



BERGISCHE UNIVERSITÄT WUPPERTAL
FAKULTÄT FÜR ARCHITEKTUR UND BAUINGENIEURWESEN

Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

Entwicklung und Anwendung einer Methodik zur ökologischen Bewertung von Ridepooling-Systemen

vorgelegt von
Peter Bruder, M.Sc.

Erstgutachterin: Prof. Dr.-Ing. Ulrike Reutter
Zweitgutachterin: Prof. Dr.-Ing. Jeanette Klemmer

Datum der Einreichung: 26. September 2025
Datum der Disputation: 31. März 2026

Kurzfassung

Ridepooling-Systeme wurden in den vergangenen Jahren vielfach als flexible Ergänzung des öffentlichen Verkehrs erprobt, insbesondere in Räumen mit geringer Nachfrage oder begrenztem ÖPNV-Angebot. Während zahlreiche Angebote praktisch umgesetzt wurden, bestehen hinsichtlich ihrer tatsächlichen Treibhausgaswirkungen weiterhin erhebliche Unsicherheiten. Dies ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass bisherige Untersuchungen häufig auf Simulationen, modellhaften Annahmen oder nur eingeschränkt vergleichbaren empirischen Datengrundlagen beruhen. Vor diesem Hintergrund untersucht die Arbeit, wie Ridepooling-Systeme auf Basis realer Betriebsdaten belastbar hinsichtlich ihrer THG-Wirkungen bewertet werden können und welche betrieblichen sowie strukturellen Rahmenbedingungen die ökologische Wirkung beeinflussen.

Hierzu wird eine standardisierbare und auf reale Betriebsdaten übertragbare Methodik zur THG-Bilanzierung von Ridepooling-Systemen entwickelt und exemplarisch auf vier Linienbedarfsverkehre unterschiedlicher Raum- und Betriebsstrukturen in Deutschland angewendet. Die Methodik orientiert sich an der DIN EN 16258 und basiert auf einer Well-to-Wheel-Betrachtung der verkehrsbedingten Emissionen. Ergänzend erfolgt eine kontextbezogene Referenzbewertung. Hierfür werden kontrafaktische Substitutionsszenarien entwickelt, in denen die Verkehrsleistung der Ridepooling-Systeme hypothetisch auf alternative Verkehrsmittel verteilt wird. Sensitivitätsanalysen untersuchen den Einfluss betrieblicher, energetischer und fahrzeugtechnologischer Rahmenbedingungen auf die THG-Bilanzierung.

Die Ergebnisse zeigen, dass sämtliche untersuchten Ridepooling-Systeme im Status quo des Jahres 2022 unter Verwendung des deutschen Strommixes höhere spezifische THG-Emissionen aufweisen als die jeweilige Referenzmobilität im Betriebsgebiet. Dies verdeutlicht, dass ökologische Vorteile realbetriebener Ridepooling-Systeme nicht aus dem Angebotsprinzip selbst folgen, sondern wesentlich von Nachfrage, Auslastung, Leerkilometeranteil und Energieversorgung abhängen. Insbesondere Fahrzeugantrieb, Strombereitstellung, Besetzungsquote und betriebliche Effizienz haben wesentlichen Einfluss auf die ökologische Bewertung der Systeme. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass ökologische Defizite insbesondere in nachfrageschwachen Betriebsräumen teilweise durch vollelektrische Fahrzeugflotten in Kombination mit emissionsarmem Ladestrom kompensiert werden können. Die Arbeit stellt eine auf harmonisierten Betriebsdaten beruhende Methodik zur THG-Bilanzierung realbetriebener Ridepooling-Systeme bereit. Sie schafft damit eine Grundlage, um unterschiedliche Systeme systematisch zu vergleichen und ihre ökologische Wirkung kontextbezogen einzuordnen. Zugleich zeigen die Ergebnisse, dass ökologische Wirkungen maßgeblich von betrieblichen, räumlichen und energetischen Rahmenbedingungen abhängen. Darüber hinaus werden Grenzen bestehender Ansätze sowie Herausforderungen hinsichtlich Datenverfügbarkeit, Intermodalität und Übertragbarkeit realbetriebener Systeme aufgezeigt.

Abstract

Ridepooling systems have been widely implemented in recent years as a flexible complement to public transport, particularly in areas with low travel demand or limited public transport services. Although numerous services have been put into operation, considerable uncertainties remain regarding their actual greenhouse gas (GHG) impacts. This is partly due to the fact that previous studies have frequently relied on simulations, modeling assumptions, or empirical data that are only of limited comparability. Against this background, this dissertation investigates how the GHG impacts of ridepooling systems can be robustly assessed on the basis of real-world operational data and which operational and structural framework conditions influence their environmental performance.

To this end, a standardisable methodology for the GHG assessment of ridepooling systems based on real-world operational data is developed and applied exemplarily to four demand-responsive transport services with different spatial and operational characteristics in Germany. The methodology follows DIN EN 16258 and is based on a well-to-wheel assessment of transport-related emissions. In addition, a context-specific reference assessment is conducted. For this purpose, counterfactual substitution scenarios are developed in which the transport performance of the ridepooling systems is hypothetically allocated to alternative modes of transport. Sensitivity analyses examine the influence of operational, energy-related, and vehicle-related framework conditions on the GHG assessment.

The results show that all investigated ridepooling systems, under the status quo conditions of 2022 and assuming the German electricity mix, exhibit higher specific GHG emissions than the respective reference mobility within the operating area. This demonstrates that the environmental benefits of real-world ridepooling systems do not arise from the service concept itself but depend largely on demand, vehicle occupancy, the proportion of empty vehicle kilometres, and the energy supply. In particular, vehicle propulsion technology, electricity supply, occupancy rates, and operational efficiency have a substantial influence on the environmental assessment of the systems. The findings further indicate that environmental disadvantages in areas with low travel demand can, to some extent, be compensated for by fully electric vehicle fleets in combination with low-emission electricity.

The present dissertation provides a methodology for the GHG assessment of real-world ridepooling systems based on harmonised operational data. It thereby establishes a basis for systematically comparing different systems and for assessing their environmental performance in a context-specific manner. At the same time, the findings demonstrate that environmental impacts depend strongly on operational, spatial, and energy-related framework conditions. Furthermore, the study identifies limitations of existing assessment approaches as well as challenges related to data availability, intermodality, and the transferability of results obtained from real-world ridepooling systems.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	I
Abstract	II
Abkürzungsverzeichnis	X
Symbolverzeichnis	XI
1 Einleitung	1
1.1 Hintergrund und Motivation	1
1.2 Zielsetzung	4
1.3 Aufbau der Arbeit	4
2 Theoretische Grundlagen	6
2.1 Terminologische und begriffliche Grundlagen von Linienbedarfsverkehren .	6
2.2 Rechtliche Rahmenbedingungen und regulatorische Einordnung	7
2.3 Technisch-betriebliche Systemlogik und Funktionsweise	10
2.4 Systemvarianten und konzeptionelle Ausprägungen	12
2.5 Potenziale, Herausforderungen und system- immanente Zielkonflikte	16
3 Forschungsstand und vergleichbare Ansätze	26
3.1 Überblick über bisherige Forschungsansätze	26
3.2 Forschungsbedarf und Einordnung der vorliegenden Arbeit	32
4 Methodik	36
4.1 Methodisches Vorgehen nach <i>DIN EN 16258</i>	36
4.2 Anwendung der <i>DIN EN 16258</i> für Linienbedarfsverkehre	42
4.3 Ansätze zur Datenerfassung und -vereinheitlichung	46
4.4 Vergleichende THG-Bilanzierung von Ridepooling-Systemen unter Berück- sichtigung substituierter Verkehre	52
4.5 Digitale Umsetzung der THG-Bilanzierungs- methodik	62
4.6 Methodische Limitationen und deren Einordnung	62
5 Anwendung der Methodik auf spezifische Linienbedarfsverkehre	65
5.1 <i>Bussi</i> (Essen)	65
5.1.1 Beschreibung des Betriebsmodells	65

5.1.2	THG-Bilanzierung	69
5.2	Mein <i>G-Mobil</i> (Gronau)	70
5.2.1	Beschreibung des Betriebsmodells	70
5.2.2	THG-Bilanzierung	73
5.3	<i>kommit-Shuttle</i> (Senden)	74
5.3.1	Beschreibung des Betriebsmodells	74
5.3.2	THG-Bilanzierung des <i>kommit-Shuttle</i>	77
5.4	<i>LOOPmünster</i> (Münster)	78
5.4.1	Beschreibung des Betriebsmodells	78
5.4.2	THG-Bilanzierung des <i>LOOPmünster</i>	81
6	Auswertung	82
6.1	Vergleich der Linienbedarfsverkehre	82
6.1.1	Systemkonzepte im Vergleich	82
6.1.2	Vergleich der betrieblichen Kenngrößen der Systeme	86
6.1.3	Zusammenfassende Gegenüberstellung betrieblicher Kennzahlen	92
6.2	Darstellung und Beschreibung der THG-Bilanz-Ergebnisse	95
6.3	Vergleich der THG-Bilanzierungsergebnisse mit konventionellen Verkehrs- mitteln	98
6.4	Bewertung der THG-Nettoeffekte auf Basis der Substitutionsszenarien	100
6.5	Wirtschaftliche Betrachtungen	103
6.6	Verkehrliche Wirkungen der Linienbedarfs- verkehre	104
7	Sensitivitätsanalyse	114
7.1	Wirkungsgefüge Ridepooling	114
7.2	Energiequellen für die Fahrzeugladung: Strommix und Ökostrom	118
7.3	Fahrzeugkilometer _{leer}	120
7.4	Besetzungsquote	122
7.5	Fahrzeugflotte	124
7.6	Durchschnittliche Reiseentfernung	126
7.7	Stornierungen	128
7.8	Kombination betrieblicher, energetischer und fahrzeugtechnologischer Maßnahmen	130
8	Interpretation der Untersuchungsergebnisse	134
8.1	Methodische Einordnung und Grenzen der Aussagekraft	134
8.2	Gesamtbewertung der THG-Bilanzierung im Kontext betrieblicher, ver- kehrlicher und ökologischer Zielstellungen	137
9	Schlussfolgerungen und Ausblick	150
9.1	Zusammenfassung	150
9.2	Handlungsempfehlungen für Stakeholder	153

9.3	Ableitung des weiteren Forschungsbedarfs	160
Literaturverzeichnis		166
A Anhang		175
A.1	Zentrale KPIs von Ridepooling-Systemen	175
A.2	Energie- und THG-Bilanzierung sowie Deklaration des Systems <i>Bussi</i> (<i>DIN EN 16258</i>)	178
A.2.1	<i>Bussi</i> Strommix	178
A.2.2	<i>Bussi</i> Ökostrom	181
A.3	Energie- und THG-Bilanzierung sowie Deklaration des Systems <i>G-Mobil</i> (<i>DIN EN 16258</i>)	184
A.3.1	<i>G-Mobil</i> Strommix	184
A.3.2	<i>G-Mobil</i> Ökostrom	188
A.4	Energie- und THG-Bilanzierung sowie Deklaration des Systems <i>kommit-Shuttle</i> (<i>DIN EN 16258</i>)	192
A.4.1	<i>kommit-Shuttle</i> Strommix	192
A.4.2	<i>kommit-Shuttle</i> Ökostrom	195
A.5	Energie- und THG-Bilanzierung sowie Deklaration des Systems <i>LOOP-münster</i> (<i>DIN EN 16258</i>)	198
A.5.1	<i>LOOPmünster</i> Strommix	198
A.5.2	<i>LOOPmünster</i> Ökostrom	201
A.6	Berechnung der THG-Nettoeffekte	204
A.7	Modal-Shift-Wirkung	206
A.8	Erschließungswirkung	208
A.9	Reduktion des Leerkilometer-Anteils im Jahresverlauf	209
A.10	Intermodalität	210
A.11	Lebenslauf	211
A.12	Hinweise zum Einsatz von Künstlicher Intelligenz	213

Abbildungsverzeichnis

2.1	Systematisierung individualisiert nutzbarer Verkehrsangebote (nach Mehler, 2019, S. 9)	7
2.2	Klassifizierung von Ridepooling hinsichtlich Preis und Komfort (Zwick, Kuehnel & Axhausen, 2022, Abb. 1, S. 2)	13
4.1	Systematischer Betrachtungsansatz für Verkehrsmittel im Kontext einer Lebenszyklusbetrachtung und des <i>Well-to-Wheel</i> Ansatzes (in Anlehnung an Umweltbundesamt [UBA], 2021, S. 11)	37
4.2	Vereinfachte Darstellung der Betrachtungsgrenzen der THG-Bilanzierung (eigene Darstellung nach Bruder und Klemmer, 2024, Abb. 3-2, S. 25) . . .	43
4.3	Projektlaufzeiten der untersuchten Linienbedarfsverkehre und Ableitung des Evaluationszeitraums (nach Tab. 3-3 Bruder und Klemmer, 2024, S. 29)	48
4.4	Buchungstrichter von Linienbedarfsverkehren	49
4.5	Methodisches Vorgehen zur THG-Bewertung von Linienbedarfsverkehren im Vergleich zur Referenzmobilität im Betriebsgebiet (in Anlehnung an Abb. 3-5 Bruder und Klemmer, 2024, S. 31)	53
4.6	Zugang Online-Tool zur THG-Bilanzierung von Ridepooling-Verkehren . .	62
5.1	Darstellung des Betriebsgebiets von „ <i>Bussi</i> “ (Stand: 2022, entnommen aus Abb. 4-1 Bruder und Klemmer, 2024, S. 40)	66
5.2	Darstellung des Betriebsgebiets von „ <i>G-Mobil</i> “ (Stand: 2022, entnommen aus Abb. 4-2 Bruder und Klemmer, 2024, S. 44)	71
5.3	Darstellung des Betriebsgebiets von „ <i>kommit-Shuttle</i> “ (Stand: 2022, entnommen aus Abb. 4-3 Bruder und Klemmer, 2024, S. 48)	75
5.4	Darstellung des Betriebsgebiets von „ <i>LOOPmünster</i> “ (Stand: 2022, entnommen aus Abb. 4-4 Bruder und Klemmer, 2024, S. 51)	79
6.1	Vergleich der THG-Bilanzierungsergebnisse unter <i>WtW</i> -Betrachtung nach <i>DIN EN 16258</i> (nach Abb. 5-5 Bruder und Klemmer, 2024, S. 69).	97
6.2	Gegenüberstellung der THG-Emissionen der Linienbedarfsverkehre mit konventionellen Verkehrsmitteln in g CO ₂ e/Pkm nach <i>WtW</i> -Betrachtung (nach Bruder & Klemmer, 2024, Abb. 5-2, S. 71)	99
6.3	Gegenüberstellung der THG-Emissionen der Linienbedarfsverkehre pro Pkm mit der Referenzmobilität im Betriebsgebiet (Minimal- und Maximalannahme) (nach Abb. 5-3 Bruder und Klemmer, 2024, S. 73)	101
6.4	Erschließungswirkungen (Siedlungsfläche und Bevölkerung) der Systeme (nach Abb. 7-1 Bruder und Klemmer, 2024, S. 105, Hintergrundberechnungen: s. Anhang A.8)	106

6.5	Intermodale Nutzung der Linienbedarfsverkehre: Ein- und Ausstiege um ÖPNV-Umstiegspunkte (nach Abb. 7-2 Bruder und Klemmer, 2024, S. 107; Hintergrundberechnungen: s. Anhang A.10)	108
7.1	Sensitivitätsanalyse der THG-Emissionen (g CO ₂ e/Pkm) in Abhängigkeit des Ökostromanteils (in Anlehnung an Abb. 6-6 Bruder und Klemmer, 2024, S. 87)	119
7.2	Sensitivitätsanalyse der THG-Emissionen (g CO ₂ e/Pkm) in Abhängigkeit des Leerkilometer-Anteils (in Anlehnung an Abb. 6-1 Bruder und Klemmer, 2024, S. 78)	121
7.3	Sensitivitätsanalyse der THG-Emissionen (g CO ₂ e/Pkm) in Abhängigkeit der Besetzungsquote (in Anlehnung an Abb. 6-2 Bruder und Klemmer, 2024, S. 79)	123
7.4	Sensitivitätsanalyse der THG-Emissionen (g CO ₂ e/Pkm) in Abhängigkeit der Flottenzusammensetzung (in Anlehnung an Abb. 6-5 Bruder und Klemmer, 2024, S. 85)	125
7.5	Analyse Reiseentfernungen (in Anlehnung an Abb. 6-3 Bruder und Klemmer, 2024, S. 80)	127
7.6	Analyse fahrgastseitiger Stornierungen und deren Zeitpunkt vor vereinbartem Abholzeitpunkt (in Anlehnung an Abb. 6-4 Bruder und Klemmer, 2024, S. 82)	129
7.7	Kombinierte Sensitivitätsanalyse (in Anlehnung an Abb. 6-7 Bruder und Klemmer, 2024, S. 90)	133
A.1	Fahrzeugkilometer _{leer} -Anteile im Laufe des Jahres 2022	209

Tabellenverzeichnis

2.1	Vergleich wesentlicher Merkmale von Linienverkehr, Linienbedarfsverkehr und gebündeltem Bedarfsverkehr (nach Agora Verkehrswende, 2023, S. 12)	9
2.2	Archetypische On-Demand-Ridepooling-Grundformen (nach Kompetenzzentrum Digitalisierung NRW (KCD) und civity Management Consultants [KCD & civity], 2022, S. 22)	15
2.3	Betriebsparameter archetypischer Ridepooling-Grundformen (nach KCD & civity, 2022, S. 23)	15
4.1	Energie- und Emissionsfaktoren verschiedener Kraftstofftypen (nach Bruder und Klemmer, 2024, Tab. 3-1, S. 26)	45
4.2	Fahrzeugmodelle und Verbrauchswerte (nach Bruder und Klemmer, 2024, Tab. 6-1, S. 84)	47
4.3	Zentrale Messgrößen, Berechnungslogik und Einheiten im Kontext von On-Demand-Verkehren (nach Verband Deutscher Verkehrsunternehmen [VDV], 2025b, S. 22-23)	50
4.4	Modal Split nach Entfernungsklasse (nach Ingenieurbüro Helmert, 2023, Tab. 1)	59
4.5	CO ₂ e-Emissionen pro Pkm der Referenzmobilität in den Betriebsgebieten der Dienste nach den Varianten 1-5 (nach Tab. 3-3 Bruder und Klemmer, 2024, S. 36)	61
5.1	Konzeptsteckbrief „ <i>Bussi</i> “ mit Bezugsjahr 2022 (nach Tab. 4-2 Bruder und Klemmer, 2024, S. 41)	68
5.2	Konzeptsteckbrief <i>G-Mobil</i> mit Bezugsjahr 2022 (nach Bruder und Klemmer, 2024, Tab. 4-3, S. 45)	72
5.3	Konzeptsteckbrief <i>kommit-Shuttle</i> mit Bezugsjahr 2022 (nach Tab. 4-4 Bruder und Klemmer, 2024, S. 49)	76
5.4	Konzeptsteckbrief <i>LOOPmünster</i> mit Bezugsjahr 2022 (nach Tab. 4-5 Bruder und Klemmer, 2024, S. 53)	80
6.1	Konzeptioneller Vergleich der untersuchten Linienbedarfsverkehre (Bezugsjahr 2022, nach Tab. 5-1 Bruder und Klemmer, 2024, S. 56)	83
6.2	Betriebliche Kenngrößen der untersuchten Linienbedarfsverkehre mit dem Bezugsjahr 2022 (nach Tab. 5.2 Bruder und Klemmer, 2024, S. 59)	87
6.3	Normierter Vergleich der betrieblichen Effizienz der Systeme (nach Tab. 5-3 Bruder und Klemmer, 2024, S. 64)	93
6.4	WtW-THG-Emissionsbilanz der Systeme unter Annahme des bundesweiten Strommixes (Umweltbundesamt, 2024, Tab. 1) (in Anlehnung an Bruder und Klemmer, 2024, Tab. 5-4, S. 67)	95

6.5	WtW-THG-Emissionsbilanz der Systeme unter Annahme von Ökostrom (vgl. Landesamt für Natur, Umwelt und Klima Nordrhein-Westfalen [LANUK], 2022, Emissionsfaktoren 2022) (in Anlehnung an Tab. 5-4 Bruder und Klemmer, 2024, S. 67)	96
6.6	Kostenstrukturen der Projekte mit dem Bezugszeitraum 2022 (nach Tab. 7-4 Bruder und Klemmer, 2024, S. 113)	103
6.7	Verkehrsmittelwahlverteilung durch Befragungen (nach Tab. 7-1 Bruder und Klemmer, 2024, S. 102)	111
6.8	Modal-Shift-Wirkung der Linienbedarfsverkehre (in Anlehnung an Tab. 7.1 und 7.2 Bruder und Klemmer, 2024, S. 102 und 103; Berechnungsgrundlage siehe Anhang A.7)	112
7.1	Szenarien für betriebliche, fahrzeugtechnologische und energetische Optimierungsmaßnahmen (nach Tab. 6-2 Bruder und Klemmer, 2024, S. 89) . .	131
A.1	Zentrale Messgrößen, Berechnungslogik und Dimensionen im Kontext von On-Demand-Verkehren (nach VDV, 2025b, S. 22-23)	175
A.2	Energie- und THG-Bilanzierung sowie Deklaration des Systems <i>Bussi</i> unter Strombezug des deutschen Strommixes (in Anlehnung an Bruder und Klemmer, 2024, Tab. 0-1, S. 130)	178
A.3	Energie- und THG-Bilanzierung des Systems <i>Bussi</i> unter Ökostrom	181
A.4	Energie- und THG-Bilanzierung sowie Deklaration des Systems <i>G-Mobil</i> unter Strombezug des deutschen Strommixes	184
A.5	Energie- und THG-Bilanzierung sowie Deklaration des Systems <i>G-Mobil</i> unter Strombezug von Ökostrom	188
A.6	Energie- und THG-Bilanzierung sowie Deklaration des Systems <i>kommit-Shuttle</i> unter Strombezug des deutschen Strommixes	192
A.7	Energie- und THG-Bilanzierung sowie Deklaration des Systems <i>kommit-Shuttle</i> unter Strombezug von Ökostrom	195
A.8	Energie- und THG-Bilanzierung sowie Deklaration des Systems <i>LOOP-münster</i> unter Strombezug des deutschen Strommixes	198
A.9	Energie- und THG-Bilanzierung sowie Deklaration des Systems <i>LOOP-münster</i> unter Strombezug von Ökostrom	201
A.10	Spezifische Emissionen der untersuchten Ridepooling-Systeme	204
A.11	Personenkilometer _{gefahren} der untersuchten Systeme	204
A.12	THG-Gesamtbilanz und Netto-THG-Effekte der untersuchten Systeme . .	205
A.13	Modal-Shift Effekte der Linienbedarfsverkehre (2022) (nach Tab. 7-1 Bruder und Klemmer, 2024, S. 102)	206
A.14	Erschließungsfaktor mit und ohne Linienbedarfsverkehr (300 m Puffer Bushaltestellen / 250 m virtuelle Haltestellen)(nach Abb. 7-1 Bruder und Klemmer, 2024, S. 105)	208
A.15	Georeferenzierte Buchungen und Nähe zu Bahnhaltepunkten (250 m Luftlinienradius, 2022)(nach Abb. 7-2 Bruder und Klemmer, 2024, S. 107) . . .	210

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bezeichnung
BEV	Battery Electric Vehicle
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
CO ₂ e	Kohlendioxid-Äquivalente
DAT	Deutsche Automobil Treuhand
DIN	Deutsches Institut für Normung
DSL	Deutscher Speditions- und Logistikverband e. V.
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
FöRi-MM	Förderrichtlinie Vernetzte Mobilität und Mobilitätsmanagement (NRW)
Fzkm	Fahrzeugkilometer
ISO	International Organization for Standardization
LANUK	Landesamt für Natur, Umwelt und Klima Nordrhein-Westfalen
LCA	Life Cycle Assessment
MaaS	Mobility as a Service
MIV	Motorisierter Individualverkehr
MUNV NRW	Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Verkehr NRW
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
ÖV	Öffentlicher Verkehr
PBefG	Personenbeförderungsgesetz
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
Pkm	Personenkilometer
Pkw	Personenkraftwagen
RE	Range-Extender-Fahrzeug
THG	Treibhausgase
TtW	Tank-to-Wheel
UBA	Umweltbundesamt
VDV	Verband Deutscher Verkehrsunternehmen
VOS	Fahrzeugeinsatzsystem
WLTP	Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure
WtW	Well-to-Wheel

Symbolverzeichnis

Symbol	Bezeichnung
η	Systemeffizienz
e_w	Energiefaktor Well-to-Wheel (WtW)
g_w	THG-Emissionsfaktor Well-to-Wheel (WtW)
e_t	Energiefaktor Tank-to-Wheel (TtW)
g_t	THG-Emissionsfaktor Tank-to-Wheel (TtW)
E_w	Well-to-Wheel-Energieverbrauch
G_w	Well-to-Wheel-THG-Emissionen
E_t	Tank-to-Wheel-Energieverbrauch
G_t	Tank-to-Wheel-THG-Emissionen
$F(\text{VOS})$	Gesamter Kraftstoffverbrauch des Fahrzeugeinsatzsystems
J	Joule
MJ	Megajoule
GJ	Gigajoule
g	Gramm
kg	Kilogramm
t	Tonne
kWh	Kilowattstunde

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Hintergrund und Motivation

Die Dekarbonisierung des Verkehrssektors zählt zu den zentralen Herausforderungen der kommenden Jahre. Um die Klimaschutzziele im Verkehrssektor zu erreichen und zugleich die Ausgewogenheit der Lebensverhältnisse in unterschiedlichen Regionen Deutschlands zu verbessern, wird eine deutliche Stärkung des öffentlichen Verkehrs als erforderlich angesehen. Reichow und Ruhrort betonen in diesem Zusammenhang, dass der Anteil des öffentlichen Verkehrs am Gesamtverkehr signifikant erhöht, die Attraktivität öffentlicher Verkehrsmittel gesteigert und neue Nutzergruppen erschlossen werden müssen (vgl. Reichow & Ruhrort, 2024, S. 17). Ein zentraler Bestandteil dieser Transformation ist daher die substanzielle Ausweitung und qualitative Verbesserung des öffentlichen Verkehrs.

Klassische, liniengebundene Angebote stoßen jedoch vielerorts an betriebliche und strukturelle Grenzen, insbesondere in nachfrageschwachen Räumen, bei geringer Wirtschaftlichkeit und begrenzter Anpassungsfähigkeit an flexible Mobilitätsbedarfe. In der Folge mangelt es in diesen Räumen oder Zeiten häufig an attraktiven öffentlichen Mobilitätsoptionen, sodass der motorisierte Individualverkehr (MIV) vielfach als einzige verlässliche Alternative wahrgenommen und entsprechend verstärkt genutzt wird. Aufgrund seines hohen Energieverbrauchs und Flächenbedarfs gilt der MIV jedoch als zentrales Hindernis für eine nachhaltige Verkehrswende. Vor diesem Hintergrund rücken flexible, nachfrageorientierte Angebote in den Fokus verkehrspolitischer und wissenschaftlicher Diskussionen, da sie eine effizientere Auslastung von Fahrzeugkapazitäten versprechen und Angebotslücken schließen können.

Als viel diskutierter Ansatz zur Effizienzsteigerung und bedarfsgerechten Ausgestaltung des öffentlichen Verkehrs gelten Linienbedarfsverkehre, die häufig auch als Ridepooling-Systeme bezeichnet werden. Sie kombinieren digitale Buchungs- und Dispositionssysteme mit der gemeinschaftlichen Nutzung kleinerer Fahrzeuge. Ziel ist es, individuelle Fahrtanfragen dynamisch zu bündeln, bestehende Angebotslücken im öffentlichen Verkehr zu schließen und mit dem Anspruch bzw. Potenzial, Umweltbelastungen zu reduzieren, eine flexiblere öffentliche Mobilität bereitzustellen (vgl. Agora Verkehrswende, 2023, S. 7–9; vgl. Hartz et al., 2024, S. 3–5). Während die Bündelung mehrerer Fahrtwünsche ein Grundprinzip des öffentlichen Verkehrs darstellt (vgl. Zwick, Kuehnel & Axhausen, 2022, S. 1–2), erfolgt sie in Ridepooling-Systemen durch digitale Buchungssysteme sowie eine zentrale, algorithmengestützte Disposition flexibler Routen.

Die Erwartungen an Ridepooling beziehungsweise Ridesourcing sind hoch: Entsprechende Dienste werden als mögliche Maßnahme zur Verringerung Pkw-bedingter Verkehrsbelas-

tungen, als Ergänzung des öffentlichen Verkehrs sowie als Bestandteil von Mobility-as-a-Service-Angeboten diskutiert (vgl. Wilkes et al., 2021, S. 1). In ländlich geprägten und suburbanen Räumen können in den ÖPNV integrierte On-Demand-Angebote zur verbesserten Erreichbarkeit und zur Ergänzung des klassischen Linienverkehrs beitragen, insbesondere dort, wo konventionelle Linienangebote Mobilitätsbedürfnisse nicht vollständig abdecken (vgl. Reichow & Ruhrort, 2024, S. 18 f.). In Städten erscheinen Ridepooling-Angebote vor allem als ergänzende Mobilitätsoption in Tagesrandzeiten, bei fehlenden direkten ÖPNV-Verbindungen oder als komfortorientierte Ergänzung des öffentlichen Verkehrs relevant (vgl. Kostorz et al., 2021, S. 2, 10, 17). Ein zentrales Potenzial liegt dabei in der Attraktivierung öffentlicher und multimodaler Mobilität: Ridepooling-Angebote können den klassischen Linienverkehr durch flexible, digitale und komfortorientierte Angebote ergänzen und Mobilität ohne eigenes Auto attraktiver machen (vgl. Kostorz et al., 2021, S. 2, 17; vgl. Knie et al., 2020, S. 4 f., 14 f.). Insbesondere in Zeiten geringer Nachfrage können solche Angebote gegenüber dem klassischen Busverkehr zusätzliche Mobilitätsoptionen schaffen und die Servicequalität, etwa hinsichtlich Warte- und Beförderungszeiten, verbessern (vgl. Asatryan et al., 2023, S. 2, 6, 19 f.). Darüber hinaus können sie in Räumen mit begrenztem ÖPNV-Angebot zur verbesserten Erreichbarkeit beitragen und Zielgruppen ansprechen, die keinen Führerschein oder keinen verfügbaren Pkw besitzen (vgl. Knie et al., 2020, S. 11, 14; vgl. Reichow & Ruhrort, 2024, S. 21 f.). In diesem Zusammenhang ist eine deutlich gestiegene politische und planerische Aufmerksamkeit zu verzeichnen, die sich bis 2022 in der Umsetzung von mehr als 80, überwiegend pilothaften Projekten in Deutschland niederschlug (vgl. VDV, 2022, Abschn. „Branchenumfrage“).

In der wissenschaftlichen Diskussion wird Ridepooling zudem vielfach ein Beitrag zur ökologischen Nachhaltigkeit zugeschrieben: Durch die Bündelung räumlich und zeitlich ähnlicher Fahrten können Fahrzeugkilometer reduziert, Flottengrößen verringert und die Fahrzeugauslastung gesteigert werden (vgl. Alonso-Mora et al., 2017, S. 462–467). Simulationen verweisen auf Effizienzgewinne durch dynamische Zuordnung von Fahrtanfragen, bedarfsgerechte Routenführung und gemeinsame Fahrzeugnutzung (vgl. Zwick et al., 2021, S. 662–663; vgl. Agatz et al., 2012, S. 295–296; vgl. Engelhardt et al., 2019, S. 2992–2997). Zugleich zeigen empirische Begleitforschungen und zusammenfassende Übersichtsarbeiten, dass geringe durchschnittliche Besetzungsquoten, hohe Leerkilometeranteile und kontextabhängige Nachfragemuster die Effizienz von Ridepooling-Systemen erheblich beeinträchtigen können (vgl. Hartz et al., 2024, S. 40–44; vgl. Zwick, Kuehnel & Axhausen, 2022, S. 9–10, 14–15). Simulationsbasierte Analysen verweisen ergänzend darauf, dass Auslastung, Flottengröße, Umwege sowie zusätzliche Fahrzeugkilometer maßgeblich für die verkehrliche Wirkung solcher Systeme sind (vgl. Wilkes et al., 2021, S. 4–7). Erste Ergebnisse deuten darauf hin, dass bei kleinskaligen Angeboten mit geringer Nachfragedichte die betrieblich notwendigen Leerkilometer mögliche Einsparungen durch Fahrtenbündelung übersteigen können (vgl. Zwick, Kuehnel & Axhausen, 2022, S. 10). Hinzu kommen mögliche Verlagerungen aus dem Umweltverbund sowie verkehrsinduzierende Effekte, die ökologisch nachteilig sein können (vgl. Hartz et al., 2024, S. 59–60; vgl. Wilkes et al., 2021, S. 7–8).

Obwohl empirische Studien auf eine differenzierte Umweltwirkung hinweisen, dominiert in der öffentlichen Debatte weiterhin ein überwiegend positives Bild. Betreibende und Aufgabenträger werben häufig mit als emissionsfrei beworbenen Fahrzeugen, etwa im Fall von *CleverShuttle* oder *Bussi* (vgl. Ruhrbahn GmbH, 2025, Abschn. „Fahrzeuge“; vgl. Knie et al., 2020, S. 2). Auch in wissenschaftlichen Studien finden sich ähnliche Verkürzungen: So setzt die Studie von Kagerbauer et al. (2021) die Umweltwirkung von MOIA in einer Berechnung mit 0 g CO₂e pro Personenkilometer an (vgl. Kagerbauer et al., 2021, S. 67). Solche Aussagen greifen jedoch zu kurz, da vorgelagerte Emissionen aus Stromerzeugung und Fahrzeugherstellung nicht berücksichtigt werden. Zudem zeigt eine VDV-Umfrage aus dem Jahr 2022, dass rund zwei Drittel der eingesetzten Fahrzeuge in Ridepooling-Systemen Hybrid- oder batterieelektrische Modelle sind, während etwa ein Drittel weiterhin konventionelle Verbrenner umfasst (vgl. VDV, 2022, Abschn. „Branchenumfrage“). Eine belastbare ökologische Bewertung erfordert daher eine systemische Betrachtung entlang der gesamten Energiekette.

Die Forschungslage bleibt insgesamt begrenzt belastbar. Viele Untersuchungen zumverkehrlichen Potenzial von Ridepooling beruhen auf modell- oder simulationsgestützten Ansätzen, sodass reale Betriebsbedingungen, Nachfrageverhalten und lokale Kontextfaktoren nur begrenzt abgebildet werden können (vgl. Agatz et al., 2012, S. 302; vgl. Alonso-Mora et al., 2017, S. 462–463; vgl. Zwick et al., 2021, S. 663–664). Zugleich zeigen weitere Untersuchungen, dass das Pooling-Potenzial stark von räumlich-zeitlichen Nachfragemustern und lokalen Kontextbedingungen abhängt (vgl. Shulika et al., 2024, S. 1–2). Empirische Analysen realbetriebener Ridepooling-Systeme sind bislang begrenzt. Mehrere bisherige Untersuchungen beruhen auf hypothetischen Nutzungsszenarien, kleineren Testbetrieben oder kurzzeitigen Pilotanwendungen, sodass ihre Übertragbarkeit auf reale Dienste eingeschränkt bleibt (vgl. Kostorz et al., 2021, S. 3–5). Während simulationsbasierte Studien hohe verkehrliche und ökologische Entlastungspotenziale insbesondere unter Bedingungen hoher Nachfrage und größerer Flotten aufzeigen (vgl. Alonso-Mora et al., 2017, S. 462, 466; vgl. Bischoff et al., 2017, S. 275, 280; vgl. Zwick et al., 2021, S. 665–666), sind reale On-Demand-Angebote häufig deutlich kleiner skaliert (vgl. Foljanty, 2025, Abschn. „Project Characteristics“; vgl. VDV, 2022, Abschn. „Branchenumfrage“). Auch der häufig postulierte Nutzen von Ridepooling als Zubringer zu leistungsfähigen ÖPNV-Achsen ist bislang empirisch nur unzureichend belegt (vgl. Zwick, Kuehnel & Axhausen, 2022, S. 15). Für kleinmaßstäbliche, häufig öffentlich geförderte Ridepooling-Dienste liegen bislang nur begrenzte belastbare Erkenntnisse zu Wirkung, Nutzung und ökologischen Beiträgen vor (vgl. Zwick, Kuehnel & Axhausen, 2022, S. 14–15).

Diese Diskrepanz zwischen theoretischen Erwartungen und praktischen Ergebnissen verweist auf erheblichen Forschungsbedarf. Erforderlich sind systematische, empirisch fundierte Analysen, die reale Nutzung, betriebliche Rahmenbedingungen und ökologische Implikationen integrativ erfassen. Nur so lassen sich realistische Aussagen über die Rolle von Ridepooling im Kontext einer nachhaltigen Verkehrswende treffen und fundierte Empfehlungen für Planung und Regulierung ableiten. Die vorliegende Arbeit leistet hierzu einen Beitrag, indem sie ausgewählte Ridepooling-Systeme unter realen Einsatzbedingungen

untersucht, um ihre betriebliche Performance und ökologischen Wirkungen differenziert zu bewerten.

1.2 Zielsetzung

Ziel der vorliegenden Dissertation ist die Entwicklung einer standardisierbaren Methodik zur Treibhausgas(THG)-Bilanzierung von Ridepooling-Systemen auf Basis realer Betriebsdaten. Im Fokus steht die Berechnung verkehrsbedingter CO₂-Äquivalenzemissionen (CO₂e) unter Berücksichtigung zentraler betrieblicher und nutzungsseitiger Parameter wie Fahrzeugauslastung, Leerkilometeranteil, Energiequelle, potenzieller Substitutionseffekte sowie induzierter Verkehre.

Die Methodik orientiert sich an der *DIN EN 16258*, die eine konsistente und übertragbare Grundlage für die Emissionsberechnung im Personenverkehr bereitstellt. Andere Umweltwirkungen (z. B. Luftschadstoffe, Lärm oder Flächeninanspruchnahme) sind nicht Bestandteil der Analyse, da der Fokus auf der quantitativen Ermittlung klimarelevanter Emissionen gemäß der *DIN EN 16258* liegt.

Zur Umsetzung wird ein übertragbares Kalkulationsmodell entwickelt, das exemplarisch auf vier realbetriebene Dienste mit unterschiedlichen Betriebsdesigns angewendet wird. Ergänzend werden Sensitivitätsanalysen durchgeführt, um die Einflussstärke und -richtung zentraler Parameter auf die Ergebnisse zu untersuchen und damit sowohl die Robustheit der Bilanzierung als auch die Wirkung einzelner Stellgrößen bewerten zu können.

Die zentrale Forschungsfrage der Arbeit lautet:

*Können Ridepooling-Systeme einen quantifizierbaren ökologischen Beitrag
in städtischen, öffentlichen Verkehrssystemen leisten?*

Dabei verfolgt die Arbeit drei zentrale Zielstellungen:

- Entwicklung eines THG-Bilanzierungsmodells zur systematischen Bewertung von Ridepooling-Systemen.
- Anwendung und Validierung der Methodik anhand vier realbetriebener Ridepooling-Dienste (*LOOPmünster*, *Mein G-Mobil*, *kommit-Shuttle*, *Bussi*).
- Ableitung von Bewertungsperspektiven und Handlungserkenntnissen für die strategische Integration von Ridepooling-Systemen in nachhaltige Verkehrsplanungsprozesse.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die Dissertation gliedert sich in insgesamt neun Kapitel. Nach der Darstellung der Kapitelinhalte werden die empirische Grundlage sowie die institutionelle Einbettung der Arbeit im Rahmen eines geförderten Forschungsprojekts erläutert.

Kapitel 2 (*Theoretische Grundlagen*) beschreibt die theoretischen Grundlagen sowie die rechtlichen und funktionalen Rahmenbedingungen von Linienbedarfsverkehren.

Kapitel 3 (*Forschungsstand und vergleichbare Ansätze*) gibt einen Überblick über den Stand der Forschung zu Effizienz und Umweltwirkungen von Ridepooling-Systemen. Darauf aufbauend werden der Forschungsbedarf abgeleitet und die Arbeit positioniert.

Kapitel 4 (*Methodik*) stellt die methodische Herangehensweise dar. Grundlage ist die Anwendung der *DIN EN 16258* zur THG-Bilanzierung im Personenverkehr. Erläutert werden das Bewertungsmodell, die Datenquellen, die Datenaufbereitung, die Berechnungslogik sowie methodische Herausforderungen.

Kapitel 5 (*Anwendung der Methodik auf spezifische Linienbedarfsverkehre*) widmet sich der exemplarischen Anwendung der Methodik auf vier reale Ridepooling-Dienste. Die Systeme werden zunächst anhand zentraler betrieblicher und struktureller Merkmale beschrieben; anschließend erfolgt die Bilanzierung der betriebsbedingten THG-Emissionen.

Kapitel 6 (*Auswertung*) umfasst die vergleichende Analyse der Ergebnisse. Untersucht werden betriebliche Effizienz, THG-Bilanzen und strukturelle Rahmenbedingungen sowie der potenzielle ökologische Mehrwert auf Grundlage unterschiedlicher Substitutionsszenarien.

Kapitel 7 (*Sensitivitätsanalyse*) untersucht die Sensitivität der Ergebnisse gegenüber zentralen Einflussfaktoren wie Leerkilometeranteil, Fahrzeugflotte und Energiequelle. Dabei werden Einzelparameter unter *ceteris paribus*-Annahmen sowie kombinierte Szenarien betrachtet.

Kapitel 8 (*Interpretation der Untersuchungsergebnisse*) ordnet die Ergebnisse in einen erweiterten Bewertungsrahmen ein. Neben ökologischen Wirkungen werden verkehrliche, soziale und wirtschaftliche Implikationen diskutiert.

Kapitel 9 (*Schlussfolgerungen und Ausblick*) fasst die zentralen Erkenntnisse zusammen, beantwortet die Forschungsfrage und formuliert Handlungsempfehlungen für Politik und Praxis. Darüber hinaus werden weiterführende Forschungsbedarfe aufgezeigt.

Datenbasis und Projektkontext

Die vorliegende Dissertation baut auf dem Drittmittelprojekt „*Bewertung der ökologischen Effekte von Ridepooling-Systemen anhand von vier Fallbeispielen in NRW*“ auf. Das Projekt wurde im Zeitraum von September 2022 bis Dezember 2024 an der FH Münster durch die Forschungsgruppe Verkehrswesen durchgeführt (Bruder & Klemmer, 2024). Das Projekt wurde durch das Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen (MUNV NRW) im Rahmen der *Richtlinien zur Förderung der Vernetzten Mobilität und des Mobilitätsmanagements (Förderrichtlinie Mobilitätsmanagement - FöRi-MM)* gefördert. Die inhaltliche und methodische Bearbeitung des Projekts erfolgte vollständig durch den Autor dieser Arbeit. Die im Projekt erhobenen empirischen Daten und Auswertungen bilden die Grundlage der nachfolgenden wissenschaftlichen Analyse, wurden jedoch im Rahmen dieser Dissertation eigenständig vertieft, aktualisiert, systematisiert und weiterentwickelt (Bruder & Klemmer, 2024).

Kapitel 2

Theoretische Grundlagen

Kapitel 2 schafft die begriffliche und konzeptionelle Grundlage für die vorliegende Dissertation. Zunächst werden zentrale Begriffe wie On-Demand-Mobilität, Linienbedarfsverkehre und Ridepooling definiert und voneinander abgegrenzt. Daran anschließend erfolgt eine Darstellung der technischen Funktionsweise sowie rechtlicher Rahmenbedingungen. Ein besonderes Augenmerk gilt den verschiedenen Integrationsvarianten von Ridepooling-Systemen in bestehende Strukturen des öffentlichen Verkehrs.

2.1 Terminologische und begriffliche Grundlagen von Linienbedarfsverkehren

On-Demand-Verkehre (engl.: „on demand“, dt.: „auf Abruf“ oder „auf Bestellung“) stellen eine technologiegestützte Form bedarfsgesteuerter Mobilität dar. Fahrten werden flexibel auf Anfrage durchgeführt, charakterisiert durch eine digitale Buchungs- und Dispositionsinfrastruktur sowie algorithmisch gesteuerte Fahrtenplanung. Die Fahrzeuge, in der Regel Pkw oder Kleinbusse, werden per App, Webplattform oder telefonisch gebucht. Die anschließende Disposition erfolgt automatisiert und bedarfsorientiert.

Die Angebote lassen sich als moderne Ausprägung klassischer Bedarfsverkehre verstehen. Während frühere flexible Bedienformen, wie Anruf-Sammeltaxis oder Rufbusse, häufig an vorgegebene Fahrpläne, Linienführungen und Haltepunkte gebunden waren, ermöglichen digital unterstützte Systeme eine deutlich höhere Flexibilität. Merkmale sind etwa die Echtzeit-Disposition, die Nutzung virtueller Haltepunkte und die Abkehr von festen Fahrplänen. Insbesondere in Regionen und Zeiten mit bislang geringer ÖPNV-Angebotsqualität entsteht dadurch eine neue Qualität der Bedarfsorientierung.

Innerhalb des Spektrums digitaler On-Demand-Angebote lassen sich verschiedene Betriebsformen unterscheiden, die sich insbesondere in der Fahrgastbündelung, dem Buchungsprozess und der Integration in bestehende öffentliche Verkehrsangebote unterscheiden (s. Abbildung 2.1):

Ridehailing (Bestellfahrten) bezeichnet digitale Mobilitätsangebote, bei denen Nutzende ein Fahrzeug exklusiv für sich buchen. Es erfolgt keine Bündelung mit weiteren Fahrgästen. Diese Dienste ähneln klassischen Taxis, unterscheiden sich jedoch durch App-basierte Vermittlung und dynamische Preisgestaltung. Bekannte Beispiele sind *UberX* oder *FreeNow* (vgl. Agora Verkehrswende, 2023, S. 9-10).

Ridesharing (Mitfahrten) beschreibt die gemeinschaftliche Nutzung von Fahrten, bei der Privatpersonen freie Sitzplätze zur Verfügung stellen. Die Mitnahme erfolgt meist informell und nicht-kommerziell, etwa über Plattformen wie *BlaBlaCar*. Die Buchung

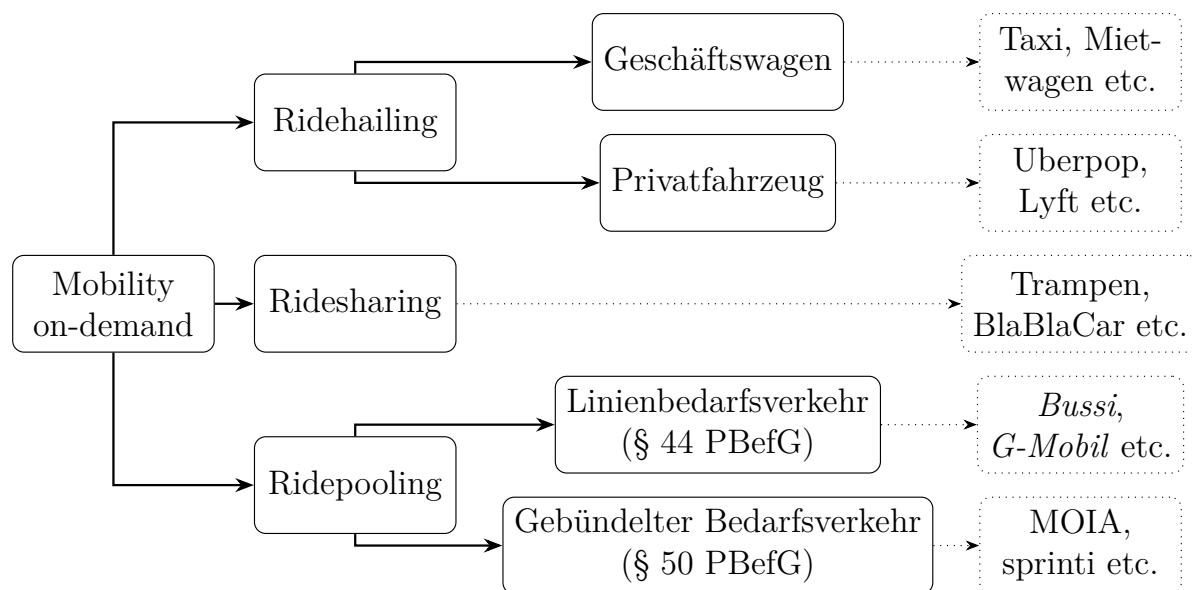


Abb. 2.1: Systematisierung individualisiert nutzbarer Verkehrsangebote (nach Mehlert, 2019, S. 9)

erfolgt häufig nicht in Echtzeit, sondern im Voraus (vgl. Agora Verkehrswende, 2023, S. 9-10).

Ridepooling (Sammelfahrten/-verkehre) bezeichnet die algorithmisch gesteuerte Bündelung mehrerer Fahrtanfragen in Fahrzeugen, die durch geschultes Personal im Auftrag eines Mobilitätsanbieters geführt werden. Die Disposition erfolgt in Echtzeit an physischen Haltepunkten, wie etwa Bushaltestellen, oder an virtuellen Haltepunkten. Ridepooling-Dienste sind häufig in den öffentlichen Verkehr eingebunden (Personenbeförderungsgesetz [PBefG], 2023, §44) oder ergänzen diesen. Es existieren jedoch auch Einzelfälle eigenwirtschaftlicher Verkehre, die nicht dem öffentlichen Verkehr zuzurechnen sind (PBefG, 2023, § 50). Sie gelten als potenziell effiziente und nachhaltige Mobilitätsform, insbesondere aufgrund ihrer Fähigkeit, bedarfsorientiert Auslastungspotenziale zu heben, Emissionen zu reduzieren und neue Zielgruppen zu erschließen (vgl. Agora Verkehrswende, 2023, S. 9-10). Im Gegensatz zu älteren Formen bedarfsorientierter Sammelfahrten wie dem Anruflinienbus, Rufbus oder Anrufsammeltaxi, die seit den 1970er-Jahren im öffentlichen Verkehr eingesetzt werden und eine vorherige Anmeldung erfordern, zeichnet sich Ridepooling durch eine digitale Echtzeit-Disposition aus (vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen [FGSV], 2021, S. 16, 20). Dies ermöglicht eine deutlich höhere Flexibilität hinsichtlich Routenführung, Buchungsprozessen und Haltepunkten. Ridepooling stellt damit eine technologische Weiterentwicklung klassischer Sammelverkehre dar.

2.2 Rechtliche Rahmenbedingungen und regulatorische Einordnung

Eine standardisierte Begriffsbestimmung von Ridepooling wurde von der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) im Jahr 2020 veröffentlicht (FGSV, 2020):

Definition Ridepooling

„Ridepooling ist definiert als kommerzielle Sammelbeförderung mehrerer Personen nach deren individuellen Anmeldungen und Vorgaben des von ihnen jeweils gewünschten Abholortes, Zielortes und Zeitpunktes der Fahrt mit einem vom Anbieter optimierten Fahrtverlauf.“ (FGSV, 2020, S. 27)

Diese Definition betont die zentrale Eigenschaft von Ridepooling-Systemen: Die dynamische Zusammenführung individueller Fahrtwünsche zu einer gemeinschaftlichen Fahrt. Die Routenoptimierung erfolgt softwaregestützt mithilfe eines sogenannten Dispositionsalgorithmus, welcher Startpunkt, Ziel und gewünschten Fahrzeitpunkt der einzelnen Fahrgäste bzw. Fahrtanfragen möglichst effizient miteinander kombiniert. Auf diese Weise sollen sowohl die Auslastung der Fahrzeuge und damit die betriebliche Effizienz erhöht als auch eine akzeptable Servicequalität für die Nutzenden gewährleistet werden.

Aus rechtlicher Perspektive bewegen sich Ridepooling-Angebote zwischen etablierten Verkehrsformen wie dem Linienverkehr, dem Taxiverkehr und dem Mietwagenverkehr. Diese sind seit den 1960er-Jahren im deutschen Personenbeförderungsgesetz (PBefG) verankert (vgl. FGSV, 2021, S. 5; vgl. PBefG, 2023, §42, §47, §49). Charakteristisch für Ridepooling-Dienste ist das Fehlen einer vorab festgelegten Linienführung, eines festen Fahrplans sowie einer verbindlichen Haltestellenbedienung, wodurch eine Zuordnung zu § 42 PBefG (Linienverkehr) ebenso ausgeschlossen ist wie eine eindeutige Unterordnung unter § 49 PBefG (Mietwagenverkehr). Vor der Novelle des PBefG im Jahr 2021 wurden solche Dienste daher häufig im Rahmen allgemeiner oder experimenteller Genehmigungen nach § 2 Abs. 6 bzw. Abs. 7 PBefG zugelassen, was zu uneinheitlichen Genehmigungspraktiken in den Kommunen führte (vgl. Agora Verkehrswende, 2023, S. 11).

Mit der Novelle des PBefG im März 2021 wurde eine rechtlich verbindliche Grundlage für Ridepooling-Angebote geschaffen. Seither lassen sich entsprechende Dienste entweder als sogenannte Linienbedarfsverkehre (§ 44 PBefG) oder als gebündelte Bedarfsverkehre (§ 50 PBefG) genehmigen (vgl. FGSV, 2021, S. 6; PBefG, 2023). Im Folgenden werden die Unterschiede zwischen Linienbedarfsverkehren, gebündelten Bedarfsverkehren und klassischen Linienverkehren erläutert. Eine systematische Gegenüberstellung dieser Betriebsformen bietet Tabelle 2.1 (vgl. Agora Verkehrswende, 2023, S. 12).

