2016. doi:10.5334/baw.
- Kaddoura, I., L. Kröger, & K. Nagel. An activity-based and dynamic approach to calculate road traffic noise damages. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 54, 335, 2017. doi:10.1016/j.trd.2017.06.005.
- Kreuschner, M., N. Bonatz, T. Schlenther, H. Mostofi, H.-L. Dienel, & K. Nagel. Dekarbonisierung des verkehrssektors in berlin: Bürgerinnen- und bürgergutachten zu wissenschaftlich erstellten szenarien. *TATuP*, 33(1), 55, 2024. doi:10.14512/tatup.33.1.55.
- KSG. Klimaschutzgesetz. <https://www.gesetze-im-internet.de/ksg/index.htm> 1, last accessed 2026-01-11.
- Landeshauptstadt München. 9. Fortschreibung des Luftreinhalteplans München. Entwurf, Referat für Klima- und Umweltschutz, München, 2024. URL https://stadt.muenchen.de/dam/jcr:20104f8c-ef30-492b-a34c-2373e6b05d47/241210_Entwurf_9._Fortschreibung_Luftreinhalteplan_Muenchen.pdf. Entwurf vom Dezember 2024, öffentliche Auslegung 11.12.2024–11.01.2025.
- London Authority, G. London-wide ultra low emission zone: One year on report. 2021. URL <https://content.tfl.gov.uk/london-wide-ulez-one-year-report.pdf>. Accessed: 2025-12-17.
- Lu, C., K. Martins-Turner, & K. Nagel. Creating an agent-based long-haul freight transport model for Germany. *Procedia Computer Science*, 201, 614, 2022. doi:10.1016/j.procs.2022.03.080.
- Matthey, A., B. Bünger, & E. Eser. Methodological convention 3.2 for the assessment of environmental costs – value factors. Tech. rep., 2024.
- Rakow, C., M. Kreuschner, & K. Nagel. Advancing the MATSim open Berlin scenario: Improvements in transport scenario generation and calibration methods. *Transportation Research Procedia*, 86, 732, 2024. doi:10.1016/j.trpro.2025.04.091.
- Rieken, P., F. Trosky, K. Goldmann, H.-U. Mann, M. Pohl, K. Nagel, T. Beckers, G. Liedtke, M. Winter, & B. Kickhöfer. Grundsätzliche Überprüfung und Weiterentwicklung der Nutzen-Kosten-Analyse im Bewertungsverfahren der Bundesverkehrswegeplanung. Endbericht FE Projekt Nr. 960974/2011, Planco GmbH, Intraplan Consult GmbH, TU Berlin Service GmbH, 2015. Im Auftrag des BMVI. Auch VSP WP 14-12, see vsp.berlin/publications.
- Scotland, T. Low emission zones: Guidance. 2021. URL <https://www.transport.gov.scot/media/50416/low-emission-zone-guidance-october-2021.pdf>. Accessed: 2025-12-17.
- SkodaEnyaqWLTP. Skoda Enyaq 85 – Stromverbrauch kombiniert (wltp). 2025. URL <https://www.skoda-auto.de/modelle/enyaq/enyaq>. Offizielle Herstellerangaben, Škoda Auto Deutschland.

- SkodaOctaviaWLTP. Skoda Octavia Combi 2024 – Kombiniierter Verbrauch (WLTP). 2025. URL https://www.skoda-media.de/model_motor/genpdf/26509/full. Offizielles technisches Datenblatt, Škoda Media GmbH.
- Speth, D. & P. Plötz. Depot slow charging is sufficient for most electric trucks in Germany. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 128, 104078, 2024. doi:10.1016/j.trd.2024.104078. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2024.104078>.
- Steinmeyer, I. Definition und bedeutung des personenwirtschaftsverkehrs – ein sachstandsbericht aus dem jahr 2006. Manuskript, Technische Universität Berlin, Institut für Land- und Seeverkehr (Stand 12/2006; Veröffentlichung in Vorbereitung), 2007. Schriften des Fachgebiets für Integrierte Verkehrsplanung an der TU Berlin.
- Wikipedia. Social welfare function. https://en.wikipedia.org/wiki/Social_welfare_function, accessed 2026-01-24.
- Winkler, J. K., A. Grahle, A. M. Syré, K. Martins-Turner, & D. Göhlich. Fuel cell drive for urban freight transport in comparison to diesel and battery electric drives: a case study of the food retailing industry in Berlin. *European Transport Research Review*, 14(1), 2, 2022. doi:10.1186/s12544-022-00525-6.
- Ziemke, D., J. W. Joubert, & K. Nagel. Accessibility in a post-apartheid city: Comparison of two approaches for accessibility computations. *Networks and Spatial Economics*, 18, 241, 2017. doi:10.1007/s11067-017-9360-3.