Linienbedarfsverkehre nach § 44 PBefG dienen der Personenbeförderung auf vorherige Bestellung, wobei Fahrten innerhalb eines definierten Gebiets zwischen festgelegten Haltepunkten und innerhalb bestimmter Betriebszeiten durchgeführt werden. Sie erlauben im Gegensatz zum traditionellen Linienverkehr (§ 42 PBefG) eine flexible Streckenführung und bündeln Fahrtwünsche verschiedener Fahrgäste. Da sie formal als besondere Form des Linienverkehrs gelten, ist ihre Einbindung in die ÖPNV-Planung zwingend erforderlich. Dies bringt Pflichten zur Betriebsdurchführung und Beförderung mit sich, die die Angebotsverlässlichkeit für Fahrgäste erhöhen, zugleich aber die unternehmerische Flexibilität der Anbieter einschränken (vgl. PBefG, 2023, § 44; vgl. Agora Verkehrswende, 2023, S. 11–12). Die Dienste müssen mit den Anforderungen des jeweiligen Nahverkehrsplans kompatibel sein, inklusive barrierefreier Zugänglichkeit. Gleichzeitig eröffnet die formale

Tab. 2.1: Vergleich wesentlicher Merkmale von Linienverkehr, Linienbedarfsverkehr und gebündeltem Bedarfsverkehr (nach Agora Verkehrswende, 2023, S. 12)

Merkmale	Linienverkehr (§ 42 PBefG)	Linienbedarfs- verkehr (§ 44 PBefG)	Gebündelter Bedarfsverkehr (§ 50 PBefG)
Bedienung nach Bedarf	Nein	Ja	Ja
Flächenbedienung (keine festgelegte Haltestellenfolge)	Nein	Ja	Ja
Ein-/Ausstieg	Haltestelle (beschildert)	Haltepunkt (beschildert/virtuell)	Keine Anforderung
Fahrplanbindung	Ja	Nein	Nein
Betriebs- und Beförderungspflicht	Ja	Ja	Nein
Tarifregelung bzw. Tarifpflicht	Ja	Ja	Ja
Barrierefreiheit gesetzlich vorgeschrieben	Ja	Ja	Optional
Ermäßigter Mehrwertsteuersatz	Ja	Ja	Nein
Anforderungen des Nahverkehrsplans erfüllend	Ja	Ja	Nein
Räumliche Beschränkung auf Betriebssitz	Nein	Nein	Ja

Einbindung in den ÖPNV die Möglichkeit zur finanziellen Unterstützung über öffentliche Mittel, was insbesondere in ländlichen oder nachfrageschwachen Räumen von Bedeutung ist (vgl. Agora Verkehrswende, 2023, S. 9–10).

Gebündelte Bedarfsverkehre gemäß § 50 PBefG stellen eine eigenständige Betriebsform der Sammelfahrten dar, bei der ebenfalls mehrere Beförderungsanfragen entlang ähnlicher Routen gemeinsam abgewickelt werden. Sie sind als privatwirtschaftlich organisierte Mobilitätsangebote konzipiert, die den ÖPNV ergänzen, aber nicht in diesen integriert sind. Folglich entfällt die Betriebs- und Beförderungspflicht. Gleichzeitig unterliegen sie bestimmten Auflagen zum Schutz öffentlicher Verkehrsinteressen, insbesondere zur Vermeidung direkter Konkurrenz zu Taxi- und Linienverkehren (vgl. PBefG, 2023, § 50; vgl. Agora Verkehrswende, 2023, S. 12–13). Das Betriebsgebiet ist in der Regel auf die jeweilige Kommune des Betriebssitzes beschränkt und kann nur mit Zustimmung angrenzender Gemeinden erweitert werden. Darüber hinaus gelten Anforderungen an Mindestentgelte (zur Abgrenzung vom ÖPNV), Vorgaben zur Mindestbündelungsquote sowie optional weitere Auflagen durch die Genehmigungsbehörden. Dazu zählen etwa Rückkehrpflichten, emissionsbezogene Standards, Anforderungen an die Barrierefreiheit oder arbeitsrechtliche Bedingungen. Aufgrund ihrer wirtschaftlichen Ausrichtung sind ge-

bündelte Bedarfsverkehre stark auf eine ausreichende Nachfrage angewiesen. Ihr Einsatz konzentriert sich daher vornehmlich auf urbane Gebiete oder dicht besiedelte Regionen. In ländlichen Räumen ist eine kostendeckende Betriebsführung erfahrungsgemäß ohne öffentliche Förderung kaum möglich (vgl. Agora Verkehrswende, 2023, S. 9–10).

Die vorliegende Dissertation fokussiert sich auf die Betriebsform des Linienbedarfsverkehrs (§ 44 PBefG) und deren Potenziale im Rahmen einer strukturierten Integration in den ÖPNV.

2.3 Technisch-betriebliche Systemlogik und Funktionsweise

Die technisch-betriebliche Logik von Linienbedarfsverkehren ist durch die dynamische Bündelung individueller Fahrtanfragen gekennzeichnet, die in eine bestehende oder neu zu entwickelnde Routenplanung integriert werden. Die Disposition der Fahrtanfragen erfolgt durch einen algorithmisch gesteuerten Prozess, der im Folgenden als Dispositionsalgorithmus bezeichnet wird. Dieser soll betriebliche Effizienz und nutzerseitige Serviceziele miteinander in Einklang bringen. Ziel ist es, räumlich und zeitlich kompatible Fahrtwünsche zu bündeln, die Wegführung effizient zu gestalten und Komforteinbußen, etwa durch lange Wartezeiten oder Umwege, zu begrenzen (vgl. Zwick, Kuehnel & Axhausen, 2022, S. 1–2; vgl. Agatz et al., 2012, S. 295–296). In der Routen- und Bündelungsplanung berücksichtigt der Dispositionsalgorithmus neben den Fahrtanfragen der Fahrgäste auch Informationen zu Fahrzeugpositionen und zur Verkehrslage. Ein prominentes Beispiel ist der von Alonso-Mora et al. (vgl. 2017, S. 462–464) entwickelte Ansatz zur dynamischen Bündelung und Zuordnung von Fahrtanfragen zu Fahrzeugen. Während einzelne Algorithmen primär zu Forschungszwecken veröffentlicht werden, beziehen sich die in dieser Arbeit betrachteten Ansätze auf privatwirtschaftliche Anbieter und unterliegen dem Betriebsgeheimnis der jeweiligen Softwareentwickler. Die konkrete Funktionsweise der in den analysierten Systemen eingesetzten Algorithmen bleibt daher intransparent und stellt eine methodische Blackbox dar.

Obwohl die konkrete Funktionsweise der Dispositionsalgorithmen weitgehend intransparent ist, kann die Systemlogik durch gezielte Parametrierung seitens der Softwareanbieter oder Betreibenden beeinflusst werden. Ziel ist es, die Parametrisierung an verkehrliche Zielsetzungen und den jeweiligen Anwendungsraum anzupassen. Im Zentrum dieser Kalibrierung stehen zwei Steuergrößen, die das Spannungsverhältnis zwischen betrieblicher Effizienz und Nutzerkomfort bestimmen: die maximale Wartezeit und der maximal zulässige Umwegfaktor. Diese Parameter legen fest, ob das System vorrangig auf Nutzerkomfort oder betriebliche Effizienz ausgerichtet ist. In den im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Projekten erfolgte die Festlegung entsprechender Schwellenwerte nach Kenntnis des Autors in Abstimmung zwischen Betreibenden, Softwareanbietern und operativer Leitstelle. Ihre Konfiguration wirkt sich unmittelbar auf die Leistungsfähigkeit und Nutzungsakzeptanz des Systems aus. Ein erhöhter Umwegfaktor steigert zwar die Bündelungsquote und verbessert die Auslastung innerhalb des Systems, führt jedoch auch zu längeren Warte-

und Fahrtzeiten. Ebenso erweitert eine längere zulässige Wartezeit den Handlungsspielraum der Dispositionsalgorithmen zur Fahrtenbündelung, wird von Fahrgästen aber ab einem bestimmten Maß als inakzeptabel empfunden (vgl. Chen et al., 2017, S. 3–4). Die Parameter sind in der folgenden Übersicht erläutert.

Zentrale Serviceparameter und ihre Systemwirkung

Der **Umwegfaktor (Detour-Faktor)** gibt an, wie viel zusätzliche Fahrzeit gegenüber der direkten Verbindung für einen Fahrgast im Rahmen der Fahrtenbündelung akzeptiert wird. Er kann entweder als fixer Maximalwert (z. B. + 5 Minuten) oder als prozentualer Anteil der Direktfahrtzeit (z. B. + 50 %) definiert sein. Ergänzend kann ein *Sockelwert* festgelegt werden, der auch bei kurzen Strecken eine Mindesttoleranz für Umwege ermöglicht. Die Höhe des Umwegfaktors beeinflusst die Bündelungsquote und somit die Fahrzeugauslastung, kann jedoch zu Komforteinbußen für Fahrgäste führen.

Die **Maximale Wartezeit** bezeichnet die maximal zulässige Zeitspanne zwischen angefragter Abfahrtszeit und der vom System prognostizierten Abholzeit. Sie definiert das zeitliche Suchfenster für passende Fahrten im Pooling-Algorithmus. Eine höhere Wartezeit erleichtert die Zusammenlegung mehrerer Fahrtenanfragen und verbessert somit die Angebotsverfügbarkeit bei begrenzten Ressourcen. Gleichzeitig kann sie jedoch die wahrgenommene Verlässlichkeit und Attraktivität des Dienstes mindern.

Hinweis zur Datenlage: Die genaue technische Funktionsweise der verwendeten Dispositionsalgorithmen ist in den hier betrachteten Systemen nicht öffentlich zugänglich. Sie unterliegt dem Betriebsgeheimnis der jeweiligen Softwareanbieter.

Beide Parameter beeinflussen zentrale Leistungskennzahlen wie Fahrtdauer, Auslastung, Pünktlichkeit und Bedienquote. Größere Spielräume bei Warte- und Umwegzeiten erleichtern die Bündelung von Fahrtenanfragen und können dadurch die betriebliche Effizienz erhöhen. Gleichzeitig gehen sie mit Komforteinbußen für die Fahrgäste einher. Darin zeigt sich ein grundlegender Zielkonflikt zwischen betrieblicher Effizienz und angebotsseitiger Attraktivität (vgl. Wilkes et al., 2021, S. 4–7; vgl. Chen et al., 2017, S. 3–4; vgl. Zwick, Kuehnel & Axhausen, 2022, S. 1–2, 9–10).

Neben diesen betriebs- und nutzerbezogenen Parametern können in Dispositionsalgorithmen auch Vorgaben zur Erreichung verkehrlicher Zielstellungen integriert werden. Ein zentrales Steuerungselement ist dabei die Definition des Betriebsgebiets. Bestimmte Zonen können zeitweise vom Ridepooling-Betrieb ausgenommen werden, um unerwünschte Substitutionseffekte gegenüber bestehenden Busverbindungen zu vermeiden. Darüber hinaus kann die Dispositionslogik um Funktionen erweitert werden, die prüfen, ob für eine angefragte Ridepooling-Fahrt bereits eine zumutbare ÖPNV-Alternative besteht. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird diese Funktion als *Parallelverkehrsfunktion* beziehungsweise als *Modalfilter* bezeichnet. Solche Einstellungen können zur gezielten Steuerung des Angebots eingesetzt werden. Weitere konfigurierbare Parameter umfassen unter anderem

Bediengebiet, Bedienzeiten, Tarifintegration, Haltestellenstruktur, Buchungszugang und Fahrzeugeinsatz (vgl. Hartz et al., 2024, S. 5–7, 25, 39).

Die tatsächliche ökologische Wirkung von Ridepooling-Systemen hängt jedoch maßgeblich vom konkreten Systemdesign sowie von der verkehrlichen Einbettung ab. Ökologisch vorteilhafte Effekte sind insbesondere dann zu erwarten, wenn geteilte Mobilitätsangebote primär Fahrten des motorisierten Individualverkehrs substituieren und nicht in relevantem Umfang mit dem öffentlichen Verkehr oder aktiven Modi konkurrieren (vgl. Becker et al., 2020, S. 239–240). Aus ökologischer Perspektive ist zudem zu berücksichtigen, dass zusätzliche, durch das Angebot erst ausgelöste Fahrten die potenziellen Einsparungen mindern oder sogar überkompensieren können. Voraussetzung für positive Wirkungen ist daher eine konsequente Ausgestaltung als kollektiv genutztes, gebündeltes und in den öffentlichen Verkehr integriertes Angebot (vgl. Reichow & Ruhrort, 2024, S. 17–19).

Aus Sicht der Fahrgäste zeigt sich die Systemlogik in einem Buchungssystem, über das Fahrtwünsche meist per App, je nach System auch über weitere Zugangskanäle, angemeldet werden. Digitale Buchungs- und Dispositionstools ermöglichen dabei flexibles Routing und Pooling in Echtzeit. Anschließend erfolgt eine algorithmisch gestützte Prüfung der Anfrage, bei der unter anderem die Lage der Fahrtanfrage im Bediengebiet, verfügbare Fahrzeuge, bestehende Routen und nutzerseitige Zeitvorgaben berücksichtigt werden. Auf dieser Basis wird dem Fahrgast ein Fahrtangebot unterbreitet und im Falle der Annahme disponiert. Die Fahrgäste erhalten daraufhin Informationen zur Buchung, insbesondere zu Abholort, Abholzeitpunkt und voraussichtlicher Ankunftszeit (vgl. Reichow & Ruhrort, 2024, S. 18; vgl. Agatz et al., 2012, S. 296–297). Ein Fahrtangebot kann jedoch nicht in jedem Fall unterbreitet werden. Die Angebotsverfügbarkeit hängt unter anderem von der aktuellen Nachfrage, der räumlichen Fahrzeugverteilung, bestehenden Fahrzeugrouten sowie den systemseitig definierten Serviceparametern ab. Wenn eine Fahrtanfrage unter den gegebenen Kapazitäts-, Wartezeit- und Umwegrestriktionen nicht in eine bestehende oder neu zu bildende Route integriert werden kann, kann sie abgelehnt werden (vgl. Agatz et al., 2012, S. 296–297; vgl. Alonso-Mora et al., 2017, S. 463–464). Das Fahrpersonal erhält die disponierten Aufträge in der Regel über eine separate fahrzeug- oder fahrpersonalbezogene Anwendung, die auftragsbezogene Informationen und Navigationsfunktionen bereitstellt.

2.4 Systemvarianten und konzeptionelle Ausprägungen

Ridepooling-Verkehre lassen sich hinsichtlich ihrer betrieblichen Ausgestaltung äußerst flexibel konfigurieren. In der Region Hannover deckt das System *sprinti* mit 120 Fahrzeugen ein großflächiges Betriebsgebiet in zwölf Regionskommunen ab und zielt darauf ab, Lücken im bestehenden Liniennetz zu schließen (Via Transportation, 2023, Abschn. „Sprinti wird zum größten On-Demand-ÖPNV-System in Deutschland“). Demgegenüber steht das *kommit-Shuttle*, das mit nur zwei Fahrzeugen in der Gemeinde Senden im ländlichen Raum primär kommunale Zubringerfahrten zum übergeordneten ÖPNV übernimmt

(vgl. Kreis Coesfeld and Zweckverband Mobilität Münsterland, 2024, Abschn. „kommit-Shuttle“). *MOIA* verkehrt hingegen mit bis zu 300 Fahrzeugen im urbanen Raum Hamburgs und ergänzt den ÖPNV um ein komfortables und direktes Mobilitätsangebot (MOIA, 2023, vgl. Abschnitt „Hamburg 13.04.2023“). Einen Sonderfall stellt Gronau dar: Hier ersetzte das *G-Mobil* 2021 den gesamten Linienverkehr durch einen vollständig flexiblen Linienbedarfsverkehr (vgl. Regionalverkehr Münsterland GmbH [RVM], 2021, S. 2). Diese Beispiele verdeutlichen die hohe Varianz in der betrieblichen Skalierung und Zielstellung von Linienbedarfsverkehren.

Trotz dieser Vielfalt weisen Ridepooling-Systeme eine zentrale Gemeinsamkeit auf: Sie sind hinsichtlich des wahrgenommenen Komfortniveaus oberhalb des klassischen Umweltverbunds, jedoch unterhalb von Taxi und motorisiertem Individualverkehr einzuordnen. Zwar müssen Nutzende im Vergleich zu individuellen Angeboten gewisse Komforteinbußen durch die Bündelung mit weiteren Fahrgästen hinnehmen, wie etwa zusätzliche Umwege oder verlängerte Wartezeiten, profitieren jedoch in der Regel von einer direkten, flexiblen Bedienung sowie kurzen Zugangswegen. Aufgrund dieses spezifischen Komfort- und Preisniveaus lassen sich Ridepooling-Angebote klar vom Taxiverkehr abgrenzen. Sie operieren mit geteilten Fahrten, liegen preislich bei durchschnittlich rund zwei Dritteln des regulären Taxitarifs, sofern sie nicht sogar mit einem regulären ÖPNV-Ticket genutzt werden können, und erfordern von den Fahrgästen eine geringere Individualisierung (vgl. Knie et al., 2020, PDF-S. 5). Abbildung 2.2 verdeutlicht diese Einordnung.

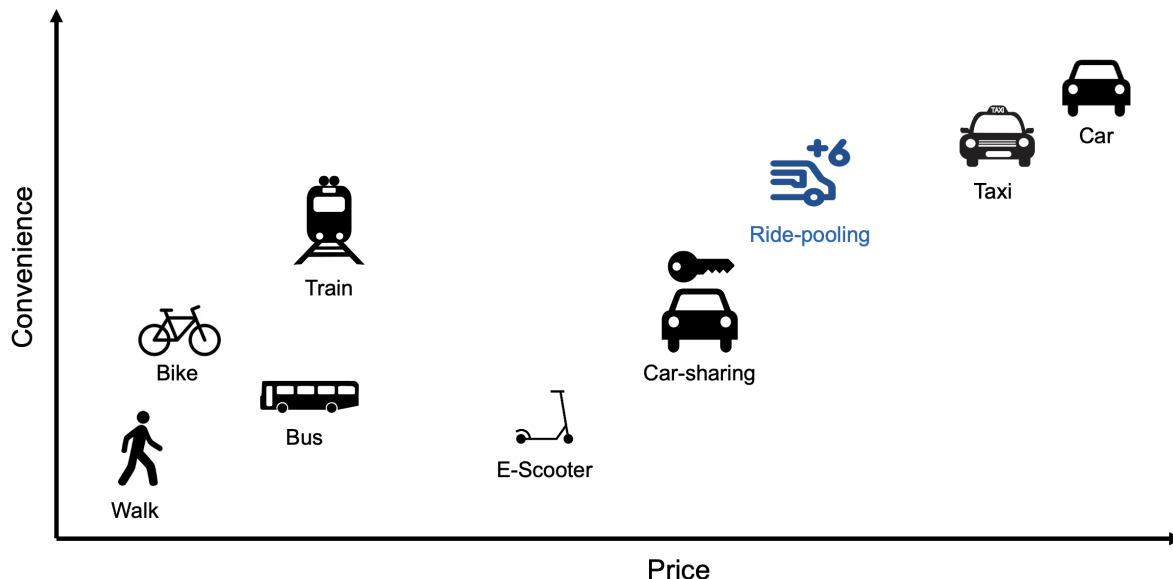


Abb. 2.2: Klassifizierung von Ridepooling hinsichtlich Preis und Komfort (Zwick, Kuehnel & Axhausen, 2022, Abb. 1, S. 2)

Angesichts der Vielzahl an verkehrlichen Zielstellungen, Systemgestaltungen und räumlichen Einsatzbedingungen ist eine differenzierte Typologie notwendig, um Ridepooling-Angebote systematisch analysieren, vergleichen und weiterentwickeln zu können. Nur so lassen sich die verkehrlichen Wirkungen, die betriebliche Effizienz und die Systeminte-

gration in den öffentlichen Verkehr fundiert bewerten und geeignete Rahmenbedingungen definieren. Eine wissenschaftlich etablierte, einheitliche Einordnung für Linienbedarfsverkehre liegt bislang jedoch nicht vor.

Der VDV (2021) hat im Jahr 2021 eine erste Typisierung vorgeschlagen, die zwischen den Funktionstypen „Anbindung der letzten Meile“, „Flächenverkehr im ländlichen Raum“ und „Flächenverkehr im städtischen Raum“ unterscheidet (vgl. VDV, 2021, S. 7). Eine funktional ähnliche Einteilung wird Brodehl (2023) zugeschrieben. Demnach lassen sich On-Demand-Angebote in „Feederverkehre“, „Shuttle- und Nachtverkehre“ sowie „Direktverkehre“ unterscheiden (vgl. Brodehl 2023, zitiert nach Schneider et al., 2024, S. 67). Beide Ansätze bieten eine praxisnahe Orientierung, setzen jedoch jeweils eine eindeutige funktionale Zielsetzung voraus. Dies wird der Realität nur eingeschränkt gerecht, da viele Angebote sowohl als Zu- und Abbringer zum ÖPNV als auch als Direktverkehre fungieren. Im Jahr 2023 ergänzte der VDV (2023) seine Typisierung durch qualitative Vorgaben in Abhängigkeit von der Siedlungsdichte (hoch, mittel, gering). Die aktualisierte Typisierung beinhaltet unter anderem Empfehlungen zu Wartezeiten, Umwegdistanzen, Angebotsquoten und Flottenbedarf. Die Orientierung an raumstrukturellen Merkmalen stellt einen wichtigen Beitrag zur Operationalisierung dar, vernachlässigt jedoch die konkrete ÖPNV-Bedienungsqualität sowie die verkehrliche Zielstellung im spezifischen Betriebsgebiet der Verkehre (vgl. VDV, 2023, S. 8).

Einen umfassenderen Ansatz verfolgen Schneider et al. (vgl. 2024, S. 67–84), die eine Typologie von neun Systemtypen nach Einsatzzweck und Grundcharakteristik entwickeln. Diese Typologie stellt eine hilfreiche heuristische Annäherung dar, ist jedoch nur eingeschränkt als trennscharfe Klassifikation realer Angebote geeignet. Dies zeigt sich insbesondere daran, dass sich in konkreten Betriebsgebieten unterschiedliche Raumtypen und Nutzungsmuster überlagern können. Auch Zielstellungen können je nach Tageszeit, Bediengebiet und bestehendem ÖPNV-Angebot variieren. Eine eindeutige und statische Zuordnung zu einem einzelnen Systemtyp ist daher methodisch z. T. problematisch.

Für eine systematische Analyse erscheint eine ziel- und wirkungsorientierte Typologie daher methodisch geeigneter als eine starre Systemklassifikation. Im Vordergrund sollte weniger die feste Einordnung in Typen, sondern vielmehr das Verständnis funktionaler Zusammenhänge zwischen Zielsetzungen, Serviceparametern und Systemwirkungen stehen. Einen solchen Ansatz haben das Kompetenzzentrum Digitalisierung NRW (KCD) und civity in der „Potenzialanalyse Ridepooling Ruhrgebiet“ entwickelt (vgl. KCD & civity, 2022, S. 21–25). Dort werden drei archetypische Einsatzformen von Ridepooling-Systemen identifiziert: „Grundmobilität“, „Lückenschluss“ und „Bequemlichkeitsmobilität“. Die Zuordnung erfolgt nicht anhand raumstruktureller Merkmale, sondern auf Basis der lokalen ÖPNV-Bedienungsqualität, gemessen über die Indikatoren Erschließungsgrad, Reisezeitverhältnis zum MIV und Angebotsdichte (s. Tabelle 2.2).

Tab. 2.2: Archetypische On-Demand-Ridepooling-Grundformen (nach KCD & civity, 2022, S. 22)

Archetyp	Bedienungsqualität im ÖPNV		
	Fußläufige Erschließung	Reisezeitverhältnis ÖPNV/MIV	Abfahrten pro HVZ / SLZ
Grundmobilität	Mehr als 30 % der Bevölkerung nicht fußläufig erschlossen	$> 2,8$	0 bis 4
Lückenschluss	5 bis 30 % der Bevölkerung nicht fußläufig erschlossen	$> 1,5$ bis $\leq 2,8$	4 bis 8
Bequemlichkeitsmobilität	Weniger als 5 % der Bevölkerung nicht erschlossen	$\leq 1,5$	> 8

Auf Basis dieser Archetypen werden typische Service-Level, betriebliche Anforderungen, Finanzierungsmöglichkeiten und tarifliche Gestaltungsmerkmale abgeleitet (s. Tabelle 2.3). Die Einteilung dient nicht der strikten Kategorisierung, sondern der Veranschaulichung typischer Ausprägungen und ist ausdrücklich offen für Mischformen; die Empfehlungen sind als Orientierung und nicht als starre Vorgabe zu verstehen. Die Archetypen verdeutlichen zentrale Zielkonflikte von Linienbedarfsverkehren im öffentlichen Verkehr, darunter die wechselseitige Abhängigkeit zwischen angestrebtem Komfortniveau, verkehrlicher Effizienz und finanziellem Aufwand.

Tab. 2.3: Betriebsparameter archetypischer Ridepooling-Grundformen (nach KCD & civity, 2022, S. 23)

Merkmal	Grundmobilität	Lückenschluss	Bequemlichkeitsmobilität
Ziele	Sicherung der Daseinsvorsorge bei geringer ÖPNV-Bedienungsqualität	Steigern der Attraktivität des ÖPNV bei lückenhafter Erschließung	Weitere Mobilitätsoptionen schaffen bei hoher ÖPNV-Bedienungsqualität
Serviceparameter	Kleinere Flotten Wartezeit 30 bis 60 Min Umwege max. 50 %	Mittlere Flotten Wartezeit 15 bis 30 Min Umwege 30 bis 40 %	Große Flotten Wartezeit 5 bis 15 Min Umwege 20 bis 30 %
Finanzierung	Basis-Angebot mit geringem Finanzierungsbedarf	Ausgewogenes Angebot mit mittlerem Finanzierungsbedarf	Attraktives Angebot mit hohem Finanzierungsbedarf
Tarif	ÖPNV-Tarif	ÖPNV-Tarif oder Distanztarif (VRR on-Demand)	Distanztarif (VRR on-Demand)

Der Archetyp der **Grundmobilität** zielt auf die Sicherung der Daseinsvorsorge in Gebieten mit geringer ÖPNV-Bedienungsqualität. Hier wird ein reduziertes Service-Level mit

längeren Wartezeiten, größeren Umwegen und gegebenenfalls Nutzungseinschränkungen akzeptiert, um durch eine kleine Flotte möglichst viele Fahrten zu bündeln und somit bedienen zu können. Der Finanzierungsbedarf wird durch möglichst kleine Flotten gering gehalten, da im Zuge der Daseinsvorsorge der ÖPNV-Tarif greift (vgl. KCD & civity, 2022, S. 23).

Beim **Lückenschluss** liegt der Fokus auf der Steigerung der Attraktivität des ÖPNV in Bereichen mit räumlichen oder zeitlichen Angebotslücken. Ziel ist ein ausgewogenes Verhältnis von Service-Level und betrieblicher Effizienz (Wartezeit 15 bis 30 Minuten, Umweganteil 30 bis 40 %). Die Finanzierung basiert auf mittleren Flottengrößen und moderaten Nutzungsentgelten (vgl. KCD & civity, 2022, S. 23–24).

Die **Bequemlichkeitsmobilität** zielt auf die Schaffung zusätzlicher Mobilitätsoptionen in bereits gut erschlossenen Räumen ab und soll zur Attraktivierung des ÖPNV beitragen. Charakteristisch ist ein hohes Komfortniveau mit kurzen Wartezeiten (5 bis 15 Minuten), geringen Umwegen (20 bis 30 %) und flexiblen Buchungsoptionen. Die begrenzte Wartezeit und Umwegdistanz reduzieren jedoch die Bündelungseffekte, was ein höheres Service-Level, aber geringere verkehrliche Effizienz bedeutet. Um dieses Leistungsniveau aufrechterhalten zu können, sind größere Fahrzeugflotten erforderlich. Der damit verbundene hohe Finanzierungsbedarf erfordert in der Regel höhere Nutzungsentgelte, sodass ein Distanztarif empfohlen wird (vgl. KCD & civity, 2022, S. 24).

In der praktischen Umsetzung treten reine Ausprägungen dieser Archetypen selten auf. Vielmehr handelt es sich meist um hybride Betriebsformen, die Elemente mehrerer Typen kombinieren. So kann ein System etwa tagsüber als Lückenschluss und in den Randzeiten als Grundmobilitätsangebot fungieren. Auch räumlich können innerhalb eines Betriebsgebiets unterschiedliche Anforderungen bestehen, etwa zwischen dicht besiedelten Ortskernen und peripheren Siedlungsbereichen. Diese Heterogenität unterstreicht die zuvor beschriebene Funktion der Archetypen als idealtypische, nicht starre Kategorien, die zur Strukturierung und Bewertung herangezogen werden können. Planerische Entscheidungen sollten daher stets die lokalen Rahmenbedingungen, die jeweiligen Zielstellungen sowie das Spannungsfeld zwischen Nutzerorientierung und Effizienz berücksichtigen.

2.5 Potenziale, Herausforderungen und systemimmanente Zielkonflikte

Um die Wirkungszusammenhänge und Rahmenbedingungen von Ridepooling-Systemen nachvollziehen zu können, ist eine differenzierte Betrachtung ihrer Potenziale und Herausforderungen notwendig. Zunächst werden die Potenziale von Ridepooling-Systemen systematisch entlang der drei Nachhaltigkeitsdimensionen sozial, ökologisch und ökonomisch analysiert. Daran anschließend folgt eine Darstellung zentraler Herausforderungen sowie die daraus resultierenden systemimmanenten Zielkonflikte.

Soziale Potenziale

Ein zentrales Potenzial von Ridepooling-Systemen liegt in der Förderung sozialer Teilhabe, indem sie Mobilitätsangebote im öffentlichen Verkehr für bislang unterversorgte

Bevölkerungsgruppen und Räume bereitstellen. Dazu zählen Personen ohne eigenen Pkw, mobilitätseingeschränkte Menschen, ältere Personen, Kinder und Jugendliche sowie Einwohnerinnen und Einwohner ländlicher oder peripherer Räume. Insbesondere in Tagesrandlagen, an Wochenenden sowie in Regionen mit geringer Nachfrage können bedarfsgerechte Bedienkonzepte bestehende Angebotslücken im öffentlichen Personennahverkehr schließen. Virtuelle Haltepunkte können zusätzlich zur Feinerschließung beitragen. In Fällen, in denen ein wirtschaftlich tragfähiger Linienbusverkehr nicht realisierbar ist, kann Ridepooling zur Sicherung der Grundmobilität und zur Angleichung der Lebensverhältnisse zwischen städtischen und ländlichen Räumen beitragen (vgl. VDV, 2025b, S. 4, 16) (vgl. Agora Verkehrswende, 2023, S. 51).

Für mobilitätseingeschränkte Personen kann Ridepooling die Zugänglichkeit verbessern, etwa durch barrierefreie Fahrzeuge, verkürzte Zuwege oder Tür-zu-Tür-Bedienformen. Als Teil des öffentlichen Verkehrs unterliegen Linienbedarfsverkehre den Anforderungen des Personenbeförderungsgesetzes zur vollständigen Barrierefreiheit (§ 8 Abs. 3 PBefG). Der SoVD weist entsprechend darauf hin, dass Linienbedarfsverkehre dem ÖPNV zugeordnet sind und damit die Vorgaben nach § 8 Abs. 3 PBefG gelten (vgl. Sozialverband Deutschland, 2022, S. 1, 3). Zudem müssen digital vermittelte Verkehrsangebote barrierefrei zugänglich sein und die gezielte Bestellung beziehungsweise Vermittlung barrierefreier Fahrzeuge ermöglichen (vgl. Sozialverband Deutschland, 2022, S. 5). Gegenüber dem klassischen Linienbusverkehr liegt der betriebliche Unterschied im Ridepooling vor allem in der digitalen Disposition, durch die barrierefreie Fahrzeuge gezielter bestimmten Fahrtanfragen zugeordnet werden können.

Ein weiteres Potenzial im Sinne sozialer und finanzieller Gerechtigkeit ergibt sich für Haushalte mit geringem Einkommen, insbesondere dann, wenn Ridepooling-Angebote in bestehende Tarifstrukturen integriert sind und keine Zusatzkosten gegenüber dem regulären ÖPNV anfallen. Sozial wirksam sind solche Angebote daher vor allem dann, wenn sie nicht nur räumlich verfügbar, sondern auch finanziell zugänglich und verständlich nutzbar sind.

Auch im urbanen Raum kann Ridepooling eine sozial wirksame Ergänzung des öffentlichen Verkehrs darstellen. Relevante Einsatzfelder bestehen insbesondere in Räumen und Zeitlagen mit geringer Taktung des Linienverkehrs, auf Relationen mit längeren Fußwegen oder Wartezeiten sowie auf der ersten und letzten Meile. Durch eine Tür-zu-Tür-Bedienung beziehungsweise ein dichtes Netz virtueller Haltestellen kann Ridepooling Zugangshürden zum Umweltverbund verringern und zusätzliche Mobilitätsoptionen für Personen schaffen, die keinen privaten Pkw besitzen oder dessen Nutzung reduzieren möchten (vgl. Koska, 2021, S. 9). Empirische Befunde zu CleverShuttle zeigen zudem, dass Ridepooling insbesondere in den Abend- und Nachtstunden genutzt wird und die Mobilität ohne eigenes Auto attraktiver machen kann (vgl. Knie et al., 2020, S. 4–5). Simulationsbasierte Befunde aus Wuppertal deuten ergänzend darauf hin, dass Ridepooling in nachfrageschwachen Abendstunden gegenüber dem Linienbusverkehr Vorteile hinsichtlich Warte- und Beförderungszeiten ermöglichen kann, was aus sozialer Perspektive vor allem für die Verbesserung zeitlicher Erreichbarkeit relevant ist (vgl. Asatryan et al., 2023, S. 19–20).

Über die rein funktionale Sicherstellung von Mobilität hinaus kann Ridepooling soziale Teilhabe auch im weiteren Sinne fördern, etwa durch ein gesteigertes Mobilitätsempfinden, die Vermeidung sozialer Isolation oder die bessere Erreichbarkeit gesellschaftlicher Infrastrukturen wie Gesundheitsversorgung, Bildungs-, Versorgungs- und Freizeitangebote. Auch im Kontext des demografischen Wandels kann Ridepooling zur Aufrechterhaltung einer selbstbestimmten Lebensführung im Alter beitragen (vgl. Schneider et al., 2024, S. 41). Damit soziale Potenziale tatsächlich wirksam werden, sind jedoch eine hohe Verfügbarkeit, kurze Wartezeiten, geringe Reisezeitverluste, barrierefreie Zugänge und transparente, sozialverträgliche Tarife zentrale Voraussetzungen (vgl. Wilkes et al., 2021, S. 7–8; vgl. Reichow & Ruhrort, 2024, S. 19 und S. 22).

Ökologische Potenziale

Das ökologische Potenzial von Ridepooling-Verkehren ergibt sich im Kern aus der algorithmischen Bündelung (teil-)paralleler Fahrtanfragen. Dadurch kann die Fahrzeugflotte effizienter genutzt, die Zahl der zurückgelegten Fahrzeugkilometer_{total} (im Folgenden als Fzkm_{total} oder Fzkm bezeichnet) sowohl im Vergleich zum MIV als auch im Vergleich zu Ridehailing-Angeboten reduziert und insbesondere redundante Fahrten vermieden werden (vgl. Alonso-Mora et al., 2017, S. 462, 466). Eine erhöhte Fahrzeugauslastung und ein höherer Anteil geteilter Fahrten können den Energieverbrauch und die Emissionen pro Personenkilometer (im Folgenden als Pkm bezeichnet) verringern, sofern eine ausreichende Nachfrage und Bündelung von Fahrtanfragen erreicht wird (vgl. Shulika et al., 2024, S. 1–2; vgl. Zwick, Kuehnel & Axhausen, 2022, S. 9–10).

Über die Vermeidung redundanter Fahrten hinaus ergeben sich zusätzliche ökologische Potenziale durch die Substitution konventioneller Verkehrsangebote. Ridepooling kann sowohl Pkw- als auch Ridehailing-Fahrten ersetzen und zugleich wenig ausgelastete Linienverkehre ergänzen oder in nachfrageschwachen Zeiten teilweise substituieren. In solchen Einsatzkontexten kann die flexible, bedarfsgerechte Bedienung von Fahrtanfragen zu einer genaueren Anpassung des Angebots an reale Mobilitätsbedarfe beitragen und dadurch ineffiziente Fahrleistungen reduzieren (vgl. Zwick et al., 2021, S. 665–666).

Eine realistische Einordnung ist dabei unerlässlich. Gegenüber adäquat ausgelasteten Massenverkehrsmitteln weisen Carpooling- bzw. Ridesharing-Angebote in der Regel höhere spezifische Energieverbräuche sowie höhere Treibhausgas- und Schadstoffemissionen auf. Gegenüber einzeln besetzten Pkw können sie jedoch ökologische Vorteile erzielen, sofern durch Fahrtenbündelung Fahrzeugkilometer reduziert werden (vgl. Heinitz, 2020, S. 2–24). Das ökologische Potenzial von Ridepooling ist daher stets relativ zur substituierten Verkehrsform zu bewerten.

Darüber hinaus kann Ridepooling einen funktionalen Beitrag zur Stärkung des Umweltverbundes leisten. Als bedarfsorientierter Verkehr bietet es neue Erschließungsoptionen, insbesondere in Randlagen, schlecht angebundenen Räumen oder zu Zeiten mit eingeschränkter Bedienungsqualität im klassischen Linienverkehr. Durch flexible Tür-zu-Tür- oder haltestellennahe Verbindungen können Zugangswege, Wartezeiten und Umstiege reduziert und damit inter- sowie multimodale Wegekettten unterstützt werden (vgl. Knie

et al., 2020, S. 4–5, 14–15). Dies betrifft etwa Zubringerfunktionen zu Bahnhöfen, Regionalbuslinien oder anderen Verknüpfungspunkten des öffentlichen Verkehrs. Durch die Reduktion der Zugangszeit gegenüber konventionellen Haltestellenverkehren kann insbesondere die sogenannte „erste und letzte Meile“ effizienter überbrückt werden. In der Folge verbessern sich Tür-zu-Tür-Erreichbarkeit und Anschlussqualität, was niedrigschwellige Alternativen zum MIV schafft und die Attraktivität des Umweltverbunds erhöht.

Über die verkehrsbezogenen Effekte hinaus können auch raumbezogene Umweltpotenziale relevant werden. Sofern Ridepooling-Angebote langfristig private Pkw-Nutzung reduzieren und den Umweltverbund stärken, können sie mittelbar zur Verringerung des MIV-Anteils beitragen (vgl. Reichow & Ruhrort, 2024, S. 17–18; vgl. Hartz et al., 2024, S. 59–60). Weitergehende Effekte, etwa eine Entlastung des öffentlichen Straßenraums oder die Rückgewinnung urbaner Flächen, setzen jedoch eine tatsächliche Reduktion von Pkw-Besitz, Pkw-Nutzung und Stellplatzbedarf voraus.

Die dargestellten ökologischen Potenziale sind nicht systemimmanent, sondern resultieren aus spezifischen Ausgestaltungs- und Einsatzbedingungen. Unter ungünstigen Rahmenbedingungen kann Ridepooling zusätzliche Verkehrsleistungen induzieren oder Verlagerungen aus dem Umweltverbund bewirken. Die ökologischen Wirkungen sind daher stets kontextabhängig zu bewerten und eng mit den im folgenden Kapitel diskutierten Herausforderungen und Zielkonflikten verknüpft.

Wirtschaftliche Potenziale

Die Bereitstellung öffentlicher Linienverkehre in nachfrageschwachen Räumen und zu Randzeiten ist mit hohen betriebswirtschaftlichen Herausforderungen verbunden. Geringe Auslastungen, hohe Fixkosten und starre Fahrpläne führen dabei häufig zu einem ineffizienten Mitteleinsatz. Linienbedarfsverkehre bieten unter diesen Bedingungen theoretisch das Potenzial, durch kleinere Fahrzeuge, flexible Betriebsweisen und bedarfsgerechte Disposition den Flottenbedarf und die zurückgelegten Fahrzeugkilometer zu reduzieren. Diese Effizienzpotenziale setzen jedoch eine ausreichende Nachfrage und Bündelung kompatibler Fahrtenanfragen voraus (vgl. Zwick, Kuehnel & Axhausen, 2022, S. 8–10).

Darüber hinaus kann Ridepooling zu einem effizienteren Ressourceneinsatz beitragen. Durch die digitale Buchung und algorithmische Disposition von Fahrtenanfragen können Angebote dynamischer an räumliche und zeitliche Nachfragemuster angepasst werden (vgl. Zwick, Kuehnel & Axhausen, 2022, S. 8–10). Dadurch lassen sich Fahrten und Fahrzeugeinsatz potenziell bedarfsgerechter organisieren, was zu einer höheren Produktivität pro Fahrpersonalstunde beitragen kann. Bei steigender Nachfrage profitieren Betreibende zudem von Skaleneffekten, da sich mit wachsender Nutzungsdichte sowohl die Bündelungseffizienz als auch die Auslastung verbessern (vgl. Zwick et al., 2021, S. 665–666).

Das Ridepooling-Angebot *Bussi* in Essen zeigt exemplarisch, dass in den Nachtstunden höhere Kostendeckungsgrade als im konventionellen Linienverkehr erzielt werden können, unter anderem begünstigt durch die Anwendung eines Distanztarifs (vgl. Stadt Essen, 2024, S. 3). Für Wuppertal zeigen simulationsbasierte Befunde zum Dienst „Hol mich! App“, dass Ridepooling in nachfrageschwachen Abendstunden gering ausgelastete Lini-

enverkehre ergänzen oder teilweise ersetzen und dabei die Servicequalität gegenüber dem Busverkehr verbessern kann (vgl. Asatryan et al., 2023, S. 1–2, 19–20).

Auch auf volkswirtschaftlicher Ebene können Linienbedarfsverkehre Potenziale eröffnen, sofern sie Wege des MIV substituieren und in das öffentliche Verkehrsangebot integriert sind. Eine Verlagerung vom MIV zum öffentlichen Verkehr kann gesamtgesellschaftliche Kosten reduzieren, insbesondere durch geringere externe Kosten infolge von Stau, Parksuchverkehr, Luftschadstoffemissionen, Lärmbelastung und Unfällen sowie durch geringere Flächen- und Infrastrukturbedarfe (vgl. Peiseler et al., 2024, S. 4–5, 11–20, 26–29). Das volkswirtschaftliche Potenzial von Linienbedarfsverkehren ist daher wesentlich davon abhängig, ob sie tatsächlich MIV-Fahrten ersetzen und nicht zusätzlichen Verkehr induzieren.

Ein zusätzliches Effizienzpotenzial ergibt sich perspektivisch durch den Einsatz automatisierter oder autonomer Fahrzeuge. Insbesondere im Linienbedarfsverkehr, der sich häufig durch räumlich und zeitlich definierte Betriebsgrenzen, kurze Fahrtstrecken sowie den Einsatz in Gebieten und Zeitlagen mit geringerer Nachfrage auszeichnet (vgl. VDV, 2025b, S. 16–17), erscheint der Einsatz automatisierter Verkehre ökonomisch besonders sinnvoll. Die in vielen On-Demand-Angeboten geringe Flottengröße und der häufige Einsatz in ländlichen Räumen unterstreichen diese Einordnung (vgl. Foljanty, 2025, Abschn. „Project Characteristics“). Durch den Wegfall von Fahrpersonalkosten können die Betriebsausgaben erheblich reduziert und damit auch unter nachfrageschwachen Bedingungen wirtschaftlich tragfähige Angebotsmodelle ermöglicht werden (s. Kapitel 6.5). Darüber hinaus schafft die Automatisierung Spielräume für mehr Flexibilität und längere Betriebszeiten, die vor allem für Lückenschluss- oder Grundmobilitätsangebote von Bedeutung sind, ohne einen proportionalen Anstieg der Personalkosten zu verursachen.

Die skizzierten Potenziale verdeutlichen, in welchen Bereichen Ridepooling-Systeme zur Erreichung verkehrs-, umwelt- und gesellschaftspolitischer Zielstellungen beitragen können. In der praktischen Umsetzung treten jedoch vielfältige Herausforderungen auf, die eine vollständige Ausschöpfung dieser Potenziale einschränken oder verzögern können. Zur Strukturierung der folgenden Ausführungen wird erneut auf die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit Bezug genommen.

Soziale Herausforderungen

Trotz ihres Potenzials zur Förderung sozialer Teilhabe sind Ridepooling-Angebote mit Zugangshürden und Verteilungsproblemen konfrontiert. Besonders die digitale Erreichbarkeit stellt eine Barriere dar, da App-basierte Buchungsprozesse weniger technikaffine Bevölkerungsgruppen, etwa ältere Menschen oder Personen ohne Smartphone, von der Nutzung ausschließen oder deren Nutzung erschweren können (vgl. Kostorz et al., 2021, S. 2–3; vgl. Asatryan et al., 2023, S. 20). Auch sprachliche, kulturelle und kognitive Hürden erschweren den Prozess. Die Nutzung erfordert Medienkompetenz, räumliche Orientierung und Vertrauen in algorithmisch gesteuerte Systeme. Um diesen Herausforderungen zu begegnen, stellen die Betreibenden einiger Systeme ergänzend eine telefonische Buchungsmöglichkeit sowie Schulungen zur Nutzung der Buchungs-App bereit.

Zudem besteht ein Zielkonflikt hinsichtlich der räumlichen Angebotsverfügbarkeit. Ridepooling ist insbesondere in Räumen mit hoher Nachfragedichte effizient betreibbar, da sich mit zunehmender Anzahl räumlich und zeitlich kompatibler Fahrtanfragen die Bündelungseffizienz und Auslastung verbessern (vgl. Zwick et al., 2021, S. 665–666). Bei geringer Nachfragedichte sinkt demgegenüber die Wahrscheinlichkeit, räumlich und zeitlich kompatible Fahrtanfragen zu bündeln, da das Pooling-Potenzial neben der Nachfragehöhe auch vom Bediengebiet, der Angebotskonzentration und der Netzstruktur abhängt (vgl. Shulika et al., 2024, S. 1–2). In räumlich ausgedehnten Bediengebieten können zudem längere Zu- und Leerfahrten entstehen, wodurch der Anteil unbesetzter Fahrzeugkilometer steigt und die Wirtschaftlichkeit des Angebots beeinträchtigt werden kann. Damit entsteht ein Spannungsverhältnis zwischen betrieblicher Effizienz und einer flächendeckenden räumlichen Verfügbarkeit des Angebots. Während eine Konzentration auf nachfragestarke Räume wirtschaftlich vorteilhaft ist, kann sie gleichzeitig zu einer Unterversorgung peripherer Räume führen und bestehende Mobilitätsungleichheiten verstärken. Politische Steuerungsinstrumente wie räumlich und zeitlich differenzierte Angebotsvorgaben oder Subventionen können als mögliche Gegenmaßnahmen verstanden werden, setzen jedoch eine klare verkehrspolitische Zieldefinition voraus (vgl. Shulika et al., 2024, S. 11).

Auch die physische Zugänglichkeit kann eingeschränkt sein, da virtuelle Haltepunkte nicht zwangsläufig barrierefrei erreichbar sind und somit insbesondere für mobilitätseingeschränkte Personen eine Hürde darstellen können.

Wirtschaftliche Herausforderungen

In Bezug auf die Wirtschaftlichkeit ist zunächst zu berücksichtigen, dass Linienbedarfsverkehre in der Praxis derzeit häufig deutlich niedrigere Kostendeckungsgrade aufweisen als klassische Linienverkehre (vgl. Hartz et al., 2024, S. 65–66; vgl. Mehlert & Weißhand, 2023, S. 56–59). Dies ist in erster Linie auf den höheren Personalbedarf und die damit verbundenen Personalkosten zurückzuführen. Darüber hinaus kommen im Linienbedarfsverkehr typischerweise kleinere Fahrzeugtypen zum Einsatz, was zu geringeren Besetzungsquoten und einer reduzierten Transportkapazität im Vergleich zum klassischen Linienverkehr führt. Hinzu kommt, dass Linienbedarfsverkehre in der Regel ergänzend zum regulären Linienangebot eingesetzt werden und häufig Gebiete mit geringer Fahrgastnachfrage bzw. unzureichender Bedienqualität erschließen, während klassische Linienverkehre tendenziell hochfrequentierte Relationen bedienen (s. Kapitel 6.5). Ein rein betriebswirtschaftlicher Vergleich zwischen Linien- und Linienbedarfsverkehren greift daher zu kurz; vielmehr ist eine integrierte Betrachtung der Kostenstrukturen erforderlich, die neben direkten betrieblichen Effekten auch Wechselwirkungen im Gesamtsystem des öffentlichen Verkehrs sowie potenzielle Einsparungen im Linienbetrieb berücksichtigt (vgl. VDV, 2025b, S. 16). Eine zentrale Herausforderung stellt die fehlende Verstetigung von Finanzierungsstrukturen über die Laufzeit von Pilotprojekten hinaus dar. Zahlreiche On-Demand-Verkehre, wie beispielsweise *LOOPmünster* oder das *kommit-Shuttle*, wurden nach Auslaufen der jeweiligen Förderperioden eingestellt, da eine dauerhafte Finanzierung nicht gewährleistet werden konnte (Stadtwerke Münster, n. d., Abschn. „Über das Projekt LOOPmünster“).

Dies verweist auf einen grundlegenden Zielkonflikt zwischen betriebswirtschaftlicher Effizienz und dem öffentlichen Anspruch auf Daseinsvorsorge in nachfrageschwachen Räumen. Die daraus resultierende Instabilität des Angebots kann die potenzielle Substitutionswirkung dieser Verkehre erheblich begrenzen. Zwar deuten empirische Befunde darauf hin, dass Ridepooling-Angebote langfristig zur Reduktion der Pkw-Abhängigkeit beitragen können (vgl. Knie et al., 2020, S. 14–15; vgl. Hartz et al., 2024, S. 14, 77). Voraussetzung dafür ist jedoch, dass sie als verlässliche und dauerhaft verfügbare Mobilitätsoption wahrgenommen werden.

Ökologische Herausforderungen

Ridepooling-Diensten wird ein ökologisches Potenzial zugeschrieben, sofern Fahrtanfragen wirksam gebündelt und Pkw-Fahrten substituiert werden (vgl. Agora Verkehrswende, 2023, S. 13). Linienbedarfsverkehre werden in diesem Zusammenhang auch vom VDV als Bestandteil einer ÖPNV-Angebotsoffensive verstanden, die im Zusammenspiel mit Lenkungsmaßnahmen zum Umweltverbund zur Erreichung von Klimaschutzzielen im Verkehr beitragen soll (vgl. VDV, 2023, S. 3, 13). Ob dieses Potenzial tatsächlich erschlossen wird, hängt jedoch maßgeblich von den konkreten Einsatzbedingungen ab. Unter realen Einsatzbedingungen ergeben sich vielfältige ökologische Herausforderungen. Insbesondere in nachfrageschwachen Räumen oder während verkehrsarmer Tageszeiten ist eine effiziente Bündelung von Fahrtanfragen häufig nur eingeschränkt möglich, da das Pooling-Potenzial wesentlich von Nachfragehöhe, Bediengebiet, Angebotskonzentration und Netzstruktur abhängt (vgl. Shulika et al., 2024, S. 1–2). In der Folge können niedrige Besetzungsquoten und eine ineffiziente Nutzung der Fahrzeugkapazitäten entstehen (vgl. Zwick et al., 2021, S. 665–666). Zusätzlich können erhöhte Leerkilometeranteile die ökologische Wirkung realbetriebener Angebote mindern. Das ökologische Einsparpotenzial hängt damit wesentlich von Nachfragebündelung, Angebotsgestaltung, Besetzungsgrad, Leerkilometeranteil und der tatsächlichen Substitution motorisierter Individualverkehrswege ab.

Aus ökologischer Perspektive sind zudem potenzielle Kannibalisierungseffekte gegenüber dem Umweltverbund kritisch zu bewerten. Im vorliegenden Zusammenhang bezeichnet der Begriff die Verlagerung von Wegen auf Ridepooling-Angebote, die ansonsten mit umweltverträglicheren Verkehrsmitteln wie dem liniengebundenen öffentlichen Nahverkehr, dem Fahrrad oder zu Fuß zurückgelegt worden wären. Dass Ridepooling-Angebote auch Nachfrage aus dem bestehenden ÖPNV übernehmen können, zeigen empirische Befunde zu realbetriebenen Diensten, bei denen ein erheblicher Teil der Nutzenden ohne das Angebot Bus oder Bahn genutzt hätte (vgl. Knie et al., 2020, S. 11; vgl. Hartz et al., 2024, S. 59–61). Ohne Nutzungsaufpreise und ohne gezielte Angebotssteuerung, etwa durch eine Parallelverkehrsfunktion (s. Kapitel 2.3), besteht daher das Risiko, dass Verlagerungen aus ökologisch vorteilhaften Verkehrsmitteln die intendierte Umweltwirkung abschwächen oder sogar ins Gegenteil verkehren (vgl. Hartz et al., 2024, S. 77–78; vgl. Wilkes et al., 2021, S. 6–9).