B. Executive Summary

Die vorliegende Studie untersucht die Auswirkungen einer Zero-Emissions-Zone (ZEZ) innerhalb des Berliner S-Bahn-Rings auf die Verkehrsnachfrage, Emissionen und auf Wohlfahrtseffekte.

Die Ergebnisse spiegeln die Untersuchung von Zukunftsszenarien wider, die mittels agentenbasierter Verkehrssimulation in Bezug auf Nutzerverhalten, Verkehrseffekte und Externalitäten untersucht und anschließend im Rahmen einer Nutzen-Kosten-Analyse bewertet wurden.

B.1. Kostengetriebener Antriebswechsel vs. Wirkung einer ZEZ

Wir gehen zunächst davon aus, dass die Fixkosten (hauptsächlich: Anschaffungskosten) von E-FZe höher als die Fixkosten von Verbrennern der gleichen Fahrzeugklasse sind, während die variablen Kosten niedriger sind. Letzteres begründet sich durch die geringeren Energiekosten von Strom im Vergleich zu fossilen Kraftstoffen.¹

Das Verhältnis der Strom- zu fossilen Kraftstoffkosten bestimmt, ab welcher Tagesfahrleistung sich ein Antriebswechsel lohnt. In der vorliegenden Studie wurde zunächst eine Erhöhung der Fixkosten um 10% verbunden mit einer Absenkung der variablen Kosten um 20% betrachtet. Weil dieser Fall die Fixkosten mit 1,1 und die variablen Kosten mit 0,8 multipliziert, bezeichnen wir ihn auch als “1,1/0,8”. Als Sensitivitätsstudie wird zusätzlich der Fall “1,1/0,95” betrachtet. In erstgenanntem Fall lohnt sich für den privaten Verkehr ein Antriebswechsel von Verbrenner zu Elektro ab einer Tagesfahrleistung von 16 Kilometern, in zweitgenanntem ab 66 Kilometern pro Tag.

Unter der Annahme, dass sich die betroffenen Verkehrsteilnehmenden langfristig kostenbewusst verhalten, würden damit 51 % der autofahrenden Einwohner in Berlin “von selbst” auf elektrisch umstellen; dies würde 54 % der von Berliner Einwohnern fossil zurückgelegten Wege und 60 % der privaten Pkw-Fahrleistung betreffen. Bei den übrigen Pkw-benutzenden Einwohnern sind die Tagesfahrleistungen unterhalb des o.g. kritischen Punktes, so dass sich bei ihnen eine Umstellung nicht rechnet.

Der letzte Absatz gilt für den *privaten* (Pkw-)Verkehr. Für den *kommerziellen* Pkw-Verkehr (z.B. Pflegedienste oder Handwerker) gilt ähnliches; der kostengetriebene Antriebswechsel würde 54 % der von Berlin ausgehenden Touren und 68 % der kommerziellen Pkw Fahrleistung betreffen. Auch hier wären bei den übrigen Pkw-benutzenden kommerziellen Touren die Tagesfahrleistungen unterhalb des kritischen Punktes, so dass sich bei ihnen die Umstellung nicht rechnet. Dies ist z.B. bei Pflegediensten oder

¹ Wir konzentrieren uns auf Elektrifizierung, weil hier die technologischen und preislichen Randbedingungen derzeit am besten bekannt sind, und sie unter den fossilfreien Ansätzen nach derzeit vorliegenden Informationen die preiswerteste zu sein scheint.

Handwerkern deshalb plausibel, weil sie ja den größeren Teil des Tages mit Dienstleistungen bei den Kund:innen beschäftigt sind und nicht mit Anfahrten.