Als in den öffentlichen Verkehr integriertes Angebot wird Ridepooling als ergänzender Baustein eines differenzierten ÖPNV-Systems eingeordnet, das Linienverkehr, Bedarfsver-

kehr und weitere Mobilitätsangebote multimodal verknüpft (vgl. VDV, 2025b, S. 9, 13). Ein besonderer Beitrag wird dabei in der inter- und multimodalen Verknüpfung gesehen, insbesondere im Sinne einer flexiblen ersten und letzten Meile (vgl. Agora Verkehrswende, 2023, S. 43). In der praktischen Nutzung zeigt sich jedoch häufig ein anderes Bild. Empirische Auswertungen realer Linienbedarfsverkehre wie *LOOPmünster* oder *sprinti* deuten darauf hin, dass ein Großteil der Fahrten als monomodale Direktverkehre durchgeführt wird (vgl. Hartz et al., 2024, S. 12; vgl. Reichow & Ruhrort, 2024, S. 21). Diese Nutzungsmuster schränken die Systemwirkung ein und stehen dem Ziel entgegen, Ridepooling als integrativen Bestandteil eines nachhaltigen, vernetzten Mobilitätssystems zu etablieren. Relevante Einsparungen bei den Fzkm durch Ridepooling-Angebote setzen eine ausreichende Fahrgastnachfrage voraus (vgl. Chen et al., 2017, S. 6–7; vgl. Zwick et al., 2021, S. 665–666; vgl. Engelhardt et al., 2019, S. 2992–2997). Bei geringer Auslastung steigt das Risiko ineffizienter Betriebsabläufe, da sowohl die Zahl möglicher Bündelungsvorgänge sinkt als auch Leerkilometer und durchschnittliche Zuwegelängen zunehmen, was den Energieverbrauch pro beförderter Person deutlich erhöht (vgl. Zwick, Kuehnel & Axhausen, 2022, S. 9–10).

Ein weiteres Risiko besteht in der Generierung induzierter Verkehre beziehungsweise in Rebound-Effekten. Durch einen erleichterten Zugang, geringere Nutzungskosten oder wahrgenommene Komfortvorteile können zusätzliche Fahrten entstehen, längere Wege zurückgelegt oder Verlagerungen aus dem Umweltverbund ausgelöst werden (vgl. Koska, 2021, S. 12). Solche Effekte erhöhen das Verkehrsaufkommen und können die durch Bündelung angestrebten Einsparungen an Emissionen und Fzkm kompensieren oder sogar übersteigen (vgl. Koska, 2021, S. 12).

Die tatsächliche ökologische Wirkung von Ridepooling-Diensten ist in der betrieblichen Realität häufig nicht eindeutig belegt. Während theoretische Modelle teils erhebliche Effizienzpotenziale identifizieren, zeigen praktische Umsetzungen häufig begrenzte Resultate. Für *sprinti* weisen Reichow und Ruhrort zwar darauf hin, dass ein erheblicher Teil der Fahrten andernfalls mit dem Auto unternommen worden wäre; zugleich zeigen die Befragungsergebnisse jedoch auch, dass ein relevanter Anteil der Fahrten ohne das Angebot nicht stattgefunden hätte und der Dienst häufig für Direktfahrten innerhalb des Bediengebiets genutzt wird (vgl. Reichow & Ruhrort, 2024, S. 21). Auch simulationsbasierte Analysen zeigen, dass Ridepooling nicht automatisch zu verkehrlichen Entlastungseffekten führt, sondern dass Auslastung, Flottengröße, zusätzliche Fahrzeugkilometer und Verlagerungen zwischen Verkehrsmitteln die Gesamtwirkung maßgeblich beeinflussen (vgl. Wilkes et al., 2021, S. 4–8). Dies unterstreicht die Kontextabhängigkeit von Effizienz und Umweltwirkung sowie die Bedeutung einer strategischen Einbettung in bestehende Verkehrsstrukturen.

Zielkonflikt Nutzerorientierung und Effizienz

Der im öffentlichen Verkehr grundsätzlich bestehende Zielkonflikt zwischen Nutzerfreundlichkeit und betriebswirtschaftlicher Tragfähigkeit tritt bei Linienbedarfsverkehren besonders deutlich hervor (s. Kapitel 2.3). Aus Perspektive der Fahrgäste sind kurze War-

tezeiten, geringe Umwege sowie eine verlässliche und direkte Bedienung von zentraler Bedeutung. Demgegenüber erfordert ein wirtschaftlich effizienter Betrieb eine möglichst hohe Fahrzeugauslastung sowie eine Reduktion von Fahrzeug- und Leerkilometern. Diese Anforderungen lassen sich jedoch nur bedingt miteinander vereinbaren: Eine starke Nutzerorientierung bzw. ein hohes Service-Level erschwert häufig die Bündelung kompatibler Fahrtwünsche, was zu einer geringeren Auslastung und einem erhöhten Ressourcenverbrauch führt. Umgekehrt geht eine konsequente Ausrichtung auf betriebliche Effizienz oftmals mit längeren Wartezeiten, Umwegen und Komforteinbußen einher. Dies führt zu einem geringen Service-Level und kann sich nachteilig auf die Fahrgastnachfrage auswirken, die wiederum für die betriebliche Leistungsfähigkeit erforderlich ist.

Niedrige Auslastungsgrade beeinflussen darüber hinaus zentrale Systemkennzahlen unmittelbar. Der Anteil an Leerkilometern steigt und es werden mehr Fzkm pro befördertem Pkm verursacht. Dies reduziert nicht nur die betriebswirtschaftliche Effizienz, sondern mindert auch die ökologischen Wirkungen des Angebots. Die Qualität der algorithmischen Fahrzeugbündelung, also die Fähigkeit, Fahrtwünsche räumlich und zeitlich effizient zu bündeln, spielt hierbei eine zentrale Rolle. Sie hängt wesentlich von der räumlichen Verteilung und zeitlichen Konzentration der Nachfrage ab. In dünn besiedelten oder nachfrageschwachen Gebieten sind die Voraussetzungen für effiziente Bündelung eingeschränkt, wodurch sich der beschriebene Zielkonflikt weiter verschärft.

In der Folge beeinflusst die konkrete Ausgestaltung des Spannungsverhältnisses zwischen Nutzerorientierung und Effizienz die sozialen, ökologischen und wirtschaftlichen Wirkungen von Linienbedarfsverkehren in erheblichem Maße. Eine ausgewogene Gestaltung des Angebots, das beide Perspektiven berücksichtigt, ist daher Grundvoraussetzung für eine nachhaltige Wirkung solcher Angebote. Eine wissenschaftliche Einordnung dieses Spannungsverhältnisses erfolgt im nächsten Kapitel.

Zusammenfassung

Das Kapitel 2.5 hat die Potenziale, Herausforderungen und systemimmanenten Zielkonflikte von Ridepooling entlang der Dimensionen sozialer, ökologischer und ökonomischer Nachhaltigkeit dargestellt. Sozial bietet Ridepooling die Chance, Angebotslücken im öffentlichen Verkehr zu schließen, die Feinerschließung zu verbessern und die Teilhabe unterversorgter Gruppen zu stärken. Ökologische Potenziale ergeben sich aus der Bündelung paralleler Fahrtanfragen, wodurch Emissionen pro Pkm reduziert und inter- sowie multimodale Wegeketten gefördert werden können. Wirtschaftlich eröffnet Ridepooling durch flexible Betriebsformen, kleinere Fahrzeuge und dynamische Disposition Effizienzgewinne und kann langfristig auch volkswirtschaftliche Kosten senken, wobei perspektivisch insbesondere automatisierte Fahrzeuge weitere Potenziale versprechen.

Demgegenüber stehen jedoch erhebliche Herausforderungen. Sozial zeigen sich Zugangshürden durch digitale Abhängigkeit, eingeschränkte Barrierefreiheit sowie räumliche Zielkonflikte zwischen zentralen und peripheren Räumen. Wirtschaftlich erschweren geringe Kostendeckungsgrade, hoher Personalbedarf und fehlende Verstetigung der Finanzierung eine nachhaltige Implementierung. Ökologisch limitieren geringe Nachfrage, niedrige Aus-

lastung, Kannibalisierungseffekte gegenüber dem Umweltverbund und induzierte Verkehre die tatsächlichen Einsparpotenziale.

Zentral ist schließlich der systemimmanente Zielkonflikt zwischen Nutzerorientierung und betrieblicher Effizienz. Kurze Wartezeiten, geringe Umwege und hoher Komfort reduzieren die Bündelungseffizienz, während eine starke Ausrichtung auf betriebliche Effizienz mit Komforteinbußen und Nachfrageverlusten verbunden ist. Dieses Spannungsfeld prägt die sozialen, ökologischen und wirtschaftlichen Wirkungen von Ridepooling-Angeboten maßgeblich und erfordert eine ausgewogene Gestaltung, um einen nachhaltigen Beitrag zur Verkehrswende leisten zu können.

Kapitel 3

Forschungsstand und vergleichbare Ansätze

In den letzten Jahren ist die Anzahl an Ridepooling-Angeboten weltweit stark gestiegen. Seit 2012 wurden über 2.000 On-Demand-Ridepooling-Verkehre gestartet, wovon Ende 2024 noch mehr als 1.300 aktiv waren. Das Jahr 2024 markierte mit rund 400 neuen Projekten den bisherigen Höchststand (vgl. Foljanty, 2025, Abschn. „New Record Year, New Drivers of Growth“). Auch in Deutschland hat seit der Novellierung des Personenbeförderungsgesetzes ein deutlicher Zuwachs entsprechender Verkehre stattgefunden. Im Jahr 2022 waren bundesweit rund 80 Ridepooling-Dienste aktiv (vgl. VDV, 2022, Abschn. „Branchenumfrage“). Diese Marktentwicklung hat das wissenschaftliche und politische Interesse an der Bewertung entsprechender Mobilitätsformen weiter verstärkt.

Das vorliegende Kapitel gibt einen systematischen Überblick über den aktuellen Stand der Forschung zu Ridepooling-Systemen. Es orientiert sich dabei an den im Kapitel 2.5: *Potenziale, Herausforderungen und systemimmanente Zielkonflikte* benannten ökologisch bzw. betrieblich relevanten Handlungsfeldern. Berücksichtigt werden sowohl empirische Untersuchungen realer Anwendungen als auch simulations- bzw. modellbasierte und theoretische wissenschaftliche Beiträge. Ziel ist es, ein fundiertes Verständnis der bisherigen Forschungslage zu vermitteln und bestehende Forschungslücken aufzuzeigen, die für eine ökologische Bewertung von Ridepooling-Systemen von Bedeutung sind. Die Literaturanalyse erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, berücksichtigt jedoch die bis März 2025 erschienene einschlägige Literatur.

3.1 Überblick über bisherige Forschungsansätze

Frühe Arbeiten von Agatz et al. (2012) systematisieren die grundlegenden Optimierungsprobleme des dynamischen Ridesharings. Dynamisches Ridesharing wird dabei als ein System verstanden, in dem Fahrende und Mitfahrende mit ähnlichen Routen und Zeitplänen kurzfristig oder während der Fahrt automatisiert zusammengeführt werden. Eine erfolgreiche Vermittlung setzt nach den Autor:innen leistungsfähige Optimierungsverfahren voraus, die geeignete Fahrtkombinationen in Echtzeit identifizieren können. Als zentrale Herausforderungen benennen sie unter anderem die schnelle Lösung großer Matching-Probleme, die Berücksichtigung nutzerseitiger Präferenzen und die Entwicklung geeigneter Anreizmechanismen zum Aufbau einer ausreichenden kritischen Masse potenzieller Fahrtanfragen (vgl. Agatz et al., 2012, S. 295–296, 302–303). Es wird deutlich, dass dynamisches Ridesharing nicht allein vom Algorithmus, sondern auch von ausreichender Nachfrage, geeigneten Systembedingungen und der Akzeptanz der Nutzenden abhängt.

Ein verwandter Ansatz wurde von Alonso-Mora et al. (2017) verfolgt, die sich auf die dynamische Bündelung in ridehailing-basierten Flottensystemen konzentrierten. Auf Grundlage von drei Millionen öffentlich zugänglichen Taxi-Fahrtdaten aus New York City entwickelten sie einen Bündelungsalgorithmus und wendeten diesen in einer simulationsbasierten Analyse auf Fahrten im Untersuchungsgebiet an. Auf Basis der Ridehailing-Daten konnte dabei simulativ festgestellt werden, dass von den rund 14.000 Taxis in New York bereits 2.000 Zehnsitzer-Busse oder 3.000 Fahrzeuge mit jeweils vier Sitzplätzen ausreichen würden, um 98 % der Fahrgastnachfrage zu bedienen. Dabei würden eine durchschnittliche Wartezeit von 2,8 Minuten sowie eine Fahrtverzögerung von 3,5 Minuten auftreten, wodurch ein angemessenes Servicelevel, trotz geteilter Fahrten, beibehalten werden könnte (vgl. Alonso-Mora et al., 2017, S. 462, 466).

Bischoff et al. (2017) nutzten ebenfalls ein Taxi- bzw. Ridehailing Datenset, um das Potenzial dynamischer Fahrtenbündelungen zu untersuchen. In einer simulationsbasierten Analyse für Berlin zeigte sich, dass bei einem vollständigen Ersatz der Taxiflotte durch geteilte Fahrzeuge mit einer Kapazität von zwei bis vier Fahrgästen die $Fzkm_{total}$ um 15 bis 20 % reduziert werden können, während die durchschnittliche Reisezeit pro Person lediglich um etwa drei Minuten steigt (vgl. Bischoff et al., 2017, S. 1, S. 4–5). Dadurch können insbesondere in Zeiten hoher Verkehrsnachfrage die Auswirkungen des Verkehrs auf das Straßennetz sowie auf die Stadt insgesamt reduziert werden. Bischoff et al. (2017) merken jedoch auch an, dass geteilte Fahrten in Gebieten mit hoher (Taxi-) Fahrgastnachfrage effizienter eingesetzt werden können und Anbieter sich entsprechend auf diese Räume konzentrieren dürften tendenziell. Zudem weisen sie darauf hin, dass ein gewisser Anteil an Leerfahrten entsteht, was die Bereitschaft von Taxifahrenden zur Durchführung geteilter Fahrten verringern könnte (vgl. Bischoff et al., 2017, S. 5).

Chen et al. (2017) analysierten auf Basis realer Ridesharing-Daten aus drei US-amerikanischen Städten das Potenzial dynamischer Fahrtenbündelung. Ihre simulationsbasierte Untersuchung zeigt, dass nahezu 50 % aller Fahrtenanfragen gebündelt werden können. Der Einsatz dynamischen Ridepoolings kann dabei zu einer Reduktion des Kraftstoffverbrauchs um rund 15 % sowie zu einer Verringerung der Fahrzeuganzahl um etwa 30 % führen. Dies eröffnet nicht nur betriebliche Vorteile für Dienste und Fahrgäste, sondern kann auch gesellschaftlich relevante Effekte wie eine Entlastung des Straßenverkehrs nach sich ziehen (vgl. Chen et al., 2017, S. 6–7).

Zwick et al. (2021) untersuchten auf Basis agentenbasierter Simulationen mit MITO und MATSim die Effizienz eines autonomen Ridepooling-Systems in sechs Kommunen der Metropolregion München. Dabei wurden zwei Szenarien mit unterschiedlichen Substitutionsgraden des MIV simuliert. Die Ergebnisse zeigen einen logarithmischen Zusammenhang zwischen Nachfragedichte und der Systemeffizienz (η), die als Indikator für die Bündelungsintensität des Angebots verstanden werden kann (s. Kapitel 4.3), sowie der mittleren Fahrzeugauslastung. Eine verkehrlich vorteilhafte Wirkung gegenüber dem MIV wird gemäß FGSV (vgl. 2021, S. 31–32) erst ab einem η -Wert von 1,36 erreicht, was einer Minstdichte von etwa 1.000 Anfragen pro km^2 und Tag entspricht (vgl. Zwick et al., 2021, S. 665–666). Dieser Wert liegt in der Größenordnung des durchschnittlichen

Pkw-Besetzungsgrades, der auf Grundlage der *Mobilität in Deutschland* näherungsweise aus den ausgewiesenen MIV-Fahrer- und MIV-Mitfahrer-Personenkilometern abgeleitet werden kann (vgl. Nobis & Kuhnimhof, 2018, S. 46). In nachfrageschwachen Räumen ist daher mit geringerer Effizienz zu rechnen; dennoch können solche Systeme auch dort einen gesellschaftlichen Mehrwert leisten (vgl. Zwick et al., 2021, S. 665–666).

Eine Studie des OECD/ITF (2017) zeigt, dass eine flächendeckende Einführung von Shared-Mobility-Diensten in der Metropolregion Lissabon zu erheblichen Effekten führen kann: Fzkm in der Hauptverkehrszeit sinken um bis zu 55 %, CO₂-Emissionen um bis zu 62 %, der Parkraumbedarf um 95 % (vgl. International Transport Forum [ITF], 2017, S. 7). Grundlage der Ergebnisse ist eine simulationsbasierte Analyse auf Basis synthetischer Bevölkerungsdaten und detaillierter Mobilitätsinformationen. Shared Taxis und Taxi-Busse dienen dabei als Zubringer zu Hochleistungssystemen wie Metro und Regionalbahn. Ein stufenweiser Einführungspfad mit Fokus auf frühe Nutzergruppen wird empfohlen, um gesellschaftliche Akzeptanz zu fördern und Synergien mit dem bestehenden ÖPNV zu schaffen (vgl. ITF, 2017, S. 7).

Engelhardt et al. (2019) analysieren in einer agentenbasierten Simulation ein autonomes On-Demand-Ridepooling-System für München, das ein wartezeitsensitives Kundenverhalten abbildet. Dabei werden Szenarien mit verschiedenen Adoptionsraten (1–15 %) simuliert. Die Ergebnisse zeigen, dass bei niedriger Nachfrage zusätzliche Leerfahrten zu einem Anstieg der Gesamtfahrleistung führen. Erst ab einer Adoptionsrate von etwa 5 % überwiegen die Effizienzgewinne durch Bündelung. Besonders deutlich fällt die Fzkm-Reduktion auf stark belasteten Hauptverkehrsstraßen aus, während zusätzliche Leerfahrten auf Nebenstraßen konzentriert bleiben (vgl. Engelhardt et al., 2019, S. 2992–2997).

Simulationsbasierte Studien in städtischen Räumen weisen Ridepooling-Systemen insbesondere bei hoher Nachfragedichte ökologische Potenziale und verkehrliche Entlastungen zu. Geteilte Flotten können demnach Emissionen, Fahrleistung und Flächenbedarf reduzieren. Für ländliche Räume ist die Studienlage zu den ökologischen Auswirkungen hingegen deutlich begrenzter. Eine der wenigen Arbeiten, die sich explizit mit einem ländlich-urbanen Kontext befassen, stammt von Schlüter et al. (2021). In der Studie wurde der Einsatz autonomer Demand-Responsive-Transport-Systeme zur Verbindung ländlicher Räume mit dem urbanen Zentrum Bremerhaven untersucht (Schlüter et al., 2021, S. 1–2). Die MATSim-basierte Simulation zeigt, dass ein vollständiger, theoretischer Ersatz des MIV durch autonome On-Demand-Verkehre die Fahrzeugkilometer in den betrachteten Szenarien um etwa ein Drittel reduzieren kann. Zugleich verringert sich die erforderliche Fahrzeugflotte gegenüber dem MIV-Szenario um rund 85 bis 86 % (Schlüter et al., 2021, S. 8–10). Die Kostenanalyse deutet darauf hin, dass die höheren Umweltkosten je Fahrzeugkilometer durch die deutlich geringere Gesamtfahrleistung mehr als ausgeglichen werden können. Unter der Annahme vollständig autonomer Fahrzeuge ergeben sich zudem geringere betriebliche Gesamtkosten als im MIV-Basiszenario (Schlüter et al., 2021, S. 10).

Obwohl die zuvor dargestellten Studien wertvolle Erkenntnisse zur Wirkung von Ridepooling-Diensten liefern, beruhen sie zumeist auf simulationsgestützten Modellierungen.

Demgegenüber mangelt es bislang an empirisch fundierten Untersuchungen zur Effizienzbewertung auf Basis von Realbetriebsdaten. In diesem Zusammenhang ist der methodische Zugang von Kagerbauer et al. (2021) hervorzuheben, der reale Nutzungsdaten mit einem agentenbasierten Simulationsmodell kombiniert. Durch die Verknüpfung von Empirie und Simulation lassen sich sowohl beobachtbare Verhaltensmuster als auch hypothetische Szenarien analysieren, wie etwa hinsichtlich intermodaler Wegekettens, Pooling-Intensitäten oder regulatorischer Eingriffe im MIV. Im Unterschied zu früheren Arbeiten wird zudem ein dynamisches Nachfrageverhalten berücksichtigt. Untersucht wurden verschiedene Szenarien (SimA bis SimE) mit variierender Flottengröße, unterschiedlichem Betriebsgebiet und regulatorischen Maßnahmen im MIV. Die Ergebnisse zeigen, dass ein erweitertes MOIA-Angebot mit einer erheblichen Nachfragesteigerung einhergeht: Die wöchentlichen Fahrten stiegen von 43.500 (SimA) auf 1,2 Mio. (SimE), die Besetzungsquote von 1,33 (SimA) auf 1,83 (SimE) Personen pro Fzkm. Der Anteil geteilter Fahrten erhöhte sich von 68,8 % (SimA) auf 86,3 % (SimE), was mit längeren Fahrtwegen und Umwegen einherging und auf intensiveres Pooling hinweist. Laut den Autor*innen lassen die Simulationsergebnisse Rückschlüsse auf Verkehrsverlagerungen zugunsten des öffentlichen Verkehrs und eine zunehmende Intermodalität zu. So sank der Anteil monomodaler Pkw-Nutzender von 10,0 % (SimA) auf 4,9 % (SimE). Dies wird als Indikator für eine stärkere multimodale Ausrichtung und eine abnehmende Pkw-Abhängigkeit interpretiert, insbesondere in Zeiten und Räumen mit eingeschränktem ÖPNV-Angebot. Zudem könne der elektrische und „CO₂-neutrale Betrieb“ (ohne Berücksichtigung der Vorketten) Emissionen verringern, während eine höhere Besetzungsquote zu Effizienzgewinnen führen könne (vgl. Kagerbauer et al., 2021, S. 66–70).

Allerdings ist die Übertragbarkeit der Ergebnisse begrenzt, da das Modell auf das spezifische Betriebskonzept von MOIA in Hamburg kalibriert wurde. Die Resultate sind somit stark vom urbanen Kontext mit dichter Besiedelung, großer Flotte, Distanztarif und gut ausgebautem ÖPNV geprägt. Die Autor*innen betonen, dass die identifizierten Potenziale vor allem in einer integrierten Strategie liegen, die Ridepooling-Angebote mit dem Ausbau von öffentlichem Verkehr und Radinfrastruktur sowie mit flankierenden Maßnahmen zur Pkw-Regulierung verbindet.

Einen ähnlichen Ansatz wählt Asatryan et al. (vgl. 2023, S. 1–2, 14–20) in einer realdatenbasierten, simulationsgestützten Fallstudie für Wuppertal. Auf Grundlage realer Bus- und Ridepooling-Daten wurde die Nachfrage für die späten Abendstunden modelliert und mit einem Rolling-Horizon-Algorithmus bedient. Die Ergebnisse zeigen ein hohes Verbesserungspotenzial gegenüber dem Linienbusbetrieb: Die durchschnittliche Beförderungszeit kann um rund 50 % reduziert werden. Für die vollständige Bedienung aller simulierten Anfragen wären abhängig vom Wochentag vier bis sieben Fahrzeuge erforderlich, verglichen mit zehn gleichzeitig verkehrenden Bussen. Während direkte Aussagen zu verkehrlichen oder ökologischen Wirkungen, etwa Fzkm oder Emissionen, nicht getroffen werden, lässt die geringere Fahrzeuganzahl auf mögliche betriebliche Effizienzpotenziale schließen. Insbesondere deutet die deutliche Reduktion der Warte- und Beförderungszeiten auf eine mögliche Attraktivitätssteigerung des öffentlichen Verkehrs in verkehrsschwachen Zeiten

hin. Die Ergebnisse sind jedoch nicht evidenzbasiert im Sinne einer realen Implementation, sondern beruhen auf simulationsgestützten Annahmen.

Eine der wenigen empirisch fundierten Untersuchungen realbetriebener Ridepooling-Angebote stammt von Knie et al. (2020). Die Autor*innen kombinierten Buchungsdaten von *CleverShuttle* mit Nutzerbefragungen in Berlin, München, Leipzig und Dresden. Die Auswertung zeigt, dass bei rund 40 bis 50 % der Fahrten weitere Fahrgäste hinzugebucht und somit mehrere Fahrtwünsche gebündelt wurden. Zugleich entfiel ein erheblicher Anteil der Fahrleistung auf Anfahrts- und Rückkehrwege ohne Fahrgäste. Ergänzend ergab die Befragung, dass über 50 % der Nutzer*innen ohne das Angebot Bus oder Bahn gewählt hätten, während rund 10 % den privaten Pkw genutzt hätten. Etwa 45 % der Befragten mit Pkw im Haushalt konnten sich perspektivisch vorstellen, dass ein entsprechendes Angebot den eigenen Pkw ersetzen könnte. Systematische Nachweise tatsächlicher Modal-Shift-Effekte oder Veränderungen der Pkw-Besitzrate wurden im Rahmen der Studie jedoch nicht erbracht. Die Ergebnisse deuten dennoch auf eine überwiegend multimodale Nutzergruppe hin. Die Autor*innen kommen zu dem Schluss, dass Ridepooling-Dienste insbesondere in den Abend- und Nachtstunden eine sinnvolle Ergänzung zum öffentlichen Nahverkehr darstellen, eine komfortable Tür-zu-Tür-Option bieten und damit die Attraktivität automobilunabhängiger Mobilität erhöhen können (vgl. Knie et al., 2020, S. 3–5, 11–15).

Eine weitere realdatenbasierte Analyse von Ridepooling-Verkehren wurde von Reichow und Ruhrort (2024) im Rahmen der Begleitforschung zum regionalen On-Demand-Dienst *sprinti* im Raum Hannover durchgeführt. Ziel des Angebots ist es, insbesondere in suburbanen und ländlich geprägten Räumen eine feinerschließende Ergänzung zum bestehenden öffentlichen Nahverkehr bereitzustellen. Die Evaluation folgte einem Mixed-Methods-Ansatz, der sowohl quantitative Online-Befragungen als auch qualitative Fokusgruppendifkussionen umfasste. Bislang wurden ausschließlich die Ergebnisse der Fahrgastbefragungen veröffentlicht; eine Auswertung der Betriebsdaten steht noch aus. Den vorliegenden Ergebnissen zufolge ersetzt ein erheblicher Teil der *sprinti*-Fahrten den privaten Pkw: Rund 40 % der Befragten hätten ihre Fahrt andernfalls mit dem Auto (davon 28 % als Fahrende und 12 % als Mitfahrende) durchgeführt. Gleichzeitig gaben 29 % an, dass sie die Fahrt ohne das Angebot nicht unternommen hätten, was als Hinweis auf induzierten Verkehr interpretiert werden kann. Die Autor*innen folgern daraus, dass *sprinti* als attraktive Mobilitätsalternative zum privaten Pkw wahrgenommen wird (vgl. Reichow & Ruhrort, 2024, S. 20–21).

Inwiefern *sprinti* Fahrten mit dem Linienbus ersetzt, bleibt in der Studie jedoch unklar. Rückschlüsse auf eine mögliche Kannibalisierung innerhalb des Umweltverbunds lassen sich lediglich eingeschränkt ziehen: 12 % der Befragten hätten den Weg ohne *sprinti* zu Fuß zurückgelegt. Neun Prozent hätten das Fahrrad genutzt. Die Ergebnisse der Befragung zeigen, dass *sprinti* auch für intermodale Wegezwecke genutzt wird: 30 % der Nutzerinnen verwenden den Dienst regelmäßig für Fahrten zu oder von Bahnhöfen (weitere 42 % gelegentlich), 14 % für Wege zu ÖPNV-Haltestellen (weitere 31 % gelegentlich). Der Großteil der befragten Personen (60 %) nutzt *sprinti* hauptsächlich für Direktverbindungen inner-

halb des Betriebsgebiets (weitere 29 % gelegentlich), was auf eine parallele Funktion als eigenständiges Verkehrsangebot hinweist. Laut den Autor*innen deutet das beobachtbare Nutzungsverhalten darauf hin, dass *sprinti* sowohl als integrativer Bestandteil des öffentlichen Nahverkehrs als auch als eigenständige Mobilitätsoption wahrgenommen wird, insbesondere in Räumen mit begrenztem konventionellem ÖPNV-Angebot (vgl. Reichow & Ruhrort, 2024, S. 12). Dass der Dienst dabei potenziell auch Verkehr induziert und Kannibalisierungseffekte innerhalb des Umweltverbunds auftreten könnten, wird in der Studie nicht thematisiert. Insbesondere der Umstand, dass keine belastbaren Aussagen zur Substitution von Busfahrten getroffen werden, erscheint mit Blick auf die verkehrspolitische Zielsetzung des Angebots erklärungsbedürftig.

Im suburbanen und ländlichen Kontext wurde zudem das On-Demand-Angebot *LOOPmünster* im Jahr 2024 von Hartz et al. im Rahmen einer projektbegleitenden Evaluation analysiert. Der Untersuchungsraum im südlichen Münster weist sowohl ländlich geprägte als auch urbane Strukturen auf. Die Untersuchung folgte einem Mixed-Methods-Ansatz, bestehend aus standardisierten Fahrgastbefragungen, der Auswertung von Betriebsdaten, georeferenzierten Analysen sowie qualitativen Interviews mit relevanten Akteur*innen. Die Ergebnisse zeichnen ein ambivalentes Bild: *LOOPmünster* wird von vielen Nutzenden positiv bewertet, insbesondere aufgrund der schnellen, direkten Wegebeziehungen sowie der verbesserten Erreichbarkeit innerhalb und zwischen Stadtteilen. 69 % der Befragten gaben an, dass ihre Abhängigkeit vom privaten Pkw durch das Angebot abnehme, 75 % sahen im Wegfall des Services eine Einschränkung ihrer Mobilität. Gleichzeitig wurden jedoch Einschränkungen bei der Verfügbarkeit des Angebots kritisch angemerkt. Obwohl *LOOPmünster* als Lückenschlussangebot im öffentlichen Verkehr konzipiert wurde, zeigt die Nutzungspraxis ein abweichendes Muster: Zwei Drittel der Nutzer*innen verwenden den Service monomodal, also ohne Umstieg auf andere Verkehrsmittel. Dies verweist auf einen hohen Anteil an Direktverbindungen innerhalb des Betriebsgebiets und deutet auf die vorwiegende Nutzung des Dienstes als eigenständiges Verkehrsangebot hin. Allerdings lassen sich auch Hinweise auf eine kombinierte Nutzung mit anderen öffentlichen Verkehrsangeboten feststellen: Laut Fahrgastbefragung und georeferenzierter Analysen werden sieben bis neun Prozent der Wege in Kombination mit einer Bahn- oder Zugfahrt und etwa 15 bis 20 % mit einer Busfahrt zurückgelegt. Im Rahmen der Befragungen gaben 33 % der Befragten an, *LOOPmünster* regelmäßig mit einem anderen Verkehrsmittel zu kombinieren. Die ursprünglich angestrebte Lückenschlussfunktion ist damit nur teilweise realisiert, was unter anderem auf eine bislang unzureichende Anschlusssicherung schließen lässt. Gleichzeitig weisen die Ergebnisse auf unerwünschte Nebeneffekte hin: 62 % der Befragten hätten den jeweiligen Weg ohne *LOOPmünster* mit dem Bus, dem Fahrrad oder zu Fuß zurückgelegt, was auf Kannibalisierungseffekte innerhalb des Umweltverbunds hinweist. Zusätzlich wären 7 % aller Fahrten ohne *LOOPmünster* nicht unternommen worden. Dies lässt sich einerseits als Mobilitätsgewinn interpretieren, weist andererseits jedoch auf eine Zunahme der Verkehrsleistung hin. Hinweise auf eine Konkurrenz zum lokalen Taxigewerbe wurden sowohl in Nutzendumfragen als auch in Interviews thematisiert, konnten jedoch nicht quantifiziert werden. Der Leerkilometer-Anteil

schwankte im Zuge verschiedener Projektphasen zwischen 44 % und 51 %. Trotz dieser gemischten Wirkungen wird die Erschließungsleistung des Systems deutlich: Der Einzugsbereich von *LOOPmünster* (300 m um virtuelle und physische Haltestellen) deckte 99 % der im Versorgungsgebiet lebenden Bevölkerung ab. Der Einzugsbereich von *LOOPmünster* deckte unter Berücksichtigung physischer und virtueller Haltestellen rund 99 % der im Bediengebiet lebenden Bevölkerung ab, während der entsprechende Anteil beim regulären Busverkehr bei rund 87 % lag (vgl. Hartz et al., 2024, S. 105–106). Trotz eines vergleichsweise hohen Fahrgastaufkommens von durchschnittlich 506 Fahrgästen täglich vor der Umstellung des Betriebsmodells wird der Modal-Shift-Effekt auf den Verkehr im Betriebsgebiet insgesamt als gering bewertet (vgl. Hartz et al., 2024, S. 59–60). Aussagen zur Reduktion der privaten Fahrzeugflotte, zu Einsparungen von Fahrzeugkilometern oder zu ökologischen Wirkungen wurden in der Studie nicht getroffen.

Die Befunde aus den vorgestellten Studien legen nahe, dass Ridepooling-Angebote, abhängig vom Einsatzkontext und der Ausgestaltung, unterschiedlich starke Wirkungen auf Verkehrsnachfrage, Modal Split und Umweltindikatoren entfalten. Um diese Wirkungen systematisch zu erfassen und vergleichbar zu machen, bedarf es geeigneter Bewertungsgrößen, die sowohl betriebliche als auch ökologische Aspekte abbilden können. Ein entsprechender Vorschlag zur Effizienzmessung wurde von Liebchen et al. (vgl. 2020, S. 5–7) erarbeitet. Sie schlagen mit der Kennzahl *Systemeffizienz* η ein Maß zur Bewertung der betrieblichen Leistungsfähigkeit von Ridepooling-Systemen vor. Dabei wird das Verhältnis von Buchungskilometer zu Fahrzeug-kilometer_{gefahren} betrachtet. Unter Buchungskilometer wird die Summe aller von Fahrgästen zurückgelegten Distanzen verstanden, unabhängig davon, ob diese Fahrten gebündelt durchgeführt wurden. Fzkm_{gefahren} umfassen hingegen alle vom Fahrzeug zurückgelegten Kilometer, einschließlich Leerfahrten, Besetztfahrten und betriebsbedingter Wege (vgl. FGSV, 2021, S. 28). Die Kennzahl verdeutlicht somit, wie effizient Fahrtwünsche im Verhältnis zum eingesetzten Ressourcenumfang erfüllt werden. Für die ökologische Bewertung ist die Systemeffizienz insofern von zentraler Bedeutung, als ein hoher Wert tendenziell mit einem geringeren Anteil an Leerfahrten, niedrigeren Emissionen pro Fahrgast und einem insgesamt reduzierten Energieverbrauch pro Pkm einhergeht.

3.2 Forschungsbedarf und Einordnung der vorliegenden Arbeit

Trotz wachsender wissenschaftlicher Aufmerksamkeit ist die ökologische Wirkung von Ridepooling-Verkehren bislang nicht abschließend geklärt. Evidenzbasierte Befunde zu den ökologischen Wirkungen bleiben häufig unscharf (vgl. Zwick, Kuehnelt & Axhausen, 2022, S. 1, 14–15). Empirische Beobachtungen aus realen Systemen, insbesondere in ländlichen und suburbanen Räumen, zeigen einen vergleichsweise hohen Anteil an Leerfahrten, geringe Bündelungsquoten sowie einen hohen Anteil monomodaler Direktfahrten (vgl. Hartz et al., 2024, S. 12, 40–44). Dies legt nahe, dass die in simulationsbasierten Studien prognostizierten positiven Effekte in der betrieblichen Praxis bislang nur eingeschränkt

realisiert werden beziehungsweise nicht uneingeschränkt übertragbar sind. Zudem finden potenziell negative Begleitwirkungen, etwa eine Kannibalisierung innerhalb des Umweltverbunds oder induzierter Verkehr, in anwendungsbezogenen Analysen bislang nur begrenzt Berücksichtigung.

Eine mögliche Erklärung für die Differenz zwischen theoretisch modellierten Potenzialen und empirisch beobachteten Wirkungen liegt in der Kontextabhängigkeit vieler Studien. Zahlreiche Simulationen betrachten urbane Räume mit günstigen Voraussetzungen für Ridepooling, etwa hoher Bevölkerungsdichte, kurzen Distanzen und guter ÖPNV-Anbindung. Zudem beruhen sie häufig auf idealisierten Annahmen zur Verfügbarkeit, Nutzung und Akzeptanz entsprechender Dienste. Auch die angenommene Skalierung weicht teils deutlich vom realen Betrieb ab. Während Modellstudien häufig großskalige Systeme wie MOIA in Hamburg betrachten, zeigt die Marktübersicht von Foljanty, dass neu eingeführte On-Demand-Angebote im Jahr 2024 im Durchschnitt nur über etwa sechs Fahrzeuge verfügten (vgl. Foljanty, 2025, Abschn. „Project Characteristics“). Vor diesem Hintergrund ist die Übertragbarkeit modellbasierter Ergebnisse auf reale Betriebsbedingungen kritisch zu prüfen.

Die zunehmende Fokussierung von Branchenverbänden und wissenschaftlichen Akteuren auf den ländlichen Raum unterstreicht die Relevanz dieser Überlegungen: Obwohl simulationsbasierte Studien zeigen, dass Ridepooling-Verkehre eine gewisse Mindestnachfrage erfordern und Effizienz- sowie Entlastungspotenziale insbesondere bei hoher Nachfragedichte und entsprechender Bündelungseffizienz zu erwarten sind (vgl. Alonso-Mora et al., 2017, S. 462, 466; vgl. Zwick et al., 2021, S. 665–666), sprechen sich sowohl der VDV als auch die Agora Verkehrswende gGmbH für einen Ausbau entsprechender Angebote in ländlichen Regionen aus (vgl. Agora Verkehrswende, 2023, S. 43–44; vgl. VDV, 2025b, S. 4). Ziel dieser Empfehlungen ist insbesondere die Verbesserung der Angebotsqualität des öffentlichen Verkehrs in strukturschwachen Räumen. Gleichzeitig weisen bestehende Untersuchungen darauf hin, dass Linienbedarfsverkehre auch betriebliche und verkehrliche Grenzen aufweisen und konventionelle Linienangebote nicht in allen Anwendungsfällen sinnvoll ersetzen können (vgl. Agora Verkehrswende, 2023, S. 44; vgl. VDV, 2025b, S. 4). Vor diesem Hintergrund erscheint eine pauschale Übertragung des Konzepts auf ländliche Räume ohne kontextspezifische Effizienznachweise kritisch, da ökologische Zielsetzungen andernfalls potenziell konterkariert werden könnten. Daraus ergibt sich die zentrale Frage, unter welchen betrieblichen Rahmenbedingungen und Steuerungsfaktoren Ridepooling-Angebote tatsächlich ökologisch wirksam gestaltet werden können.

Um diese Frage fundiert beantworten zu können, ist ein vertieftes Verständnis der relevanten Einflussfaktoren auf Betrieb und Gestaltung von Ridepooling-Angeboten erforderlich. Bislang ist jedoch nicht erforscht, welche Stellgrößen dabei eine Rolle spielen. Dazu zählen unter anderem die Flottensteuerung, die Tarifgestaltung und die Wahl der Betriebsform, die Integration in den öffentlichen Nahverkehr, die räumlich-zeitliche Angebotssteuerung, der Anteil an Leerkilometern, die Besetzungsquote beziehungsweise die durchschnittliche Auslastung sowie Fahrzeugtyp und Antriebsart. In welchen Umgebungen diese Faktoren einen ökologisch vorteilhaften Betrieb begünstigen, ist bislang weitgehend offen.

Zudem fehlt ein Bewertungsansatz zur ökologischen Wirkung von Ridepooling-Angeboten, der reale Betriebsdaten systematisch einbezieht, potenzielle Kannibalisierungs- und Verkehrsinduktionseffekte explizit berücksichtigt und Emissionseinsparungen im Vergleich zu einem realitätsnahen Status quo bilanziert.

Bestehende Bewertungsansätze, etwa zur Systemeffizienz (vgl. Liebchen et al., 2020, S. 5–7) oder zur CO₂-Bilanzierung (vgl. VDV, 2025b, S. 21), differenzieren bislang unzureichend nach diesen Effekten. Der Ansatz von Liebchen et al. ist insofern als sinnvoll einzustufen, als dass er Aufwand und Nutzen systematisch gegenüberstellt, um die betriebliche Effizienz von Ridepooling-Angeboten zu bewerten. Hieraus lassen sich zwar indirekt Aussagen zur ökologischen Relevanz ableiten, eine Bewertung der emissionsbezogenen Nettoeffekte ist jedoch nicht möglich.

Ein aktueller Ansatz diesbezüglich findet sich in der VDV-Richtlinie 10017 „Linien- und Bedarfsverkehre in der Region: Integriert, datenbasiert, effizient“, welche die Kennzahl der Emissionseinsparung zur Quantifizierung der Klimaschutzwirkung einführt. Diese wird wie folgt definiert:

„Emissionseinsparung [...] zeigt die Reduktion von THG-Emissionen durch die Verlagerung vom MIV in den ÖPNV. Im Zielbild reduzieren sich die CO₂-Emissionen, da durch das attraktive Angebot die Menschen verstärkt den klimafreundlichen ÖPNV für ihre Wege nutzen.“ (vgl. VDV, 2025b, S. 16)

Die betrachtete Kennzahl berücksichtigt ausschließlich Verlagerungseffekte vom MIV zum öffentlichen Personennahverkehr. Diese Betrachtung greift jedoch zu kurz, da sie mögliche Kannibalisierungseffekte innerhalb des Umweltverbunds, etwa Verlagerungen vom Fuß- oder Radverkehr, sowie induzierten Verkehr unberücksichtigt lässt. Zudem basiert sie auf der pauschalen Annahme, dass verlagerte oder neu generierte Ridepooling-Verkehre, unabhängig von ihrer Ausgestaltung, grundsätzlich ökologisch vorteilhaft gegenüber dem Pkw seien. Diese Annahme ist kritisch zu hinterfragen und durch differenzierte, empirisch validierte Indikatoren zu ergänzen, etwa spezifische Emissionen je Pkm, durchschnittliche Besetzungsquoten oder den Anteil an Leerkilometern. Emissionseinsparungen durch den Einsatz (teil-)elektrifizierter Flotten im Vergleich zu schwach ausgelasteten konventionellen Bussen bleiben bislang ebenfalls unberücksichtigt.

Die in der Richtlinie eingeführte Kennzahl ersetzt somit keinen umfassenden Bewertungsansatz, der die ökologischen Wirkungen von Ridepooling-Angeboten systematisch und empirisch fundiert erfasst. Die Dissertation adressiert damit eine zentrale Forschungslücke: die kontextsensitive, empirisch fundierte Bewertung der THG-Wirkung von Ridepooling-Systemen im Realbetrieb. Während bestehende Studien häufig auf Simulationen oder vereinfachte Annahmen zurückgreifen oder sich auf großskalige Modellprojekte konzentrieren, verbindet diese Arbeit reale Nutzungsdaten mit einem standardisierten Bilanzierungsansatz.

Untersucht werden unterschiedlich konzipierte Ridepooling-Dienste in diversen räumlichen Kontexten - von urban verdichteten Gebieten mit gut ausgebautem ÖPNV bis hin zu peripheren Räumen mit eingeschränkter Erschließung. Berücksichtigt werden zudem

die jeweiligen Zielstellungen der Angebote, etwa als Ergänzung zum ÖPNV, als Zubringerlösung oder als eigenständiger Bedarfsverkehr.

Ergänzend erfolgt eine kontextbezogene Referenzbewertung, bei der abgeschätzt wird, welche Emissionen im jeweiligen Untersuchungsraum ohne das Ridepooling-Angebot angefallen wären. Auf dieser Grundlage wird analysiert, wie sich die Angebote auf die gesamtverkehrliche THG-Bilanz auswirken, insbesondere im Hinblick auf Verlagerungseffekte, Kannibalisierung innerhalb des Umweltverbunds sowie potenzielle Verkehrsinduktion. Durch den Vergleich der Systeme und eine szenariobasierte Analyse betrieblicher Stellschrauben wird aufgezeigt, unter welchen Bedingungen Ridepooling ökologisch wirksam ist und wie sich die Systeme im Sinne einer verbesserten Umwelt- und Betriebseffizienz weiterentwickeln lassen. Die Ergebnisse liefern praxisnahe Impulse für Planung und Politik und stärken die wissenschaftliche Basis für eine evidenzbasierte Weiterentwicklung nachhaltiger, kontextangepasster Mobilitätsangebote.

Kapitel 4

Methodik

Ausgehend vom in Kapitel 1.2 formulierten Ziel einer standardisierten Methodik zur ökologischen Bewertung von Ridepooling-Systemen wird im Folgenden der methodische Ansatz dargestellt. In Kapitel 4.1 werden zunächst die wesentlichen Inhalte und Vorgehensweisen der Norm beschrieben. Darauf aufbauend werden in Kapitel 4.2 die für Linienbedarfsverkehre erforderlichen methodischen Anpassungen erläutert, die über die Standardanwendung hinausgehen.

4.1 Methodisches Vorgehen nach *DIN EN 16258*

Die Methodik dieser Arbeit basiert auf der *DIN EN 16258:2013 „Methode zur Berechnung und Deklaration des Energieverbrauchs und der THG-Emissionen bei Transportdienstleistungen“* (Deutsches Institut für Normung [DIN], 2013, S. 6). Im Folgenden wird sie als *DIN EN 16258* bezeichnet. Die Norm stellt eine standardisierte Grundlage zur Berechnung und Deklaration des Energieverbrauchs sowie der THG-Emissionen im Personen- und Güterverkehr bereit.

Begründung der Normauswahl

Die *DIN EN 16258* legte eine standardisierte Methode zur Berechnung und Deklaration des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen bei Transportdienstleistungen im Güter- und Personenverkehr fest (DIN, 2013, S. 6). Mit der *DIN EN ISO 14083:2024-06* wurde während der Promotionslaufzeit eine internationale Nachfolgenorm eingeführt, die die Quantifizierung und Berichterstattung von THG-Emissionen aus Transportketten für Personen- und Güterverkehr adressiert (DIN, 2024).

Für diese Arbeit wurde dennoch die *DIN EN 16258* angewendet, da der Untersuchungszeitraum, die verfügbaren Eingangsdaten sowie die herangezogenen Referenzwerte methodisch auf dieser Normgrundlage aufbauen. Eine nachträgliche Umstellung auf die *DIN EN ISO 14083* hätte zusätzliche Primärdaten zu realen Energieverbräuchen sowie weitergehende Informationen zu vor- und nachgelagerten Wegekettens erfordern, die für die untersuchten Systeme nicht durchgängig verfügbar waren. Für den deutschen Untersuchungskontext wurde die Bilanzierung auf Grundlage nationaler Emissionsfaktoren durchgeführt. Für den deutschen Strommix wurde ein Emissionsfaktor von 498 g CO₂e/kWh und für Ökostrom ein Emissionsfaktor von 56 g CO₂e/kWh angesetzt (vgl. Umweltbundesamt, 2024, Tab. 1; vgl. LANUK, 2022, Emissionsfaktoren 2022). Die ergänzende Berechnung nach *DIN EN*

ISO 14083 dient der methodischen Einordnung und verwendet den im Online-Tool hinterlegten europäischen Vergleichswert von 277 g CO₂e/kWh (vgl. DIN, 2024, Tab. A2).

Die Beibehaltung der *DIN EN 16258* dient damit der methodischen Konsistenz zwischen Untersuchungszeitraum, Datengrundlage und Vergleichswerten. Zur ergänzenden Einordnung werden im Online-Tool zusätzlich Berechnungen mit den im Kontext der *DIN EN ISO 14083* verwendeten Emissionsfaktoren ausgewiesen (vgl. DIN, 2024, Tab. A2).

Die Norm legt grundlegende Prinzipien, systematische Abgrenzungen, Berechnungsmethoden sowie Zuweisungsregeln fest und benennt geeignete Datenquellen. Ihr Ziel besteht darin, für Verkehrsmittel und Verkehrsträger standardisierte, verlässliche und nachvollziehbare Angaben zum Energieverbrauch und zu THG-Emissionen zu ermöglichen (vgl. DIN, 2013, S. 4–21).

Betrachtungsansatz:

Die DIN folgt dem *Well-to-Wheel-Ansatz* (*WtW*; *sinngemäß aus dem Englischen übersetzte: „Vom Bohrloch bis zum Rad“*), der den gesamten Energiebedarf und die Treibhausgasemissionen von der Energiegewinnung bis zur Nutzung im Fahrzeugbetrieb erfasst. Dabei werden sowohl vorgelagerte Emissionen aus der Kraftstoff- bzw. Strombereitstellung (*Well-to-Tank*; *WtT*) als auch emissionsrelevante Prozesse während der Fahrzeugnutzung (*Tank-to-Wheel*; *TtW*) einbezogen. Nicht berücksichtigt werden hingegen die Emissionen, die bei der Herstellung der Fahrzeuge oder der zugehörigen Infrastruktur entstehen. Die Systematik des *WtW-Ansatzes* ist in Abbildung 4.1 grafisch dargestellt.

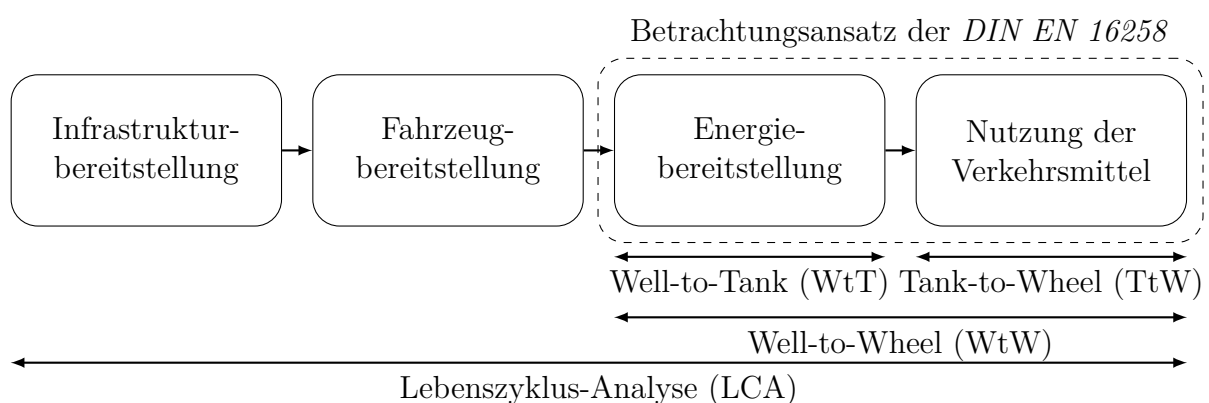


Abb. 4.1: Systematischer Betrachtungsansatz für Verkehrsmittel im Kontext einer Lebenszyklusbetrachtung und des *Well-to-Wheel* Ansatzes (in Anlehnung an UBA, 2021, S. 11)

Die konkrete methodische Umsetzung des *WtW-Ansatzes* wird in der *DIN EN 16258* durch klar definierte Betrachtungs- bzw. Systemgrenzen spezifiziert. Dabei werden sowohl die *Fahrzeugprozesse* während der Betriebsphase als auch die vorgelagerten *Energieprozesse* berücksichtigt (vgl. DIN, 2013, S. 13). Im Einzelnen gilt:

- Die *Fahrzeugprozesse* müssen den Betrieb sämtlicher im Fahrzeug befindlicher Systeme (einschließlich Subunternehmer) umfassen und sowohl die Antriebsleistung als auch zusätzliche Dienstleistungen einschließen.
- Die *Energieprozesse* umfassen:
 - Bei Kraftstoffen: Förderung oder Anbau von Primärenergie, Raffinerien, Umwandlung, Transport und Verteilung von Energie auf sämtlichen Stufen der Produktion des verwendeten Kraftstoffs.
 - Bei Elektrizität: Gewinnung und Transport von Primärenergie, Umwandlung, Stromerzeugung und Verluste im Stromnetz.

Gemäß *DIN EN 16258* werden bestimmte Prozesse explizit von der Bilanzierung ausgenommen, da sie nicht unmittelbar dem energiebezogenen Betrieb der Transportdienstleistung zugeordnet werden können. Andernfalls wäre eine verzerrungsfreie Bewertung unterschiedlicher Verkehrsträger nicht möglich. Zu den ausgeschlossenen Prozessen zählen unter anderem (vgl. DIN, 2013, S. 13):

- direkte THG-Emissionen infolge von Leckagen im Fahrzeugbetrieb (z. B. Kältemittelverluste oder Methanemissionen bei Erdgasfahrzeugen),
- unterstützende Maßnahmen zur kurzzeitigen Bewegung oder Sicherung von Fahrzeugen durch externe Einrichtungen (z. B. Abschleppvorgänge),
- Hilfsprozesse zur Bewegung von Fahrgästen mittels externer Vorrichtungen (z. B. Rollstuhlrampen),
- administrative Prozesse innerhalb der Organisation des Transportdienstleisters (z. B. Betrieb von Gebäuden oder IT-Infrastruktur),
- Herstellungs-, Wartungs- und Entsorgungsprozesse für Fahrzeuge,
- Prozesse im Zusammenhang mit dem Bau, Betrieb, der Wartung und Demontage von Verkehrsinfrastrukturen,
- vorgelagerte, betriebsfremde Prozesse, wie die Herstellung und Entsorgung von Förderanlagen, Raffinerieanlagen, Energieerzeugungssystemen oder Verteilnetzen.

Damit unterscheidet sich der Betrachtungsansatz der *DIN EN 16258* grundlegend von dem einer *Lebenszyklusanalyse*, wie sie in der *DIN EN ISO 14040* und *14044* definiert ist. Während die *DIN EN 16258* ausschließlich den Energieverbrauch und die THG-Emissionen im laufenden Betrieb von Transportdienstleistungen berücksichtigt, umfasst die Life Cycle Assessment (LCA) sämtliche Phasen der Wertschöpfungskette, einschließlich vor- und nachgelagerter Prozesse und unabhängig von deren direkter Kontrollierbarkeit durch das Unternehmen. Zusätzlich zur Erfassung von THG-Emissionen berücksichtigt die *LCA* auch weitere Schadstoffe wie Stickoxide (NO_x) sowie Feinstaubpartikel ($\text{PM}_{2.5}$, PM_{10}) und analysiert überdies weitere Wirkungskategorien, etwa Eutrophierung und Versauerung von Umweltmedien (vgl. DIN, 2021a, S. 23 ff. vgl. DIN, 2021b, S. 28 ff.). Die *DIN EN 16258* beschränkt sich demgegenüber auf die Erfassung der THG-Emissionen (vgl. DIN, 2013, S. 12).