Für den kommerziellen *Lkw*-Verkehr haben wir, anders als bei den Pkw, nicht mit einer pauschalen Veränderung der festen bzw. variablen Kosten gerechnet, sondern mit preislich durchgerechneten Fahrzeugtypen, welche uns aus anderen Forschungsarbeiten zur Verfügung standen. Mit diesen Fahrzeugtypen rechnet sich der kostengetriebene Antriebswechsel oft heute schon; Umstellungsbarrieren sind eher der nicht vorhersagbare Preisabstand zwischen fossiler und elektrischer Energie insbesondere wegen der Eingriffe der Politik sowie die (Nicht)Verfügbarkeit ausreichender elektrischer Anschlussleistung am Depot. Auch hier verbleiben fossile Fahrzeuge für geringere Tagesfahrleistungen.

Eine ZEZ innerhalb des S-Bahn-Rings (von jetzt an einfach nur ‘die ZEZ’) würde also

1. dort, wo sie sich rechnet, die Umstellung beschleunigen;
2. dort, wo sie sich nicht rechnet, die Umstellung erzwingen.

Der kostengetriebene Antriebswechsel reduziert somit die Wirkung der ZEZ, also einer restriktiven Maßnahme, die auf den Antriebswechsel abzielt. Die in der vorliegenden Studie vorgenommene Quantifizierung der ZEZ-Wirkung spiegelt die Differenz dieser Szenarien wider und exkludiert Effekte durch den kostengetriebenen Antriebswechsel.

B.2. CO2 Einsparungen

Tabelle B.1 zeigt die jährlichen CO₂-Ausstöße laut Modell im Bezugsfall (knapp 4,1 Mio t)² sowie die Einsparungen durch die “freiwillige” Umstellung bis 2035 (–1,8 Mio t) sowie durch die freiwillige Umstellung kombiniert mit der ZEZ (–2,65 Mio t). Hiernach würde die ZEZ also weitere 0,85 Mio t einsparen, das sind ca. 20% der CO₂ Emissionen von 1990.

Tabelle B.1.: CO₂ Ausstoß (*Baseline*) sowie Einsparungen in unterschiedlichen Szenarien.

	<i>Baseline</i>	<i>EV’35</i>	<i>EV&ZEZ’35</i>	Effekt ZEZ’35
CO ₂ Pkw + Lkw [kt/yr]	4089	-1782	-2626	-845
Einsp in pct ggü <i>Baseline</i>		-44	-64	-20

B.2.1. Beitrag der ZEZ zu den klimapolitischen Zielen Berlins

Unser Modell bezieht sich zwar auf 2022. Allerdings sind die CO₂ Emissionen Berlins im Straßenverkehr im Jahr 2022 nahezu identisch mit denjenigen im Jahr 1990, so dass Tabelle B.1 direkt mit den CO₂-Zielen verglichen werden kann. Interpoliert aus den Werten für 2030 und 2040 lauten diese CO₂-Ziele für den Bund –80% und für Berlin –76%. Trotz der recht deutlichen zu erwartenden Fortschritte sind die CO₂-Einsparungen im Straßenverkehr selbst mit der ZEZ immer noch niedriger als sowohl

² Diese Werte können abweichen von den offiziellen Statistiken, weil sich die Grundgesamtheiten jeweils unterscheiden. Bei uns beziehen sich die Werte auf Fahrten von/nach/in Berlin.

die Bundes- als auch die Landesziele. Die Frage, ob dies in anderen Sektoren ausgeglichen werden kann, wie wenigstens auf Bundesebene inzwischen zulässig, wird von uns hier nicht adressiert.

B.3. Ökonomische Bewertung

B.3.1. Nutzen-Kosten-Analyse

Nutzen-Kosten-Analysen werden manchmal kontrovers diskutiert, weil sie Annahmen z.B. bzgl. Zeitwerten (Zahlungsbereitschaften für Reisezeitveränderungen) oder CO₂-Schadenskosten machen müssen. Andererseits erlaubt sie es, unterschiedliche Effekte auf eine einheitliche Skala zu bringen und sie damit vergleichen zu können. Im folgenden fassen wir wesentliche Aspekte aus Kap. 6 zusammen.

In Tabelle 6.16 weisen wir die ökonomischen Gewinne und Verluste im Sinne einer Nutzen-Kosten-Analyse aus. Die Tabelle weist die *zusätzlichen* Veränderungen aus gegenüber den Veränderungen, die ohnehin wegen der fortschreitenden Elektrifizierung (im Szenario mit 110% Fixkosten und 80% Energiekosten für Elektrofahrzeuge im Vergleich zu Verbrennern) zu erwarten sind.