Einheiten und Symbole:

Die *DIN EN 16258* definiert standardisierte *Einheiten* und *Symbole* zur Darstellung von

Energieverbräuchen und THG-Emissionen im Verkehrssektor. Diese dienen der einheitlichen Kommunikation und Vergleichbarkeit von Berechnungsergebnissen (vgl. DIN, 2013, S. 20):

- *Energiemengen* sind in Joule (J) oder in Vielfachen davon, wie Megajoule (MJ) oder Gigajoule (GJ), anzugeben.
- *THG-Emissionen* werden in Gramm Kohlenstoffdioxid-Äquivalent (g CO₂e) oder in den Vielfachen Kilogramm (kg CO₂e) bzw. Tonnen (t CO₂e) angegeben.

Berechnungsmethodik:

Für die Berechnung des Energieverbrauchs und der THG-Emissionen gelten folgende **grundsätzliche Vorgaben** (vgl. DIN, 2013, S. 13–14):

- Es sind alle Fahrzeuge zu berücksichtigen, die für die Erbringung der Transportdienstleistung eingesetzt werden, einschließlich jener, die durch Subunternehmer betrieben werden.
- Der gesamte Kraftstoffverbrauch ist für jeden verwendeten Energieträger zu erfassen.
- Sowohl Ladungs- als auch Leerfahrten sind vollständig zu bilanzieren.

Die Berechnung muss vier **Ergebnisgrößen** ausweisen (vgl. DIN, 2013, S. 13, 20):

- *Well-to-Wheel*-Energieverbrauch (E_w),
- *Well-to-Wheel*-THG-Emissionen (G_w),
- *Tank-to-Wheel*-Energieverbrauch (E_t),
- *Tank-to-Wheel*-THG-Emissionen (G_t).

Für die Berechnung sind **betriebsbezogene Merkmale der Transportdienstleistung und der Fahrzeuge** zu berücksichtigen, insbesondere (vgl. DIN, 2013, S. 14):

- Kraftstoffverbrauch
- zurückgelegte Entfernung
- spezifischer Kraftstoffverbrauch je Entfernung
- beförderte Ladung / Auslastungsgrad
- Nutzlastkapazität
- Anteil der Leerkilometer

Die grundlegenden **Teilschritte der Emissionsberechnung** gestalten sich wie folgt (vgl. DIN, 2013, S. 15–16):

1. Bestimmung der relevanten Teilstrecken der Transportdienstleistung
2. Für jede Teilstrecke:
 - (a) Festlegung des zugehörigen Fahrzeugeinsatz-Systems (VOS)
 - (b) Berechnung des gesamten Kraftstoffverbrauchs des VOS
 - (c) Berechnung des Energieverbrauchs und der THG-Emissionen
 - (d) Allokation der Ergebnisse auf die betrachtete Teilstrecke
3. Aggregation der Ergebnisse über alle Teilstrecken

Die **Festlegung eines VOS (Schritt 2 a)** erfolgt für eine homogene Gruppe von Fahrzeugeinsätzen, die einer spezifischen Teilstrecke zugeordnet sind. Zu berücksichtigen sind dabei insbesondere folgende Aspekte:

- Anzahl und Typ der eingesetzten Fahrzeuge
- Zeitraum des Fahrzeugeinsatzes
- Berücksichtigung sämtlicher Leerfahrten
- Weitere Faktoren, die Größe und Zusammensetzung beeinflussen

Im Zuge der **Berechnung des gesamten Kraftstoffverbrauchs des VOS (Schritt 2 b)** sind folgende Vorgaben zu beachten:

- Der gesamte Kraftstoffverbrauch des VOS ist zu bestimmen.
- Bei Nutzung unterschiedlicher Energieträger erfolgt die Berechnung getrennt nach Kraftstoffart.
- Die Berechnungslogik entspricht derjenigen einzelner Transportleistungen.

Die **Berechnung des Energieverbrauchs und der Emissionen des VOS (Schritt 2 c)** erfolgt gemäß der folgenden Vorgaben:

$$E_{WtW}(VOS) = F(VOS) \cdot e_w \quad (4.1)$$

$$G_{WtW}(VOS) = F(VOS) \cdot g_w \quad (4.2)$$

$$E_{TtW}(VOS) = F(VOS) \cdot e_t \quad (4.3)$$

$$G_{TtW}(VOS) = F(VOS) \cdot g_t \quad (4.4)$$

mit:

- $F(VOS)$: gesamter Kraftstoffverbrauch des VOS
- e_w, g_w : Energie- und Emissionsfaktoren *Well-to-Wheel* (WtW)
- e_t, g_t : Energie- und Emissionsfaktoren *Tank-to-Wheel* (TtW)

Bei Nutzung mehrerer Energieträger sind die Verbräuche jeweils separat in Energieverbrauch und Emissionen umzurechnen und anschließend zu summieren. Die anzuwendenden Emissionsfaktoren sind in Anhang A der DIN definiert und sind in Tabelle 4.1 dargestellt.

Datengrundlagen:

Die Auswahl der Verbrauchs- und Emissionswerte folgt einem in der DIN festgelegten Prioritätenschema, das eine Verwendung möglichst spezifischer Daten vorsieht (vgl. DIN, 2013, S. 14):

1. Individuelle Messwerte
2. Spezifische Werte des jeweiligen Transportdienstleisters
3. Durchschnittswerte der Flotte des Transportdienstleisters
4. Vorgabewerte aus der DIN

Die Kategorien sind in absteigender Priorität zu verstehen. Soweit verfügbar, sind individuell erhobene Messwerte zu verwenden. Der Rückgriff auf weniger spezifische Kategorien

erfolgt nur, sofern höher priorisierte Daten nicht vorliegen. Eine Kombination mehrerer Kategorien ist zwar zulässig, sollte jedoch nach Möglichkeit vermieden werden (vgl. DIN, 2013, S. 14).

Emissionen:

Zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit wird die Klimawirkung aller Treibhausgase in CO₂-Äquivalenten (CO₂e) angegeben. Hierzu wird die Masse eines emittierten Gases mit dessen *Global Warming Potential* (GWP) über einen Referenzzeitraum von 100 Jahren multipliziert. Diese Umrechnung erlaubt eine konsistente Aggregation sämtlicher Emissionen zu einem einheitlichen Maß für die Klimawirkung.

Gemäß *DIN EN 16258* umfasst die THG-Bilanzierung dabei sechs klimarelevante Gase (vgl. DIN, 2013, S. 12):

- Kohlendioxid (CO₂)
- Methan (CH₄)
- Distickstoffoxid (N₂O)
- Teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (HFC)
- Perfluorierte Kohlenwasserstoffe (PFC)
- Schwefelhexafluorid (SF₆)

Maßnahmen zur Emissionskompensation oder zum Emissionshandel sind gemäß *DIN EN 16258* explizit von der Bilanzierung auszuschließen.

Allokation:

Die *DIN EN 16258* legt außerdem Grundsätze zur Allokation von Energieverbräuchen und Emissionen auf Transportdienstleistungen fest.

Unter *Allokation* wird die zielgerichtete Verteilung von Ressourcen, Kosten oder Emissionen auf einzelne Prozesse, Produkte oder Dienstleistungen verstanden. Ziel ist es, den jeweiligen Beitrag zur Gesamtsumme quantifizierbar zu machen und so eine Vergleichbarkeit unterschiedlicher Leistungseinheiten zu ermöglichen.

Im Personenverkehr erfolgt die Allokation auf Basis der Personenkilometer_{gefahren} (im Folgenden synonym als Pkm_{gefahren} oder Pkm bezeichnet). Diese ergeben sich durch die Summe der individuell zurückgelegten Distanzen aller Fahrgäste:

$$\text{Pkm}_{\text{gefahren}} = \sum_{i=1}^{n_{\text{Fgte}}} d_i \quad (4.5)$$

mit:

- n_{Fgte} : Anzahl der transportierten Fahrgäste
- d_i : tatsächlich zurückgelegte Strecke des Fahrgasts i (in km)

Die Einheit der Allokation ist somit ein Pkm, welcher als funktionale Bezugsgröße für die Zuordnung von Energieverbräuchen und THG-Emissionen dient (vgl. DIN, 2013, S. 16–19). Im Rahmen dieser Arbeit wird jedoch, abhängig von der Datenverfügbarkeit, ein davon abweichender Berechnungsansatz gewählt, der in Kapitel 4.3 detailliert dargestellt und begründet wird.

Deklaration:

Die *DIN EN 16258* enthält darüber hinaus Vorgaben zur Art und zum Umfang der Deklaration der berechneten Energieverbräuche und Emissionen. Diese Vorgaben werden in der vorliegenden THG-Bilanzierung berücksichtigt (s. Kapitel 4.2), jedoch aus Platzgründen nicht vertiefend erläutert.

4.2 Anwendung der *DIN EN 16258* für Linienbedarfsverkehre

Die Anwendung der *DIN EN 16258* auf Linienbedarfsverkehre erfolgt mit dem Ziel, eine methodisch konsistente und technologieoffene Bewertung der Energieverbräuche und THG-Emissionen von Ridepooling-Systemen zu ermöglichen. Während die DIN ursprünglich auf klassische Transportdienstleistungen mit festen Routen und Fahrplänen ausgelegt ist, erfordert ihre Umsetzung im Kontext dynamischer, bedarfsorientierter Verkehre eine angepasste Interpretation zentraler Methodenvorgaben. Insbesondere die Definition von Transporteinheiten, Systemgrenzen sowie die Allokation der Emissionen auf einzelne Beförderungsleistungen bedarf einer kontextsensitiven Adaption. Die vorliegende Arbeit greift diese Herausforderungen auf und überträgt die Struktur der *DIN EN 16258* auf die betrieblichen Charakteristika von Linienbedarfsverkehren, etwa hinsichtlich variierender Routenführungen, Fahrgastzahlen und Fahrzeugauslastungen. Damit wird eine belastbare Vergleichbarkeit mit anderen Verkehrsangeboten ermöglicht und eine Grundlage für die ökologische Bewertung geschaffen.

Für die THG-Bilanzierung der Linienbedarfsverkehre ist zwingend der in *DIN EN 16258* definierte Betrachtungsrahmen (bzw. die Betrachtungsgrenze) nach dem *Well-to-Wheel* (WtW)-Prinzip heranzuziehen. Wie bereits erläutert, umfasst dieser ausschließlich die Fahrzeug- und Energieprozesse. Die Fahrzeugprozesse beinhalten den Betrieb sämtlicher im Fahrzeug befindlicher Systeme (einschließlich der durch Subunternehmer erbrachten Leistungen) und schließen sowohl die zur Fortbewegung erforderliche Antriebsleistung als auch zusätzliche betriebsrelevante Dienstleistungen ein. Die Energieprozesse umfassen:

- **Kraftstoffe:** Berücksichtigt werden Förderung bzw. Anbau der Primärenergie, Refination, Umwandlung, Transport sowie die Verteilung des Energieträgers über alle Stufen der Kraftstoffbereitstellung.
- **Elektrizität:** Eingeschlossen sind die Gewinnung und der Transport der Primärenergie, deren Umwandlung, die Stromerzeugung sowie die Übertragungsverluste im Stromnetz.

Alle weiteren Prozesse, wie die Rohstoffgewinnung und Fahrzeugherstellung, die zugehörige Logistik, die Wartung der Fahrzeuge sowie das App- und Backend-System für den Serverbetrieb, bleiben in dieser Studie bewusst unberücksichtigt. Auch die End-of-Life-Phase (z. B. Recycling oder Wiederverwendung) sowie das Fahrverhalten der Fahrer werden nicht in die Bilanz einbezogen.

Die Auswahl des WtW-Ansatzes folgt dem Ziel, technologieneutrale, vergleichbare und steuerbare Emissionsbewertungen zu ermöglichen. Durch die Fokussierung auf betriebsbe-

dingte Energie- und Emissionsprozesse gemäß *DIN EN 16258* werden ausschließlich jene Anteile betrachtet, die sich einheitlich erfassen lassen und durch Verkehrsunternehmen direkt beeinflussbar sind. So wird eine sachgerechte Vergleichbarkeit verschiedener Antriebstechnologien gewährleistet, ohne durch externe, schwer standardisierbare Faktoren wie Infrastruktur oder Fahrzeugproduktion verzerrt zu werden. Die Betrachtungsgrenze dieses Bilanzierungsansatzes ist schematisch in Abbildung 4.2 dargestellt. Die Pfeile stellen stoffliche, energetische oder logistische Flüsse zwischen den Prozessschritten dar und dienen dazu, die Systemdynamik und Prozessverflechtung innerhalb und außerhalb der Betrachtungsgrenze transparent darzustellen. Sie markieren Energieflüsse, Einflussbeziehungen und die Reihenfolge der Prozessschritte im Betrachtungsrahmen.

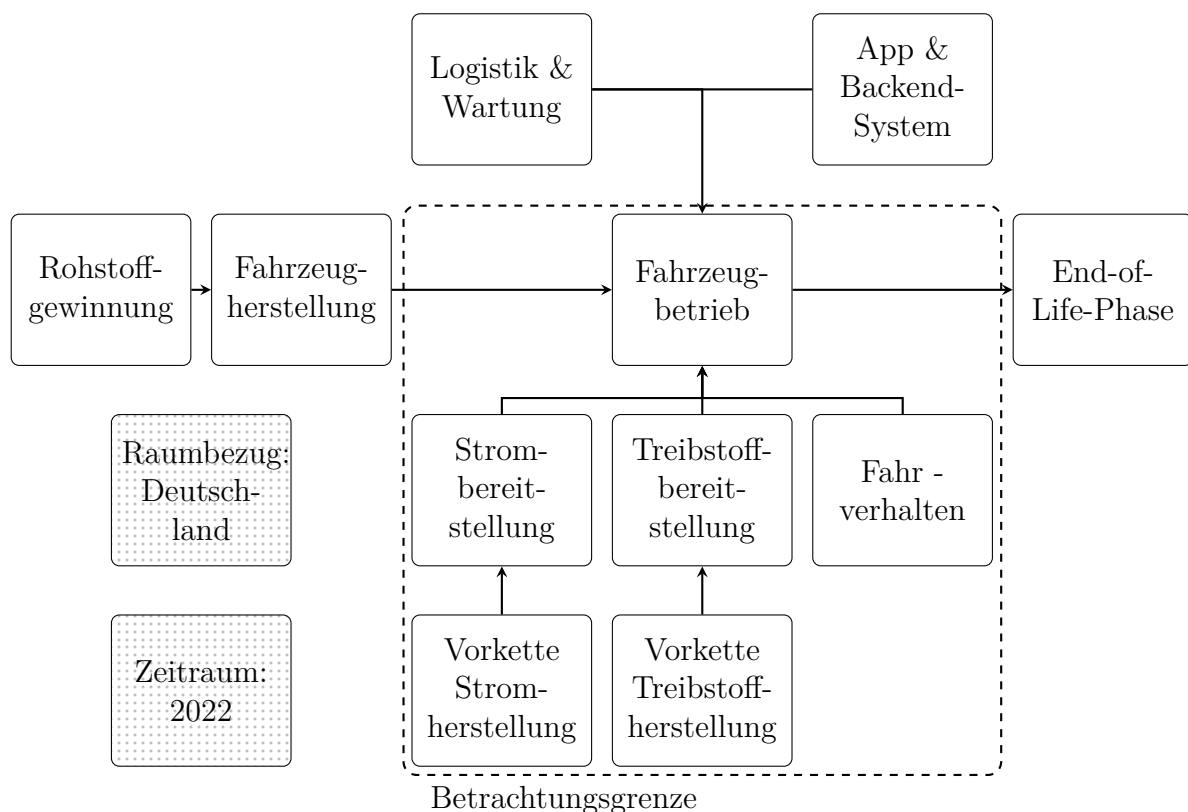


Abb. 4.2: Vereinfachte Darstellung der Betrachtungsgrenzen der THG-Bilanzierung (eigene Darstellung nach Bruder und Klemmer, 2024, Abb. 3-2, S. 25)

Der Berechnung der Energieverbräuche und der THG-Emissionen liegt der Grundsatz zugrunde, dass sämtliche Fahrzeuge einbezogen werden, die im jeweiligen Betriebsgebiet zur Durchführung der Transportleistungen eingesetzt sind. Berücksichtigt wird dabei der vollständige Verbrauch aller eingesetzten Energieträger, unabhängig davon, ob es sich um Kraftstoffe oder elektrische Energie handelt. In die Bilanz fließen auch Leerfahrten ein, die im Rahmen des Fahrbetriebes anfallen, unabhängig davon, ob sie im Zusammenhang mit Fahrgastaufnahmen oder betriebsbedingten Umläufen stehen (vgl. DIN, 2013, S. 15). Die Angabe des Energieverbrauchs erfolgt gemäß den Vorgaben der DIN in Joule (J) beziehungsweise in entsprechenden Vielfachen. Die Emissionen klimarelevanter Gase werden als Kohlenstoffdioxid-Äquivalente in Gramm (g CO_{2e}) ausgewiesen.

Gemäß den Vorgaben der *DIN EN 16258* werden verschiedene Ergebniskennzahlen ausgewiesen. Dazu zählen der gesamte Energiebedarf von der Primärenergiequelle bis zum Rad (E_w) (d. h. bis zum Fahrzeugbetrieb) sowie die damit verbundenen THG-Emissionen (G_w). Diese Größen umfassen neben dem eigentlichen Fahrbetrieb auch alle vorgelagerten Prozesse der Energiebereitstellung, wie etwa Förderung, Verarbeitung, Transport und Speicherung von Kraftstoffen oder Strom. Zusätzlich werden die direkt fahrzeugbezogenen Verbrauchs- und Emissionswerte im Fahrbetrieb, also ab Tank bzw. Batterie, separat als TtW-Kennwerte (E_t , G_t) ausgewiesen (vgl. DIN, 2013, S. 11–12).

Die Ermittlung des Energieverbrauchs und der THG-Emissionen für Linienbedarfsverkehre erfolgt auf der Aggregationsebene des Fahrzeugeinsatzsystems (VOS). Da Linienbedarfsverkehre keine festen Fahrpläne oder standardisierten Linienführungen aufweisen, sondern flexible Fahrten zur Bedienung individueller Nutzeranfragen ermöglichen, erfordert ihre Bilanzierung eine methodische Anpassung der *DIN EN 16258*. Die Fahrzeuge absolvieren unterschiedliche Fahrabschnitte, darunter Zu- und Abfahrten sowie Transportfahrten mit Fahrgästen. Eine getrennte Auswertung dieser Teilabschnitte gemäß der DIN wäre zwar theoretisch möglich, erweist sich jedoch angesichts der hohen Anzahl an Einzelbuchungen (241.841 Buchungen_{durchgeführt}) und der komplexen zeitlichen Dynamik als praktisch nicht umsetzbar und methodisch nicht zielführend.

Insbesondere durch Bündelungseffekte, bei denen mehrere Fahrgäste simultan befördert werden und sich bestimmte Streckenabschnitte teilen, lässt sich eine eindeutige Zuordnung des Energieverbrauchs zu einzelnen Transportleistungen technisch nicht trennscharf umsetzen. Daher wird stattdessen die gesamte Jahresfahrleistung der eingesetzten Fahrzeugflotte als Bezugsgröße herangezogen. Die Fahrzeuge eines Angebotsjahres bilden gemeinsam das VOS. Dessen Gesamtfahrleistung wird auf Grundlage spezifischer Messwerte aus den Backend-Daten des jeweiligen Anbieters berechnet. Darauf aufbauend erfolgt die Berechnung des Energieverbrauchs und der THG-Emissionen unter Anwendung der systematischen Vorgehensweise inklusive der Teilschritte gemäß *DIN EN 16258*.

Für die Berechnung der THG-Emissionen im Rahmen der Linienbedarfsverkehre werden betriebliche Kenngrößen herangezogen, die sich anhand definierter Wertekategorien systematisieren lassen (vgl. DIN, 2013, S. 14). Dazu zählen:

- der spezifische Energie- bzw. Kraftstoffverbrauch pro Entfernungseinheit (als standardisierter Referenzwert),
- die zurückgelegten Entfernungen basierend auf unternehmensspezifischen Fahrleistungsdaten,
- die anteiligen Leerkilometer der eingesetzten Flotte,
- sowie die Beförderungskapazität bzw. tatsächliche Auslastung der Fahrzeuge.

Für Flotten mit Plug-in-Hybrid-Fahrzeugen (PHEV) sind die Verbrauchs- und Emissionswerte von Kraftstoff und elektrischer Energie getrennt zu erfassen und gemäß *DIN EN 16258* zu bilanzieren. Sofern mehrere Fahrzeugtypen im Betrieb eingesetzt werden, erfolgt die Emissionsberechnung fahrzeugbezogen und differenziert nach spezifischen Fahrleistungen sowie nach den jeweils zugeordneten Verbrauchskennwerten. Die resultierenden Werte werden im Anschluss auf Basis der insgesamt geleisteten $P_{km_{\text{gefahren}}}$ allokiert.

Die für die Bilanzierung erforderlichen Faktoren, darunter der *Well-to-Wheel*-Energiefaktor (e_w), der *WtW*-Emissionsfaktor (g_w), der *TtW*-Energiefaktor (e_t) sowie der entsprechende THG-Emissionsfaktor (g_t), sind kraftstoffspezifisch in Tabelle 4.1 aufgeführt. Soweit nicht anders gekennzeichnet (durch ^a, ^b oder ^c), basieren die Angaben auf den Vorgabewerten aus Anhang A der *DIN EN 16258* (DIN, 2013, S. 23).

Für die Bilanzierung der Linienbedarfsverkehre werden die Emissions- und Energiefaktoren der in Deutschland üblichen Standardkraftstoffe Dieseldieselkraftstoff B7 und Ottokraftstoff E5 verwendet. Diese Auswahl begründet sich durch deren breite Marktabdeckung im nationalen Straßenverkehr (Shell, 2024a, 2024b). Die entsprechenden Referenzwerte sind in der *DIN EN 16258* im Anhang, Tabellen A.2 und A.4, dokumentiert (DIN, 2013, S. 25–26).

Tab. 4.1: Energie- und Emissionsfaktoren verschiedener Kraftstofftypen (nach Bruder und Klemmer, 2024, Tab. 3-1, S. 26)

Kraftstofftyp	Energiefaktor			THG-Emissionsfaktor		
	Einheit	TTW (e_t)	WTW (e_w)	Einheit	TTW (g_t)	WTW (g_w)
Diesel (ohne Biodiesel)	MJ/l	35,9	42,7	kg CO ₂ e/l	2,670	3,240
Ottokraftstoff (ohne Ethanol)	MJ/l	32,2	37,7	kg CO ₂ e/l	2,420	2,880
Dieseldieselkraftstoff-B7 ^a	MJ/l	35,7	44,5	kg CO ₂ e/l	2,480	3,170
Ottokraftstoff-E5 ^a	MJ/l	31,7	38,4	kg CO ₂ e/l	2,300	2,800
Strommix DE ^c	MJ/kWh	3,6	9,7 ^b	kg CO ₂ e/kWh	0,000 ^c	0,498 ^c
Ökostrom DE ^c	MJ/kWh	3,6	9,7 ^b	kg CO ₂ e/kWh	0,000 ^c	0,056 ^c

^a Dieseldieselkraftstoff B7 ist der Standardkraftstoff für Fahrzeuge mit dieselmotorischem Antrieb in Deutschland und der EU und weist einen Marktanteil von 99 % auf (Shell, 2024a); Ottokraftstoff E5 ist hingegen der Standardkraftstoff für Fahrzeuge mit Benzinantrieb in Deutschland und der EU (Shell, 2024b). Die Daten für Energiefaktor und THG-Emissionen stammen jedoch aus der *DIN EN 16258*.

^b Die zugrunde liegenden Daten stammen aus dem Leitfaden Berechnung von THG-Emissionen in Spedition und Logistik gemäß *DIN EN 16258* (Deutscher Speditions- und Logistikverband e. V. [DSLVL], 2013, S. 12).

^c Die Daten wurden den LANUK Emissionsfaktoren der Klimaneutralen Landesverwaltung entnommen (vgl. LANUK, 2022, Emissionsfaktoren 2022).

Im Hinblick auf elektrische Energie wurden zwei Stromvarianten berücksichtigt: zum einen der bundesweite Strommix einschließlich Vorkette, zum anderen Ökostrom mit Vorkette auf Basis der Stromkennzeichnung für Nordrhein-Westfalen. Diese Differenzierung erfolgt, da alle betrachteten Systeme in diesem Bundesland betrieben werden. Die zugrunde gelegten Werte für THG-Emissionen und Energiegehalt stammen vom *Landesamt für Natur, Umwelt und Klima Nordrhein-Westfalen (LANUK)* und beziehen sich auf das Jahr 2022 (vgl. LANUK, 2022, Emissionsfaktoren 2022).

Der *Well-to-Wheel*-Energiefaktor (e_w) für beide Stromarten wurde auf Basis des Leitfadens zur Anwendung der *DIN EN 16258* des DSLV (Deutscher Speditions- und Logistikverband e. V.) übernommen. Die dort enthaltenen Werte stammen aus dem Jahr 2013 (DSLVL, 2013, S. 12). Obwohl die DIN vorsieht, möglichst aktuelle Datenquellen zu verwenden, stehen für diesen Anwendungsfall keine aktuelleren öffentlich zugänglichen

Vorgaben zur Verfügung.

Da in der THG-Bilanzierung neben Fahrzeugen mit konventionellen Antrieben (Diesel- und Ottomotoren) auch rein batterieelektrische Fahrzeuge (Battery Electric Vehicles, BEV), Plug-in-Hybride (Plug-in Hybrid Electric Vehicles, PHEV) sowie Range-Extender-Fahrzeuge (RE) einbezogen werden, ist eine differenzierte Betrachtung der emissionsrelevanten Systemgrenzen erforderlich.

Im Fahrbetrieb (*TtW*) verursachen vollelektrische Fahrzeuge keine direkten lokalen Emissionen. Jedoch entstehen Emissionen im vorgelagerten Bereich der Energiebereitstellung, insbesondere bei Stromerzeugung, Netzdurchleitung und Konversion, die im Rahmen der *WtT*-Analyse zu erfassen sind. Da bei Elektrofahrzeugen sämtliche relevanten Emissionen ausschließlich in dieser Vorkette auftreten, entspricht die *WtW*-Bilanz, als Summe aus *WtT*- und *TtW*-Anteilen, bei reinem Batterieantrieb vollständig den vorgelagerten Emissionen.

4.3 Ansätze zur Datenerfassung und -vereinheitlichung

In diesem Kapitel werden die den THG-Bilanzierungen gemäß *DIN EN 16258* zugrunde liegenden Datenstrukturen und -annahmen objektiv dargestellt und die zugrunde liegenden Datenquellen beschrieben.

Fahrzeugmodelle:

Die Auswahl der betrachteten Fahrzeugmodelle orientiert sich an den im Jahr 2022 in den untersuchten Ridepooling-Systemen eingesetzten Fahrzeugtypen. Ergänzend wurden weitere Modelle aus der „VDV-Mitteilung 10016: Hinweise zur Ausschreibung von Linienbedarfsverkehren - Erste Erkenntnisse aus der Praxis von On-Demand-Verkehren“ berücksichtigt (vgl. VDV, 2021, S. 21–25). Für die LEVC-TX5-Vista-Fahrzeuge liegen nach der DAT keine konkreten Verbrauchswerte vor (Deutsche Automobil Treuhand GmbH [DAT], 2022, S. 77). Zur Abschätzung wurden daher die Verbrauchsdaten des Volvo XC90 Recharge T8 AWD herangezogen, da beide Modelle auf demselben Chassis basieren und denselben Antriebsstrang verwenden.

Spezifischer Kraftstoff- und Energieverbrauch:

Der spezifische Kraftstoff- und Energieverbrauch je Entfernung wurde für die genannten Fahrzeugmodelle auf Grundlage von Verbrauchsdaten aus dem „Leitfaden zu Energieverbrauch und CO₂-Emissionen“ der Deutschen Automobil Treuhand (DAT) ermittelt (DAT, 2022, S. 44, 47, 77). Diese Daten wurden mithilfe verschiedener Testverfahren erhoben und bilden die methodische Basis der weiteren Analyse (s. Tabelle 4.2).

Das WLTP-Verfahren wurde als standardisierte Typgenehmigungsgrundlage herangezogen, ist jedoch insbesondere bei PHEV kritisch zu bewerten, da zentrale Annahmen zur elektrischen Fahranteilsnutzung unter realen Einsatzbedingungen häufig nicht erreicht werden (vgl. Plötz et al., 2022, S. 1–2).

Für die in dieser Studie betrachteten Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor lagen keine

WLTP-Verbrauchsdaten vor. Stattdessen wurden Verbrauchswerte gemäß dem NEFZ-Prüfverfahren (Neuer Europäischer Fahrzyklus) verwendet. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass standardisierte Typprüfverfahren reale Fahrbedingungen nur eingeschränkt abbilden und insbesondere bei Plug-in-Hybridfahrzeugen zu deutlich niedrigeren offiziellen Verbrauchs- und Emissionswerten führen können als unter realen Nutzungsbedingungen beobachtet wird (vgl. Plötz et al., 2022, S. 1–2; Plötz, 2022, vgl. Abschn. „Plug-in-Hybride verbrauchen bei der Nutzung mehr als offiziell angegeben“). Eine methodische Einordnung der verwendeten Testverfahren erfolgt in Kapitel 4.6. Eine Übersicht der betrachteten Fahrzeugmodelle sowie der jeweils verwendeten Verbrauchswerte ist in Tabelle 4.2 dargestellt. Neben den Antriebsarten und spezifischen Verbrauchswerten ist auch die jeweils zur Berechnung herangezogene konkrete Fahrzeugkonfiguration ausgewiesen. Verbrauchswerte, die auf dem WLTP-Verfahren basieren, sind entsprechend gekennzeichnet (a, b, c).

Tab. 4.2: Fahrzeugmodelle und Verbrauchswerte (nach Bruder und Klemmer, 2024, Tab. 6-1, S. 84)

Fahrzeugmodell ^a	Benzin [l/100 km]	Diesel [l/100 km]	Strom [kWh/100 km]	Konkrete Fahrzeugauswahl ^b
Mercedes Vito 116 CDI TourerPro	–	8,5	–	Vito lang 116 CDI
LEVC TX (HRE) Vis- ta Comfort Plus	1,35 ^c	–	21,55 ^c	Volvo XC90 Recharge T8 AWD
Nissan eNV 200	–	–	20,6 ^c	Nissan eNV 200
Mercedes eVito LR (Langer Radstand)	–	–	29,95	eVito Tourer PRO ex- tra lang (90 kWh)
Mercedes eVito EQV	–	–	30,2	EQV 300 extra lang

^a nach VDV (vgl. 2021, S. 21–25); ^b nach DAT (2022, S. 44, 47, 77); ^c gemäß WLTP-Verfahren

Fahrzeugaufleistung und Leerkilometer:

Im Rahmen der Datenerhebung werden die Fahrleistungen der Fahrzeuge differenziert erfasst. Dabei wird zwischen Fahrten mit mindestens einem beförderten Fahrgast (Fahrzeugkilometer_{besetzt}) und Leerfahrten ohne Passagiere (Fahrzeugkilometer_{leer}) differenziert. Letztere entstehen vor allem durch Zu- und Abfahrten im Zusammenhang mit der Durchführung der Transportaufträge, aber auch auf dem Weg vom Betriebshof zu den Betriebsgebieten. Die entsprechenden Rohdaten wurden über die flotten- und schichtbezogenen Schnittstellen der Dispositionssoftware erhoben, welche den zugrunde liegenden Steuerungsalgorithmus für die Einsatzplanung der Fahrzeuge bereitstellt. Um die Datenqualität sicherzustellen, ist gemäß VDV (2025b) darauf zu achten, dass die Abweichung zwischen den auf Basis der App ermittelten Fahrdistanzen und den Odometerwerten der Fahrzeuge 2 % nicht überschreitet (vgl. VDV, 2025b, S. 22). Da die entsprechende Empfehlung erst nach dem betrachteten Zeitraum veröffentlicht wurde, wird davon ausgegangen, dass eine Überprüfung im operativen Fahrbetrieb erfolgt ist. Aufgrund der geringen potenziellen Abweichung wird dieser Aspekt in der vorliegenden THG-Analyse nicht weiter berücksichtigt.

Ladung bzw. Beförderungskapazität:

Die Beförderungskapazität der Linienbedarfsverkehre wird anhand der Anzahl transportierter Fahrgäste sowie der realisierten Fahrtanfragen bzw. Buchungen_{durchgeführt} erfasst. Die entsprechenden Daten werden über die buchungsbezogenen Schnittstellen der von den Dispositionssoftware-Anbietern bereitgestellten Systeme bezogen.

Emissionsannahmen:

Die Annahmen der Emissionen der eingesetzten Energie- und Kraftstoffarten basieren im Wesentlichen auf den Vorgaben der *DIN EN 16258*. Ergänzende Informationen finden sich in Kapitel 4.2 bzw. in Tabelle 4.1.

Betrachtungszeitraum:

Für die THG-Bilanzierung stellt der gewählte Betrachtungszeitraum eine zentrale methodische Grundlage dar, da er sowohl die Datenbasis als auch die Vergleichbarkeit zwischen den untersuchten Systemen bestimmt. Um konsistente Rahmenbedingungen sicherzustellen, wurde ein einheitlicher Zeitraum vom 01.01.2022 bis zum 31.12.2022 festgelegt. Die zeitliche Verortung der analysierten (Pilot-)Projekte innerhalb dieses Bezugsrahmens ist in Abbildung 4.3 dargestellt.

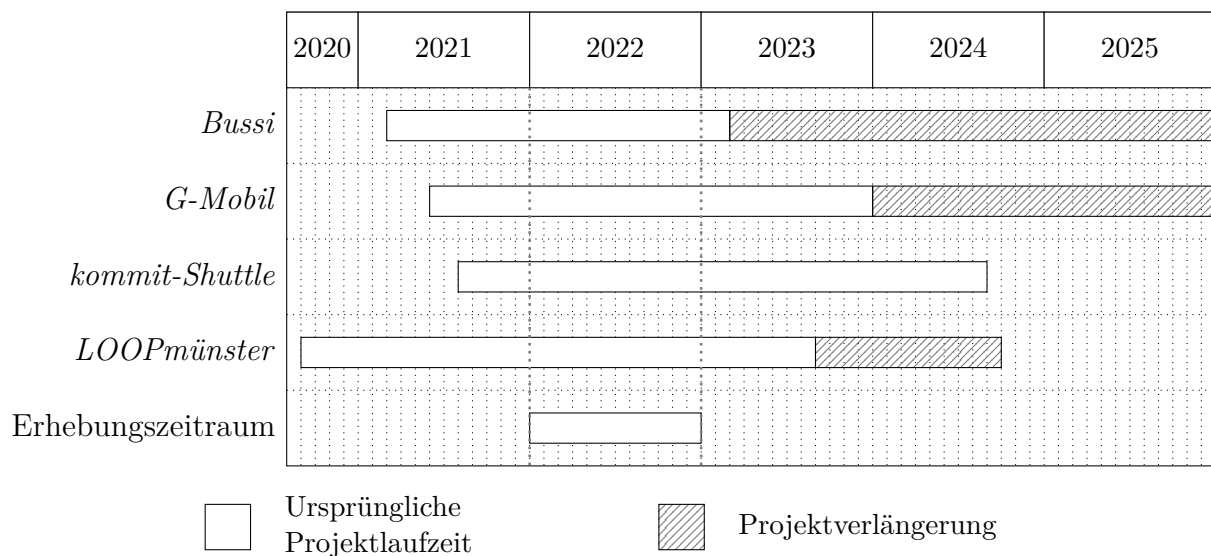


Abb. 4.3: Projektlaufzeiten der untersuchten Linienbedarfsverkehre und Ableitung des Evaluationszeitraums (nach Tab. 3-3 Bruder und Klemmer, 2024, S. 29)

Zwischen dem 1. Juni und dem 31. August 2022 galt bundesweit das sogenannte 9-Euro-Ticket, das zu einer temporären Veränderung der Fahrgastnachfrage im öffentlichen Personennahverkehr führte. Auch wenn anzunehmen ist, dass diese Maßnahme die Nachfrage in den untersuchten Systemen beeinflusste, wurde sich für den Betrachtungszeitraum 2022 entschieden. Die Wahl beruht auf der Annahme, dass bis 2022 in allen vier betrachteten Systemen ein stabiler Betriebszustand erreicht war: Die Nutzerinnen und Nutzer hatten sich an das Angebot des Linienbedarfsverkehrs gewöhnt, die betrieblichen Abläufe einschließlich der Leitstellenprozesse waren etabliert und pandemiebedingte Einschränkungen wirkten sich nicht mehr signifikant auf Nachfrage oder Betrieb aus. Zudem war der

Betrieb aller analysierten Systeme über das Jahr 2022 hinweg kontinuierlich sichergestellt. Ausschlaggebend hierfür war die ganzjährige Verfügbarkeit von Betriebsdaten, die Etablierung stabiler Betriebszustände in allen Systemen sowie der Umstand, dass eine kürzere oder künstlich segmentierte Betrachtung die Vergleichbarkeit und Vollständigkeit der THG-Analyse deutlich eingeschränkt hätte. Darüber hinaus ermöglicht die Analyse eines vollständigen Kalenderjahres eine Berücksichtigung saisonaler Effekte und stellt eine konsistente Grundlage für jährliche Emissionsbilanzen dar.

Datenharmonisierung:

Die für die THG-Bilanzierung erforderlichen Betriebsdaten der untersuchten Ridepooling-Verkehre wurden aus den digitalen Schnittstellen der jeweiligen Dispositionssysteme extrahiert. Sie umfassen Buchungs-, Flotten- sowie schichtbezogene Betriebsdaten der vier analysierten Linienbedarfsverkehre: *Bussi* (*Via Transportation Inc.*), *G-Mobil* (*ioki GmbH*), *kommit-Shuttle* (*ioki GmbH*) und *LOOPmünster* (*door2door GmbH*). Aufgrund unterschiedlicher Systemarchitekturen der Softwareanbieter weisen die Daten teils strukturelle Unterschiede auf. Insbesondere die Buchungsdaten zeigten eine hohe Variabilität. Zur Harmonisierung wurde ein sogenannter Buchungstrichter angewandt, der es ermöglichte, die heterogenen Datenformate in eine einheitliche, analysierbare Struktur zu überführen (s. Abbildung 4.4). Im Gegensatz dazu sind die Flotten- und Schichtdaten der verschiedenen Software-Anbieter weitgehend konsistent und können größtenteils ohne aufwändige Nachbearbeitung verwendet werden.

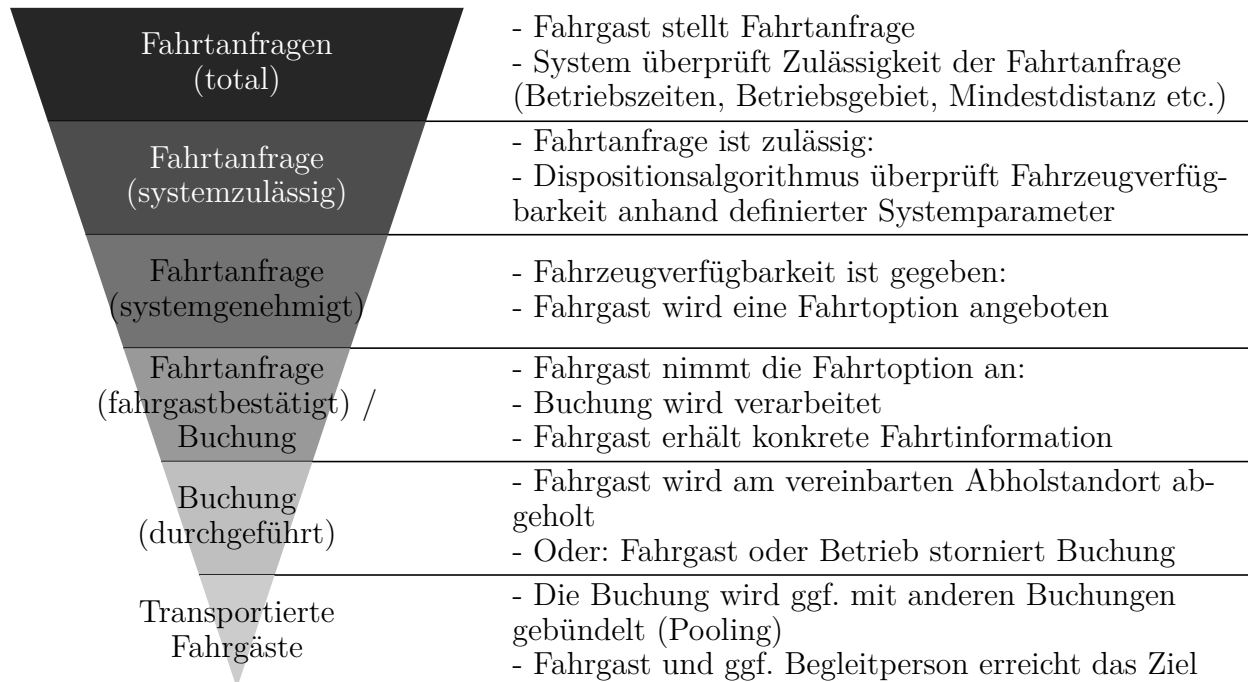


Abb. 4.4: Buchungstrichter von Linienbedarfsverkehren (nach Hartz et al., 2024, S. 27)

Betriebliche Effizienzgrößen:

Die Analyse von betrieblichen Effizienzgrößen soll einen systematischen Vergleich mit anderen On-Demand-Verkehren ermöglichen und zugleich Zusammenhänge zwischen be-

trieblicher Leistungsfähigkeit und den Ergebnissen der THG-Bilanzierung aufzeigen. Auf dieser Grundlage lassen sich Rückschlüsse für potenzielle Handlungsempfehlungen ableiten. Tabelle 4.3 gibt einen Überblick über die in dieser Arbeit betrachteten zentralen Leistungskennzahlen (KPIs), die auf den Empfehlungen des VDV basieren (VDV, 2025b). Eine vollständige Auflistung der verwendeten Kennzahlen findet sich im Anhang A.1. s

Tab. 4.3: Zentrale Messgrößen, Berechnungslogik und Einheiten im Kontext von On-Demand-Verkehren (nach VDV, 2025b, S. 22-23)

Messgröße	Berechnungslogik	Einheit
Produktive Fahrzeugstunden	Summe der Zeit in Schichten zwischen Schichtstart und Schichtende (Events in der Fahrpersonal-App), ausgenommen die tatsächliche Pausenzeit. Fahrten zwischen Depot und Betriebsgebiet sind einbezogen, da sie vom Aufgabenträger bezahlt werden.	h
Personenkilometer (Pkm _{gefahren})	Summe der gefahrenen Fahrzeugkilometer, multipliziert mit der jeweils an Bord befindlichen Fahrgastanzahl.	km
Buchungskilometer (Bukm)	Summe der direkten Distanzen (schnellste Route laut Google Maps o.ä.) zwischen Abhol- und Absetzpunkt, multipliziert mit der Fahrgastanzahl.	km
Poolingquote	„Personenkilometer“ geteilt durch „Fahrzeugkilometer“ – entspricht der Bündelungsquote gemäß § 50 PBefG.	-
Auslastung	„Fahrgäste“ geteilt durch „Produktive Fahrzeugstunden“.	-
Produktivität	„Fahrgäste“ geteilt durch „Produktive Fahrzeugstunden“ zwischen erster Abholung und letztem Absetzen eines Fahrgasts. Vergleichbar mit der Produktivität einer Buslinie.	-
Verfügbarkeit	Anteil von Fahrtanfragen, für die eine On-Demand-Option bereitgestellt werden konnte (theoretisch mögliche Fahrten innerhalb der Bedienzeiten, technisch korrekt, ohne Modalfilter). Gezählt wird, ob ein Angebot unter Einhaltung von max. Wartezeit und Laufdistanz unterbreitet wurde – unabhängig von der Annahme durch den Fahrgast.	%
Systemeffizienz	„Buchungskilometer“ geteilt durch „Fahrzeugkilometer“.	-
Besetzungsquote	„Personenkilometer“ geteilt durch „Fahrzeugkilometer _{besetzt} “	-
Umwegfaktor	„Personenkilometer“ geteilt durch „Buchungskilometer“.	-
Leerkilometeranteil	„Fahrzeugkilometer ohne Fahrgäste“ geteilt durch „Fahrzeugkilometer“.	-
Mittlere Fahrtstrecke	Mittelwert der tatsächlichen Fahrtstrecken von Abholung bis Absetzen, inkl. aller Umwege aufgrund von Pooling und Verkehrsumgehung. Entspricht „Personenkilometer“ geteilt durch „Fahrgäste“.	km

Pkm_{gefahren}:

Die Pkm_{gefahren} nehmen im Rahmen dieser Arbeit eine zentrale Rolle ein. Während die *DIN EN 16258* Pkm_{gefahren} grundsätzlich als Summe der individuell zurückgelegten Distanzen aller Fahrgäste definiert (s. Kapitel 4.1), erfolgt die Berechnung in dieser Arbeit, abhängig von der Datenverfügbarkeit, nach den in den VDV-Schriften beschriebenen Ansätzen. Die gewählte Einheit erlaubt eine alloktationsbasierte Bewertung und dient dem Vergleich sowohl mit anderen Verkehrsmodi als auch zwischen verschiedenen Ridepooling-Systemen. Zur Berechnung können grundsätzlich zwei unterschiedliche Ansätze herangezogen werden. Im ÖPNV definiert der VDV die Pkm_{gefahren} als Produkt aus der Anzahl der Fahrgäste und der durchschnittlich zurückgelegten Entfernung, der sogenannten mittleren Fahrtweite (vgl. VDV, 2025a, Eintrag Personenkilometer). Dies entspricht der folgenden Berechnungsformel:

$$\text{Pkm}_{\text{gefahren}} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\text{Fzkm}_{\text{besetzt},i}}{B_{\text{durchgeführt},i}} \cdot F_i \right) \quad (4.6)$$

mit:

- Pkm_{gefahren}: Anzahl der gesamten gefahrenen Personenkilometer
- n : Anzahl der betrachteten Ridepooling-Systeme im Untersuchungszeitraum
- Fzkm_{besetzt, i} : gesamte Fahrzeugkilometer mit Fahrgastbesetzung im System i
- $B_{\text{durchgeführt},i}$: Anzahl der durchgeführten Buchungen im System i
- F_i : Gesamtzahl der transportierten Fahrgäste im System i

Formel 4.6 stellt somit einen Näherungswert auf Basis aggregierter Durchschnittswerte dar. Fahrtenbündelungen und die damit verbundenen Umwege werden hierbei pauschal über die Fzkm_{besetzt} berücksichtigt.

Ein alternativer Berechnungsansatz für die Pkm_{gefahren} in Linienbedarfsverkehren findet sich in der VDV-Schrift 10017 (vgl. VDV, 2025b, S. 22). Dieser basiert auf der Aggregation einzelner Buchungsdaten und entspricht damit dem mathematischen Äquivalent zur Definition der *DIN EN 16258*. Voraussetzung für die Anwendung ist jedoch, dass entweder die Fzkm mit Fahrgastbesetzung (Fzkm_{besetzt}) je Buchung oder direkt die aus den Einzelbuchungen abgeleiteten Pkm_{gefahren} vorliegen:

$$\text{Pkm}_{\text{gefahren}} = \sum_{i=1}^n \left(\text{Fzkm}_{\text{besetzt},i} \cdot F_i \right) \quad (4.7)$$

mit:

- Pkm_{gefahren}: Gesamte Anzahl der gefahrenen Personenkilometer
- Fzkm_{besetzt, i} : Fahrzeugkilometer (mit Fahrgastbesetzung) der Buchung i
- F_i : Anzahl der Fahrgäste an Bord bei Buchung i
- n : Anzahl der betrachteten Buchungen

Der Ansatz der einzelfallbasierten Aggregation (Formel 4.7) bildet die Leistung des Systems präzise ab und wird methodisch bevorzugt. Fahrtenbündelungen fließen hier explizit über die individuell gefahrenen Fzkm_{besetzt} ein. Da die reale Fahrtweite bzw. die Fzkm_{besetzt} nicht für alle untersuchten Systeme in Form von Einzelbuchungsdaten vorlie-

gen, erfolgt die Berechnung im Rahmen dieser Arbeit einheitlich nach dem Näherungsansatz auf Basis aggregierter Durchschnittswerte (Formel 4.6). Dieses Vorgehen stellt die Vergleichbarkeit zwischen den Systemen sicher und vermeidet methodische Inkonsistenzen.

4.4 Vergleichende THG-Bilanzierung von Ridepooling-Systemen unter Berücksichtigung substituierter Verkehre

Die Umweltwirkungen eines Linienbedarfsverkehrsangebots ergeben sich nicht allein aus dessen isolierter Betrachtung, sondern auch durch Wechselwirkungen mit anderen Verkehrsmitteln, also der Verkehrsverlagerung, Kannibalisierung innerhalb bestehender Systeme sowie der Induktion neuen Verkehrsaufkommens. Für eine Bewertung der Klimawirkung von Ridepooling-Angeboten ist daher nicht allein entscheidend, wie viele THG-Emissionen das Angebot unmittelbar verursacht, sondern insbesondere, welche Verkehrsmittel durch das neue Angebot verdrängt oder ersetzt werden. Wird der MIV substituiert, kann dies zur Emissionsreduktion beitragen; erfolgt hingegen eine Verlagerung des Umweltverbunds (Fuß-, Rad- oder ÖPNV), können sich gegenteilige Effekte einstellen.

Um diesen Zusammenhängen methodisch gerecht zu werden, wird ein Vorgehen angewandt, das diese relevanten Einflussgrößen systematisch einbezieht und eine differenzierte Bewertung der Angebote auf Grundlage der tatsächlichen Mobilitätsnutzung im jeweiligen Untersuchungsraum ermöglicht (s. Abbildung 4.5). Konkret wird dies über kontrafaktische Substitutionsszenarien operationalisiert, in denen die durch das Ridepooling-System erbrachte Verkehrsleistung hypothetisch auf alternativ genutzte Verkehrsmittel verteilt wird (im Folgenden als substituierte Verkehrsmittel bezeichnet). Der Begriff *kontrafaktisch* bezeichnet hierbei die Annahme eines hypothetischen Referenzfalls („Mobilität ohne Ridepooling“), wodurch die Nettoeffekte der THG-Emissionen im Vergleich zur realen Situation, mit Ridepooling, bestimmt werden können (s. Kapitel 6.4).

Das methodische Vorgehen sieht zunächst die THG-Bilanzierung der Linienbedarfsverkehre auf Grundlage des *WtW*-Ansatzes gemäß *DIN EN 16258* vor (s. linke Seite in Abbildung 4.5). Als Bezugsgröße wird zunächst die Verkehrsleistung des Ridepooling-Systems in $\text{Pkm}_{\text{gefahren}}$ ermittelt (s. Kapitel 4.3). Darauf aufbauend erfolgt die getrennte Berechnung des Energieverbrauchs für jeden Energieträger und jeden spezifischen Fahrzeugtyp anhand der Fahrleistungsdaten. Auf Grundlage des Energieverbrauchs werden anschließend die THG-Emissionen in CO_2 -Äquivalenten unter Berücksichtigung entsprechender Emissionsfaktoren berechnet und aggregiert. Abschließend erfolgt die Allokation der Emissionen auf die Bezugsgröße $\text{Pkm}_{\text{gefahren}}$ (s. Kapitel 4). Die zugrunde liegenden Datensätze werden in Kapitel 4.3 erläutert. Die zugrunde liegende Berechnungsmethodik wird in Kapitel 4.2 beschrieben.

In einem zweiten Schritt erfolgt eine THG-Bilanzierung für ein hypothetisches Mobilitätsverhalten im Untersuchungsraum ohne Ridepooling-Angebot, der Referenzmobilität im Betriebsgebiet (s. rechte Seite in Abbildung 4.5). Grundlage der Berechnung ist die

Verkehrsleistung des realen Ridepooling-Systems, gemessen entweder in $\text{Pkm}_{\text{gefahren}}$, in der Anzahl beförderter Fahrgäste oder in der zurückgelegten Wegstrecke, abhängig vom jeweils angewandten methodischen Ansatz (V1-V5). Die Annahmen über die jeweils ersetzten Verkehrsmittel basieren auf Modal-Split-Daten sowie ergänzenden Nutzerbefragungen der wissenschaftlichen Begleitforschungen (Wetzchewald & Schäfer-Sparenberg, 2022, S. 24; Hartz et al., 2024, S. 59–60; Wittowsky & Malow, 2022, S. 65; Koska & Wetzchewald, 2022, S. 25).

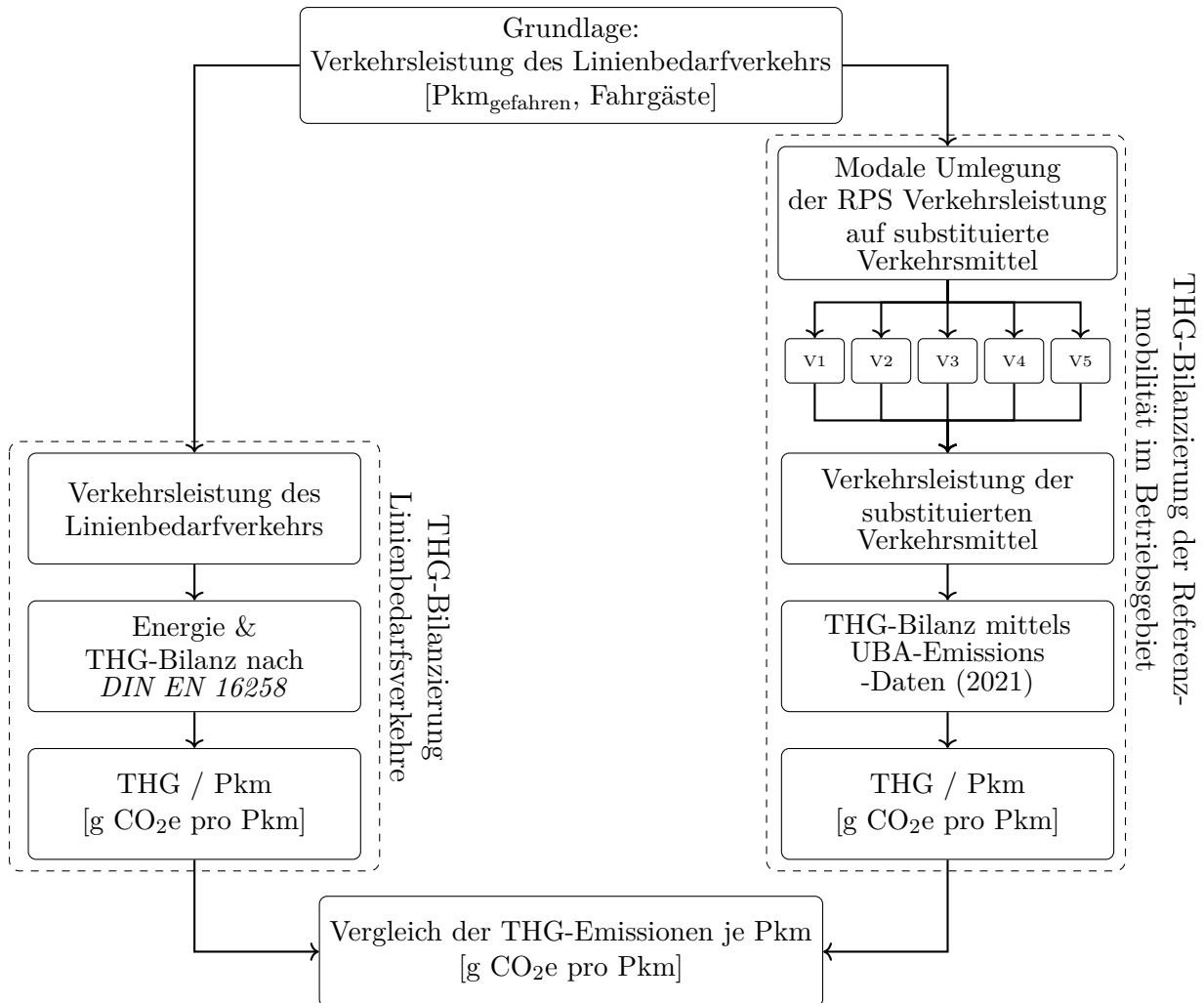


Abb. 4.5: Methodisches Vorgehen zur THG-Bewertung von Linienbedarfsverkehren im Vergleich zur Referenzmobilität im Betriebsgebiet (in Anlehnung an Abb. 3-5 Bruder und Klemmer, 2024, S. 31)

Zur Quantifizierung der modalen Umlegung der Verkehrsleistung des Ridepooling-Systems werden fünf methodische Ansätze angewandt, die unterschiedliche Annahmen zur Verkehrsmittelwahl im Substitutionsszenario abbilden:

1. Variante 1 (V1): Modal Split (Wege),
2. Variante 2 (V2): Modal Split (Pkm),
3. Variante 3 (V3): Umfragedaten (Wege),

4. Variante 4 (V4): Umfragedaten (Pkm),
5. Variante 5 (V5): Modal Split (Wege nach Entfernungsklasse mit Buchungskilometer)

Für die resultierenden Verkehrsleistungen der substituierten Verkehrsmittel werden die jeweiligen spezifischen Emissionsfaktoren (in g CO₂e/Pkm) gemäß den Angaben des Umweltbundesamts herangezogen (UBA, 2021, Tab. 3). Auf dieser Basis wird der hypothetische Emissionsausstoß berechnet und, analog zum Ridepooling-System, auf einen Pkm_{gefahren} normiert.

Nachfolgend werden die angewandten Methoden zur modalen Umlegung erläutert, mit denen das hypothetische Mobilitätsverhalten ohne Ridepooling-Angebot abgebildet wird.

Variante 1 (V1) - Modale Umlegung der Verkehrsleistung des Ridepooling-Systems auf Basis des Modal Splits nach Wegen:

Mithilfe dieser Methode wird die hypothetische Verkehrsleistung der substituierten Verkehrsmittel auf Basis des Modal Splits nach Wegen geschätzt. Es wird angenommen, dass die Fahrgäste ihr Mobilitätsverhalten, in Abwesenheit des Ridepooling-Angebots, gemäß der lokal vorliegenden Verteilung der Verkehrsmittelwahl (Modal Split) ausgerichtet hätten. Da im Modal Split nach Wegen die Anzahl der Wege der Anzahl der beförderten Personen entspricht, kann die Gesamtanzahl der im Ridepooling-System transportierten Personen unmittelbar verwendet werden. Auf dieser Grundlage erfolgt eine anteilige Zuordnung der Fahrgäste zu den im Modal Split enthaltenen Verkehrsmitteln. Die so ermittelten Wege je Verkehrsmittel werden anschließend mit der durchschnittlichen Fahrtdistanz des Ridepooling-Systems multipliziert, um die hypothetischen Pkm_{gefahren} zu berechnen. Diese werden mit den jeweiligen Emissionsfaktoren des Umweltbundesamtes multipliziert (UBA, 2021, Tab. 3), um den resultierenden CO₂e-Ausstoß je Verkehrsmittel zu ermitteln. Abschließend wird die Gesamtemission auf die Pkm_{gefahren} der substituierten Verkehrsmittel normiert. Die THG-Bilanzierung für die substituierten Verkehrsmittel nach V1 ist wie folgt aufgebaut:

1. **Modale Umlegung der Verkehrsleistung des Ridepooling-Systems auf Referenzmobilität im Betriebsgebiet**

$$W_i = W_{\text{RPS}} \cdot MS_i^{\text{Weg}} \quad (4.8)$$

2. **Berechnung der hypothetischen Personenkilometer:**

$$\text{Pkm}_i = W_i \cdot \bar{d}_{\text{RPS}} \quad (4.9)$$

3. **Bilanzierung der THG-Emissionen:**

$$\text{Emission}_i = \text{Pkm}_i \cdot EF_i \quad (4.10)$$

4. Normierung auf Personenkilometer:

$$\text{Emissionen}_{\text{Referenzmobilität}} = \frac{\sum_i \text{Emission}_i}{\sum_i \text{Pkm}_i} \quad (4.11)$$

mit:

- W_i : Anzahl der Wege mit Verkehrsmittel i
- W_{RPS} : Anzahl der im Ridepooling-System zurückgelegten Wege
- MS_i^{Weg} : Modal-Split-Anteil des Verkehrsmittels i (nach Wegen)
- $\bar{d}_{\text{RPS}}$: durchschnittliche Fahrtstrecke des Ridepooling-Systems
- Pkm_i : hypothetische $\text{Pkm}_{\text{gefahren}}$ für Verkehrsmittel i
- EF_i : Emissionsfaktor von Verkehrsmittel i in g CO₂e/Pkm (UBA, 2021, Tab. 3)
- Emission_i : Emissionen durch Verkehrsmittel i (in g CO₂e)
- $\text{Emissionen}_{\text{Referenzmobilität}}$: THG-Emissionen (aggregiert und allokiert) der Referenzmobilität im Betriebsgebiet (in g CO₂e / Pkm)

Der Ansatz basiert auf breit verfügbaren Modal Split Daten auf kommunaler oder regionaler Ebene. Gleichzeitig berücksichtigt das Verfahren keine unterschiedlichen Wegelängen der einzelnen Verkehrsmittel. Damit bleibt unberücksichtigt, dass je nach Verkehrsmittel systematisch unterschiedliche Distanzen zurückgelegt werden, beispielsweise bei der Nutzung des motorisierten Individualverkehrs im Vergleich zum Fußverkehr. Auch potenzielle Verkehrsinduktionseffekte werden nicht erfasst. Darüber hinaus basiert die Methode auf der Annahme, dass das Mobilitätsverhalten von Nutzerinnen und Nutzern des Linienbedarfsverkehrs dem allgemeinen Modal Split der Gesamtbevölkerung entspricht. Empirische Untersuchungen legen jedoch nahe, dass die Nutzengruppe des Linienbedarfsverkehrs häufiger den Umweltverbund nutzt, multimodal eingestellt ist (vgl. Kostorz et al., 2021, S. 8–9) und zudem seltener über einen privaten Pkw verfügt (vgl. Hartz et al., 2024, S. 8–15).

Variante 2 (V2) - Abschätzung der substituierten Verkehrsleistung anhand des Modal Split nach Personenkilometern:

Die Methode V2 schätzt die hypothetische Verkehrsleistung der substituierten Verkehrsmittel auf Basis des Modal Splits nach Verkehrsleistung (Pkm). Es wird angenommen, dass die im Ridepooling-System erbrachte Verkehrsleistung, in Abwesenheit des Angebots, proportional zur Verteilung der Pkm auf die Verkehrsmittel im Modal Split (nach Pkm) entfällt.

Dazu wird die im Ridepooling-System insgesamt zurückgelegte Verkehrsleistung, gemessen an $\text{Pkm}_{\text{gefahren}}$, gemäß dem Modal Split nach Verkehrsleistung auf die verschiedenen Verkehrsmittel verteilt. Die so bestimmten hypothetischen $\text{Pkm}_{\text{gefahren}}$ pro Verkehrsmittel werden anschließend mit den entsprechenden Emissionsfaktoren des Umweltbundesamtes multipliziert (UBA, 2021, Tab. 3), um die resultierenden THG-Emissionen je Verkehrsmittel zu berechnen. Abschließend erfolgt eine Normierung auf die insgesamt zurückgelegten Pkm. Die THG-Bilanzierung der substituierten Verkehrsmittel nach V2 ist wie folgt aufgebaut:

1. Modale Umlegung der Verkehrsleistung des Ridepooling-Systems auf Referenzmobilität im Betriebsgebiet:

$$\text{Pkm}_i = \text{Pkm}_{\text{RPS}} \cdot MS_i^{\text{Pkm}} \quad (4.12)$$

2. Bilanzierung der THG-Emissionen:

$$\text{Emission}_i = \text{Pkm}_i \cdot EF_i \quad (4.13)$$

3. Normierung auf Personenkilometer:

$$\text{Emissionen}_{\text{Referenzmobilität}} = \frac{\sum_i \text{Emission}_i}{\sum_i \text{Pkm}_i} \quad (4.14)$$

mit:

- Pkm_i : hypothetische Personenkilometer mit Verkehrsmittel i
- Pkm_{RPS} : im Ridepooling-System erbrachte Gesamtverkehrsleistung (in $\text{Pkm}_{\text{gefahren}}$)
- MS_i^{Pkm} : Modal-Split-Anteil des Verkehrsmittels i nach Verkehrsleistung (Pkm)
- EF_i : Emissionsfaktor von Verkehrsmittel i in $\text{g CO}_2\text{e/Pkm}$ (UBA, 2021, Tab. 3)
- Emission_i : THG-Emissionen durch Verkehrsmittel i (in $\text{g CO}_2\text{e}$)
- $\text{Emissionen}_{\text{Referenzmobilität}}$: THG-Emissionen (aggregiert und allokiert) der Referenzmobilität im Betriebsgebiet (in $\text{g CO}_2\text{e} / \text{Pkm}$)

Durch die Orientierung an der Verkehrsleistung können unterschiedliche Wegelängen der einzelnen Verkehrsmittel berücksichtigt werden. Dadurch lässt sich die unterschiedliche Distanzverteilung, beispielsweise zwischen dem Fußverkehr und dem motorisierten Individualverkehr, differenzierter abbilden als bei einer ausschließlichen Betrachtung auf Wegbasis. Einschränkend ist jedoch zu beachten, dass auch dieser Ansatz keine Aussagen über Verkehrsinduktion zulässt und keine spezifische Anpassung an die Nutzerstruktur von Linienbedarfsverkehren ermöglicht.

Variante 3 (V3) - Abschätzung der substituierten Verkehrsleistung auf Basis befragungsbasierter Verkehrsmittelwahl nach Wegen:

In V3 wird die hypothetische Verkehrsleistung substituierten Verkehrsmittel auf Grundlage empirischer Verkehrsmittelwahlanteile aus Nutzerbefragungen geschätzt. Es wird angenommen, dass die im Ridepooling-System transportierten Personen, in Abwesenheit des Angebots, ihre Wege gemäß der in wissenschaftlichen Begleitforschungen erhobenen Verkehrsmittelpräferenzen durchgeführt hätten.

Dazu wird die im Ridepooling-System insgesamt erbrachte Anzahl an Wegen proportional zu den befragungsbasierten Verkehrsmittelanteilen auf die einzelnen Modi verteilt. Die resultierenden Wege je Verkehrsmittel werden mit der durchschnittlichen Fahrtdistanz des Ridepooling-Systems multipliziert, um die hypothetischen Pkm zu berechnen. Diese bilden die Grundlage zur Emissionsbewertung mittels der Emissionsfaktoren des Umweltbundesamtes (UBA, 2021, Tab. 3).

Die Berücksichtigung der Befragungsdaten ermöglicht eine Differenzierung zwischen verlagerten und induzierten Wegen. Wege, die ohne das Ridepooling-Angebot nicht stattgefunden hätten, werden in der Emissionsbilanzierung mit null angesetzt, da sie im hypothetischen Substitutionsszenario entfallen würden.

Die THG-Bilanzierung gemäß Variante 3 ist wie folgt aufgebaut:

1. **Modale Umlegung der Verkehrsleistung des Ridepooling-Systems auf Referenzmobilität im Betriebsgebiet (ohne induzierte Nachfrage):**

$$W_i = W_{\text{RPS}} \cdot (1 - \delta_{\text{ind}}) \cdot A_i^{\text{Befragung}} \quad (4.15)$$

2. **Berechnung der hypothetischen Personenkilometer:**

$$\text{Pkm}_i = W_i \cdot \bar{d}_{\text{RPS}} \quad (4.16)$$

3. **Bilanzierung der THG-Emissionen:**

$$\text{Emission}_i = \text{Pkm}_i \cdot EF_i \quad (4.17)$$

4. **Normierung auf Personenkilometer:**

$$\text{Emissionen}_{\text{Referenzmobilität}} = \frac{\sum_i \text{Emission}_i}{\sum_i \text{Pkm}_i} \quad (4.18)$$

mit:

- W_i : Anzahl hypothetischer Wege mit Verkehrsmittel i
- W_{RPS} : Anzahl der im Ridepooling-System zurückgelegten Wege
- $A_i^{\text{Befragung}}$: Anteil des Verkehrsmittels i gemäß Nutzerbefragung (nach Wegen)
- δ_{ind} : Anteil der durch das Ridepooling induzierten Wege (dimensionslos, 0-1)
- $\bar{d}_{\text{RPS}}$: durchschnittliche Fahrtstrecke im Ridepooling-System
- Pkm_i : hypothetische Personenkilometer mit Verkehrsmittel i
- EF_i : Emissionsfaktor von Verkehrsmittel i in g CO₂e/Pkm (UBA, 2021, Tab. 3)
- Emission_i : Emissionen durch Verkehrsmittel i (in g CO₂e)
- $\text{Emissionen}_{\text{Referenzmobilität}}$: THG-Emissionen (aggregiert und allokiert) der Referenzmobilität im Betriebsgebiet (in g CO₂e / Pkm)

Der Ansatz basiert auf systembezogenen Befragungsdaten und ermöglicht dadurch eine differenzierte Abbildung des Mobilitätsverhaltens der Ridepooling-Nutzenden. Im Vergleich zu generischen Modal-Split-Werten kann die Verkehrsleistung dadurch spezifischer den jeweiligen Verkehrsmitteln zugeordnet werden. Darüber hinaus erlaubt der Ansatz Rückschlüsse auf potenzielle Verkehrsinduktion, da auf Ebene der Befragungsdaten zwischen verlagerten und neu erzeugten Wegen differenziert werden kann.

Als Einschränkungen sind die begrenzte Verfügbarkeit sowie die Heterogenität der Erhebungsmethoden zu nennen. Befragungsdaten liegen nicht flächendeckend vor, und uneinheitliche Fragebögen erschweren die Vergleichbarkeit. Die Berechnung erfolgt auf Basis

einer mittleren Distanz über alle Verkehrsmittel hinweg, wodurch systematische Unterschiede in den Wegelängen zwischen den Modi, wie bereits in Variante 1, unberücksichtigt bleiben.

Variante 4 (V4) - Abschätzung der substituierten Verkehrsleistung auf Basis befragungsbasierter Modal-Split-Werte nach Verkehrsleistung (Pkm):

In Variante 4 wird die hypothetische Verkehrsleistung der substituierten Verkehrsmittel mithilfe empirisch erhobener Anteile an der Verkehrsleistung ($\text{Pkm}_{\text{gefahren}}$) geschätzt. Diese Anteile stammen aus Nutzerbefragungen von Ridepooling-Systemen. Der Berechnung liegt die Annahme zugrunde, dass die im Ridepooling-System zurückgelegten Pkm ohne das Angebot entsprechend der angegebenen Verteilung anderen Verkehrsmitteln zugeordnet worden wären. Ausgehend von der im Ridepooling-System erbrachten Verkehrsleistung (in $\text{Pkm}_{\text{gefahren}}$) erfolgt eine anteilige Zuordnung zu den Verkehrsmitteln gemäß den befragungsbasierten Verkehrsanteilen. Die daraus resultierenden hypothetischen Pkm je Verkehrsmittel werden mit den entsprechenden Emissionsfaktoren des Umweltbundesamtes (UBA, 2021, Tab. 3) multipliziert. Abschließend erfolgt analog zu den vorangegangenen Varianten eine Normierung auf die insgesamt erbrachten Pkm.

1. Modale Umlegung der Verkehrsleistung des Ridepooling-Systems auf Referenzmobilität im Betriebsgebiet:

$$\text{Pkm}_i = \text{Pkm}_{\text{RPS}} \cdot A_i^{\text{Pkm, Befragung}} \quad (4.19)$$

2. Bilanzierung der THG-Emissionen:

$$\text{Emission}_i = \text{Pkm}_i \cdot EF_i \quad (4.20)$$

3. Normierung auf Personenkilometer:

$$\text{Emissionen}_{\text{Referenzmobilität}} = \frac{\sum_i \text{Emission}_i}{\sum_i \text{Pkm}_i} \quad (4.21)$$

mit:

- Pkm_i : hypothetische Personenkilometer mit Verkehrsmittel i
- Pkm_{RPS} : im Ridepooling-System erbrachte Gesamtverkehrsleistung (in $\text{Pkm}_{\text{gefahren}}$)
- $A_i^{\text{Pkm, Befragung}}$: Anteil des Verkehrsmittels i an der Verkehrsleistung gemäß Nutzerbefragung (nach Pkm)
- EF_i : Emissionsfaktor von Verkehrsmittel i in g $\text{CO}_2\text{e}/\text{Pkm}$ (UBA, 2021, Tab. 3)
- Emission_i : Emissionen durch Verkehrsmittel i (in g CO_2e)
- $\text{Emissionen}_{\text{Referenzmobilität}}$: THG-Emissionen (aggregiert und allokiert) der Referenzmobilität im Betriebsgebiet (in g $\text{CO}_2\text{e} / \text{Pkm}$)

Die Eigenschaften dieses Ansatzes entsprechen im Wesentlichen denen von Variante 3. Durch die Nutzung empirischer Umfragedaten kann das Mobilitätsverhalten der Zielgruppe differenziert abgebildet werden. Zusätzlich können potenzielle Verkehrsinduktions-

effekte berücksichtigt werden. Im Unterschied zu Variante 3 erfolgt die Verteilung direkt auf Basis der Personenkilometer. Dadurch werden Unterschiede in den durchschnittlichen Wegelängen der einzelnen Verkehrsmittel berücksichtigt.

Variante 5 (V5) - Abschätzung der substituierten Verkehrsleistung anhand entfernungs-differenzierter Modal-Split-Daten (Wege):

In Variante 5 erfolgt die Abschätzung der hypothetischen Verkehrsleistung der substituierten Verkehrsmittel auf Grundlage eines entfernungsabhängigen Modal Splits. Dabei wird die Verkehrsmittelwahl nicht pauschal, sondern differenziert in Abhängigkeit der Wegelänge modelliert (s. Tabelle 4.4, Beispiel Münster-Hiltrup). Diese Methode trägt dem Umstand Rechnung, dass die Wahl des Verkehrsmittels stark von der zurückgelegten Distanz beeinflusst wird und ermöglicht somit eine realitätsnähere Abbildung der THG-Bilanzierung.

Tab. 4.4: Modal Split nach Entfernungsklasse (nach Ingenieurbüro Helmert, 2023, Tab. 1)

Entfernungs- klasse	Zu Fuß	Fahr- rad	E- Bike/ Pedelec	(E)- Lasten- rad	ÖV	MIV (Mit- fahrer)	MIV (Fahrer)
0–1 km	63 %	27 %	4 %	1 %	1 %	1 %	2 %
1–2 km	27 %	51 %	7 %	3 %	0 %	2 %	8 %
2–3 km	11 %	55 %	10 %	4 %	4 %	4 %	11 %
3–4 km	5 %	55 %	9 %	2 %	7 %	4 %	19 %
4–5 km	2 %	47 %	10 %	2 %	9 %	7 %	23 %
5–6 km	2 %	38 %	12 %	2 %	12 %	7 %	28 %
6–7 km	0 %	31 %	10 %	2 %	13 %	8 %	37 %
7–8 km	0 %	27 %	10 %	0 %	14 %	9 %	39 %
8–9 km	0 %	23 %	10 %	0 %	21 %	7 %	36 %
9–10 km	0 %	14 %	13 %	0 %	19 %	5 %	48 %
10–20 km	0 %	10 %	9 %	0 %	24 %	6 %	52 %
> 20 km	0 %	0 %	0 %	0 %	26 %	5 %	66 %

Zur Berechnung der hypothetischen Verkehrsleistung werden in V5 die tatsächlich im Linienbedarfsverkehr angefallenen Buchungskilometer (reale Entfernung zwischen Einstiegsstandort und Zielstandort einer Buchung) in definierte Entfernungsklassen unterteilt. Innerhalb jeder Entfernungsklasse erfolgt eine anteilige Verteilung der Verkehrsleistung auf die Verkehrsmittel gemäß den klassenspezifischen Modal-Split-Anteilen. Die so berechneten hypothetischen Pkm je Verkehrsmittel werden anschließend mit den entsprechenden Emissionsfaktoren des Umweltbundesamtes gewichtet. Abschließend erfolgt eine Normierung auf einen $\text{Pkm}_{\text{gefahren}}$.

1. Modale Umlegung der Verkehrsleistung des Ridepooling-Systems auf Referenzmobilität im Betriebsgebiet (entfernungsabhängig):

$$\text{Pkm}_i = \sum_{e=1}^k \left(\text{Pkm}_{\text{RPS},e} \cdot MS_{i,e}^{\text{Pkm}} \right) \quad (4.22)$$

2. Bilanzierung der THG-Emissionen:

$$\text{Emission}_i = \text{Pkm}_i \cdot EF_i \quad (4.23)$$

3. Normierung auf Personenkilometer:

$$\text{Emissionen}_{\text{Referenzmobilität}} = \frac{\sum_i \text{Emission}_i}{\sum_i \text{Pkm}_i} \quad (4.24)$$

mit:

- Pkm_i : hypothetische Personenkilometer mit Verkehrsmittel i
- $\text{Pkm}_{\text{RPS},e}$: im Ridepooling-System zurückgelegte Personenkilometer in Entfernungsklasse e
- $MS_{i,e}^{\text{Pkm}}$: Modal-Split-Anteil von Verkehrsmittel i in Entfernungsklasse e (nach Verkehrsleistung)
- k : Anzahl der betrachteten Entfernungsklassen
- EF_i : Emissionsfaktor von Verkehrsmittel i (in g CO₂e / Pkm)
- Emission_i : Emissionen durch Verkehrsmittel i (in g CO₂e)
- $\text{Emissionen}_{\text{Referenzmobilität}}$: aggregierte THG-Emissionen der Referenzmobilität im Betriebsgebiet (in g CO₂e / Pkm)

Im Gegensatz zu den anderen Varianten werden in Variante 5 die Buchungskilometer der Verkehre zur Bestimmung der substituierten Verkehrsleistung und Modalwahl herangezogen. Diese bilden den von den Fahrgästen gewünschten Fahrtverlauf unmittelbar ab. Durch die Anwendung entfernungs-differenzierter Modal-Split-Werte lässt sich zudem eine realitätsnähere Verkehrsmittelverteilung innerhalb der jeweiligen Distanzklassen erreichen.

Gleichzeitig sind jedoch mehrere methodische Einschränkungen zu berücksichtigen: Erstens bleiben mögliche Verkehrsinduktionseffekte unberücksichtigt. Zweitens bildet der herangezogene Modal Split die spezifische Nutzerstruktur von Linienbedarfsverkehren nur eingeschränkt ab, insbesondere im Vergleich zu befragungsbasierten Ansätzen, wo ausschließlich reale Nutzende von Ridepooling-Diensten berücksichtigt wurden. Drittens setzt die Klassenzuordnung voraus, dass die gebuchte Distanz der tatsächlich zurückgelegten Strecke entspricht, ohne vor- oder nachgelagerte Wege einzubeziehen. Viertens erschwert die uneinheitliche Definition von Entfernungsklassen eine konsistente Anwendung. Während in Gronau beispielsweise zwischen Bus und Bahn differenziert wird, wird in Münster lediglich der ÖPNV als Gesamtkategorie ausgewiesen. Schließlich werden Umwegfaktoren im Linienverkehr nicht berücksichtigt.

Vorgehen zur Bewertung der substituierten Verkehrsleistung (Referenzmobilität)

Die Gegenüberstellung der fünf Varianten zur Abschätzung hypothetischer Verkehrsleistungen und THG-Emissionen zeigt, dass sich je nach Datenverfügbarkeit und Zielsetzung unterschiedliche methodische Stärken und Schwächen ergeben. Variante 5 bietet die

fundiertesten Grundlage zur realitätsnahen Abbildung des Mobilitätsverhaltens, erfordert jedoch detaillierte Buchungsinformationen und ist aufgrund der selten verfügbaren entfernungs-differenzierten Modal-Split-Werte nicht flächendeckend anwendbar.

Zur systematischen Vergleichbarkeit wurde für die beiden Fallbeispiele *LOOPmünster* und *G-Mobil* eine exemplarische Berechnung auf Basis aller fünf Varianten durchgeführt. Die in Tabelle 4.5 dargestellten Ergebnisse zeigen teils deutliche Unterschiede in den resultierenden THG Bilanzen.

Tab. 4.5: CO₂e-Emissionen pro Pkm der Referenzmobilität in den Betriebsgebieten der Dienste nach den Varianten 1-5 (nach Tab. 3-3 Bruder und Klemmer, 2024, S. 36)

Berechnungsmethodik	g CO ₂ e/Pkm Referenzmobilität			
	<i>Bussi</i>	<i>G-Mobil</i>	<i>kommit-Shuttle</i>	<i>LOOP-münster</i>
Variante 1: Modal Split (Wege) ^a	96,8	85,5	93,4	68,3
Variante 2: Modal Split (Pkm) ^a	119,1	–	–	92,4
Variante 3: Umfragedaten (Wege)	89,2	67,5	71,5	89,2
Variante 4: Umfragedaten (Pkm)	89,2	67,5	71,5	89,2
Variante 5: Modal Split ^a (Wege nach Entfernungsklasse mit Buchungskilometern)	–	86,0	–	67,0

^aKeine Berücksichtigung von Verkehrsinduktions-Effekten

Diese Abweichungen lassen sich primär auf Unterschiede in der Datengrundlage, insbesondere beim Modal Split (Wege und Pkm) und der Erhebungsmethodik, zurückführen. Eine eindeutige Bewertung der Validität einzelner Varianten ist aufgrund dieser Heterogenität nicht möglich. Die identischen Ergebnisse von Variante 3 und 4 sind darauf zurückzuführen, dass die substituierte Verkehrsleistung, gemessen in Pkm, in beiden Varianten auf Basis derselben Modalverteilung aus den Umfragedaten sowie derselben durchschnittlichen Reiseentfernung des Ridepooling Systems berechnet wurde. Die durchschnittliche Reiseentfernung ergibt sich aus dem Quotienten der besetzten Fahrzeugkilometer und der Anzahl der durchgeführten Buchungen. Dadurch ergeben sich für Variante 3 und 4 identische Emissionswerte für die Referenzmobilität im Betriebsgebiet. Im Online-Tool besteht jedoch die Möglichkeit, differenzierte Reiseweiten je Verkehrsmittel anzugeben, um Umweltfaktoren einzelner Verkehrsmittel berücksichtigen zu können. Aus diesem Grund wurden die Varianten nicht zusammengeführt. Für die weiterführende Analyse der THG-Bilanz des Linienbedarfsverkehrs im Verhältnis zu konventionellen Verkehrsmitteln werden daher die jeweils minimalen und maximalen Emissionswerte der Varianten 1 bis 4 je System herangezogen. Dieses Vorgehen erlaubt es, realistische Emissionsbandbreiten für mögliche Substitutionseffekte abzuleiten und trägt der eingeschränkten Vergleichbarkeit der Methoden angemessene Rechnung. Variante 5 wird nicht berücksichtigt, da die hierfür erforderlichen entfernungs-differenzierten Modal-Split-Daten nicht in allen Untersuchungsräumen vorlagen und somit keine konsistente Anwendung möglich war.

Insgesamt liefert der Variantenvergleich eine belastbare Grundlage für die THG-Bilanzierung von Ridepooling-Systemen unter unterschiedlichen Datenverfügbarkeiten. Die flexible Anwendbarkeit des gewählten methodischen Rahmens ermöglicht es, auch bei he-

terogener oder unvollständiger Datenlage belastbare Aussagen zur Umweltwirkung von Linienbedarfsverkehren abzuleiten.

4.5 Digitale Umsetzung der THG-Bilanzierungsmethodik

Im Rahmen der Dissertation wurde ein webbasiertes Tool entwickelt, das die THG-Bilanzierung von Linienbedarfsverkehren nach der beschriebenen Methodik ermöglicht. Ziel ist eine niedrigschwellige und standardisierte Anwendung, unabhängig von den eingesetzten Softwarelösungen oder lokalen Rahmenbedingungen. Über die in Abbildung 4.6 verlinkte Webanwendung können Nutzerinnen und Nutzer Systemdaten eingeben und automatisiert auswerten lassen. Das Tool verarbeitet aggregierte Eingaben, etwa Gesamtfahrleistung oder Fahrgastzahlen. Auf dieser Grundlage können die CO₂e-Emissionen sowohl pro Pkm als auch für den gesamten Dienst berechnet und mit Referenzwerten anderer Verkehrsmittel verglichen werden. Darüber hinaus erlaubt das Tool die Analyse der Netto-THG-Emissionen auf Basis der Substitutionsszenarien V1 bis V4 (s. Kapitel 4.4). Das Werkzeug wird bis Ende Dezember 2026 gepflegt und weiterentwickelt. Der Zugang ist über folgenden QR-Code bzw. Link möglich:



`oekorpsfhmuenster.streamlit.app`

Abb. 4.6: Zugang Online-Tool zur THG-Bilanzierung von Ridepooling-Verkehren

4.6 Methodische Limitationen und deren Einordnung

Die Bilanzierung der THG-Emissionen für Linienbedarfsverkehre auf Grundlage der *DIN EN 16258* ermöglicht grundsätzlich eine methodisch nachvollziehbare und standardisierte Bilanzierung. Gleichwohl sind die daraus resultierenden Ergebnisse unter Berücksichtigung verschiedener methodischer und datenspezifischer Einschränkungen zu interpretieren. Im Folgenden werden zentrale Aspekte benannt, die bei der Einordnung der Resultate dieser Arbeit zu berücksichtigen sind:

Begrenzung auf den *Well-to-Wheel*-Ansatz:

Die Berechnungen basieren auf dem *WtW*-Ansatz und konzentrieren sich damit ausschließlich auf die Emissionen, die im direkten und somit vorgelagerten Betrieb der Fahrzeuge entstehen. Emissionen aus weiteren Lebenszyklusphasen wie Produktion, Wartung oder Entsorgung der Fahrzeuge bleiben unberücksichtigt. Dies kann insbesondere bei Vergleichen mit konventionellen Linienverkehren zu einer Verzerrung führen.

Nichtberücksichtigung intermodaler Wegeketten:

Intermodale Wegebeziehungen, wie sie in der *DIN EN 16258* prinzipiell zu berücksichtigen sind (vgl. DIN, 2013, S. 20), konnten aufgrund unzureichender Datenverfügbarkeit in dieser Studie nicht berücksichtigt werden. Dies stellt insbesondere für Linienbedarfsverkehre, die in der Regel als integrierte Bausteine des ÖPNV zu konzipieren sind (vgl. VDV, 2025b, S. 42–43), eine methodische Einschränkung dar.

Einschränkungen bei der Berechnung von Personenkilometern_{gefahren}

Aufgrund unterschiedlicher Datenverfügbarkeiten wurde die Berechnung der Personenkilometer_{gefahren} einheitlich nach dem in Kapitel 4.3 beschriebenen VDV Näherungsverfahren durchgeführt (vgl. VDV, 2025a, Eintrag Personenkilometer). Dadurch wird eine konsistente Vergleichbarkeit zwischen den Fallbeispielen ermöglicht. Gleichzeitig können reale streckenbezogene Unterschiede, beispielsweise durch poolingbedingte Umwege oder unterschiedlich lange Fahrtweiten einzelner Fahrgäste, nur eingeschränkt abgebildet werden. Insbesondere bei stark variierender Auslastung oder hoher Streuung der Fahrtweiten können dadurch Abweichungen gegenüber den tatsächlichen Emissionswerten auftreten.

Standardisierte Verbrauchswerte statt realer Nutzung

Der Energieverbrauch basiert auf standardisierten Werten der Deutschen Automobil Treuhand (DAT) und bildet Lade- und Fahrverhalten nur idealtypisch ab. Prüfzyklen wie WLTP oder NEFZ erhöhen zwar die Vergleichbarkeit unterschiedlicher Fahrzeuge, bleiben jedoch modellhafte Typgenehmigungsverfahren. Besonders bei Plug-in-Hybridfahrzeugen (PHEV) können reale Verbrauchswerte deutlich von den Typgenehmigungswerten abweichen, da die im Prüfverfahren angenommenen elektrischen Fahranteile unter realen Einsatzbedingungen häufig nicht erreicht werden. Eine europäische Auswertung von rund 9.000 PHEV zeigt, dass der reale Kraftstoffverbrauch im Durchschnitt drei- bis fünfmal höher liegt als die offiziellen WLTP-Werte. Für privat genutzte PHEV werden reale Verbräuche von 4,0 bis 4,4 l/100 km ausgewiesen, für dienstlich genutzte PHEV 7,6 bis 8,4 l/100 km (Plötz et al., 2022, S. 1–2; vgl. Plötz, 2022, Abschn. „Plug-in-Hybride verbrauchen bei der Nutzung mehr als offiziell angegeben“). Die Diskrepanz unterstreicht die Notwendigkeit einer kritischen Nutzung normbasierter Daten. In dieser Untersuchung wurden keine quantitativen Abweichungsanalysen durchgeführt. Sofern verfügbar, kamen WLTP-Werte zum Einsatz.

Einschränkungen durch stated-preference-Daten

Die in dieser Arbeit verwendeten Substitutionsszenarien basieren auf Umfragewerten aus den wissenschaftlichen Begleitforschungen der untersuchten Systeme. Dabei wurden stated-preference-Fragen ausgewertet, etwa zur hypothetischen Verkehrsmittelwahl ohne das jeweilige Ridepooling-Angebot. Diese Angaben dienten sowohl zur Bestimmung der Netto-THG-Wirkung als auch zur Ableitung von Modal-Shift-Effekten. Methodisch ist zu berücksichtigen, dass hypothetische Angaben nicht zwingend dem tatsächlichen Verhalten entsprechen. Verzerrungen durch soziale Erwünschtheit oder retrospektive Rationalisierung können daher dazu führen, dass die berichteten Substitutionswirkungen reale Ver-

haltensänderungen nur eingeschränkt abbilden. Die berechneten Netto-THG-Wirkungen und Modal-Shift-Effekte sind entsprechend mit Unsicherheiten verbunden.

Unsicherheit der Strombezugsquelle

Die Herkunft des Stroms für PHEV- und BEV-Fahrzeuge ist regional unterschiedlich und hängt vom jeweiligen Ladeort ab. Da Ladeort und Stromquelle nicht im Detail nachvollziehbar sind, berücksichtigen die Berechnungen sowohl den deutschlandweiten Strommix (2022) als auch den deutschlandweiten Ökostrommix (2022). Während der Strommix eine allgemeine Vergleichsgrundlage darstellt, ermöglicht die zusätzliche Berücksichtigung von Ökostrom eine Sensitivitätsbetrachtung. Kurzfristige Schwankungen der Stromzusammensetzung, etwa infolge meteorologischer oder saisonaler Effekte, werden nur indirekt erfasst.

Bestimmung substituierter Wege:

Für die Ermittlung der substituierten Verkehrsleistung, also jener Wege, die ohne das Ridepooling-Angebot mit anderen Verkehrsmitteln zurückgelegt worden wären, liegt bislang kein methodisch validiertes Verfahren vor. In dieser Studie wurde daher ein heuristischer Ansatz gewählt, der auf modellbasierten Substitutionsannahmen beruht und plausible Vergleichsszenarien abbildet. Eine vollständige empirische Validierung dieser Annahmen ist nicht möglich. Die Einordnung erfolgt daher über wertebereichsbasierte Annäherungen (s. Kapitel 4.4).

Nicht Berücksichtigung administrativer Prozesse:

Emissionen, die im Rahmen administrativer Prozesse anfallen, etwa durch den Energieverbrauch serverbasierter Dispositionssysteme oder durch die Nutzung mobiler Endgeräte des Fahrpersonals, fließen gemäß der *DIN EN 16258* nicht in die Bilanzierung ein, da sie nicht dem Transportprozess im engeren Sinne zugeordnet werden (vgl. DIN, 2013, S. 12).

Aussagekraft und Anwendungsbereich der Ergebnisse

Die im Rahmen dieser Untersuchung ermittelten Ergebnisse zur THG-Bilanz von Linienbedarfsverkehren sind unter Berücksichtigung der aufgezeigten methodischen Limitationen als richtungssicher und größenordnungstreu zu interpretieren. Sie ermöglichen belastbare Aussagen hinsichtlich relativer Unterschiede zwischen Systemen und unterstützen die Analyse übergeordneter Wirkungszusammenhänge. Aufgrund vereinfachender Annahmen, normativer Vorgaben (z. B. bei Emissionsfaktoren) sowie eingeschränkter Datenverfügbarkeit sind die absoluten Emissionswerte jedoch nicht als vollständig valide im Sinne einer präzisen Quantifizierung zu verstehen. Eine Verwendung der Resultate sollte daher primär im Kontext systemischer Vergleiche und nicht zur Ableitung exakter Emissionswerte einzelner Systeme erfolgen.

Kapitel 5

Anwendung der Methodik auf spezifische Linienbedarfsverkehre

Ziel dieses Kapitels ist es, die Praxistauglichkeit des methodischen Vorgehens durch die Analyse real existierender Ridepooling-Angebote im öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) zu demonstrieren und kritisch zu bewerten. Anhand ausgewählter Pilotprojekte werden die jeweiligen Angebotsstrukturen, Betriebsparameter sowie die verkehrlichen und sozioökonomischen Rahmenbedingungen systematisch untersucht. Ergänzend werden die Ergebnisse der THG-Bilanzierung gemäß *DIN EN 16258* präsentiert. Eine weiterführende Einordnung und Bewertung dieser Resultate erfolgt im anschließenden Kapitel.

5.1 *Bussi* (Essen)

5.1.1 Beschreibung des Betriebsmodells

Bussi ist ein Linienbedarfsverkehr gemäß § 44 PBefG in Essen, der im Auftrag der Ruhrbahn GmbH in Kooperation mit einem externen Fahrdienstunternehmen betrieben wird. Bis November 2023 wurde der operative Betrieb durch die CleverShuttle GmbH durchgeführt; seitdem obliegt dieser der ViaVan GmbH. Das Projekt befand sich zwischen März 2021 und Februar 2023 in einer Pilotphase. Am 27. September 2023 beschloss die Stadt Essen, das Angebot bis zum 31. Dezember 2025 zu finanzieren (Stadt Essen, 2023, Abschn. „Weitere Fortführung des On-Demand-Shuttles *Bussi* beschlossen“).

Im Betrachtungszeitraum dieser Studie (2022) zielte das Projekt darauf ab, das bestehende Nahverkehrsangebot in den Tagesrandzeiten an Donnerstagen, Freitagen und Samstagen im Umfeld des Essener Stadtkerns bedarfsgerecht zu erweitern (s. Abbildung 5.1). Die Bereitstellung einer flexiblen und komfortablen Mobilität während der Abend- und Nachtstunden stand dabei im Vordergrund.

Das Betriebsgebiet umfasste im Jahr 2022 rund 55 km². Auf Basis des Zensus 2011 ergibt sich für das Gebiet eine rechnerische Einwohnerzahl von etwa 270.000 Personen und damit eine Bevölkerungsdichte von ca. 4.900 Personen pro km² (Statistische Ämter des Bundes und der Länder [Statistische Ämter], 2011). Das Betriebsgebiet befindet sich innerhalb des Essener Stadtgebiets und ist somit Teil der Metropolregion Ruhr. Der urbane Raum ist durch eine heterogene Siedlungsstruktur mit Unternehmensstandorten und Einkaufsmöglichkeiten geprägt und weist ein gut ausgebautes öffentliches Verkehrsangebot auf. Das Gebiet wird durch U-Bahnen, Straßenbahnen, Buslinien sowie verschiedene Nachtverkehre erschlossen. Zusätzlich stehen Car- und Bike-Sharing-Angebote zur Verfügung. Über zentrale Umsteigepunkte wie den Hauptbahnhof Essen besteht zudem eine Anbindung an den

(über)regionalen Schienenpersonenverkehr, darunter S-Bahn-, Regionalbahn-, Regional-Express-, IC- und ICE-Linien.

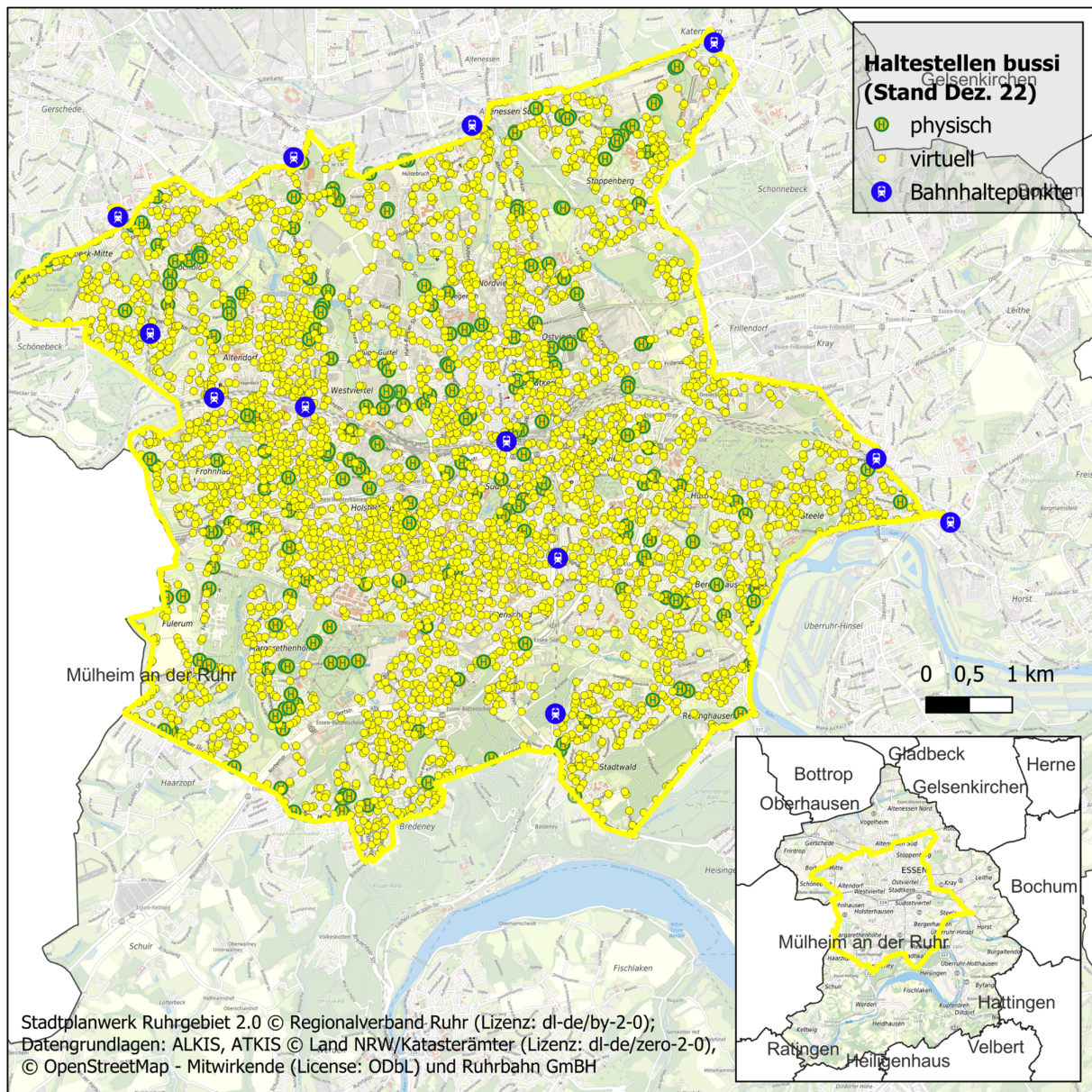


Abb. 5.1: Darstellung des Betriebsgebiets von „Bussi“ (Stand: 2022, entnommen aus Abb. 4-1 Bruder und Klemmer, 2024, S. 40)

Das Mobilitätsverhalten in Essen ist stark vom MIV geprägt. Laut Modal-Split entfielen im Erhebungszeitraum 47 % aller Wege auf MIV-Nutzende (Fahrende) und weitere 8 % auf MIV-Mitfahrende. Dies gilt für eine Stadtregion innerhalb einer Metropolregion als überdurchschnittlich hoch (vgl. Nobis & Kuhnimhof, 2018, S. 47). Der Anteil öffentlicher Verkehrsmittel betrug 19 %, ebenso wie der Anteil des Fußverkehrs. Der Radverkehr nimmt mit 7 % einen vergleichsweise geringen Anteil ein (vgl. Stadt Essen, 2019, S. 17). Im Buchungssystem sind insgesamt 242 physische sowie 4.067 virtuelle Haltestellen hinterlegt. Der Betriebszeitraum erstreckt sich donnerstags von 19:00 bis 24:00 Uhr sowie freitags und samstags von 19:00 bis 03:00 Uhr. Die Buchung des Services ist ausschließ-

lich über eine App möglich.

Die Tarifstruktur orientiert sich am Distanztarif des Verkehrsverbunds Rhein-Ruhr (VRR) mit einem Zuschlag von 40 % und ist nicht in das reguläre ÖPNV-Tarifsystem integriert. Abo-Kund*innen der Ruhrbahn GmbH erhalten einen Rabatt in Höhe von 25 %. Die Preisgestaltung für Gruppen ist gestaffelt: Die erste Person zahlt den vollen Fahrpreis, die zweite 50 %, die dritte und vierte jeweils 25 %, für die fünfte Person ist die Mitfahrt kostenfrei. Wird eine Fahrt für eine Einzelperson gebucht, fällt der volle Fahrpreis unabhängig von der tatsächlichen Auslastung an. Für Stornierungen wird eine Gebühr von 2 € erhoben, sofern diese nicht innerhalb einer Minute nach Buchung erfolgt. Bei Nichterscheinen am Abholort wird zusätzlich eine Gebühr von 3 € erhoben (vgl. Ruhrbahn GmbH, 2021, Abschn. „3. Fahrtbuchung, Nutzung“).

Die Fahrzeugflotte bestand 2022 aus fünf barrierearmen LEVC-TX-Fahrzeugen mit Hybridantrieb und jeweils sechs Sitzplätzen.

Eine Zusammenfassung aller projektrelevanten Informationen ist im Konzeptsteckbrief (s. Tabelle 5.1) dargestellt. *Bussi* ist durch seinen Einsatz in einem vollständig urban geprägten Raum charakterisiert, der eine hohe Bevölkerungsdichte aufweist und über ein differenziertes Angebot im öffentlichen Verkehr verfügt. Im Vergleich zu den weiteren in dieser Untersuchung betrachteten Systemen stellt *Bussi* das einzige Angebot dar, das sowohl auf einem Distanztarif basiert als auch Stornierungsgebühren erhebt, ohne in das reguläre Tarifsystem des ÖPNV integriert zu sein. Darüber hinaus weist das System die höchste Dichte an Haltepunkten auf. Hervorzuheben sind die auf die Abend- und Nachtstunden konzentrierten Betriebszeiten. Vor dem Hintergrund des vielfältigen und engmaschigen ÖPNV-Angebots im Einsatzgebiet ist *Bussi* der Funktion der Bequemlichkeitsmobilität zuzuordnen (vgl. KCD & civity, 2022, S. 24–25).

Mit Wirkung ab Juli 2024 wurde das Betriebskonzept umfassend angepasst. Seither steht das Angebot stadtweit zur Verfügung und kann von Sonntag bis Donnerstag in der Zeit von 19:00 bis 24:00 Uhr sowie freitags und samstags von 19:00 bis 03:00 Uhr genutzt werden. Parallel dazu erfolgte eine Erweiterung der Fahrzeugflotte. Aufgrund des zeitlichen Schwerpunkts in den Abendstunden und der weiterhin hohen Dichte des konventionellen ÖPNV-Angebots ist *Bussi* vorrangig dem Anwendungsbereich der Komfortmobilität zuzuordnen. Durch die stadtweite Ausdehnung übernimmt das System jedoch zunehmend ergänzende Funktionen zur Schließung von Angebotslücken, insbesondere in peripheren Lagen des Stadtgebiets in Randzeiten.

Tab. 5.1: Konzeptsteckbrief „*Bussi*“ mit Bezugsjahr 2022 (nach Tab. 4-2 Bruder und Klemmer, 2024, S. 41)

<i>Bussi</i> (Essen)	
Betreibende	Ruhrbahn GmbH
Betreibenden-Klassifizierung	Nahverkehrsunternehmen in Kooperation mit operativem Fahrdienstleister (2022: CleverShuttle GmbH, seit Nov. 2023 ViaVan GmbH)
Projektstatus (Stand 09.2025)	Pilotphase abgeschlossen, Fortführung bis 31.12.2025 beschlossen
Genehmigung	Linienbedarfsverkehr (§ 44 PBefG)
Funktion*	Bequemlichkeitsmobilität
Betriebszeiten	Randzeiten: Do., 19-24 Uhr; Fr. & Sa.: 19-03 Uhr
Betriebsgebiet Lage	Lage in einer Großstadt innerhalb einer Metropolregion; verdichteter Kernbereich um die Innenstadt; urban geprägter Raum mit heterogener Siedlungsstruktur und mehreren Gewerbegebieten.
Betriebsgebiet Größe	ca. 55 km ²
Bevölkerung im Betriebsgebiet**	ca. 270.000 EW; ca. 5.000 EW/km ²
Nahverkehrsangebot im Betriebsgebiet	Vielfältiges Angebot an Bussen, Straßen-, S- und U-Bahnen im Nahverkehr sowie Car- und Bike-Sharing; Angebote für den (über-)regionalen Verkehr.
Haltestellen (einschl. Masten)	242 physische Haltepunkte, 4.067 virtuelle Haltestellen
Fahrzeugflotte	5 x LEVC TX 5 Vista Comfort Plus (PHEV RE, 6 Sitzplätze, Hybrid, barrierearm); 1 x Nissan e-NV200 Evalia (BEV, 7 Sitzplätze, Reserve)
Tarif	Distanztarif nach VRR; Rabatt für Ruhrbahn-Kundschaft; Ermäßigung bei Gruppenbuchungen
Stornierungsgebühr	2 € Stornierungsgebühr
Buchungsoptionen	Ausschließlich App-Buchung

*nach KCD & civity, 2022, S. 21–25; **eigene Berechnung auf Grundlage des Zensus 2011 Statistische Ämter, 2011

5.1.2 THG-Bilanzierung

Strommix

Im Folgenden werden die Energie- und THG-Bilanzen für den Linienbedarfsverkehr *Bussi* dargestellt, basierend auf der vollständigen Nutzung von Ladestrom gemäß des deutschen Strommixes (Umweltbundesamt, 2024, Tab. 1). Grundlage ist die in Kapitel 4.2 und 4.1 beschriebene Methodik. Die Einordnung erfolgt in Kapitel 6. Unter Anwendung der *DIN EN 16258* wurden folgende Ergebnisgrößen ermittelt:

$$1) \text{ Well-to-Wheel-THG-Emissionen } (G_w)_{Bussi, \text{ Strommix}} = 11.263 \text{ kg CO}_2\text{e} \quad (5.1)$$

$$2) \text{ Tank-to-Wheel-THG-Emissionen } (G_t)_{Bussi, \text{ Strommix}} = 2.410 \text{ kg CO}_2\text{e} \quad (5.2)$$

$$3) \text{ Well-to-Wheel-Energieverbrauch } (E_w)_{Bussi, \text{ Strommix}} = 202.462 \text{ MJ} \quad (5.3)$$

$$4) \text{ Tank-to-Wheel-Energieverbrauch } (E_t)_{Bussi, \text{ Strommix}} = 93.422 \text{ MJ} \quad (5.4)$$

Diese vier Ergebnisse wurden in Übereinstimmung mit der *DIN EN 16258* ermittelt. Um weitere Informationen über unberücksichtigte Prozesse, Leitlinien und allgemeine Grundsätze zu erhalten, ist diese Norm heranzuziehen. Beim Vergleich der Ergebnisse mit anderen nach dieser Norm berechneten Untersuchungen sind insbesondere die jeweils angewendeten Verfahren, vor allem die Allokationsverfahren sowie die zugrunde liegenden Datenquellen, zu berücksichtigen (vgl. DIN, 2013, S. 20). Das verwendete Berechnungsverfahren ist in Anhang A.2.1 dokumentiert.