Die Einsparungen bei den CO₂-Kosten dominieren das Resultat und führen zu einer insgesamt positiven Bewertung. Wir haben hierbei mit dem "höheren" der beiden Sätze des Umweltbundesamtes gerechnet. Dieser ergibt sich aus einer Gleichgewichtung von zukünftigen mit heutigen Generationen, was uns in Anbetracht der Langfristigkeit des Problems angemessen erscheint.³

Große negative Beiträge entstehen durch Zeitverluste und Kostenerhöhungen beim privaten Verkehr (−177 Mio Eu/Jahr) und Kostenerhöhungen beim kommerziellen Verkehr (−396 Mio Eu/Jahr). Die Kostenerhöhungen entstehen in beiden Fällen durch den "erzwungenen" E-FZ-Kauf, welcher sich bei kleinen Tageslaufleistungen finanziell nicht lohnt. Um Zeitverluste auf die monetäre Skala zu bringen, benötigt man den oben bereits angesprochenen Zeitwert. Allerdings sind alle Verluste im kommerziellen Verkehr sowie ca. die Hälfte der Verluste im privaten Verkehr bereits monetär, so dass der Einfluss des Zeitwertes auf das hier vorliegende Resultat gering ist.

Die Gewinne in den Bereichen Luftschadstoffe, Lärm und Unfälle sind wünschenswert, aber im Vergleich zu den bisher genannten Effekten deutlich kleiner.

Die staatlichen Einnahmegewinne (ÖV-Tickets) und -verluste (Mineralölsteuer) sind nochmal kleiner. Weiterhin halten sie sich in etwa die Waage, wobei es vielleicht eine Rolle spielt, dass ersteres in Berlin und zweiteres im Bund anfällt.

Generell berücksichtigt die Nutzen-Kosten-Analyse den Aspekt nicht, dass CO₂-Einsparungen global einen Nutzen erzeugen, während die dafür notwendigen Kosten lokal bzw. regional anfallen.

Bepreisungsmaßnahmen, z.B. Parkraumbewirtschaftung oder City-Maut insbes. auf fossile Fahrzeuge, sind typischerweise effizienter als vollständige Verbote. Dies ergibt sich daraus, dass eine Bepreisung auf jeden Fall eine schwächere Maßnahme ist als

³ Weiterhin beruht dieser Kostensatz auf der Annahme eines jährlichen Wohlstandswachstums pro Kopf von 1%. Dies erscheint uns aus heutiger Sicht eher optimistisch; niedrigeres Wohlstandswachstum führt aber zu nochmals höheren CO₂ Kosten.

ein Verbot. Andererseits entstehen durch die Bepreisung Einnahmen, welche z.B. zur Kompensation eingesetzt werden können. Bepreisungen gelten allerdings in Deutschland derzeit als politisch nicht durchsetzbar.

B.3.2. Verluste und mögliche Kompensationen

Die privaten Verluste, dividiert durch ca. 100,000 autofahrende Einwohner der ZEZ, welche nicht freiwillig umstellen, belaufen sich auf 1770 Eu/J oder 147,5 Eu/Monat oder 4,85 Eu/Tag. Dies sind durchaus erhebliche Effekte;

Im Prinzip könnte man darüber nachdenken, die betroffenen Personen, welche sich eben durch geringe Tagesfahrleistungen auszeichnen, gezielt zu unterstützen. Wenigstens für Berufspendler wäre dies wohl näherungsweise leistbar, indem man die ersten X km besonders unterstützt, wenn sie mit einem E-FZ durchgeführt würden; ob dies eine politisch oder administrativ sinnvolle Überlegung ist, können wir nicht beurteilen.

Ähnlich könnte man bei Unternehmen pro Fuhrpark (und nicht pro Fahrzeug) eine Unterstützung bei Elektrifizierung leisten. Auch hier können wir nicht beurteilen, ob das eine politisch oder administrativ sinnvolle Überlegung ist.

B.4. Kurze Zusammenfassung

Die ZEZ würde zum Erreichen der Klimaschutzziele im Transportbereich erheblich beitragen, aber alleine immer noch nicht ausreichen. Kosten entstehen bei privaten Nutzern, nicht dem Staat; die Kostenverteilungseffekte sind progressiv.