Ökostrom

Im Folgenden werden die Energie- und THG-Bilanzen für den Linienbedarfsverkehr *Bussi* dargestellt, basierend auf der vollständigen Nutzung von Ökostrom (vgl. LANUK, 2022, Emissionsfaktoren 2022). Grundlage ist die in Kapitel 4 beschriebene Methodik. Die Einordnung erfolgt in Kapitel 6. Unter Anwendung der *DIN EN 16258* wurden folgende Ergebnisgrößen ermittelt:

$$1) \text{ Well-to-Wheel-THG-Emissionen } (G_w)_{Bussi, \text{ Ökostrom}} = 3.877 \text{ kg CO}_2\text{e} \quad (5.5)$$

$$2) \text{ Tank-to-Wheel-THG-Emissionen } (G_t)_{Bussi, \text{ Ökostrom}} = 2.410 \text{ kg CO}_2\text{e} \quad (5.6)$$

$$3) \text{ Well-to-Wheel-Energieverbrauch } (E_w)_{Bussi, \text{ Ökostrom}} = 202.462 \text{ MJ} \quad (5.7)$$

$$4) \text{ Tank-to-Wheel-Energieverbrauch } (E_t)_{Bussi, \text{ Ökostrom}} = 93.422 \text{ MJ} \quad (5.8)$$

Diese vier Ergebnisse wurden in Übereinstimmung mit der *DIN EN 16258* ermittelt. Um weitere Informationen über unberücksichtigte Prozesse, Leitlinien und allgemeine Grundsätze zu erhalten, ist diese Norm heranzuziehen. Beim Vergleich der Ergebnisse mit anderen nach dieser Norm berechneten Untersuchungen sind insbesondere die jeweils angewendeten Verfahren, vor allem die Allokationsverfahren sowie die zugrunde liegenden Datenquellen, zu berücksichtigen (vgl. DIN, 2013, S. 20). Das verwendete Berechnungsverfahren ist in Anhang A.2.2 dokumentiert.

5.2 Mein *G-Mobil* (Gronau)

5.2.1 Beschreibung des Betriebsmodells

Das „Mein *G-Mobil*“ (im Folgenden als „*G-Mobil*“ bezeichnet) ist ein Linienbedarfsverkehr im Sinne des § 44 PBefG, der im Stadtgebiet von Gronau den konventionellen Stadtbusbetrieb vollständig substituiert hat und seitdem ein flexibles Nahverkehrsangebot bereitstellt (s. Abbildung 5.2). Das Angebot wird von der Stadt Gronau in Kooperation mit der Regionalverkehr Münsterland GmbH (RVM) verantwortet. Für den operativen Fahrbetrieb ist die *sei mobil on demand GmbH* zuständig.

Das Projekt wurde ab dem 1. Juni 2021 im Rahmen eines Pilotvorhabens durch mobil.nrw gefördert; diese Förderung lief zum 31. Dezember 2023 aus. Seither trägt die Stadt Gronau die Betriebskosten. Die Zielsetzung des Angebots besteht in der Sicherstellung von Binnenverkehren und Anschlussmobilität sowie in einer verbesserten Erschließung des Stadtgebiets durch den ÖPNV. Da der Service den klassischen Stadtbus ersetzt, ist er primär der Kategorie „Grundmobilität“ zuzuordnen (vgl. KCD & civity, 2022, S. 23). Gleichzeitig übernimmt das System die Funktion eines Zubringers zum (über-)regionalen Schienenverkehr am Bahnhof Gronau und leistet somit einen Beitrag zur Schließung verkehrlicher Lücken im Nahverkehr.

Das Betriebsgebiet umfasst eine Fläche von 30,9 km² und erstreckt sich über das Stadtgebiet Gronaus sowie über den nördlichen Bereich des Ortsteils Epe. Die Einwohnerzahl im Betriebsgebiet beträgt rund 38.500, was einer durchschnittlichen Bevölkerungsdichte von etwa 1.250 Personen pro km² entspricht. Als Mittelstadt innerhalb einer regiopolen Struktur weist das Gebiet eine überwiegend homogene Siedlungsstruktur auf. Im östlichen Teil ist zusätzlich ein Gewerbegebiet angebunden.

Das Mobilitätsverhalten in Gronau ist durch einen hohen Anteil des MIV geprägt: 47 % aller Wege werden als Fahrende, weitere 8 % als Mitfahrende zurückgelegt. Der Anteil des Radverkehrs ist mit 30 % vergleichsweise hoch. Lediglich 2 % aller Wege entfallen auf den öffentlichen Verkehr (Bus und Bahn), während der Fußverkehr einen Anteil von 13 % erreicht. Somit beträgt der Anteil des Umweltverbunds insgesamt 45 % des Modal Splits (Planersocietät, 2021, S. 25).

Vor der Einführung des *G-Mobils* wurde das Gebiet durch drei Stadtbuslinien, zwei Taxibuslinien sowie einen weiterhin verkehrenden Bürgerbus erschlossen, welcher das On-Demand-Angebot ergänzt. Im Jahr 2022 war der Dienst montags bis freitags von 5:00 bis 24:00 Uhr sowie an Wochenenden und Feiertagen von 7:00 bis 24:00 Uhr verfügbar. Die Buchung kann telefonisch, über eine App oder über die Website erfolgen. Damit erweitert das Angebot die bisherigen Betriebszeiten des Stadtbusverkehrs erheblich, auch wenn zwischen 24:00 und 5:00 Uhr keine Bedienung erfolgt.

Die Tarifstruktur orientiert sich am WestfalenTarif und ist vollständig in das bestehende ÖPNV-Tarifsystem integriert. Weder Aufschläge noch Stornierungsgebühren fallen an.

Die Fahrzeugflotte im Jahr 2022 setzte sich aus acht unterschiedlichen Fahrzeugmodellen mit variierenden Antriebsarten zusammen. Die Fahrzeugflotte setzte sich zusammen aus

vier LEVC TX 5 (HRE) Vista Comfort Plus Plug-in-Hybriden (barrierearm, jeweils sechs Sitzplätze) mit Range Extender (PHEV RE) , zwei vollelektrischen Mercedes eVito Tourer PRO lang (90 kWh, barrierefrei, drei Sitzplätze), einem Mercedes Vito lang 114 CDI mit Dieselmotor (nicht barrierefrei, sechs Sitzplätze) sowie einem Mercedes Sprinter Tourer 319 CDI (nicht barrierefrei, acht Sitzplätze). Der gleichzeitige Einsatz von mehr als sechs Fahrzeugen erfolgte nicht.

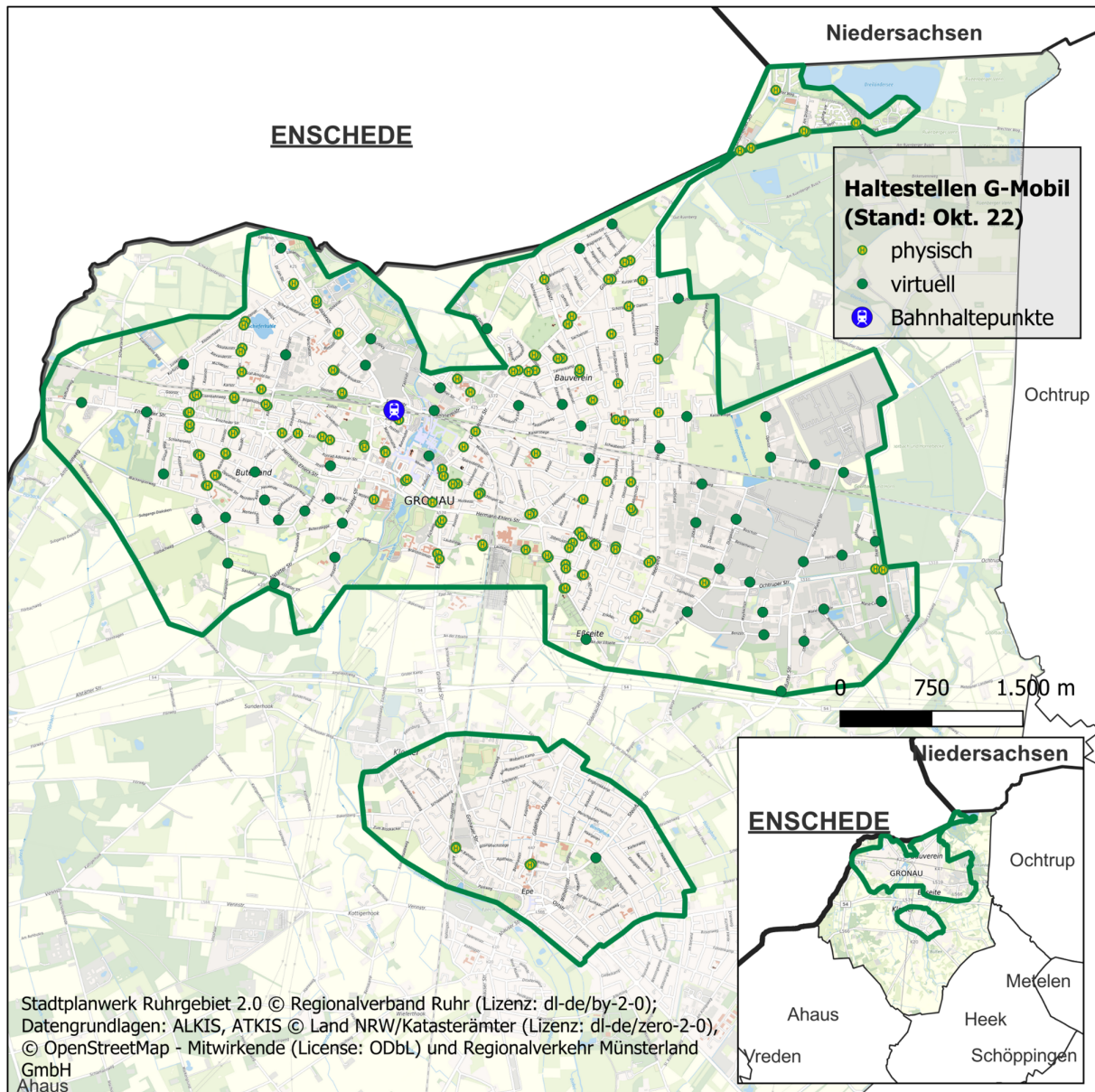


Abb. 5.2: Darstellung des Betriebsgebiets von „G-Mobil“ (Stand: 2022, entnommen aus Abb. 4-2 Bruder und Klemmer, 2024, S. 44)

Ein Alleinstellungsmerkmal des *G-Mobils* besteht in der vollständigen Übernahme der Aufgaben des Stadtbusverkehrs bei gleichzeitiger Integration in den WestfalenTarif, wodurch die Nutzung ohne zusätzlichen Komfort- oder Zuschlagstarif möglich ist. Im Vergleich zu den weiteren analysierten Linienbedarfsverkehren weist das *G-Mobil* das flächenmäßig kleinste Betriebsgebiet auf. Die Fahrzeugflotte vereint unterschiedliche Antriebs-

arten und stellt damit ein technisch heterogenes Betriebssystem dar. Die Betriebszeiten erstrecken sich von 6:00 bis 24:00 Uhr; während der Nachtstunden erfolgt kein Betrieb. Aufgrund der Substitution des konventionellen Stadtbusangebots ist das *G-Mobil* primär der Grundmobilität zuzuordnen, übernimmt jedoch ergänzend die Funktion des Lückenschlusses im ÖPNV-System (vgl. KCD & civity, 2022, S. 23–24). Die vollständige Projektbeschreibung ist in Tabelle 5.2 zusammengefasst.

Tab. 5.2: Konzeptsteckbrief *G-Mobil* mit Bezugsjahr 2022 (nach Bruder und Klemmer, 2024, Tab. 4-3, S. 45)

<i>G-Mobil</i> (Gronau)	
Betreibende	Regionalverkehr Münsterland GmbH (RVM) im Auftrag der Stadt Gronau
Betreibenden-Klassifizierung	Nahverkehrsunternehmen in Kooperation mit Kommune und operativem Fahrdienstleister (sei mobil on demand GmbH)
Projektstatus (Stand 09.2025)	Pilotphase abgeschlossen, Regelbetrieb seit 01.01.2024
Genehmigung	Linienbedarfsverkehr (§ 44 PBefG)
Funktion*	Grundmobilität / Lückenschluss
Betriebszeiten	Mo.-Fr.: 5-24 Uhr / Sa., So. und Feiertage: 7-24 Uhr
Betriebsgebiet Lage	Städtischer Raum einer Mittelstadt in einer regiopolen Region mit homogener Siedlungsstruktur und mehreren Gewerbegebieten.
Betriebsgebiet Größe	30,9 km ²
Bevölkerung im Betriebsgebiet**	ca. 38.500 EW; ca. 1.250 EW/km ²
Nahverkehrsangebot im Betriebsgebiet	Das <i>G-Mobil</i> ersetzte den städtischen Busverkehr, daher bestand 2022 das Mobilitätsangebot ausschließlich aus dem BürgerBus sowie einer Regionalbuslinie (R77) sowie Schülerverkehren. (Über-)regionale Anbindung nach Dortmund, Essen und Enschede (RB 51, RB 64)
Haltestellen (einschl. Masten)	135 physische und 54 virtuelle Haltestellen
Fahrzeugflotte	4 x LEVC TX 5 (HRE) Vista Comfort Plus (PHEV RE, 6 Sitzplätze, barrierearm), 2 x eVito Tourer PRO lang (BEV, 3 Sitzplätze, barrierefrei), 1 x Mercedes Vito lang 114 CDI (Diesel, 6 Sitzplätze, nicht barrierefrei), 1 x Sprinter (Tourer) 319 CDI (Diesel, 8 Sitzplätze, nicht barrierefrei)
Tarif	Vollintegration in Tarif (WestfalenTarif)
Stornierungsgebühr	Keine Gebühren
Buchungsoptionen	App + Telefonbuchung + Webbuchung

*nach KCD & civity, 2022, S. 21–25; **eigene Berechnung auf Grundlage des Zensus 2011 Statistische Ämter, 2011

5.2.2 THG-Bilanzierung

Strommix

Im Folgenden werden die Energie- und THG-Bilanzen für den Linienbedarfsverkehr *G-Mobil* dargestellt, basierend auf der vollständigen Nutzung von Ladestrom gemäß des deutschen Strommixes (Umweltbundesamt, 2024, Tab. 1). Grundlage ist die in Kapitel 4.2 und 4.1 beschriebene Methodik. Die Einordnung erfolgt in Kapitel 6. Unter Anwendung der *DIN EN 16258* wurden folgende Ergebnisgrößen ermittelt:

$$1) \text{ Well-to-Wheel-THG-Emissionen } (G_w)_{G\text{-}Mobil, \text{ Strommix}} = 62.314 \text{ kg CO}_2\text{e} \quad (5.9)$$

$$2) \text{ Tank-to-Wheel-THG-Emissionen } (G_t)_{G\text{-}Mobil, \text{ Strommix}} = 25.414 \text{ kg CO}_2\text{e} \quad (5.10)$$

$$3) \text{ Well-to-Wheel-Energieverbrauch } (E_w)_{G\text{-}Mobil, \text{ Strommix}} = 1.036.695 \text{ MJ} \quad (5.11)$$

$$4) \text{ Tank-to-Wheel-Energieverbrauch } (E_t)_{G\text{-}Mobil, \text{ Strommix}} = 580.546 \text{ MJ} \quad (5.12)$$

Diese vier Ergebnisse wurden in Übereinstimmung mit der *DIN EN 16258* ermittelt. Um weitere Informationen über unberücksichtigte Prozesse, Leitlinien und allgemeine Grundsätze zu erhalten, ist diese Norm heranzuziehen. Beim Vergleich der Ergebnisse mit anderen nach dieser Norm berechneten Untersuchungen sind insbesondere die jeweils angewendeten Verfahren, vor allem die Allokationsverfahren sowie die zugrunde liegenden Datenquellen, zu berücksichtigen (vgl. DIN, 2013, S. 20). Das verwendete Berechnungsverfahren ist in Anhang A.3.1 dokumentiert.

Ökostrom

Im Folgenden werden die Energie- und THG-Bilanzen für den Linienbedarfsverkehr *G-Mobil* dargestellt, basierend auf der vollständigen Nutzung von Ökostrom (vgl. LANUK, 2022, Emissionsfaktoren 2022). Grundlage ist die in Kapitel 4 beschriebene Methodik. Die Einordnung erfolgt in Kapitel 6. Unter Anwendung der *DIN EN 16258* wurden folgende Ergebnisgrößen ermittelt:

$$1) \text{ Well-to-Wheel-THG-Emissionen } (G_w)_{G\text{-}Mobil, \text{ Ökostrom}} = 35.574 \text{ kg CO}_2\text{e} \quad (5.13)$$

$$2) \text{ Tank-to-Wheel-THG-Emissionen } (G_t)_{G\text{-}Mobil, \text{ Ökostrom}} = 25.414 \text{ kg CO}_2\text{e} \quad (5.14)$$

$$3) \text{ Well-to-Wheel-Energieverbrauch } (E_w)_{G\text{-}Mobil, \text{ Ökostrom}} = 1.036.695 \text{ MJ} \quad (5.15)$$

$$4) \text{ Tank-to-Wheel-Energieverbrauch } (E_t)_{G\text{-}Mobil, \text{ Ökostrom}} = 580.546 \text{ MJ} \quad (5.16)$$

Diese vier Ergebnisse wurden in Übereinstimmung mit der *DIN EN 16258* ermittelt. Um weitere Informationen über unberücksichtigte Prozesse, Leitlinien und allgemeine Grundsätze zu erhalten, ist diese Norm heranzuziehen. Beim Vergleich der Ergebnisse mit anderen nach dieser Norm berechneten Untersuchungen sind insbesondere die jeweils angewendeten Verfahren, vor allem die Allokationsverfahren sowie die zugrunde liegenden Datenquellen, zu berücksichtigen (vgl. DIN, 2013, S. 20). Das verwendete Berechnungsverfahren ist in Anhang A.3.2 dokumentiert.

5.3 *kommit-Shuttle* (Senden)

5.3.1 Beschreibung des Betriebsmodells

Beim *kommit-Shuttle* handelte es sich um ein gemäß § 44 PBefG genehmigtes Linienbedarfsverkehrsangebot in der Gemeinde Senden, das im Auftrag des Kreises Coesfeld durch die Regionalverkehr Münsterland GmbH (RVM) betrieben wurde (s. Abbildung 5.3). Der operative Fahrbetrieb lag bei der „sei mobil on demand GmbH“. Das Pilotprojekt wurde im August 2021 im Rahmen des übergeordneten Fördervorhabens „Bürgerlabor Mobiles Münsterland (BüLaMo)“ initiiert und durch mobil.NRW finanziert. Das Projekt wurde mit Auslaufen der Förderung am 17. August 2024 eingestellt. Das Projekt BüLaMo verfolgte das Ziel, multimodale, umweltfreundliche Mobilitätslösungen im ländlich geprägten Untersuchungsraum zu erproben. Neben dem Shuttle-Verkehr beinhaltete das Maßnahmenpaket unter anderem eine ExpressBus-Linie, ein quartiersbezogenes Carsharing-Angebot, tarifliche Innovationsansätze sowie eine Mobilstation (vgl. RVM, 2024, Abschn. „Die Angebote“).

Das *kommit-Shuttle* verfolgte das Ziel, ein grundlegendes Mobilitätsangebot in Randlagen der Stadt Senden sicherzustellen und durch die Anbindung an regionale SchnellBus-Linien sowie den Bahnhof Bösensell bestehende Erschließungslücken im Verkehrsnetz zu schließen. In der initialen Projektphase fungierte das Shuttle als flächendeckende Ergänzung zum Linienbusverkehr im Ortskern von Senden und bot eine haustürnahe Bedienung an. Parallel dazu bestand Anschluss an bestehende ÖV-Angebote, darunter drei Regionalbuslinien (X90/S90, R41 in Ottmarsbocholt) mit Verbindungen nach Münster, Lüdinghausen und Olfen, ein Bürgerbus (Linie B81) sowie die Nachtlinie N4. Im Stadtteil Bösensell befindet sich darüber hinaus ein Bahnhof mit Anschluss an die Regionalzüge RE 42 und RE 2 in Richtung Münster, Essen und Mönchengladbach.

Bis zum 22. August 2022 umfasste das Betriebsgebiet ausschließlich den zentralen Ortsteil Senden mit einer Fläche von etwa 19 km² und einem Durchmesser zwischen 3,5 und 4 km. In einer zweiten Projektphase wurde das Einsatzgebiet auf das gesamte Gemeindegebiet ausgeweitet, einschließlich der Ortsteile Bösensell und Ottmarsbocholt. Dadurch vergrößerte sich das Betriebsgebiet auf rund 110 km² mit einer Bevölkerung von etwa 20.000 Personen, was einer durchschnittlichen Bevölkerungsdichte von 180 Einwohnern pro km² entspricht. Im Vergleich der betrachteten Systeme verfügte das *kommit-Shuttle* somit über das flächenmäßig größte und zugleich am dünnsten besiedelte Einsatzgebiet. Insgesamt wurden 199 physische und 41 virtuelle Haltestellen eingerichtet. Zudem war es das einzige System im Vergleich, das eine vollständige Haustürbedienung ermöglichte.

Die Verkehrsmittelnutzung in Senden zeigt einen Schwerpunkt auf dem MIV: 56 % der Wege wurden mit dem Pkw als Fahrende oder Mitfahrende zurückgelegt. Der Anteil des Radverkehrs lag bei 24 %, der Anteil öffentlicher Verkehrsmittel bei 8 % und der Anteil des Fußverkehrs bei 12 %. Insgesamt entfielen damit 44 % des Modal Splits auf den Umweltverbund (Brilon Bondzio Weiser, 2015, S. 39–40).

Die Betriebszeiten des Shuttles waren auf den werktäglichen Alltagsverkehr ausgerichtet,

deckten am Wochenende jedoch auch Randzeiten ab. Montag bis Donnerstag war das Angebot von 6:00 bis 22:00 Uhr verfügbar, in der Nacht von Freitag auf Samstag bis 4:00 Uhr sowie von Samstag auf Sonntag bis 6:00 Uhr. An Sonn- und Feiertagen stand der Service von 10:00 bis 22:00 Uhr zur Verfügung. Im Jahr 2022 bestand die Fahrzeugflotte aus zwei LEVC TX 5 (HRE) Vista Comfort Plus Plug-in-Hybriden, die jeweils über sechs Sitzplätze verfügten und barrierearm ausgestattet waren. Der Dienst war vollständig in den WestfalenTarif integriert, sodass alle Zeitkarten des ÖPNV genutzt werden konnten. Ab 22:00 Uhr wurde ein Nachzuschlag in Höhe von 2 € erhoben. Stornierungsgebühren fielen nicht an. Die Buchung war per App, über die Website oder telefonisch möglich.

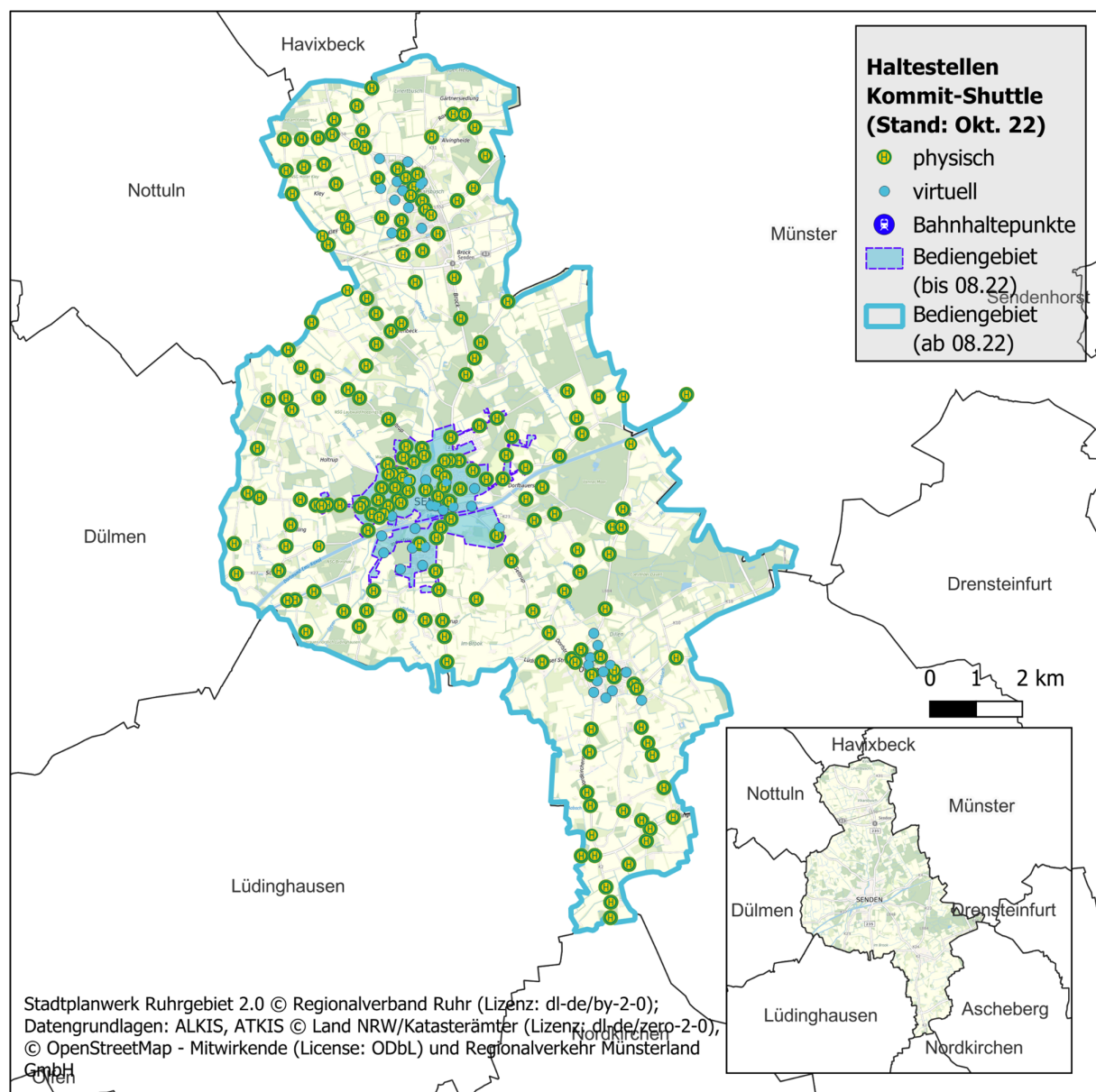


Abb. 5.3: Darstellung des Betriebsgebiets von „kommit-Shuttle“ (Stand: 2022, entnommen aus Abb. 4-3 Bruder und Klemmer, 2024, S. 48)

Zusammenfassend ist festzustellen, dass das *kommit-Shuttle* das größte Versorgungsgebiet unter den untersuchten Systemen abdeckte und zugleich die niedrigste Bevölkerungsdichte

aufwies. Die Fahrzeugflotte war mit lediglich zwei Fahrzeugen vergleichsweise klein dimensioniert. Als einziges System im Vergleichsrahmen bot es eine Haustürbedienung an. Ein Nachtzuschlag wurde ebenfalls exklusiv erhoben. Hauptsächlich diene das Shuttle als ergänzende Zubringerverbindung zu regionalen und überregionalen ÖPNV-Angeboten, weshalb es vorrangig der Funktion des Lückenschlusses zugeordnet werden kann (vgl. KCD & civity, 2022, S. 23–24). Aufgrund der eingeschränkten Taktung im Linienverkehr und unzureichender Erschließung in Randlagen erfüllte das Angebot darüber hinaus auch Aufgaben im Bereich der Grundmobilität. Eine Übersicht der zentralen Merkmale des *kommit-Shuttle* findet sich in Tabelle 5.3.

Tab. 5.3: Konzeptsteckbrief *kommit-Shuttle* mit Bezugsjahr 2022 (nach Tab. 4-4 Bruder und Klemmer, 2024, S. 49)

<i>kommit-Shuttle</i> (Senden)	
Betreibende	Regionalverkehr Münsterland GmbH (RVM) im Auftrag des Kreis Coesfeld
Betreibenden-Klassifizierung	Nahverkehrsunternehmen in Kooperation mit operativem Fahrdienstleister (sei mobil on demand GmbH)
Projektstatus (Stand 09.2025)	Pilotphase: 08.21-08.24, Einstellung des Dienstes seit 08.24
Genehmigung	Linienbedarfsverkehr (§ 44 PBefG)
Funktion*	Lückenschluss / Grundmobilität
Betriebszeiten	Mo.-Do.: 6-22 Uhr; Fr.&Sa.: 6-4 Uhr; So.& feiertags: 10-22 Uhr
Betriebsgebiet Lage	Das Betriebsgebiet erstreckt sich über den gesamten Gemeindebereich Sendens. Kleinstadt mit dörflicher Prägung in einer regiopolitanen Region.
Betriebsgebiet Größe	110 km ²
Bevölkerung im Betriebsgebiet**	ca. 20.000 EW; 180 EW/km ² (nach Erweiterung des Betriebsgebietes)
Nahverkehrsangebot im Betriebsgebiet	Nahverkehr durch Buslinie (C12/B81) und BürgerBus, Regional- und Schnellbuslinien (X90, S90 und R41)
Haltestellen (einschl. Masten)	199 physische und 41 virtuelle Haltestellen, Haustürbedienung (Einstellung ab 07.23)
Fahrzeugflotte	2x LEVC TX 5 (HRE) Vista Comfort Plus (PHEV RE, 6 Sitzplätze, hybrid, barrierearm)
Tarif	Vollintegration in Tarif (WestfalenTarif) + 2 € Nachtzuschlag ab 22 Uhr
Stornierungsgebühr	Keine Gebühren
Buchungsoptionen	App + Telefonbuchung + Webbuchung

*nach KCD & civity, 2022, S. 21–25; **eigene Berechnung auf Grundlage des Zensus 2011 Statistische Ämter, 2011

5.3.2 THG-Bilanzierung des *kommit-Shuttle*

Strommix

Im Folgenden werden die Energie- und THG-Bilanzen für den Linienbedarfsverkehr *kommit-Shuttle* dargestellt, basierend auf der vollständigen Nutzung von Ladestrom gemäß des deutschen Strommixes (Umweltbundesamt, 2024, Tab. 1). Grundlage ist die in Kapitel 4.2 und 4.1 beschriebene Methodik. Die Einordnung erfolgt in Kapitel 6. Unter Anwendung der *DIN EN 16258* wurden folgende Ergebnisgrößen ermittelt:

$$1) \text{ Well-to-Wheel-THG-Emissionen } (G_w)_{\text{kommit-Shuttle, Strommix}} = 16.973 \text{ kg CO}_2\text{e} \quad (5.17)$$

$$2) \text{ Tank-to-Wheel-THG-Emissionen } (G_t)_{\text{kommit-Shuttle, Strommix}} = 3.632 \text{ kg CO}_2\text{e} \quad (5.18)$$

$$3) \text{ Well-to-Wheel-Energieverbrauch } (E_w)_{\text{kommit-Shuttle, Strommix}} = 305.114 \text{ MJ} \quad (5.19)$$

$$4) \text{ Tank-to-Wheel-Energieverbrauch } (E_t)_{\text{kommit-Shuttle, Strommix}} = 140.788 \text{ MJ} \quad (5.20)$$

Diese vier Ergebnisse wurden in Übereinstimmung mit der *DIN EN 16258* ermittelt. Um weitere Informationen über unberücksichtigte Prozesse, Leitlinien und allgemeine Grundsätze zu erhalten, ist diese Norm heranzuziehen. Beim Vergleich der Ergebnisse mit anderen nach dieser Norm berechneten Untersuchungen sind insbesondere die jeweils angewendeten Verfahren, vor allem die Allokationsverfahren sowie die zugrunde liegenden Datenquellen, zu berücksichtigen (vgl. DIN, 2013, S. 20). Das verwendete Berechnungsverfahren ist in Anhang A.4.1 dokumentiert.

Ökostrom

Im Folgenden werden die Energie- und THG-Bilanzen für den Linienbedarfsverkehr *kommit-Shuttle* dargestellt, basierend auf der vollständigen Nutzung von Ökostrom (vgl. LANUK, 2022, Emissionsfaktoren 2022). Grundlage ist die in Kapitel 4 beschriebene Methodik; die Einordnung erfolgt in Kapitel 6. Unter Anwendung der *DIN EN 16258* wurden folgende Ergebnisgrößen ermittelt:

$$1) \text{ Well-to-Wheel-THG-Emissionen } (G_w)_{\text{kommit-Shuttle, Ökostrom}} = 5.843 \text{ kg CO}_2\text{e} \quad (5.21)$$

$$2) \text{ Tank-to-Wheel-THG-Emissionen } (G_t)_{\text{kommit-Shuttle, Ökostrom}} = 3.632 \text{ kg CO}_2\text{e} \quad (5.22)$$

$$3) \text{ Well-to-Wheel-Energieverbrauch } (E_w)_{\text{kommit-Shuttle, Ökostrom}} = 305.114 \text{ MJ} \quad (5.23)$$

$$4) \text{ Tank-to-Wheel-Energieverbrauch } (E_t)_{\text{kommit-Shuttle, Ökostrom}} = 140.788 \text{ MJ} \quad (5.24)$$

Diese vier Ergebnisse wurden in Übereinstimmung mit der *DIN EN 16258* ermittelt. Um weitere Informationen über unberücksichtigte Prozesse, Leitlinien und allgemeine Grundsätze zu erhalten, ist diese Norm heranzuziehen. Beim Vergleich der Ergebnisse mit anderen nach dieser Norm berechneten Untersuchungen sind insbesondere die jeweils angewendeten Verfahren, vor allem die Allokationsverfahren sowie die zugrunde liegenden Datenquellen, zu berücksichtigen (vgl. DIN, 2013, S. 20). Das verwendete Berechnungsverfahren ist in Anhang A.4.2 dokumentiert.

5.4 *LOOPmünster* (Münster)

5.4.1 Beschreibung des Betriebsmodells

LOOPmünster war ein Linienbedarfsverkehr gemäß § 44 PBefG, der in Kooperation zwischen der Stadt Münster und den Stadtwerken Münster konzipiert wurde. Der Betrieb lag bei der Stadtwerke Münster GmbH, während die Durchführung des Fahrdienstes durch die „sei mobil on demand GmbH“ erfolgte. Das Pilotprojekt startete im September 2020, war zunächst bis September 2023 geplant und wurde anschließend bis September 2024 verlängert. Am 31. August 2024 wurde der Betrieb aufgrund des Auslaufens der Fördermittel und daraus resultierender finanzieller Erwägungen eingestellt (Stadtwerke Münster, n. d., Abschn. „Über das Projekt LOOPmünster“).

Das Einsatzgebiet umfasste den südlichen Teil Münsters, der durch eine Mischung aus suburbanen und ländlichen Strukturen sowie eine differenzierte Siedlungsstruktur charakterisiert ist (s. Abbildung 5.4). Das Ziel des Projekts bestand in der funktionalen Ergänzung des bestehenden Stadtbusnetzes durch die Herstellung neuer tangentialer Verbindungen und die Verbesserung der Anbindung an Haltepunkte des Bus- und Bahnverkehrs. Hierzu wurden wichtige Verkehrsachsen wie der Albersloher Weg, die Weseler Straße und die Westfalenstraße/B54 in das Bedienkonzept integriert, um das primär radiale Liniennetz durch zusätzliche Direktverbindungen zu erweitern.

Das Betriebsgebiet erstreckt sich über verschiedene Stadtteilzentren mit überwiegender Wohnnutzung, einzelne Gewerbegebiete sowie teilweise ländlich geprägte Bereiche im Süden. Nach einer Ausweitung des Einsatzbereichs im Januar 2022 erstreckte sich das Gebiet auf 56,85 km² mit einer Bevölkerung von rund 63.150 Personen, was einer durchschnittlichen Dichte von etwa 1.110 Einwohnern pro km² entspricht. Während der nördliche Teil des Betriebsgebiets urban geprägt war, überwog im Süden eine stärker ländliche Struktur. Parallel zum On-Demand-Verkehr verkehrten im Betriebsgebiet zahlreiche Linienangebote des regulären ÖPNV, darunter die Stadtbuslinien 1, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 15, 16, 17, 18, 20, mehrere Schulbusse, vier Nachtbuslinien (N81, N82, N84, N85) sowie die Taxibuslinie T18. Durch die Einführung von *LOOPmünster* wurden vier bestehende Taxibuslinien ersetzt (T341, T5, T9 und T85). Im Betriebsgebiet befanden sich zudem drei Bahnhaltepunkte mit Anschluss an regionale Bahnverbindungen. Um bestehende Lücken im ÖPNV-Netz zu schließen, wurden neben 270 physischen Haltepunkten zusätzlich 414 virtuelle Haltestellen definiert.

Das Mobilitätsverhalten im zentralen Betriebsbereich, insbesondere in Münster-Hiltrup, war stark durch den Radverkehr geprägt. Der Anteil des Radverkehrs am Modal Split belief sich auf 34 % (einschließlich E-Bike und Pedelec). Die Anteile des MIV lagen bei 31 % (Fahrer) bzw. 9 % (Mitfahrer), während öffentliche Verkehrsmittel für 9 % und der Fußverkehr für 17 % der Wege genutzt wurden. Insgesamt betrug der Anteil des Umweltverbunds 60 % (vgl. Ingenieurbüro Helmert, 2023, Tab. 1).

Die Betriebszeiten von *LOOPmünster* waren umfangreich gestaltet: Von Montag bis Donnerstag war der Dienst zwischen 5:00 und 2:00 Uhr verfügbar, am Wochenende wurde ein

durchgehender Betrieb von Freitag 5:00 Uhr bis Montag 2:00 Uhr angeboten. Die Tarife waren vollständig in den regulären ÖPNV-Tarif eingebunden. Ab März 2023 wurde jedoch ein Zuschlag von 1 € pro Fahrgast und Fahrt eingeführt. Die Buchung erfolgte primär über eine eigenständige App; eine telefonische Buchung war ebenfalls möglich.

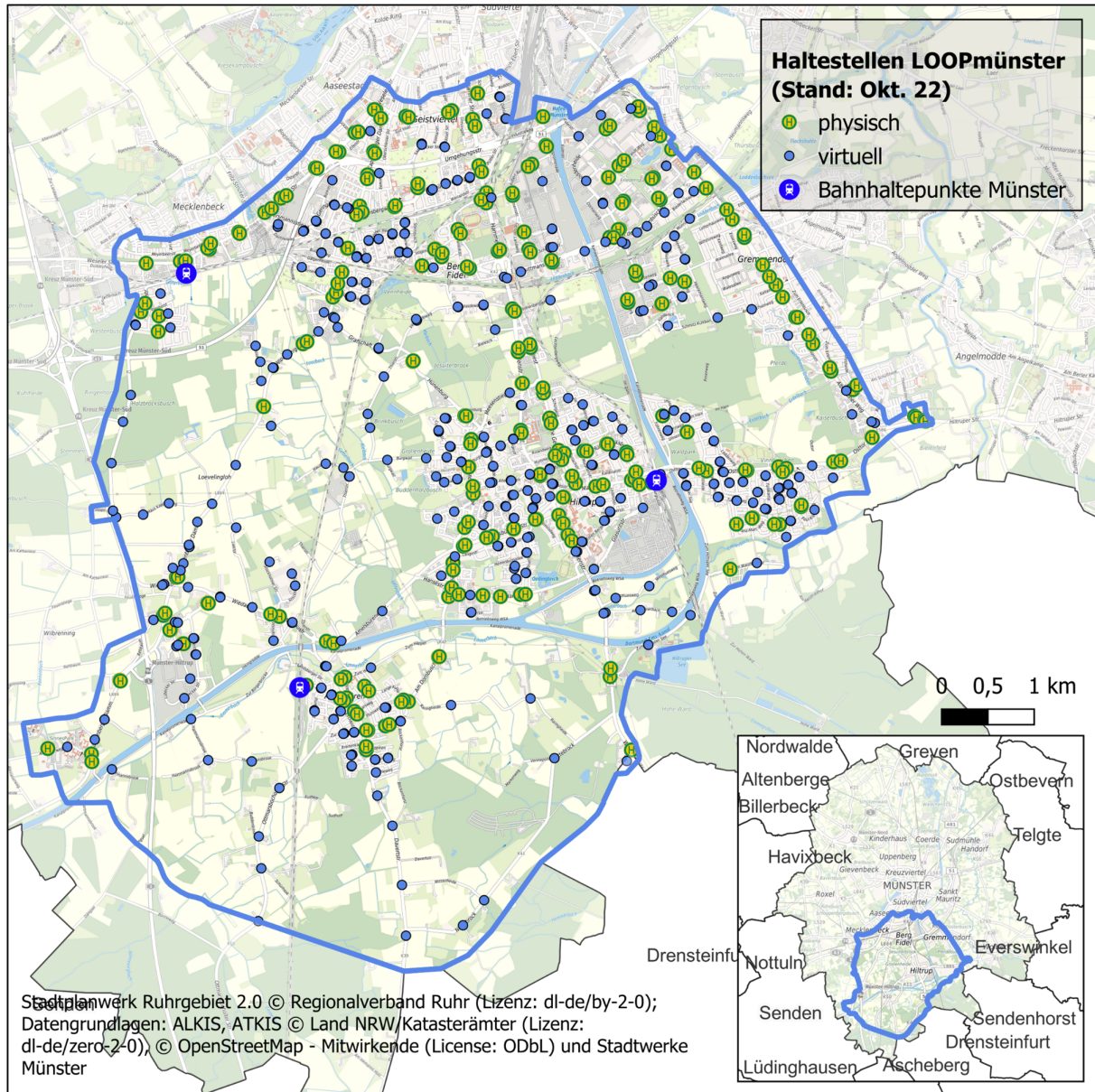


Abb. 5.4: Darstellung des Betriebsgebiets von „LOOPmünster“ (Stand: 2022, entnommen aus Abb. 4-4 Bruder und Klemmer, 2024, S. 51)

Im Jahr 2022 bestand die Flotte aus 13 LEVC-TX-Fahrzeugen mit Hybridantrieb und jeweils sechs Sitzplätzen. Gleichzeitig waren maximal zehn Fahrzeuge im Einsatz. Eine Übersicht der zentralen Merkmale findet sich in Tabelle 5.4.

Zusammenfassend verfügte LOOPmünster über die größte Fahrzeugflotte unter den betrachteten Systemen und verzeichnete im Jahr 2022 das höchste Fahrgastaufkommen. Die Heterogenität der Siedlungsstruktur innerhalb des Einsatzgebiets stellt ein zentrales Charakteristikum dar. Ähnlich wie beim *kommit-Shuttle* waren auch die Betriebszeiten von

LOOPmünster, insbesondere am Wochenende, überdurchschnittlich großzügig bemessen. Aufgrund seiner Rolle als Ergänzung zum bestehenden Netz ist das System vorrangig der Funktion des Lückenschlusses zuzuordnen (vgl. KCD & civity, 2022, S. 23–24). In peripheren Bereichen wie der Davert, wo der reguläre ÖPNV nur eingeschränkt verfügbar war, erfüllte das Angebot darüber hinaus auch Aufgaben im Rahmen der Grundmobilität (vgl. KCD & civity, 2022, S. 23).

Tab. 5.4: Konzeptsteckbrief *LOOPmünster* mit Bezugsjahr 2022 (nach Tab. 4-5 Bruder und Klemmer, 2024, S. 53)

<i>LOOPmünster</i> (Münster)	
Betreibende	Stadtwerke Münster GmbH
Betreibenden-Klassifizierung	Nahverkehrsunternehmen in Kooperation mit operativem Fahrdienstleister (sei mobil on demand GmbH)
Projektstatus (Stand 09.2025)	Pilotphase: 09.20-09.24, Einstellung des Dienstes seit 09.24
Genehmigung	Linienbedarfsverkehr (§ 44 PBefG)
Funktion*	Lückenschluss / Grundmobilität
Betriebszeiten	Mo-Do: 5-2 Uhr und Fr-Mo: ab 5 Uhr durchgehend bis Mo 2 Uhr
Betriebsgebiet Lage	Städtischer Raum im Süden Münsters mit einer z.T. suburban-ländlichen Prägung und einer heterogenen Siedlungsstruktur, einschließlich mehrerer Gewerbegebiete
Betriebsgebiet Größe	56,9 km ² (seit 01.2022)
Bevölkerung im Betriebsgebiet**	ca. 63.000 EW; 1.100 EW/km ²
Nahverkehrsangebot im Betriebsgebiet	3 Bahnhaltepunkte, 13 Buslinien (Tagesnetz), 4 Buslinien (Nachtnetz), 1 Taxibuslinie
Haltestellen (einschl. Masten)	270 physische Haltestellen, 414 virtuelle Haltestellen
Fahrzeugflotte	10x LEVC TX 5 (HRE) Vista Comfort Plus (PHEV RE, 6 Sitzplätze, hybrid, barrierearm) 3x LEVC TX 5 (HRE) Vista Comfort Plus (Reserve)
Tarif	Vollintegration in ÖPNV (Westfalentarif) + 1 € Nutzungsaufpreis pro Fahrgast (seit März 2022)
Stornierungsgebühr	Keine Stornierungsgebühr
Buchungsoptionen	App + Telefonbuchung (seit 03.2023 Einstellung der Telefonbuchung)

*nach KCD & civity, 2022, S. 21–25; **eigene Berechnung auf Grundlage des Zensus 2011 Statistische Ämter, 2011

5.4.2 THG-Bilanzierung des *LOOPmünster*

Strommix

Im Folgenden werden die Energie- und THG-Bilanzen für den Linienbedarfsverkehr *LOOPmünster* dargestellt, basierend auf der vollständigen Nutzung von Ladestrom gemäß des deutschen Strommixes (Umweltbundesamt, 2024, Tab. 1). Grundlage ist die in Kapitel 4.2 und 4.1 beschriebene Methodik. Die Einordnung erfolgt in Kapitel 6. Unter Anwendung der *DIN EN 16258* wurden folgende Ergebnisgrößen ermittelt:

$$1) \text{ Well-to-Wheel-THG-Emission } (G_w)_{LOOPmünster, \text{ Strommix}} = 181.862 \text{ kg CO}_2\text{e} \quad (5.25)$$

$$2) \text{ Tank-to-Wheel-THG-Emissionen } (G_t)_{LOOPmünster, \text{ Strommix}} = 38.912 \text{ kg CO}_2\text{e} \quad (5.26)$$

$$3) \text{ Well-to-Wheel-Energieverbrauch } (E_w)_{LOOPmünster, \text{ Strommix}} = 3.269.270 \text{ MJ} \quad (5.27)$$

$$4) \text{ Tank-to-Wheel-Energieverbrauch } (E_t)_{LOOPmünster, \text{ Strommix}} = 1.508.532 \text{ MJ} \quad (5.28)$$

Diese vier Ergebnisse wurden in Übereinstimmung mit der *DIN EN 16258* ermittelt. Um weitere Informationen über unberücksichtigte Prozesse, Leitlinien und allgemeine Grundsätze zu erhalten, ist diese Norm heranzuziehen. Beim Vergleich der Ergebnisse mit anderen nach dieser Norm berechneten Untersuchungen sind insbesondere die jeweils angewendeten Verfahren, vor allem die Allokationsverfahren sowie die zugrunde liegenden Datenquellen, zu berücksichtigen (vgl. DIN, 2013, S. 20). Das verwendete Berechnungsverfahren ist in Anhang A.5.1 dokumentiert.

Ökostrom

Im Folgenden werden die Energie- und THG-Bilanzen für den Linienbedarfsverkehr *LOOPmünster* dargestellt, basierend auf der vollständigen Nutzung von Ökostrom (vgl. LANUK, 2022, Emissionsfaktoren 2022). Grundlage ist die in Kapitel 4 beschriebene Methodik; die Einordnung erfolgt in Kapitel 6. Unter Anwendung der *DIN EN 16258* wurden folgende Ergebnisgrößen ermittelt:

$$1) \text{ Well-to-Wheel-THG-Emissionen } (G_w)_{LOOPmünster, \text{ Ökostrom}} = 62.602 \text{ kg CO}_2\text{e} \quad (5.29)$$

$$2) \text{ Tank-to-Wheel-THG-Emissionen } (G_t)_{LOOPmünster, \text{ Ökostrom}} = 38.912 \text{ kg CO}_2\text{e} \quad (5.30)$$

$$3) \text{ Well-to-Wheel-Energieverbrauch } (E_w)_{LOOPmünster, \text{ Ökostrom}} = 3.269.270 \text{ MJ} \quad (5.31)$$

$$4) \text{ Tank-to-Wheel-Energieverbrauch } (E_t)_{LOOPmünster, \text{ Ökostrom}} = 1.508.532 \text{ MJ} \quad (5.32)$$

Diese vier Ergebnisse wurden in Übereinstimmung mit der *DIN EN 16258* ermittelt. Um weitere Informationen über unberücksichtigte Prozesse, Leitlinien und allgemeine Grundsätze zu erhalten, ist diese Norm heranzuziehen. Beim Vergleich der Ergebnisse mit anderen nach dieser Norm berechneten Untersuchungen sind insbesondere die jeweils angewendeten Verfahren, vor allem die Allokationsverfahren sowie die zugrunde liegenden Datenquellen, zu berücksichtigen (vgl. DIN, 2013, S. 20). Das verwendete Berechnungsverfahren ist in Anhang A.5.2 dokumentiert.

Kapitel 6

Auswertung

In diesem Kapitel erfolgt eine vergleichende Analyse der THG-Emissionen der betrachteten Ridepooling-Systeme. Neben konzeptionellen Unterschieden stehen betriebliche Effizienzkennzahlen im Fokus, um die Systeme hinsichtlich ihrer Klimawirksamkeit bewerten zu können.

6.1 Vergleich der Linienbedarfsverkehre

Die analysierten Ridepooling-Systeme werden im Hinblick auf ihre konzeptionelle Ausgestaltung, betriebliche Kennzahlen und THG-Emissionen systematisch gegenübergestellt. Ziel ist es, strukturelle Unterschiede zu identifizieren und die betriebliche Effizienz vergleichend zu bewerten.

6.1.1 Systemkonzepte im Vergleich

Die konzeptionelle Gegenüberstellung berücksichtigt insbesondere Angebotscharakteristik, verkehrliche Funktion, räumliche Abdeckung sowie die Integration in bestehende Verkehrssysteme. Tabelle 6.1 fasst die relevanten Merkmale der analysierten Systeme zusammen. Die zugrunde liegenden Informationen stammen aus Kapitel 5; auf eine erneute Quellenangabe wird im Interesse eines besseren Leseflusses verzichtet.

Mindeststandards für die Konzeption von Linienbedarfsverkehren

Zur Einordnung der betrieblichen Ausgestaltung der untersuchten Linienbedarfsverkehre dienen die vom Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) definierten Mindeststandards als Bewertungsrahmen. In einer Veröffentlichung aus dem Jahr 2023 stellt der VDV Linienbedarfsverkehre regulären Linienangeboten gleich und formuliert entsprechende Anforderungen an deren Qualität und Erreichbarkeit. Zu den zentralen Kriterien zählen die Verfügbarkeit von (virtuellen) Haltestellen in maximal 250 m Entfernung vom Start- oder Zielort, eine maximale Wartezeit von 50 Minuten, eine Angebotsverfügbarkeit von mindestens 70 % sowie eine maximal zulässige Umwegedistanz von 100 %. Für dünn besiedelte Regionen wird zudem eine Fahrzeugdichte von einem Fahrzeug je 100 km² empfohlen (vgl. VDV, 2023, S. 8). Obwohl diese Mindeststandards keine rechtlich verbindlichen Vorgaben darstellen, bieten sie einen fachlich anerkannten Orientierungsrahmen für die konzeptionelle Ausgestaltung und Bewertung entsprechender Angebote. Die nachfolgende Analyse bewertet die betrachteten Systeme auf Grundlage dieser Vorgaben.

Tab. 6.1: Konzeptioneller Vergleich der untersuchten Linienbedarfsverkehre (Bezugsjahr 2022, nach Tab. 5-1 Bruder und Klemmer, 2024, S. 56)

Merkm ^{al}	<i>Bussi</i>	<i>G-Mobil</i>	<i>kommit-Shuttle</i>	<i>LOOPmünster</i>
Betriebsgebiet	Großstadt Metropolregion Urban	Mittelstadt urban	Gemeinde ländlich	Großstadt urban und ländlich
Funktion^a	Bequemlichkeits- mobilität	Grund- mobilität/ Lückenschluss	Lückenschluss/ Grund- mobilität	Lückenschluss/ Grund- mobilität
Betriebszeiten	Do-Sa; Abend-Nacht	Werktags und wochenends tagsüber bis abends	Werktags und wochenends tagsüber bis nachts	Werktags und wochenends tagsüber bis nachts
Betriebsgebiet Größe	55 km ²	30,9 km ²	110 km ²	56,9 km ²
Bevölkerung Betriebsgebiet²	ca. 270.000	ca. 38.500	ca. 20.000	ca. 63.000
Bevölkerungs- dichte^b	4.900 EW/km ²	1.250 EW/km ²	180 EW/km ²	1.100 EW/km ²
ÖV-Angebots- qualität	Hoch	Substitution	Niedrig	Moderat
Anteil Umwelt- verbund^c	45 % (davon 19 % ÖV-Linie)	45 % (davon 2 % ÖV-Linie)	44 % (davon 8 % ÖV-Linie)	60 % (davon 9 % ÖV-Linie)
Haltestellen- anzahl (inkl. Masten)	4.309	189	240 (+Haustür- bedienung)	684
Haltestellen- dichte [HS/km²]	78 HS/km ²	6 HS/km ²	2 HS/km ² (+Haustür- bedienung)	12 HS/km ²
Abstand zwischen Haltestellen	49 m	235 m	351 m (+Haustür- bedienung)	67 m
Fahrzeugflotte (max. im - Einsatz)	5 Fahrzeuge	6 Fahrzeuge	2 Fahrzeuge	10 Fahrzeuge
Flottendichte [EW/Fz]	54.000 EW/Fz	6.400 EW/Fz	10.000 EW/Fz	6.300 EW/Fz
Tarif	Distanztarif	Vollintegration	Vollintegration	Vollintegration
Zugriff	App	App+Telefon	App+Telefon	App+Telefon

^a nach KCD & civity, 2022, S. 21–25; ^b **eigene Berechnung auf Grundlage des Zensus 2011
Statistische Ämter, 2011; ^c siehe Kapitel 5

Betriebsgebiet und Bevölkerungsdichte

Die vier untersuchten Ridepooling-Verkehre unterscheiden sich deutlich hinsichtlich ihrer räumlichen Einsatzkontexte und der jeweiligen Bevölkerungsdichte. *Bussi* bedient ein stark verdichtetes urbanes Betriebsgebiet in Essen mit rund 270.000 Einwohnenden und

einer Siedlungsdichte von ca. 4.900 EW/km². Im Gegensatz dazu war das *kommit-Shuttle* im ländlich geprägten Senden im Einsatz, einer Mittelstadt mit rund 20.000 Einwohnenden und einer deutlich geringeren Dichte von etwa 180 EW/km². Das *G-Mobil* verkehrt in der Kernstadt Gronaus (1.250 EW/km²; 38.500 Einwohnende), einem Mittelzentrum, das formal als städtisch einzustufen ist, jedoch keine ausgeprägt urbanen Strukturen aufweist. Das Betriebsgebiet von *LOOPmünster* in Münster (1.100 EW/km²; 66.000 Einwohnende) ist überwiegend suburban geprägt. Beide Systeme sind in Räumen mit mittlerer Siedlungsdichte verortet und lassen sich typologisch im Übergangsbereich zwischen urbanen und ländlichen Strukturen einordnen.

ÖV-Angebotsqualität und Mobilitätsstruktur ohne Ridepooling

Die Angebotsqualität des öffentlichen Verkehrs und die verkehrliche Nutzungsstruktur variieren ebenfalls deutlich zwischen den betrachteten Betriebsgebieten. Die Erschließungswirkung ist Kapitel 6.4 zu entnehmen. In Essen verfügt das *Bussi*-Betriebsgebiet über ein gut ausgebautes ÖPNV-System mit Bus-, U- und Straßenbahn sowie ergänzenden Sharing-Angeboten. Etwa 82 % der Bevölkerung leben im Einzugsbereich einer Bushaltestelle; dennoch dominiert der MIV am Modal Split mit einem Wegeanteil von 55 %. In Senden, dem Einsatzgebiet des *kommit-Shuttles*, liegt der Anteil der Bevölkerung mit fußläufigem Zugang zu einer Haltestelle bei rund 89 %. Der MIV erreicht am Modal Split (Wege) 56 %, während der ÖPNV lediglich einen Anteil von 8 % aufweist. In Gronau, welches das Betriebsgebiet des *G-Mobil* ausmacht, liegt der MIV-Anteil bei 45 %, der Radverkehr bei 30 % am Modal Split (Wege); der ÖPNV spielt mit 2 % eine untergeordnete Rolle. Vor Einführung des Ridepooling-Angebots verfügten etwa 75 % der Bevölkerung über Zugang zu einer Stadt- oder Bürgerbus-Haltestelle. *LOOPmünster* bedient ein heterogenes Gebiet mit städtischen und ländlichen Teilräumen Münsters. Der Umweltverbund erreicht einen Modal-Split-Anteil (Wege) von 60 %, davon entfallen 34 % auf den Radverkehr; der ÖPNV liegt bei 9 %. Rund 78 % der Bevölkerung verfügen über einen fußläufigen Zugang zu einer Bus-Haltestelle.

Primäre Funktionalität nach KCD & civity (2022)

Die funktionale Ausrichtung der vier betrachteten Systeme zeigt sich in ihren jeweiligen Betriebskonzepten und Zielgruppen (vgl. KCD & civity, 2022, S. 21–25). *Bussi* fungiert als komfortorientiertes Zusatzangebot zum klassischen städtischen ÖPNV und richtet sich an Nutzende mit dem Bedürfnis nach einer direkten, komfortablen Verbindung. Das *Kommit-Shuttle* in der Gemeinde Senden ist primär als Zubringer zu regionalen Verkehrsangeboten konzipiert und dient der Sicherstellung der Grundmobilität in peripheren Gemeindeteilen. 2022 umfasste das örtliche ÖPNV-Angebot drei Regionalbuslinien, einen Bürgerbus und eine Nachtlinie. Das *G-Mobil* übernimmt in Gronau eine Daseinsversorgungsfunktion, da es den konventionellen Linienbusbetrieb vollständig ersetzt hat. Zudem schließt es Versorgungslücken, indem es Zu- und Abbringerfahrten zum Bahnhof Gronau gewährleistet. Auch *LOOPmünster* ist der Grundversorgung und dem Lückenschluss zuzuordnen. Das System ist in einem suburban geprägten Gebiet aktiv, ergänzt den bestehenden ÖPNV und adressiert Defizite in der tangentialen Erschließung peripherer Teilräume sowie die

Versorgung von Randlagen und Randzeiten.

Fahrzeugdichte

Bezüglich der Fahrzeugdichte bestehen deutliche Unterschiede zwischen den analysierten Systemen. Die vom VDV definierten Mindeststandards hinsichtlich der Fahrzeugdichte (vgl. VDV, 2023, S. 8) werden von *LOOPmünster* und *G-Mobil* erfüllt, da in beiden Fällen in Gebieten mittlerer Siedlungsdichte jeweils ein Fahrzeug pro 5.000 bis 10.000 Einwohnende eingesetzt wird. Das *kommit-Shuttle* entspricht dem Richtwert für gering besiedelte Räume, da zwei Fahrzeuge ein 110 km² großes Betriebsgebiet abdecken. Lediglich *Bussi* unterschreitet den empfohlenen Fahrzeugschlüssel für hochverdichtete Räume, der ein Fahrzeug pro 5.000 Einwohnende vorsieht (vgl. VDV, 2023, S. 8). Diese Abweichung ist vor dem Hintergrund der funktionalen Ausrichtung als ergänzendes Komfortangebot zum konventionellen ÖPNV nachvollziehbar. Die Haltestellenstruktur unterscheidet sich deutlich zwischen den betrachteten Angeboten. *Bussi* weist mit 4.309 Haltepunkten auf 55 km² (davon 4.067 virtuell) eine sehr hohe Dichte von 78 Haltestellen/km² auf; der durchschnittliche Abstand beträgt nur 49 m. Das *kommit-Shuttle* bedient ein 110 km² großes Gebiet mit 240 Haltestellen (2 Haltestellen/km²) und einem mittleren Abstand von 351 m. Durch die im Untersuchungszeitraum angebotene Haustürbedienung ergab sich jedoch theoretisch ein besonders dichtes Haltestellen-Netz. Beim *G-Mobil* (189 Haltestellen auf 30,9 km²) beträgt die Dichte 6 Haltestellen/km², der mittlere Abstand 235 m. *LOOPmünster* kommt bei 684 Haltestellen auf 56,9 km² auf 12 Haltestellen/km² und 67 m durchschnittlichen Abstand. Zu berücksichtigen ist, dass bei dem *G-Mobil*, *kommit-Shuttle* und *LOOPmünster* richtungsbezogene Haltepunkte genutzt werden, was die Abstandskennzahlen relativiert. Somit erfüllen alle Systeme die VDV-Vorgaben zur Haltestellenverteilung. Eine weiterführende Bewertung erfolgt in Kapitel 7.2.4.

Auch die Betriebszeiten variieren deutlich zwischen den Systemen. *Bussi* verkehrt ausschließlich am Wochenende in den Abend und Nachtstunden. Die übrigen Angebote sind werktags und am Wochenende ganztägig verfügbar, teilweise auch nachts, wie etwa beim *kommit Shuttle* oder *LOOPmünster*. Entsprechend unterscheiden sich auch die aktiven Fahrzeugstunden deutlich zwischen den Systemen und reichen von 4.459 Stunden bei *Bussi* bis zu 59.723 Stunden bei *LOOPmünster* (s. Tabelle 6.2). Die Verkehre decken damit in unterschiedlichem Umfang Schwachlastzeiten ab.

Tarifintegration

Hinsichtlich der Tarifintegration bestehen ebenfalls deutliche Unterschiede. *Bussi* verwendet einen streckenabhängigen Distanztarif, was der großstädtischen Angebotsstruktur und der Funktion als Bequemlichkeitsmobilität entspricht. Die übrigen Systeme sind vollständig in den ÖPNV-Tarif eingebunden und können bzw. konnten demnach ohne einen Aufpreis mit einem regulären ÖPNV-Ticket genutzt werden.

Zugriff

Hinsichtlich des Zugriffes können ebenfalls Unterschiede festgestellt werden. *Bussi* ist das einzige System, das ausschließlich über die App gebucht werden kann. Bei den anderen

Systemen waren Telefonbuchungen im Jahr 2022 (noch) möglich. Zudem verfügen das *kommit-Shuttle* und das *G-Mobil* über eine zusätzliche Web-Buchung.

6.1.2 Vergleich der betrieblichen Kenngrößen der Systeme

Für die Einordnung der THG-Bilanzierungen ist maßgeblich, mit welcher Effizienz die analysierten Verkehrssysteme die jeweilige Fahrgastnachfrage bedienen. Die hierfür relevanten betrieblichen Kennzahlen sind in Tabelle 6.2 aufgeführt. Eine detaillierte Darstellung der Methodik zur Differenzierung innerhalb des Buchungstrichters findet sich in Kapitel 4.3. Im Nachfolgenden werden die Linienbedarfsverkehre systemübergreifend analysiert und interpretiert.

Fahrtanfragen_{total}

Die Anzahl an Fahrtanfragen_{total} weist erhebliche Unterschiede zwischen den betrachteten Systemen auf. Während *Bussi* im Jahr 2022 lediglich rund 24.000 Fahrtanfragen_{total} registrierte, verzeichnete *LOOPmünster* mit etwa 770.000 eine mehr als dreißigfache Nachfrage. Auch das *kommit-Shuttle* (rund 87.000) sowie das *G-Mobil* (rund 358.000) lagen deutlich über dem Fahrgastanfragen-Niveau von *Bussi*. Eine wesentliche Ursache für diese Unterschiede liegt in den jeweiligen Betriebszeiten und Betriebsmodellen. *Bussi* wird ausschließlich an Wochenenden sowie Donnerstagen und lediglich in den Abend- und Nachtstunden betrieben, während die übrigen Systeme auch werktags und tagsüber buchbar sind. *LOOPmünster* bietet darüber hinaus am Wochenende einen durchgehenden 24/7-Betrieb. Das *G-Mobil* ersetzt zudem vollständig den konventionellen Linienbusverkehr im entsprechenden Betriebsgebiet, ist jedoch nur bis 24 Uhr buchbar. Ein weiterer zentraler Einflussfaktor ist die Größe der Bevölkerung in den jeweiligen Betriebsgebieten. Im Einzugsbereich von *LOOPmünster* leben mehr als dreimal so viele Personen wie im Gebiet des *kommit-Shuttles* und etwa 60 % mehr als im Bereich des *G-Mobils*. Die Fahrgastnachfrage von *Bussi* fällt trotz der hohen Bevölkerungsdichte im Betriebsgebiet deutlich geringer aus als bei den übrigen Systemen. Ausschlaggebend dafür sind das abweichende Betriebskonzept und die eingeschränkten Betriebszeiten. Zudem scheint die tarifliche Einbindung der Angebote in Zusammenhang mit den Fahrtanfragen_{total} zu stehen. Bei den vollständig in den öffentlichen Nahverkehrstarif integrierten Systemen *G-Mobil*, *LOOPmünster* und *kommit-Shuttle* war im Jahr 2022 eine vergleichsweise hohe Anzahl an Fahrtanfragen zu verzeichnen. Das System *Bussi* unterlag hingegen einem separaten Distanztarif, was möglicherweise zu einer geringeren Nutzung beigetragen hat. Mögliche Erklärungsansätze hierfür liegen in potenziellen Zugangshemmnissen sowie in einer geringeren Preisattraktivität für Gelegenheitsnutzende. Ein weiterer potenzieller Einflussfaktor ist die kommunikative Sichtbarkeit der Angebote, insbesondere im Hinblick auf begleitende Marketingmaßnahmen. Eine quantitative Bewertung dieses Aspekts wird in dieser Studie jedoch nicht getätigt.

Tab. 6.2: Betriebliche Kenngrößen der untersuchten Linienbedarfsverkehre mit dem Bezugsjahr 2022 (nach Tab. 5.2 Bruder und Klemmer, 2024, S. 59)

2022	<i>Bussi</i>	<i>G-Mobil</i>	<i>kommit-Shuttle</i>	<i>LOOP-münster</i>
Fahrtanfragen _{total}	24.226	358.548	87.787	773.892
Fahrtanfragen _{systemzulässig}	17.741	357.181	87.657	769.122
Fahrtanfragen _{systemgenehmigt}	16.101	258.036	67.500	498.912
Fahrtanfragen _{fahrgastbestätigt} bzw. Buchungen _{total}	9.062	101.095	29.326	272.999
Buchungen _{storniert}	515	41.052	7.418	121.584
Buchungen _{no-show}	72	–	–	7.593
Buchungen _{durchgeführt}	8.475	60.043	21.908	151.415
Buchungen _{gebündelt}	958	17.116	5.132	44.962
Transportierte Fahrgäste	13.876	74.561	26.280	187.309
Fahrzeugkilometer _{total}	77.609	335.437	116.958	1.253.194
Fahrzeugkilometer _{leer}	43.248	151.682	62.351	544.798
Fahrzeugkilometer _{besetzt}	34.361	183.755	54.607	708.396
Personenkilometer _{gefahren}	56.259	228.185	65.504	876.326
Fahrzeugstunden (aktiv) [h]	4.459	18.849	8.954	59.723
Angebotsverfügbarkeit [%]	91 %	72 %	77 %	65 %
Akzeptanzrate [%]	56 %	39 %	43 %	55 %
Fahrtweite [km]	4,05	3,06	2,49	4,68
Stornierungsrate [%]	6 %	41 %	25 %	45 %
Poolingquote [%]	11 %	29 %	23 %	30 %
Leerkilometeranteil [%]	56 %	45 %	53 %	43 %
Bündelungsquote (nach § 50 PBefG)	0,72	0,68	0,56	0,70
Besetzungsquote	1,64	1,24	1,20	1,24
Buchungskilometer [km]	-	196.226	60.165	903.230
Systemeffizienz	-	0,58	0,51	0,72

Neben der Anzahl an Fahrtanfragen_{total} unterscheiden sich die Systeme auch hinsichtlich des Anteils an Fahrtanfragen_{unzulässig}. Hierbei zeigen sich erneut deutliche Unterschiede zwischen den betrachteten Angeboten. Während bei *G-Mobil* (0,4 %), *kommit Shuttle* (0,1,%) und *LOOPmünster* (0,6 %) nur ein sehr geringer Anteil der Anfragen außerhalb der systemseitig zulässigen Parameter lag, betrug dieser Anteil bei *Bussi* rund 27 %. Von den insgesamt 6.485 unzulässigen Anfragen bei *Bussi* wurden etwa 90 % zu Zeitpunkten gestellt, an denen der Dienst nicht verfügbar war. Dies steht im Zusammenhang mit den Betriebszeiten, die im Rahmen des Angebotskonzepts bewusst auf bestimmte Tages und Wochenzeiten ausgerichtet sind. Während der zuvor betrachtete Anteil unzulässiger Fahrtanfragen auf Einschränkungen der räumlichen und zeitlichen Bediengebiete verweist, beschreibt die Angebotsverfügbarkeit den Anteil der zulässigen Anfragen, der durch das verfügbare Fahrzeugangebot bedient werden kann. Sie ergibt sich aus dem Verhältnis von Fahrt-anfragen_{systemgenehmigt} zu Fahrt-anfragen_{systemzulässig} (s. Formel 6.1).

$$\text{Angebotsverfügbarkeit} = \frac{\text{Fahrtanfragensystemgenehmigt}}{\text{Fahrtanfragensystemzulässig}} \quad (6.1)$$

Die Werte der Angebotsverfügbarkeit unterscheiden sich deutlich zwischen den untersuchten Systemen. Bei *Bussi* konnten im Jahr 2022 etwa 91 % der zulässigen Fahrtanfragen bedient werden, während dieser Anteil bei *LOOPmünster* lediglich 65 % betrug. Der VDV gibt für Linienbedarfsverkehre eine Mindestanforderung der Angebotsverfügbarkeit von 70, % vor (vgl. VDV, 2023, S. 8). Das *kommit Shuttle* erreicht mit einem Wert von 77 % als einziges der untersuchten Systeme die Zielvorgabe für Räume mit „geringer Siedlungsdichte“. Dagegen liegen *LOOPmünster* (65 %) und *G-Mobil* (72 %) unterhalb der Referenzwerte für Gebiete mit „mittlerer Siedlungsdichte“, die laut VDV zwischen 80 % und 95 % liegen.

Trotz der vergleichsweise hohen Angebotsverfügbarkeit von 91 % bei *Bussi* wird der Zielwert für Räume mit „hoher Siedlungsdichte“ (95 %) nicht erreicht (vgl. VDV, 2023, S. 8).

Buchungen

Sobald eine Fahrtanfrage sowohl als zulässig als auch als durchführbar eingestuft wurde ($\text{Buchungen}_{\text{systemgenehmigt}}$) erhält der Fahrgast ein konkretes Fahrtangebot. Dieses kann in Bezug auf die ursprünglich gewünschte Abholzeit oder den Abholort vom Fahrtwunsch abweichen, sofern bestimmte systemseitig definierte Vorgaben dies erfordern. Im Anschluss daran hat der Fahrgast die Möglichkeit, das Angebot anzunehmen oder abzulehnen. Das Verhältnis der vom Fahrgast bestätigten Fahrtanfragen fahrgastbestätigt zu den genehmigten Anfragen systemgenehmigt wird als Akzeptanzrate (s. Formel 6.2) bezeichnet.

$$\text{Akzeptanzrate} = \frac{\text{Fahrtanfragen}_{\text{fahrgastbestätigt}}}{\text{Fahrtanfragen}_{\text{systemgenehmigt}}} \quad (6.2)$$

Zwischen den betrachteten Systemen bestehen Unterschiede in Bezug auf diese Kennzahl. *Bussi* erreichte im Jahr 2022 eine Akzeptanzrate von 56 %, *LOOPmünster* 55 %, das *kommit-Shuttle* 43 % und *G-Mobil* 39 %. Die Akzeptanzrate kann als Maß für die Kongruenz zwischen dem realisierten Leistungsangebot und den Erwartungen der Fahrgäste bezüglich des Service-Levels interpretiert werden.

In der Betrachtung der absoluten Buchungen total zeigt sich ein erwartbares Verhältnis zu den Fahrtanfragen total , da eine höhere Nachfrage in der Regel zu einem Anstieg der Buchungen fahrgastbestätigt führt. Die Analyse der Buchungen total (entspricht $\text{Fahrtanfragen}_{\text{fahrgastbestätigt}}$) erfordert darüber hinaus die Berücksichtigung von Buchungen storniert sowie Buchungen no-show , bei denen Fahrgäste nicht zum Abholort erscheinen.

Ein hoher Anteil von Stornierungen im Verhältnis zu den Buchungen total kann die Angebotsverfügbarkeit potenziell beeinträchtigen. Dies gilt insbesondere für kurzfristige Stornierungen sowie No-Shows, da diese zu betrieblicher Ineffizienz führen können. No-Shows und nicht in Anspruch genommene Fahrtangebote erhöhen den Anteil an Leerkilometern und reduzieren die verfügbare Systemkapazität. Gleichzeitig kann die Fahrgasterfahrung beeinträchtigt werden, wenn Mitfahrende aufgrund nicht angetretener Fahrten unnötige Umwege in Kauf nehmen müssen.

Stornierungen werden jedoch nicht ausschließlich durch Fahrgäste verursacht. Auch das Fahrpersonal oder die Disposition kann eine Buchung aufheben, beispielsweise bei un-

gültigen Fahrkarten, nicht erschienenen Fahrgästen oder Fehlverhalten. Der Anteil dieser systemseitig initiierten Stornierungen am Gesamtstornierungsvolumen fiel bei den betrachteten Systemen jedoch gering aus. Bei *G-Mobil* lag er bei 19 %, beim *kommit-Shuttle* bei 21 % und bei *LOOPmünster* bei 9 %. Für *Bussi* lagen hierzu keine verwertbaren Angaben vor.

Im Vergleich der betrachteten Systeme zeigen sich deutlichere Unterschiede bei den Stornierungsraten (s. Formel 6.3). Diese Kennziffer beschreibt den Anteil aller bestätigten Buchungen, die entweder aktiv durch Fahrgäste oder den Betrieb storniert wurden oder aufgrund eines No-Shows nicht in Anspruch genommen werden konnten, gemessen an der Gesamtzahl der Buchungen_{total}.

$$\text{Stornierungsrate} = \frac{\text{Buchungen}_{\text{storniert}} + \text{Buchungen}_{\text{no-show}}}{\text{Buchungen}_{\text{total}}} \quad (6.3)$$

Bussi verzeichnete mit 6 % die niedrigste Stornierungsrate. Dieser Umstand lässt sich möglicherweise auf die Einführung eines eigenständigen Tarifsystems mit zusätzlicher Stornierungsgebühr zurückführen. Der Anteil an Buchungen_{no-show} lag bei *Bussi* bei etwa 1 %. Im Gegensatz dazu lagen die Stornierungsraten bei den tarifintegrierten Systemen höher. *G-Mobil* verzeichnete eine Rate von 41 %, das *kommit-Shuttle* 25 % und *LOOPmünster* 42 %. Bei *LOOPmünster* lag der Anteil an Buchungen_{no-show} bei rund 3 %. Eine hohe Stornierungsrate kann darauf hinweisen, dass das Angebot hinsichtlich Pünktlichkeit oder Flexibilität nicht vollständig mit den Erwartungen der Fahrgäste übereinstimmt.

Die Anzahl der Buchungen_{durchgeführt} sowie der beförderten Fahrgäste deutet auf einen möglichen Zusammenhang mit der Fahrgastnachfrage hin. Eine detaillierte Analyse statistischer Zusammenhänge erfolgt in Kapitel 7.

Im Jahr 2022 wurden im System *Bussi* insgesamt 8.475 Buchungen durchgeführt und 13.876 Fahrgäste befördert, was einer durchschnittlichen Auslastung von 1,64 Fahrgästen pro Buchung_{durchgeführt} entspricht. Das *G-Mobil* verzeichnete 60.043 Buchungen_{durchgeführt} bei 74.561 transportierten Fahrgästen, entsprechend 1,24 Fahrgästen pro Buchung_{durchgeführt}. Beim *kommit-Shuttle* lag die Zahl der Buchungen_{durchgeführt} bei 21.908 und die Zahl der beförderten Personen bei 26.280, was einem Durchschnittswert von 1,2 Fahrgästen pro Buchung_{durchgeführt} entspricht. *LOOPmünster* registrierte im selben Zeitraum 151.415 Buchungen_{durchgeführt} und beförderte 187.309 Fahrgäste, was einer durchschnittlichen Besetzungsquote von 1,24 Fahrgästen pro Buchung_{durchgeführt} entspricht.

Zwischen den Systemen *G-Mobil*, *kommit-Shuttle* und *LOOPmünster* ergeben sich hinsichtlich der mittleren Besetzungsquote pro durchgeführter Buchung lediglich geringfügige Unterschiede (1,20-1,24 Fahrgäste pro Buchung). Demgegenüber weist *Bussi* mit durchschnittlich 1,64 Fahrgästen pro Buchung einen deutlich höheren Wert auf, der auf die tarifliche Begünstigung von Gruppenbuchungen zurückzuführen ist. Darüber hinaus ist *Bussi* ausschließlich in den Abend- und Nachtstunden im Einsatz und bedient primär den Verkehrszweck Freizeit, der typischerweise auch im MIV mit höheren durchschnittlichen Besetzungsquoten einhergeht (Forschungsinformationssystem des BMVI [FIS], 2023, Abschn. „Pkw-Besetzungsgrad bei der privaten Autonutzung“).

Fahrtenbündelung

Das wesentliche Ziel von Linienbedarfsverkehren besteht in der Bündelung individueller Fahrtwünsche (in diesem Fall Buchungen) zu gemeinsamen Fahrten, um die betriebliche Effizienz zu steigern und Umweltwirkungen zu verringern. In der vorliegenden Auswertung werden unter Buchungen_{gebündelt} ausschließlich solche Fälle berücksichtigt, bei denen sich Buchungen_{durchgeführt} einer bereits disponierten Route anschließen, also aktiv zusammengelegt werden. Die initiale Fahrtbuchung bleibt hierbei unberücksichtigt. Ebenfalls nicht als Bündelung gewertet werden Buchungen_{durchgeführt}, in denen ein Zustieg unmittelbar an eine Haltestelle mit einem vorherigen Ausstieg gekoppelt ist, da in diesen Fällen keine räumlich und zeitlich unabhängige Zusammenführung von Fahrtenanfragen vorliegt.

Die sogenannte *Poolingquote* beschreibt den Anteil der Buchungen_{gebündelt} an allen Buchungen_{durchgeführt} (s. Formel 6.4).

$$\text{Poolingquote} = \frac{\text{Buchungen}_{\text{gebündelt}}}{\text{Buchungen}_{\text{durchgeführt}}} \quad (6.4)$$

Die Poolingquote ist ein Indikator für die Effizienz der Fahrtenbündelung, da sie auf eine gesteigerte Fahrzeugauslastung und eine potenzielle Reduktion der Fzkm_{leer} hinweist (s. Kapitel 7.1 für die empirische Herleitung). Im Jahr 2022 liegt die Poolingquote im System *Bussi* bei 11 %, während *G-Mobil* (29 %), das *kommit-Shuttle* (23 %) und *LOOP-münster* (30 %) deutlich höhere Poolingquoten aufweisen. Die beobachteten Unterschiede deuten auf systembedingte Variationen hin, etwa hinsichtlich der Nachfrageverteilung, Unterschiede des Bedienkonzepts oder der eingesetzten Dispositionsalgorithmen.

Fahrzeugkilometer und Leerkilometer-Anteil

Zur Bewertung der betrieblichen Effizienz von On-Demand-Verkehren wird neben der Gesamtfahrleistung (Fzkm_{total}) der Leerkilometeranteil als zentrale Kennzahl herangezogen. Der Leerkilometer-Anteil beschreibt das Verhältnis der ohne Fahrgast gefahrenen Fahrzeugkilometer (Fzkm_{leer}) zur Gesamtfahrleistung (s. Formel 6.5) und ermöglicht Rückschlüsse auf die ökologische Wirkungsbilanz sowie die operative Steuerung des Systems. Ein hoher Anteil leer zurückgelegter Strecken kann auf ineffiziente Dispositionsprozesse, geringe Bündelungsquoten oder eine ungünstige Raumstruktur hinweisen.

$$\text{Leerkilometeranteil} = \frac{\text{Fzkm}_{\text{leer}}}{\text{Fzkm}_{\text{total}}} \quad (6.5)$$

Im Jahr 2022 verzeichnete *LOOPmünster* mit 1.253.194 km die höchste Gesamtfahrleistung, wobei 43 % davon ohne Fahrgast zurückgelegt wurden. Auch in den anderen Systemen ist der Anteil Fzkm_{leer} vergleichsweise hoch: Bei *G-Mobil* entfallen 45 % der insgesamt 335.437 km auf Leerfahrten, beim *kommit-Shuttle* sind es 53 % von 116.958 km. Den höchsten relativen Leerkilometeranteil weist *Bussi* auf: Von insgesamt 77.609 km wurden 56 % ohne Fahrgast zurückgelegt.

Pkm_{gefahren}

Die Kenngröße der Pkm_{gefahren} stellt einen zentralen Indikator zur Leistungsdarstellung und Effizienzanalyse im öffentlichen Personennahverkehr dar. Gleichzeitig dient sie als Allokationsgröße der THG-Bilanzierung dieser Studie (siehe Kapitel 4.3).

Da in mehreren der untersuchten Systeme weder die tatsächlich zurückgelegten Fahrtstrecken noch die buchungsbezogenen Distanzen ohne Bündelungseffekte (Buchungskilometer) im Backend-Systems dokumentiert wurden, erfolgt die Berechnung der Pkm_{gefahren} auf Basis einer Näherungsformel, wie sie vom VDV definiert wurde: Die Anzahl der beförderten Fahrgäste wird mit der jeweiligen mittleren Fahrtweite multipliziert. Die mittlere Fahrtweite ergibt sich wiederum aus dem Quotienten der Fzkm_{besetzt} und der Anzahl Buchungen_{durchgeführt} (vgl. VDV, 2025b, S. 22-23) (s. Kapitel 4.3).

Im Vergleich der Systeme weist *LOOPmünster* mit 876.326 Pkm_{gefahren} das höchste Beförderungsvolumen auf, gefolgt von *G-Mobil* mit 228.185 Pkm, dem *kommit-Shuttle* mit 65.504 Pkm und *Bussi* mit 56.259 Pkm. Die Differenzen in den absoluten Werten lassen sich im Wesentlichen durch Unterschiede in den Fzkm, der Fahrgastnachfrage sowie durch das jeweilige Angebot an Fahrzeugen und Betriebszeiten erklären.

Auch hinsichtlich der mittleren Fahrtweiten bestehen systembedingte Unterschiede: Bei *Bussi* beträgt die durchschnittliche Fahrtweite 4,05 km und liegt damit vergleichsweise hoch, während sie beim *kommit-Shuttle* mit 2,49 km deutlich niedriger ausfällt. Die mittleren Fahrtweiten sind vor dem Hintergrund der jeweiligen räumlich-betrieblichen Rahmenbedingungen einzuordnen.

Bündelungs- und Besetzungsquoten

Die Bündelungsquote (Formel 6.6) ist gemäß § 50 PBefG definiert und beschreibt das Verhältnis der von Fahrgästen zurückgelegten Reiseweiten (Pkm_{gefahren}) zur gesamten Fahrzeugfahrleistung (Fzkm_{total}) einschließlich der Anfahrts- und Abfahrtswege im Rahmen von Fahrtenbündelungen.

$$\text{Bündelungsquote (nach § 50 PBefG)} = \frac{\text{Pkm}_{\text{gefahren}}}{\text{Fzkm}_{\text{total}}} \quad (6.6)$$

Die Besetzungsquote (Formel 6.7) hingegen gibt das Verhältnis der Pkm_{gefahren} zur Fahrzeugleistung mit Fahrgästen an (Fzkm_{besetzt}) und wird gemäß der FGSV (2021) herangezogen (vgl. FGSV, 2021, S. 28–32).

$$\text{Besetzungsquote (nach FGSV, 2021)} = \frac{\text{Pkm}_{\text{gefahren}}}{\text{Fzkm}_{\text{besetzt}}} \quad (6.7)$$

Die Bündelungsquote ist für gebündelte Bedarfsverkehre gemäß § 50 PBefG gesetzlich verpflichtend nachzuweisen. Sie dient der Bewertung der Auswirkungen von Linienbedarfsverkehren auf öffentliche Verkehrsinteressen sowie deren Umweltverträglichkeit. Je größer der Umweg ist, den Fahrgäste durch das Bündelungskonzept in Kauf nehmen, desto höher fällt die Bündelungsquote aus (vgl. FGSV, 2021, S. 28–32).

Zusammenfassend stellen Bündelungs- und Besetzungsquote zentrale Kenngrößen zur Beurteilung gebündelter Bedarfsverkehre sowie von Linienbedarfsverkehren dar. Sie ermög-

lichen eine Bewertung sowohl ökologischer als auch ökonomischer Aspekte des Verkehrsangebots und schaffen Vergleichbarkeit mit konventionellen Verkehrsmitteln wie Linienbussen oder Taxis. Eine systembezogene Einordnung der erzielten Werte erfolgt im nachfolgenden Unterkapitel.

Systemeffizienz

Ein zentraler Indikator zur Bewertung der Effizienz von Linienbedarfsverkehren ist die Systemeffizienz. Die von Liebchen et al. (vgl. 2020, S. 5–7) eingeführte Kennzahl setzt den erzeugten Nutzen ins Verhältnis zum betrieblichen Aufwand und erlaubt Rückschlüsse auf ökologische Effekte. Grundlage der Berechnung sind die Buchungskilometer, also jene Distanzen, die die Nutzenden hypothetisch mit einem privaten Fahrzeug (oder zu Fuß) zurückgelegt hätten. Hierzu wurden Start- und Zielorte der Buchungen mittels Geoinformationssystem auf das reale Straßennetz projiziert (schnellste Route, ohne Autobahnen) und die resultierenden Distanzen anschließend aggregiert. Diese Werte werden den $Fzkm_{total}$ gegenübergestellt (s. Formel 6.8).

$$\text{Systemeffizienz (nach Liebchen et al. 2020, vgl. S. 5-7)} = \frac{Pkm_{gebucht}}{Fzkm_{total}} \quad (6.8)$$

Ein Referenzwert von 1,36 für den Pkw-Verkehr dient nach FGSV (vgl. 2021, S. 31–32) als Schwelle: Wird dieser Wert überschritten, verursacht der Linienbedarfsverkehr weniger $Fzkm$ als der MIV. Dieser Wert entspricht näherungsweise dem aus der *Mobilität in Deutschland* ableitbaren leistungsbezogenen Pkw-Besetzungsgrad (vgl. Nobis & Kuhnimhof, 2018, S. 46). Für *Bussi* konnte die Systemeffizienz aufgrund datenschutzbedingter Datenlücken nicht ermittelt werden. Bei den übrigen Systemen liegen die Ergebnisse unterhalb des Referenzwerts. *LOOPmünster* weist mit 0,72 die höchste Systemeffizienz auf, gefolgt von *G-Mobil* (0,58) und dem *kommit-Shuttle* (0,51). Zu beachten ist, dass derzeit kein standardisiertes Verfahren zur Bestimmung der Buchungskilometer existiert. Die resultierenden Kennzahlen sind daher mit methodischer Vorsicht zu interpretieren. Bei *LOOPmünster* konnten zudem rund 6.302 Buchungen_{durchgeführt} (ca. 4 % des Gesamtaufkommens) aufgrund fehlender Ausstiegspunkte nicht georeferenziert einbezogen werden. Die tatsächliche Systemeffizienz dürfte folglich höher liegen als der ausgewiesene Wert.

6.1.3 Zusammenfassende Gegenüberstellung betrieblicher Kennzahlen

Wie im vorherigen Kapitel festzustellen ist, ist ein direkter Vergleich der Verkehre aufgrund ihrer konzeptionellen Ausgestaltung, insbesondere im Hinblick auf Betriebszeiten, Flottengröße und die damit verbundene Betriebsleistung, nur eingeschränkt möglich. Um dennoch eine systematische Vergleichbarkeit herzustellen, werden im Folgenden die relevanten Kenngrößen auf die aktiven Servicestunden (bzw. Fahrzeugstunden) der jeweiligen Flotten normiert und miteinander in Beziehung gesetzt. Dadurch kann eine Bewertung unabhängig von betrieblichen Rahmenbedingungen erfolgen. Die vergleichbaren Kenngrö-

ßen sind Tabelle 6.3 zu entnehmen.

Tab. 6.3: Normierter Vergleich der betrieblichen Effizienz der Systeme (nach Tab. 5-3 Bruder und Klemmer, 2024, S. 64)

2022	<i>Bussi</i>	<i>G-Mobil</i>	<i>kommit-Shuttle</i>	LOOP-münster
Fahrzeugstunden (aktiv) [h]	4.459	18.849	8.954	59.723
Fahrtanfragen _{zulässig} pro Fahrzeugstunde	4,0	18,9	9,8	12,9
Buchungen _{durchgeführt} pro Fahrzeugstunde	1,9	3,2	2,4	2,5
Poolingquote [%]	11 %	29 %	23 %	30 %
Besetzungsquote (nach FGSV, 2021)	1,64	1,24	1,20	1,24
Beförderte Fahrgäste pro Fahrzeugstunde	3,1	4,0	2,9	3,1
Mittlere Fahrtweite [km]	4,05	3,06	2,49	4,68
Bündelungsquote (nach § 50 PBefG)	0,72	0,68	0,56	0,70
Pkm _{gefahren} pro Fahrzeugstunde	12,6 Pkm/h	12,1 Pkm/h	7,3 Pkm/h	14,7 Pkm/h
Leerkilometeranteil [%]	56 %	45 %	53 %	43 %

Nachfolgend wird das System *Bussi* hinsichtlich zentraler Leistungskennzahlen analysiert. Es zeigt eine vergleichsweise geringe Fahrgastnachfrage, gemessen an der Anzahl der Fahrtanfragen_{zulässig} pro Fahrzeugstunde (4,0). Auch die Anzahl der Buchungen_{durchgeführt} pro Fahrzeugstunde (1,7) liegt auf einem niedrigen Niveau. Die Poolingquote beträgt lediglich 11 % und stellt damit den geringsten Wert unter den betrachteten Systemen dar. Trotz dieser Einschränkungen weist *Bussi* die höchste Besetzungsquote auf (1,64), was durch einen überdurchschnittlich hohen Anteil an Gruppenbuchungen bedingt ist. Diese führen dazu, dass pro Fahrzeugstunde durchschnittlich 3,1 Fahrgäste transportiert werden. Dieser Wert liegt auf einem ähnlichen Niveau wie die Fahrgastzahlen anderer Systeme, obwohl Nachfrage, Poolingquote und Buchungsanzahl im Vergleich zu diesen unterdurchschnittlich ausfallen. Die durchschnittliche Fahrtweite beträgt 4,1 Kilometer und liegt im oberen Bereich der untersuchten Systeme. Aufgrund der hohen Besetzungsquote wird trotz der geringen Nachfragekennzahlen die höchste Bündelungsquote (0,72) erzielt. Die generierten Pkm pro Fahrzeugstunde (12,6) bewegen sich, bedingt durch die Kombination aus hoher Besetzungsquote und überdurchschnittlicher Fahrtweite, im durchschnittlichen Bereich der betrachteten Systeme.

Das *G-Mobil* zeigt unter den untersuchten Systemen die höchste Fahrgastnachfrage, gemessen an 18,9 Fahrtanfragen_{zulässig} pro Fahrzeugstunde. Im Zusammenhang mit der hohen Nachfrage zeigen sich auch erhöhte Werte bei der Anzahl der Buchungen_{durchgeführt} (3,2) sowie der Zahl der transportierten Fahrgäste pro Fahrzeugstunde (4,0). auf einem überdurchschnittlichen Niveau. In beiden Kennzahlen erzielt das *G-Mobil* die höchsten Werte im Vergleich. Die Poolingquote beträgt 29 % und ist damit ebenfalls vergleichswei-

se hoch. Die Besetzungsquote liegt bei 1,24 und fällt somit deutlich niedriger aus als bei *Bussi*, jedoch höher als beim *kommit-Shuttle*. Die durchschnittliche Fahrtweite beträgt 3,1 Kilometer und ist damit als eher kurz einzustufen. Aufgrund der Kombination aus geringer Fahrtweite und hoher Beförderungsleistung pro Fahrzeugstunde liegen sowohl die generierten Pkm (12,1) als auch die Bündelungsquote (0,68) unter den Werten von *LOOPmünster*, stellen jedoch jeweils die zweithöchsten Werte im Vergleich dar.

Das *kommit-Shuttle* weist mit 9,8 Fahrthanfragen_{zulässig} pro Fahrzeugstunde eine leicht unterdurchschnittliche Nachfrage auf. Entsprechend liegt auch die Anzahl der Buchungen_{durchgeführt} pro Fahrzeugstunde auf einem niedrigeren Niveau (2,4). Die Poolingquote ist als durchschnittlich einzustufen (23 %), liegt jedoch über der von *Bussi*, aber unter den Werten von *G-Mobil* und *LOOPmünster*. Die Besetzungsquote beträgt 1,2 und stellt den niedrigsten Wert im Vergleich dar, was auf einen geringen Anteil an Gruppenbuchungen hinweist. Die vergleichsweise geringe Fahrgastnachfrage in Verbindung mit einer durchschnittlichen Buchungsanzahl führt dazu, dass 2,9 Fahrgäste pro Fahrzeugstunde befördert werden. Darüber hinaus beträgt die mittlere Fahrtweite des *kommit-Shuttles* 2,5 Kilometer und stellt damit den niedrigsten Wert unter den betrachteten Systemen dar. Die geringe Distanz korrespondiert mit der begrenzten Größe des Betriebsgebiets zu Beginn des Analysezeitraums. Infolge der niedrigen Besetzungsquote, des geringen Fahrgastaufkommens pro Fahrzeugstunde sowie der kurzen Fahrtweite erreicht das *kommit-Shuttle* mit 7,3 Pkm_{gefahren} pro Fahrzeugstunde den niedrigsten Wert hinsichtlich der betrieblichen Effizienz im Vergleich der untersuchten Systeme.

LOOPmünster weist nach dem *G-Mobil* die zweithöchste Fahrgastnachfrage auf, gemessen an 12,9 Fahrthanfragen_{zulässig} pro Fahrzeugstunde. Dies ist insofern bemerkenswert, als die Betriebszeiten umfassender sind als bei den anderen Systemen und somit tendenziell mehr Schwachlastzeiten abgedeckt werden. Gleichzeitig erklärt dies auch die vergleichsweise geringe Angebotsverfügbarkeit, da ein erheblicher Anteil der Fahrthanfragen während der Hauptverkehrszeiten auftritt. Die Poolingquote beträgt 30 % und stellt den höchsten Wert im Vergleich dar. Dieser Wert fällt mit einer relativ hohen Fahrgastnachfrage zusammen, gemessen an der Anzahl der Fahrthanfragen_{total}. Die Anzahl der Buchungen_{durchgeführt} pro Fahrzeugstunde liegt bei 2,5. Damit übertrifft *LOOPmünster* die Buchungsanzahl pro Fahrzeugstunde von *Bussi* und dem *kommit-Shuttle*, bleibt jedoch hinter dem *G-Mobil* zurück. Die Besetzungsquote *LOOPmünsters* ist mit dem Wert des *G-Mobils* vergleichbar und lässt sich als leicht positiv einordnen. Hinsichtlich der Bündelungsquote sowie der Anzahl der beförderten Fahrgäste pro Fahrzeugstunde erreicht *LOOPmünster* ein Effizienzniveau, das dem von *Bussi* entspricht. Im Unterschied zu *Bussi*, wo dieses Ergebnis vorwiegend durch eine hohe Anzahl an Gruppenbuchungen zustande kommt, ist es bei *LOOPmünster* primär auf tatsächliche Fahrtenzusammenlegungen (Pooling) zurückzuführen. Die generierten Pkm_{gefahren} pro Fahrzeugstunde betragen 14,7 und stellen den höchsten Wert unter den betrachteten Systemen dar. Sie liegen deutlich über den entsprechenden Werten von *Bussi*, *G-Mobil* und dem *kommit-Shuttle*.

Für die Beurteilung der betrieblichen Effizienz von Linienbedarfsverkehren sind insbesondere die Pkm_{gefahren} pro Fahrzeugstunde sowie die Anzahl der beförderten Fahrgäste pro

Stunde relevante Kennwerte. Auf Basis dieser beiden Indikatoren weist das *G-Mobil* die höchste Effizienz unter den betrachteten Systemen auf. Es transportiert durchschnittlich vier Fahrgäste pro Fahrzeugstunde und erzielt dabei rund 12,1 Pkm_{gefahren}. Zwar befördert *LOOPmünster* weniger Fahrgäste pro Fahrzeugstunde, jedoch legen diese im Durchschnitt längere Strecken zurück, was zu höheren Pkm pro Servicestunde führt. An dritter Stelle folgt *Bussi*. Trotz einer vergleichsweise geringen Bündelungseffizienz wird durch eine hohe Anzahl an Gruppenbuchungen eine ähnlich hohe Fahrgastanzahl pro Fahrzeugstunde wie bei *LOOPmünster* erreicht. Das *kommit-Shuttle* transportiert die geringste Anzahl an Fahrgästen pro Stunde. Aufgrund der kürzesten mittleren Fahrtweite verzeichnet es auch den niedrigsten Wert bei den Pkm_{gefahren} pro Fahrzeugstunde.

6.2 Darstellung und Beschreibung der THG-Bilanz-Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der THG-Bilanzierung unter Anwendung der *Well-to-Wheel-Betrachtung* (*WtW*) analysiert. Diese Methodik berücksichtigt den Lebenszyklus der verwendeten Energie von der Erzeugung bis zur Nutzung (s. Kapitel 4). Ausgewiesen werden sowohl absolute Werte (in kg CO₂e) als auch spezifische Werte bezogen auf die Allokationseinheit Pkm_{gefahren}.

Zunächst werden die Emissionen unter Berücksichtigung des bundesweiten Strommixes (s. Tabelle 6.4) dargestellt. Dabei wird analysiert, inwieweit sich energetische, fahrzeugtechnologische und betriebliche Aspekte auf die THG-Bilanz auswirken. Anschließend erfolgt die Betrachtung unter Annahme vollständig bezogenen Ökostroms (s. Tabelle 6.5).

Tab. 6.4: *WtW*-THG-Emissionsbilanz der Systeme unter Annahme des bundesweiten Strommixes (Umweltbundesamt, 2024, Tab. 1) (in Anlehnung an Bruder und Klemmer, 2024, Tab. 5-4, S. 67)

Linienbedarfsverkehr	Strommix DE	
	WtW-THG-Emissionen_{total}	WtW-THG-Emissionen_{pkm}
<i>Bussi</i>	11.263 kg CO ₂ e	200,2 g CO ₂ e pro Pkm
<i>G-Mobil</i>	62.314 kg CO ₂ e	273,1 g CO ₂ e pro Pkm
<i>kommit-Shuttle</i>	16.973 kg CO ₂ e	259,1 g CO ₂ e pro Pkm
<i>LOOPmünster</i>	181.862 kg CO ₂ e	207,5 g CO ₂ e pro Pkm

Bussi weist mit 200,2 g CO₂e pro Pkm die geringsten spezifischen *WtW*-THG-Emissionen auf. Trotz geringer Nachfrage, geringem Anteil gebündelter Buchungen und hohem Leerkilometeranteil ergibt sich ein vergleichsweise hoher Besetztgrad. Dieser ist jedoch primär auf Gruppenbuchungen und weniger auf eine systemseitige Bündelung unabhängiger Fahrtanfragen zurückzuführen. Die geringsten absoluten THG-Emissionen_{total} erklären sich insbesondere durch die geringe wöchentliche Betriebsdauer und die kleine Flottengröße von fünf Fahrzeugen.

Das *G-Mobil* weist mit 273,1 g CO₂e pro Pkm die höchsten spezifischen THG-Emissionen der analysierten Systeme auf. Das Ergebnis ist wesentlich auf die Fahrzeugflotte zurückzu-

führen, die neben Hybridfahrzeugen auch Dieselfahrzeuge umfasst. Rund 25 % der gesamten Fahrleistung, gemessen an den $Fzkm_{total}$, entfällt auf Dieselfahrzeuge. Zudem führen kurze durchschnittliche Reiseweiten zu einem geringeren Verkehrsaufkommen in Pkm und mindern die betriebliche Effizienz. Eine hohe Poolingquote sowie ein niedriger Leerkilometeranteil wirken diesem Effekt zwar entgegen, können die negativen Auswirkungen der eingesetzten Antriebstechnologie jedoch nicht vollständig kompensieren.

Das *kommit-Shuttle* weist mit 259,1 g CO₂e pro Pkm ebenfalls hohe spezifische THG-Emissionen auf. Ursachen hierfür sind insbesondere kurze durchschnittliche Reiseweiten, eine geringe Fahrgastnachfrage, niedrige Fahrzeugauslastungen und ein hoher Leerkilometeranteil. Aufgrund der kleinen Flottengröße von zwei Fahrzeugen fallen die absoluten Emissionen dennoch vergleichsweise gering aus.

Mit 181.862 kg CO₂e verzeichnet *LOOPmünster* die höchsten absoluten *WtW*-THG-Emissionen. Hauptgründe sind die langen Betriebszeiten und der große Fahrzeugpool. Gleichzeitig erreicht das System mit 207,5 g CO₂e pro Pkm die zweitniedrigsten spezifischen Emissionen. Dies ist auf ein hohes Fahrgastaufkommen pro Stunde, lange Reiseweiten, eine hohe Verkehrsleistung sowie eine geringe Leerkilometerquote zurückzuführen. Trotz hoher Poolingquote liegt die Besetzungsquote infolge seltener Gruppenbuchungen unter der von *Bussi*. Dies zeigt, dass eine hohe betriebliche Effizienz zwar zur Senkung spezifischer Emissionen beitragen kann, jedoch nicht zwangsläufig mit einer günstigen Gesamtbilanz einhergeht.

Da aufgrund unterschiedlicher Ladestandorte und regional variierender Strombereitstellung keine einheitlichen Emissionsfaktoren für den Ladestrom bestimmt werden konnten (s. Kapitel 4.6), erfolgt ergänzend eine Bilanzierung unter Annahme von Ökostrom (s. Tabelle 6.5).

Tab. 6.5: *WtW*-THG-Emissionsbilanz der Systeme unter Annahme von Ökostrom (vgl. LANUK, 2022, Emissionsfaktoren 2022) (in Anlehnung an Tab. 5-4 Bruder und Klemmer, 2024, S. 67)

Linienbedarfsverkehr	Ökostrom	
	WtW-THG-Emissionen _{total}	WtW-THG-Emissionen _{pkm}
<i>Bussi</i>	3.877 kg CO ₂ e	68,9 g CO ₂ e pro Pkm
<i>G-Mobil</i>	35.574 kg CO ₂ e	155,9 g CO ₂ e pro Pkm
<i>kommit-Shuttle</i>	5.843 kg CO ₂ e	89,2 g CO ₂ e pro Pkm
<i>LOOPmünster</i>	62.602 kg CO ₂ e	71,4 g CO ₂ e pro Pkm

Durch den Einsatz von Ökostrom lassen sich die THG-Emissionen deutlich reduzieren; Abbildung 6.1 veranschaulicht die daraus resultierenden Unterschiede.

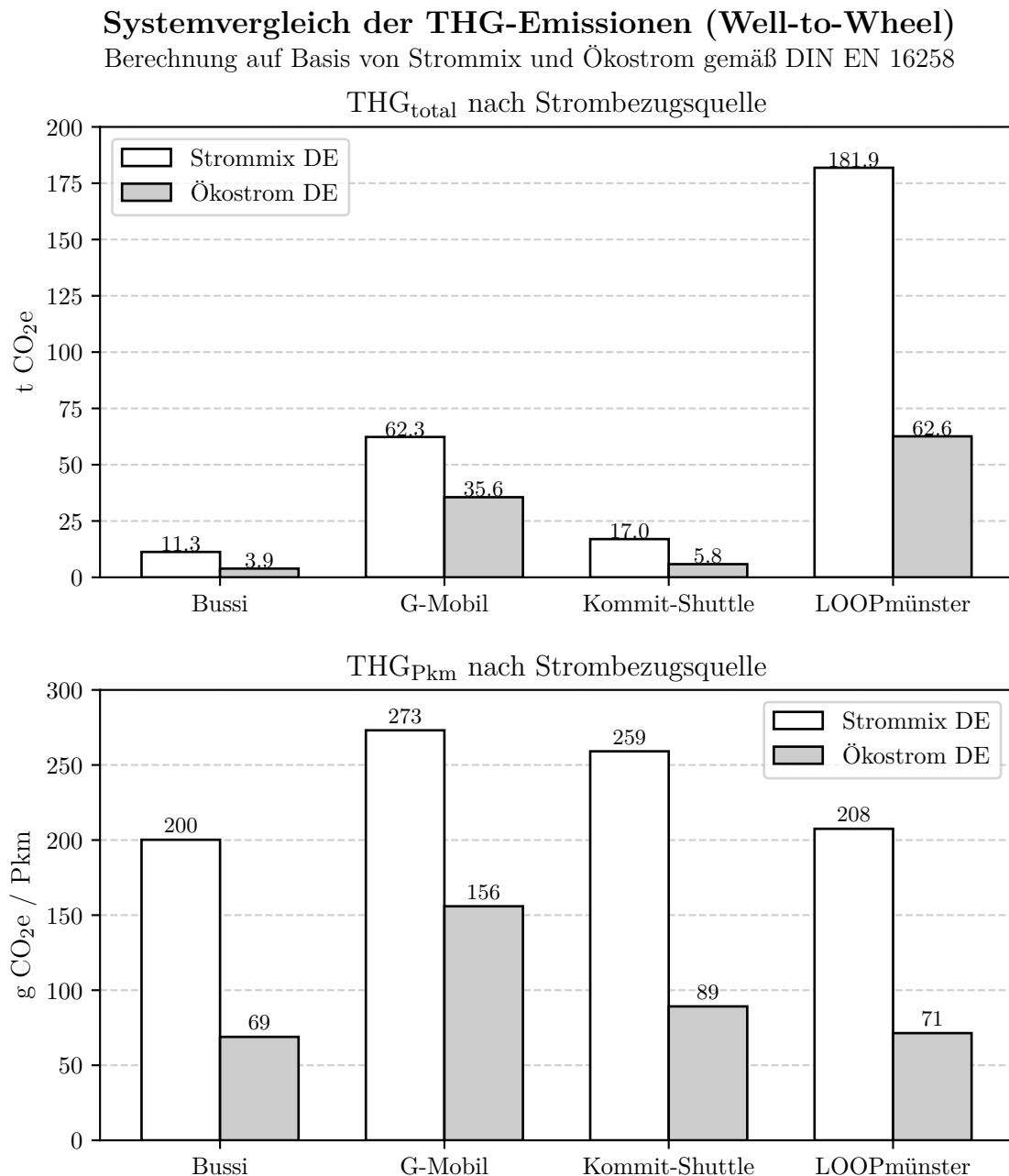


Abb. 6.1: Vergleich der THG-Bilanzierungsergebnisse unter *WtW*-Betrachtung nach *DIN EN 16258* (nach Abb. 5-5 Bruder und Klemmer, 2024, S. 69).

Zum Vergleich

Der durchschnittliche jährliche CO₂e-Ausstoß einer in Deutschland lebenden Person beträgt im Jahr 2025 etwa 10,3 t (UBA, 2025, Abschn. „Wie hoch sind die Treibhausgasemissionen pro Person in Deutschland und wie viel wäre klimaverträglich?“).

Die Emissionsdifferenzen zwischen den betrachteten Systemen bleiben bestehen, weisen jedoch eine abgeschwächte Ausprägung auf. Systeme wie *Bussi*, *kommit-Shuttle* und *LOOPmünster*, deren Fahrzeugflotten ausschließlich aus Plug-in-Hybridfahrzeugen desselben Typs bestehen, profitieren in besonderem Maße vom Einsatz von Ökostrom. Da diese Fahrzeuge anteilig elektrisch betrieben werden, können sie auf eine emissionsärmere

Energiequelle zugreifen. Beim *G-Mobil* fällt die THG-Minderung durch die Umstellung auf Ökostrom hingegen anteilig geringer aus, da neben baugleichen Plug-in-Hybridfahrzeugen zusätzlich Dieselfahrzeuge eingesetzt werden, die nicht vom emissionsarmen Strommix profitieren.

Laut Bilanzierung würden die THG-Emissionen_{total} im System *Bussi* durch den ausschließlichen Einsatz von Ökostrom um ca. 7,3 t CO₂e (−66 %) reduziert. Für *G-Mobil* ergibt sich eine Minderung um 26,7 t CO₂e (−43 %), für das *kommit-Shuttle* um 11,1 t CO₂e (−65 %) und für *LOOPmünster* um 119,2 t CO₂e (−65 %). Die identische Reduktionsquote bei *Bussi*, *kommit-Shuttle* und *LOOPmünster* ist darauf zurückzuführen, dass in diesen Systemen im Jahr 2022 baugleiche Fahrzeugtypen eingesetzt wurden und die Emissionsbilanzen auf einheitlichen Verbrauchsdaten und Emissionsfaktoren basieren.

Über die aggregierten Emissionswerte hinaus lassen sich systemübergreifende Muster erkennen: Die Emissionen pro Pkm verringern sich methodisch bedingt proportional. Bei Nutzung von Ökostrom fallen die Emissionsunterschiede zwischen Systemen mit identischer Fahrzeugflotte deutlich geringer aus. So beträgt die Differenz zwischen *Bussi* und dem *kommit-Shuttle* beim Strommix rund 58,9 g CO₂e/Pkm, bei Ökostrom hingegen nur noch etwa 20 g CO₂e/Pkm. Das System *G-Mobil* verdeutlicht darüber hinaus, dass ein hoher Dieselanteil die Emissionsbilanz trotz betrieblicher Effizienz signifikant verschlechtern kann. Der Vergleich zeigt, dass Antriebsstruktur und Energieversorgung wesentliche Einflussfaktoren auf die THG-Bilanz von Linienbedarfsverkehren darstellen.

6.3 Vergleich der THG-Bilanzierungsergebnisse mit konventionellen Verkehrsmitteln

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der THG-Bilanzierung den THG-Emissionen konventioneller Verkehrsmittel gegenübergestellt. Abbildung 6.2 veranschaulicht die spezifischen THG-Emissionen der analysierten Systeme im Vergleich zu anderen Verkehrsmitteln. Die Referenzdaten für konventionelle Verkehrsmittel stammen aus einer Veröffentlichung des Umweltbundesamtes und beziehen sich ebenfalls auf Emissionen pro Pkm in CO₂-Äquivalenten unter Berücksichtigung vorgelagerter Prozessketten, womit ebenfalls ein *WtW*-Betrachtungsansatz zugrunde liegt (UBA, 2021, Tab. 3).

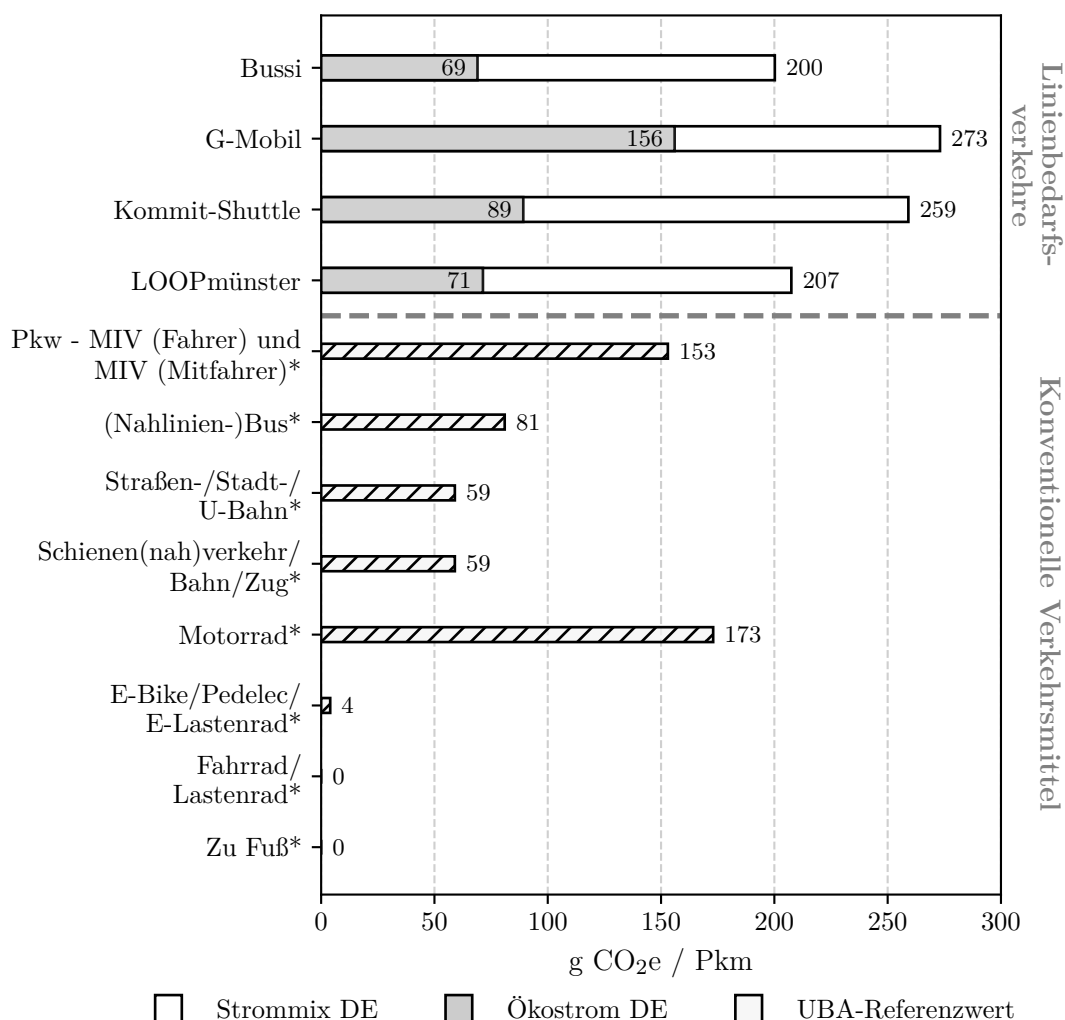
Ein Vergleich der THG-Bilanzierung der Linienbedarfsverkehre mit den Emissionen konventioneller Verkehrsträger zeigt, dass die spezifischen THG-Emissionen der bedarfsorientierten Angebote insgesamt höher ausfallen. Grundlage der Bilanzierung ist die Annahme, dass 100 % des eingesetzten Ladestroms dem deutschen Strommix des Jahres 2022 entsprechen. Auch beim emissionsärmsten analysierten System (*Bussi*) liegen die CO₂e-Emissionen pro Pkm unter den betrachteten Rahmenbedingungen etwa 30 % über dem Referenzwert eines Pkws (153 g CO₂e pro Pkm nach UBA, 2021, Tab. 3). Dieses Muster zeigt sich konsistent über alle analysierten Dienste hinweg. Im Vergleich zu einem (nahverkehrstypischen) Linienbus emittiert das *kommit-Shuttle* etwa 319 % mehr CO₂e pro Pkm.

Die spezifischen THG-Emissionen von Linienbedarfsverkehren werden maßgeblich durch

ihre Besetzungsquoten und den Anteil an $Fzkm_{\text{leer}}$ beeinflusst. Solche Leerfahrten finden im MIV sowie im nichtmotorisierten Verkehr in der Regel nicht statt und sind im konventionellen Linienverkehr i. d. R. nur in geringem Umfang vorhanden.

Systemvergleich der THG-Emissionen (Well-to-Wheel)

Berechnung auf Basis von Strommix und Ökostrom gemäß DIN EN 16258



* Daten: Umweltbundesamt, Umweltfreundlich mobil!, 2022

Abb. 6.2: Gegenüberstellung der THG-Emissionen der Linienbedarfsverkehre mit konventionellen Verkehrsmitteln in g CO₂e/Pkm nach *WtW*-Betrachtung (nach Bruder & Klemmer, 2024, Abb. 5-2, S. 71)

Wird hingegen eine vollständige Versorgung der Linienbedarfsverkehre mit Ökostrom angenommen, ändert sich die Bewertung der Umweltwirkungen grundlegend. Unter dieser Voraussetzung ergeben sich für die Linienbedarfsverkehre signifikant geringere spezifische CO₂e-Emissionen. In einzelnen Fällen, insbesondere bei besonders effizienten Systemen wie *LOOPmünster* oder *Bussi*, fällt die Emissionsbilanz günstiger aus als die eines durchschnittlichen Pkw oder eines typischen Linienbusses.

Im Vergleich zu konventionellen Verkehrsmitteln weisen schienengebundene Systeme wie Straßen-, Stadt- und U-Bahnen in der Regel niedrigere spezifische THG-Emissionen pro

Pkm auf. Die analysierten Linienbedarfsverkehre erreichen dieses Emissionsniveau auch unter der Annahme von Ökostrom derzeit nicht. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Vergleichswerte kontextabhängig sind und die betrachteten Verkehrsmittel nicht in allen Untersuchungsräumen gleichermaßen als reale Alternative verfügbar sind.

Selbst Systeme mit vergleichsweise hohen Emissionswerten (bei Nutzung des regulären deutschen Strommixes), wie das *kommit-Shuttle*, erreichen bei vollständiger Versorgung mit Ökostrom CO₂e-Werte, die signifikant unter dem Niveau eines durchschnittlichen Pkw liegen (−42%). Trotz des Einsatzes von Ökostrom erreicht das *G-Mobil* lediglich Emissionswerte, die mit denen eines durchschnittlichen Pkw vergleichbar sind, da rund 25 % der Fzkm_{total} durch Fahrzeuge mit Dieselantrieb zurückgelegt wurden.

Insgesamt verdeutlichen die Ergebnisse, dass die THG-Emissionen von Ridepooling-Systemen maßgeblich von den angenommenen Emissionen des Ladestroms abhängen. Während bei Nutzung des regulären deutschen Strommixes die Emissionen im Vergleich zu konventionellen Verkehrsmitteln in der Regel ungünstiger ausfallen, kann durch die vollständige Versorgung mit regenerativ erzeugtem Strom eine substantielle Reduktion der spezifischen CO₂e-Emissionen erreicht werden.

6.4 Bewertung der THG-Nettoeffekte auf Basis der Substitutionsszenarien

Nachfolgend wird auf Grundlage der in Kapitel 4.4 beschriebenen Substitutionsszenarien analysiert, welche ökologischen Auswirkungen die THG-Bilanzierungswerte von Linienbedarfsverkehren im Vergleich zu den Verkehrsmitteln haben, die ohne das Ridepooling-Angebot genutzt worden wären. Es handelt sich damit um eine kontrafaktische Analyse, bei der die durch das Ridepooling-System erbrachte Verkehrsleistung hypothetisch auf andere Verkehrsmodi verteilt wird.

Die Annahmen über die jeweils ersetzten Verkehrsmittel basieren auf Modal-Split-Daten sowie ergänzenden Nutzendenbefragungen der wissenschaftlichen Begleitforschungen (Hartz et al., 2024, S. 59–60; Wittowsky & Malow, 2022, S. 65; Wetzchewald & Schäfer-Sparenberg, 2022, S. 24; Koska & Wetzchewald, 2022, S. 25). Auf dieser Grundlage wird für jedes Substitutionsszenario V1–V4 die hypothetische Emissionsbilanz ermittelt, indem die beobachteten Pkm mit den spezifischen THG-Emissionsfaktoren des Umweltbundesamtes multipliziert werden (UBA, 2021, Tab. 3). Der Vorteil dieser Vorgehensweise besteht darin, dass potenzielle Kannibalisierungs- und Rebound-Effekte, z.,B. durch induzierten Verkehr, explizit berücksichtigt und die ökologischen Wirkungen differenzierter abgeschätzt werden können. Gleichzeitig ermöglicht das Verfahren auch die Bestimmung der THG-Nettoeffekte.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 6.3 dargestellt. Die dunkelgrauen Balken, als „Referenzmobilität Betriebsgebiet“ bezeichnet, zeigen die auf Grundlage der Szenarien V1–V4 berechneten THG-Emissionen. Dargestellt sind jeweils *Minimal*- und *Maximalannahmen*, die die Bandbreite der Substitutionsszenarien abbilden. Anschließend erfolgt der Vergleich mit den Emissionen der Linienbedarfsverkehre bei vollständiger Ladung mit dem bundes-

weiten Strommix sowie mit Ökostrom.

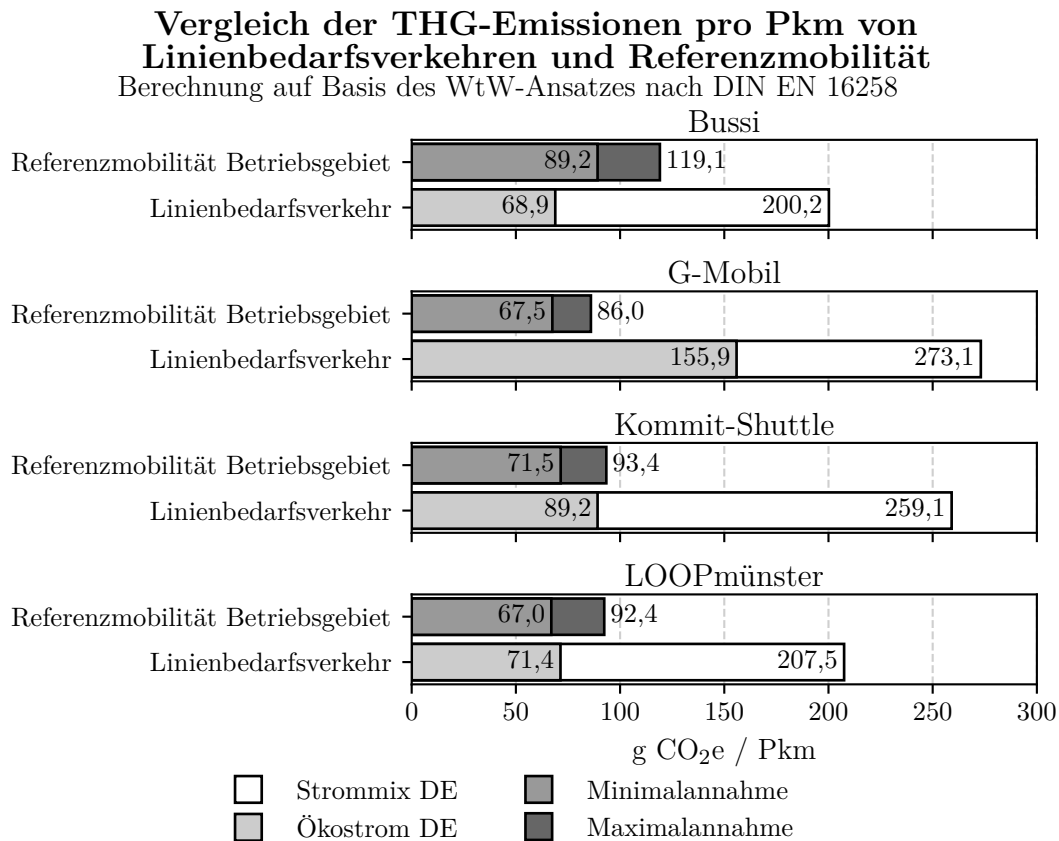


Abb. 6.3: Gegenüberstellung der THG-Emissionen der Linienbedarfsverkehre pro Pkm mit der Referenzmobilität im Betriebsgebiet (Minimal- und Maximalannahme) (nach Abb. 5-3 Bruder und Klemmer, 2024, S. 73)

Unter der Verwendung des deutschen Strommixes und unter Berücksichtigung der *Minimal-* und *Maximalannahmen* der Substitutionsszenarien V1-V4 ergeben sich für die Linienbedarfsverkehre die folgenden THG-Nettoeffekte. Diese werden jeweils als Differenz zwischen den durch Ridepooling verursachten Emissionen und den Emissionen der entsprechenden Referenzmobilität berechnet. Die Darstellung erfolgt in absoluten THG-Werten, um die gesamtverkehrlichen Nettoeffekte der Systeme innerhalb ihrer jeweiligen Betriebsgebiete abzubilden. Die vollständigen Berechnungen der Netto-THG-Effekte sind im Anhang dargestellt (s. Anhang A.6). In allen untersuchten Systemen zeigt sich für das Jahr 2022 (Status quo) ein zusätzlicher THG-Ausstoß gegenüber der Referenzmobilität. Negative Werte kennzeichnen Einsparungen, positive Werte einen zusätzlichen Ausstoß:

- *Bussi*: 4.562 bis 6.245 kg CO₂e
- *G-Mobil*: 42.815 bis 46.904 kg CO₂e
- *kommit-Shuttle*: 10.855 bis 12.288 kg CO₂e
- *LOOPmünster*: 100.881 bis 121.943 kg CO₂e

Selbst bei Angeboten mit vergleichsweise hoher betrieblicher Effizienz, wie *LOOPmünster* oder *Bussi*, resultiert ein zusätzlicher THG-Ausstoß im Vergleich zur Referenzmobilität

im jeweiligen Betriebsgebiet. Systemübergreifend ergibt sich ein aggregierter Mehrausstoß von +159,1 bis +187,4 t CO₂e.

Unter der Verwendung von Ökostrom und unter Berücksichtigung der *Minimal-* und *Maximalannahmen* der Substitutionsszenarien V1-V4 ergeben sich für die Linienbedarfsverkehre die folgenden THG-Nettoeffekte:

- *Bussi*: -1.141 bis -2.824 kg CO₂e
- *G-Mobil*: 16.072 bis 20.161 kg CO₂e
- *kommit-Shuttle*: 1.159 bis -275 kg CO₂e
- *LOOPmünster*: 2.675 bis -18.387 kg CO₂e

Werden die Ergebnisse der THG-Bilanzierung unter vollständiger Verwendung von Ökostrom betrachtet, ergibt sich ein deutlich verändertes Bild. Unter diesen Voraussetzungen fallen die Netto-THG-Emissionen der Ridepooling-Verkehre erheblich niedriger aus. Über alle vier Systeme aggregiert ergeben sich in Abhängigkeit der zugrunde gelegten *Minimal-* und *Maximalannahmen* Wertebereiche von einem zusätzlichen Ausstoß von 22,9 t CO₂e bis hin zu einer Einsparung von 5,4 t CO₂e.

Für *LOOPmünster* und das *kommit-Shuttle* liegen die Netto-THG-Emissionen zwar oberhalb der *Minimalannahme* der Referenzmobilität im jeweiligen Betriebsgebiet, jedoch unterhalb der *Maximalannahme*. Das System *Bussi*, das die niedrigsten THG-Emissionen pro Pkm aufweist, erreicht unter vollständiger Verwendung von Ökostrom sogar Nettoeinsparungen unterhalb der *Minimalannahme*.

Für das System *G-Mobil* ergibt sich hingegen kein ökologischer Vorteil gegenüber den *Minimal-* und *Maximalannahmen* der Referenzmobilität. Ursächlich hierfür ist der Anteil von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor innerhalb der Fahrzeugflotte, insbesondere von Dieselfahrzeugen.

Die Analyse der THG-Nettoeffekte auf Grundlage der Substitutionsszenarien zeigt, dass das lokale Mobilitätsverhalten maßgeblich zur Ausprägung der THG-Bilanzen der Substitutionsszenarien beiträgt. Zwar dominiert in allen betrachteten Betriebsgebieten der motorisierte Individualverkehr (MIV; Fahrende und Mitfahrende) den Modal Split, jedoch unterscheiden sich die Anteile umweltfreundlicher Verkehrsarten zwischen den Systemen deutlich. So weisen *G-Mobil*, *kommit-Shuttle* und *LOOPmünster* vergleichsweise hohe Anteile des Rad- und Fußverkehrs auf, während dieser beim System *Bussi* deutlich geringer ausfällt (s. Kapitel 5). Da Rad- und Fußverkehr im Durchschnitt mit geringeren THG-Emissionen verbunden sind (UBA, 2021, Tab. 3), fallen die Referenzemissionen in diesen Betriebsgebieten niedriger aus. Dadurch vergrößert sich rechnerisch die Differenz zwischen den Emissionen der Linienbedarfsverkehre und der Referenzmobilität.

Ein Abgleich mit den Mobilitätsdaten der MiD 2017 zeigt zudem, dass der MIV-Anteil sowohl bei der Zahl der Wege als auch bei den Pkm vom städtischen in den ländlichen Raum kontinuierlich zunimmt (vgl. Nobis & Kuhnimhof, 2018, S. 47–48). Die betrachteten Systeme weisen, mit Ausnahme von *Bussi*, im Vergleich zum Bundesdurchschnitt (Radverkehrsanteil: 11 %, Nobis und Kuhnimhof (vgl. 2018, S. 47) überdurchschnittlich hohe Radverkehrsanteile auf. Daraus wird ersichtlich, dass die ökologischen Effekte von Linienbedarfsverkehren stark von der bestehenden Modal-Split-Struktur abhängen. In Regionen

mit einem hohen Anteil des Umweltverbunds besteht das Risiko, dass ökologisch vorteilhafte Wege durch On-Demand-Verkehre substituiert werden. Dieser sogenannte Kannibalisierungseffekt tritt auf, wenn Fahrten, die bislang zu Fuß, mit dem Fahrrad oder im Linienbus zurückgelegt wurden, durch bedarfsgesteuerte Angebote ersetzt werden.

Unabhängig von der Modal-Split-Struktur ist zudem von einer gewissen Verkehrsinduktion auszugehen. Komfortable On-Demand-Angebote können zusätzliche Wege erzeugen, die ohne das Angebot nicht zurückgelegt worden wären. Dieser Mobilitätszuwachs verbessert zwar die Erreichbarkeit, führt jedoch gleichzeitig zu zusätzlichem Verkehrsaufkommen und damit verbundenen THG-Emissionen. Bei *Bussi* lag der Anteil induzierter Wege bei 3 % (vgl. Wittowsky & Malow, 2022, S. 65), beim *G-Mobil* bei 4 % (Koska & Wetzchewald, 2022, S. 25), beim *kommit-Shuttle* bei 5 % (Wetzchewald & Schäfer-Sparenberg, 2022, S. 24) und bei *LOOPmünster* bei 12 % (Hartz et al., 2023, S. 55).

6.5 Wirtschaftliche Betrachtungen

Linienbedarfsverkehre stehen in Deutschland vor erheblichen Herausforderungen hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit, was sich unter anderem in der Einstellung des Betriebs der Angebote *LOOPmünster* und *kommit-Shuttle* zum 01.09.2024 zeigt. Anhand der untersuchten Projekte werden typische Kostenstrukturen dargestellt (s. Tabelle 6.6).

Die Gesamtkosten des Jahres 2022 unterscheiden sich deutlich zwischen den Systemen, was vor allem auf Unterschiede in Flottengröße und Betriebszeiten zurückzuführen ist. Zudem zeigen sich Abweichungen zwischen den tarifintegrierten Angeboten (*G-Mobil*, *kommit-Shuttle* und *LOOPmünster*) und *Bussi*, das im Gegensatz zu den übrigen Systemen einen entfernungsabhängigen Distanztarif nutzt. Während die Kosten pro Buchung^{durchgeführt} bei den tarifintegrierten Systemen mit 12,15 bis 13,00 € nur geringfügig variieren, fallen sie bei *Bussi* deutlich höher aus. Ein ähnliches Bild zeigt sich bei den Kosten je Fahrgast. Bei den tarifintegrierten Angeboten bestehen dagegen größere Unterschiede bei den Kosten pro Pkm, die stark von der betrieblichen Effizienz und der jeweils erbrachten Verkehrsleistung abhängen (s. Kapitel 6.1.2).

Tab. 6.6: Kostenstrukturen der Projekte mit dem Bezugszeitraum 2022 (nach Tab. 7-4 Bruder und Klemmer, 2024, S. 113)

Merkmale (2022)	<i>Bussi</i>	<i>G-Mobil</i>	<i>kommit-Shuttle</i>	<i>LOOPmünster</i>
Jährliche Betriebskosten	168.700 €	729.438 €	284.857 €	1.929.800 €
Kosten pro Buchung^{durchgeführt}	19,91 € (8.475)	12,15 € (60.043)	13,00 € (21.908)	12,75 € (151.415)
Kosten pro Fahrgast	12,16 € (13.876)	9,78 € (74.561)	10,84 € (26.280)	10,30 € (187.309)
Kosten pro Pkm	3,00 € (56.259)	3,20 € (228.185)	4,35 € (65.504)	2,20 € (876.326)

Durch die hohe Zahl an Gruppenbuchungen und die vergleichsweise gute betriebliche

Effizienz relativieren sich bei *Bussi* allerdings die Kosten pro Fahrgast und pro Pkm. Es ist zudem anzunehmen, dass sich die Einnahmestruktur von *Bussi* aufgrund des spezifischen Tarifs deutlich unterscheidet, wenngleich hierzu keine Daten vorliegen.

Für *LOOPmünster* liegen konkrete Angaben zum Kostendeckungsgrad vor, der bei 6,5 % liegt und damit den Anteil der Fahrgelderlöse an den Betriebs-, Personal- und Marketingkosten beschreibt (vgl. Hartz et al., 2024, S. 65–66). Da die Kostenstrukturen von *G-Mobil* und dem *kommit-Shuttle* in einer ähnlichen Größenordnung liegen, ist davon auszugehen, dass auch deren Kostendeckungsgrade vergleichbar ausfallen. Damit liegen die hier betrachteten Linienbedarfsverkehre deutlich unter dem von Statista für den klassischen ÖPNV ausgewiesenen durchschnittlichen Kostendeckungsgrad von 71,5 % im Jahr 2019 (Statista, 2021). Für *Bussi* konnte hingegen für das Jahr 2023 ein Kostendeckungsgrad von 30,4 % ermittelt werden, der über dem des Essener Nachtnetzes im konventionellen ÖPNV (ca. 17 %) liegt (vgl. Stadt Essen, 2024, S. 3). Dabei ist jedoch der spezifische Distanztarif von *Bussi* zu berücksichtigen.

Die in dieser Arbeit ermittelten Kostendeckungsgrade liegen im Vergleich zum klassischen ÖPNV vor allem aus zwei Gründen niedriger, was auch mit Befunden anderer Untersuchungen zu deutschen Linienbedarfsverkehren übereinstimmt (vgl. Mehlert & Weißhand, 2023, S. 56–59). Erstens entfallen die größten Ausgabeposten auf das Personal; bei *LOOPmünster* beträgt der Anteil beispielsweise rund 72 % der jährlichen Kosten (vgl. Hartz et al., 2024, S. 65–66). Auch bei *Bussi*, dem *G-Mobil* und dem *kommit-Shuttle* liegt dieser Wert mit 71 bis 78 % in einem ähnlichen Bereich und nimmt damit einen deutlich höheren Stellenwert ein als im liniengebundenen ÖPNV. Zweitens unterscheiden sich die Einsatzzwecke grundlegend: Während im klassischen ÖPNV größere Fahrzeuge auf Relationen mit stabiler Fahrgastnachfrage eingesetzt werden, bedienen Linienbedarfsverkehre i. d. R. gezielt nachfrageschwache Zeiten und Räume mit kleineren Fahrzeugen.

6.6 Verkehrliche Wirkungen der Linienbedarfsverkehre

Ergänzend zur ökologischen Wirkung ist es für eine ganzheitliche Bewertung erforderlich, auch die verkehrlichen Wirkungen der Linienbedarfsverkehre zu betrachten. Auf diese Weise lässt sich ein aussagekräftigeres und systematischeres Gesamtbild ableiten. Im Folgenden werden daher die verkehrlichen Wirkungen analysiert. Diese Auswertungen dienen als Ergänzung zur THG-Bilanzierung.

Interkommunale Mobilität

Linienbedarfsverkehre können grundsätzlich über kommunale Grenzen hinweg eingesetzt werden und damit die Mobilität zwischen verschiedenen Kommunen und Gemeinden unterstützen (vgl. Agora Verkehrswende, 2023, S. 13). In ländlichen Regionen ist dies besonders relevant, da Arbeitsplätze, Einkaufsmöglichkeiten oder medizinische Versorgung häufig in benachbarten Gemeinden liegen.

Keines der in dieser Arbeit untersuchten Systeme überschreitet sein Betriebsgebiet wesentlich über kommunale Grenzen hinaus. Eine Ausnahme stellt die Überlappung der Betriebs-

gebiete von *LOOPmünster* und dem *kommit-Shuttle* dar, wodurch Umstiege zwischen den Systemen und zu anderen öffentlichen Verkehrsangeboten ermöglicht. Das *G-Mobil* überschreitet formal ebenfalls nicht die Stadtgrenzen, verbindet jedoch den Stadtteil Epe mit der Innenstadt von Gronau. *LOOPmünster* verknüpft mehrere Stadtteilzentren innerhalb Münsters. Gleiches gilt für *Bussi*, das mehrere Stadtteilzentren in Essen verbindet. Auch *Bussis* Betriebsgebiet endet im Westen an der Kommunalgrenze zu Mülheim an der Ruhr. Das *kommit-Shuttle* verknüpft Stadtteilzentren wie Senden-Bösensell und Ottmarsbocholt mit dem Zentrum von Senden.

Alle betrachteten Systeme binden jedoch überregionale Verkehrsknotenpunkte an. *LOOPmünster* integriert mehrere Bahnhöfe im Stadtgebiet, während das *G-Mobil* den Hauptbahnhof Gronau umfasst. Im Betriebsgebiet von *Bussi* befinden sich mehrere Bahnstationen sowie der Hauptbahnhof Essen. Das *kommit-Shuttle* verfügt im zentralen Stadtgebiet über keinen Bahnhaltepunkt; ein Bahnhof ist lediglich im Stadtteil Bösensell vorhanden. Die Anbindung an den Regionalverkehr erfolgt in Senden über mehrere Regionalbuslinien, die an einem zentralen Busbahnhof gebündelt sind.

Die betrachteten Systeme weisen unterschiedliche Ausprägungen hinsichtlich interkommunaler Mobilität auf. Während *LOOPmünster* und das *kommit-Shuttle* durch eine Überlappung ihrer Betriebsgebiete Umsteigemöglichkeiten zwischen den Systemen eröffnen, fokussieren sich *G-Mobil* und *Bussi* im Wesentlichen auf die Anbindung von Stadtteilen innerhalb der jeweiligen Kommunalgrenzen. Ein expliziter Beitrag zur interkommunalen Mobilität ist bei diesen Systemen nicht vorgesehen und entspricht auch nicht ihrer konzeptionellen Zielsetzung.

Erschließungswirkung

Linienbedarfsverkehren wird das Potenzial zugeschrieben, durch ergänzende virtuelle Haltestellen oder sogar eine Haustürbedienung zur (feinräumigen) Erschließung des ÖPNV-Angebots beizutragen. Zur Quantifizierung des verkehrlichen Nutzens dieses Aspekts wird die Bedeutung des Linienbedarfsverkehrs für die räumliche Zugänglichkeit des ÖPNV analysiert. Hierzu werden die Betriebsgebiete hinsichtlich ihrer Erschließung der Siedlungsflächen und der Bevölkerung in zwei Szenarien untersucht: Ohne Linienbedarfsverkehr (nur Bus) und mit Einbezug des Linienbedarfsverkehrs (s. Abbildung 6.4). Ergänzende absolute Werte sind in Anhang A.8 dokumentiert.

Sowohl im Szenario ohne als auch mit Linienbedarfsverkehr wird physischen Haltestellen ein Puffer von 300 Metern Luftlinie zugeordnet. Dies entspricht den FGSV-Empfehlungen für urbane Räume (vgl. FGSV, 2010, S. 20) und wird auch für ländliche Kommunen beibehalten, um gemäß „E Klima 2022“ die Zugangs- und Abgangszeiten zu Haltestellen zu verringern (vgl. FGSV, 2022, S. 21). Im Szenario mit Linienbedarfsverkehr werden zusätzlich virtuelle Haltestellen mit einem Einzugsbereich von 250 Metern berücksichtigt. Dieser entspricht der VDV-Qualitätsanforderung, wonach virtuelle Haltestellen höchstens 250 Meter vom Start- beziehungsweise Zielort entfernt liegen sollen (vgl. VDV, 2023, S. 6).

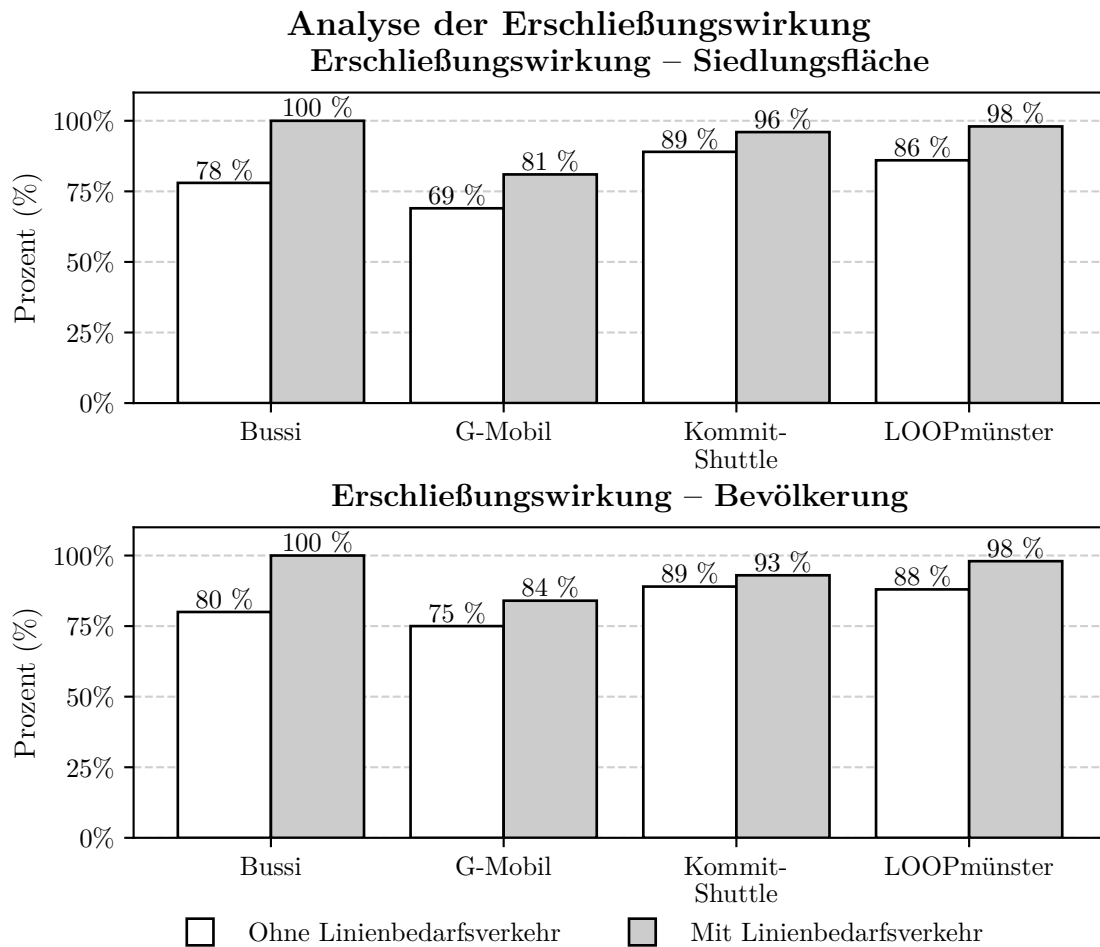


Abb. 6.4: Erschließungswirkungen (Siedlungsfläche und Bevölkerung) der Systeme (nach Abb. 7-1 Bruder und Klemmer, 2024, S. 105, Hintergrundberechnungen: s. Anhang A.8)

Im Szenario ohne Linienbedarfsverkehr wird jeder physischen Haltestelle ein Puffer von 300 Metern Luftlinie zugeordnet, entsprechend den Empfehlungen der FGSV für urbane Räume (vgl. FGSV, 2010, S. 20). Dieser Abstand bleibt auch für ländliche Kommunen erhalten, um im Kontext des FGSV-Empfehlungspapiers „E Klima 2022“ die Zielsetzung einer Verringerung der Zugangs- und Abgangszeiten zu Haltestellen zu unterstützen (vgl. FGSV, 2022, S. 21). Im Szenario mit Linienbedarfsverkehr erhalten die physischen Haltestellen ebenfalls einen 300-Meter-Puffer. Zusätzlich werden virtuelle Haltestellen berücksichtigt. Für diese wird ein Einzugsbereich von 250 Metern modelliert, da der VDV virtuelle Haltestellen mit einer maximalen Entfernung von 250 Metern zum Start- und Zielort des Fahrgastes als Qualitätsanforderung für Linienbedarfsverkehre benennt (vgl. VDV, 2023, S. 6).

Die für diese Analyse herangezogenen Bevölkerungsdaten stammen aus dem Zensus 2011 (Statistische Ämter, 2011), während die Geo-Informationen zu den Siedlungsflächen aus OpenStreetMap stammen (OpenStreetMap contributors, 2023). Untersucht wird ausschließlich das Angebot des Busverkehrs; andere öffentliche Verkehrsmittel wie U-Bahn, Straßenbahn oder Regionalbahn bleiben unberücksichtigt, da die betrachteten Systeme

vorrangig eine Ergänzung des Nahverkehrs darstellen. Berücksichtigt werden lediglich jene Anteile der Bevölkerung und der Siedlungsflächen, die innerhalb der jeweiligen Betriebsgebiete liegen.

Im Szenario ohne Linienbedarfsverkehr beträgt der durch Busangebote erreichte Anteil der Siedlungsfläche bei *Bussi* 78 %. Beim *G-Mobil*, das den konventionellen Linienbus ersetzt, liegt dieser Wert lediglich bei 69 %. *kommit-Shuttle* und *LOOPmünster* weisen bereits ohne zusätzliche virtuelle Haltestellen hohe Erschließungsgrade von 89 % bzw. 86 % auf. Mit der Einbindung von Linienbedarfsverkehren und der damit verbundenen Ergänzung durch virtuelle Haltestellen verbessern sich die Erschließungswerte sämtlicher Systeme. *Bussi* erreicht nun eine vollständige Abdeckung (100 %), *kommit-Shuttle* steigt auf 96 %, und *LOOPmünster* auf 98 %. Auch *G-Mobil* profitiert von der Ausweitung des Haltestellennetzes und erreicht nun 81 %.

Ein vergleichbares Bild zeigt sich bei der Analyse der Bevölkerungserschließung: Ohne Linienbedarfsverkehre liegen die Erschließungsgrade bei *Bussi* bei 80 %, bei *G-Mobil* bei 75 % sowie bei *kommit-Shuttle* und *LOOPmünster* bei 89 % bzw. 88 %. Durch die Integration virtueller Haltestellen erhöhen sich auch hier die Werte: *Bussi* erreicht 100 %, *kommit-Shuttle* 93 % und *LOOPmünster* 98 %. Für das *kommit-Shuttle* ist anzumerken, dass eine Haustürbedienung realisiert wird, wodurch theoretisch eine vollständige Erschließung der Bevölkerung innerhalb des Betriebsgebiets ermöglicht wird. *G-Mobil* verzeichnet mit 84 % den niedrigsten Wert; dieser ist primär auf den Ortsteil Epe zurückzuführen. Im Stadtgebiet Gronau hingegen liegen über 90 % der Siedlungsfläche innerhalb der Einzugsradien physischer und virtueller Haltestellen.

Besonders bei *Bussi* zeigt sich, dass ein engmaschiges Netz physischer Haltestellen Ausdruck einer hohen Servicequalität ist. Dies steht im Einklang mit dem konzeptionellen Anspruch, ein besonders komfortorientiertes Mobilitätsangebot im Sinne der „Bequemlichkeitsmobilität“ zu schaffen. Insgesamt zeigt die Analyse, dass die betrachteten Verkehre wesentlich zur Feinerschließung der Bevölkerung in den jeweiligen Betriebsgebieten beitragen.

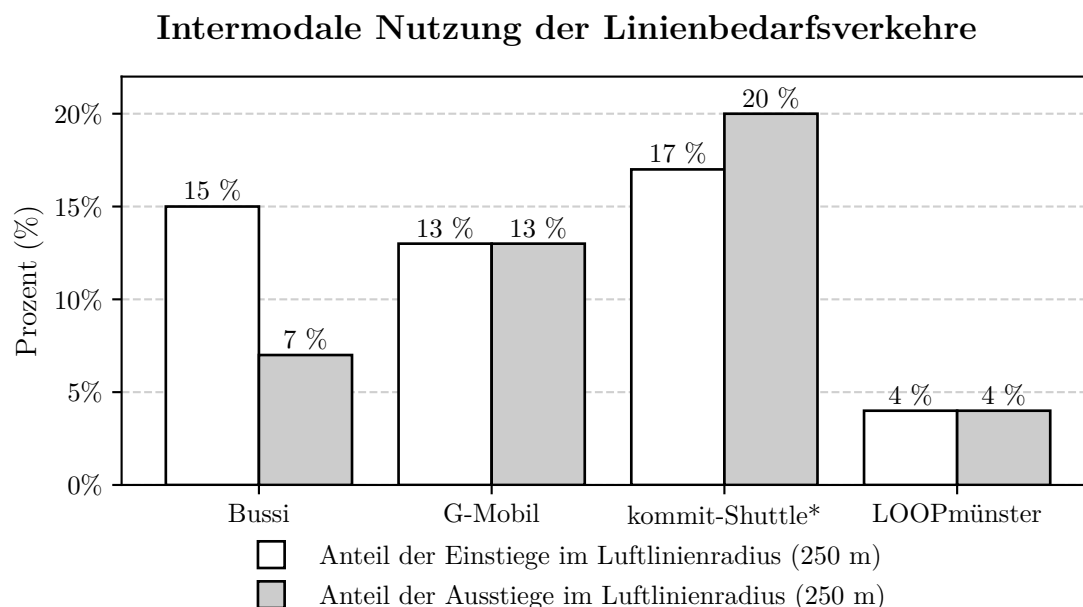
Intermodale Nutzung der Linienbedarfsverkehre

Linienbedarfsverkehren wird häufig ein Beitrag zur Förderung von Intermodalität zugeschrieben, wodurch der ÖPNV insgesamt attraktiver gestaltet werden kann. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, inwieweit diese Verkehrsangebote mit anderen Verkehrsmitteln kombiniert werden und damit zur Stärkung des Umweltverbunds beitragen. Zur Untersuchung dieser Fragestellung wurde ein geodatenbasierter Ansatz gewählt, dessen Ergebnisse im weiteren Verlauf durch Erkenntnisse aus den im Rahmen der Pilotprojekte durchgeführten Fahrgastbefragungen validiert werden. Streng genommen handelt es sich bei einem Umstieg zwischen Linienbedarfsverkehren und anderen Angeboten des öffentlichen Verkehrs nicht um eine intermodale Wegekette, da Ridepooling formal Teil des ÖPNV ist. Gleichwohl wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit von intermodalen Umstiegen gesprochen, da sich aus Nutzendenperspektive Unterschiede in Buchungssystemen, Tarifstrukturen und Angebotscharakteristik ergeben, die funktional einer intermodalen

Kombination von Verkehrsmitteln entsprechen.

Konkret erfolgt die Analyse über die räumliche Zuordnung physischer und virtueller Haltestellen zu überregional angebundenen Bahnhöfen. Hierzu werden alle Haltestellen innerhalb eines Umkreises von 250 Metern Luftlinie identifiziert. Der Schwellenwert orientiert sich an der vom VDV genannten maximalen Entfernung virtueller Haltestellen zum Start- und Zielort des Fahrgastes (VDV, 2023, S. 6). Auf dieser Grundlage werden für alle vier untersuchten Systeme die Ein- und Ausstiege an den betreffenden Haltestellen auf Basis der realen Buchungsdaten des Jahres 2022 erfasst.

Für das *kommit-Shuttle* wird ein Sonderfall berücksichtigt: Aufgrund der überregionalen Bedeutung der Schnellbusverbindungen in der Kommune Senden erfolgt die Analyse auf Basis der Haltestelle am zentralen Busbahnhof. Obwohl auch in den anderen Systemen überregionale Busverbindungen bestehen, bleiben diese unberücksichtigt, da Bahnanschlüsse als vorrangige Knotenpunkte eingestuft werden. Die Ergebnisse der Auswertung sind in Abbildung 6.5 dargestellt.



*Untersuchung der Ein- und Ausstiege am Busbahnhof Senden

Abb. 6.5: Intermodale Nutzung der Linienbedarfsverkehre: Ein- und Ausstiege um ÖPNV-Umstiegspunkte (nach Abb. 7-2 Bruder und Klemmer, 2024, S. 107; Hintergrundberechnungen: s. Anhang A.10)

Im Betriebsgebiet von *Bussi* befinden sich 137 Haltestellen innerhalb eines 250-Meter-Luftlinienradius um die zwölf Bahnhaltepunkte. Diese hohe Zahl ergibt sich aus dem dichten Netz virtueller Haltestellen sowie den sechs ÖPNV-Umstiegspunkten mit regionalem Verkehrsangebot. Von den 8.403 Einstiegen und 8.429 Ausstiegen entfielen 1.295 Einstiege und 565 Ausstiege auf diese Haltestellen; lediglich 69 Buchungen wiesen sowohl Ein- als auch Ausstieg an einem Bahnhaltepunkt auf. Daraus ergibt sich ein intermodaler Nutzungsanteil von rund 22 %. Der deutlich höhere Anteil an Einstiegen deutet darauf hin, dass *Bussi* überwiegend für die letzte Meile einer Anreise in das Betriebsgebiet genutzt

wird. Ein möglicher Grund dafür sind die eingeschränkten Bedienzeiten in den Abend- und Nachtstunden. Dieses Nutzungsmuster bestätigt auch eine Fahrgastbefragung: 9 % der Befragten nutzten vor einer Fahrt mit *Bussi* ein anderes Verkehrsmittel, 7 % im Anschluss. Damit ergibt sich ein intermodaler Anteil von 16 % (Wittowsky & Malow, 2022). Der deutlich höhere Anteil an Einstiegen gegenüber Ausstiegen an den Bahnhaltelpunkten entspricht den Ergebnissen der geodatenbasierten Analyse und unterstreicht die Annahme, dass *Bussi* überwiegend für die letzte Meile im Anschluss an andere ÖV-Angebote genutzt wird.

Für *G-Mobil* lag lediglich die Haltestelle „Bahnhof C“ innerhalb eines 250-Meter-Luftlinienradius um den Bahnhof. Entsprechend wurden sämtliche Ein- und Ausstiege an dieser Haltestelle in die Analyse einbezogen. Im Jahr 2022 konnten dort 7.593 Einstiege und 7.894 Ausstiege erfasst werden, was zusammen einem Anteil von 26 % aller Buchungen_{durchgeführt} entspricht. Im Rahmen der Analyse des Angebots wurde jedoch nicht untersucht, ob Fahrgäste vor oder nach der Nutzung von *G-Mobil* weitere Verkehrsmittel in Anspruch nahmen (Koska & Wetzchewald, 2022, vgl.), sodass sich die intermodale Nutzung des Angebots nicht näher quantifizieren lässt.

Die Erfassung der intermodalen Nutzung des *kommit-Shuttles* unterscheidet sich methodisch von den anderen Systemen. Da im Jahr 2022 eine Haustürbedienung angeboten wurde, konnten Fahrgäste auch Ziele in unmittelbarer Nähe zu Bahnhöfen oder Schnellbuslinien ansteuern, ohne dass diese im Buchungssystem explizit als Haltestellen ausgewiesen waren. Für die Analyse wurden daher die Ein- und Ausstiegskoordinaten berücksichtigt, die innerhalb eines Radius von 250 Metern Luftlinie zu einem Bahnhalte- oder Umstiegspunkt lagen. Die Auswertung ergab, dass 2022 lediglich 191 Einstiege und 228 Ausstiege am Bahnhof Bösensell registriert wurden. Dies entspricht weniger als 2 % aller Buchungen_{durchgeführt} (bzw. durchgeführten Fahrten), bei denen ein solcher Standort als Start- oder Ziel diente. Deutlich höhere Werte wurden hingegen am Busbahnhof Senden verzeichnet, mit 3.719 Einstiegen und 4.338 Ausstiegen. Damit entfielen rund 37 % aller Buchungen_{durchgeführt} auf diesen Umstiegspunkt, was ein Hinweis auf eine ausgeprägte intermodale Nutzung des *kommit-Shuttles* ist. Die vergleichsweise hohen Anteile lassen sich vermutlich durch die Einbettung des *kommit-Shuttles* in das BüLaMo-Projekt erklären (s. Kapitel 5.3.1), in dessen Rahmen es als Zubringer für die überregionalen ExpressBuslinien (S90, X90) konzipiert wurde. Aufgrund der abweichenden Erhebungsmethodik ist die Vergleichbarkeit des *kommit-Shuttle* mit den übrigen Systemen eingeschränkt.

Die geodatenbasierte Analyse zeigt für *LOOPmünster* einen eher geringen Anteil intermodaler Fahrten. Nur etwa 8 % der Buchungen_{durchgeführt} entfielen auf Haltestellen, die innerhalb von 250 Metern Luftlinie zu den drei Bahnhaltelpunkten im Betriebsgebiet liegen und als Start- oder Ziel genutzt wurden. Im Gegensatz dazu ergaben Fahrgastbefragungen im Rahmen einer wissenschaftlichen Begleitforschung, dass im Jahr 2022 37 % der Nutzenden *LOOPmünster* zusammen mit weiteren Angeboten des ÖPNV verwenden (Hartz et al., 2023, S. 23). Wird speziell der Umstieg auf Bahnverbindungen betrachtet, so gaben 9 % der Befragten an, *LOOPmünster* dafür zu nutzen. Dieser Wert entspricht weitgehend den 8 % aus der geodatenbasierten Analyse. Die Differenz zwischen der Gesamtquote in-

termodaler Nutzung (32 %) und dem geringen Anteil an Bahnanschlüssen (9 %) legt nahe, dass *LOOPmünster* tendenziell häufiger als Zubringer zum Linienbusverkehr genutzt wird. Zusammenfassend ist festzustellen, dass alle untersuchten Linienbedarfsverkehre eine grundlegende intermodale Verknüpfung mit anderen Verkehrsmitteln aufweisen. Diese ist jedoch unterschiedlich stark ausgeprägt und hängt von der Integration der Angebote in den Gesamt-ÖPNV sowie dem öffentlichen Mobilitätsangebot vor Ort ab. Da die Methodik lediglich Umstiege an Bahnhaltepunkten identifiziert, ist davon auszugehen, dass dieses Vorgehen den Anteil von Linienbedarfsverkehren an intermodalen Wegeverbindungen eher unterschätzt. In zukünftigen Analysen könnte die Einbeziehung weiterer multimodaler Umstiegspunkte, wie zentraler Bushaltestellen, B+R- und P+R-Stationen, Carsharing-Standorte, Mitfahrerparkplätze sowie Infrastrukturen für Mikromobilität und Mobilitätsstationen, das Verständnis intermodaler Wegeketten sowie die Bewertung der Vernetzungsqualität von Bedarfsverkehren verbessern. Im Rahmen dieser Arbeit wurde darauf verzichtet, da die Untersuchung intermodaler Verknüpfungen lediglich ergänzenden Charakter besitzt und nicht den Schwerpunkt der entwickelten Methodik bildet.

Im Zuge der Bewertung der intermodalen Nutzung ist ebenfalls anzumerken, dass bei nahezu allen Systemen Optimierungsbedarf in Bezug auf die Reiseinformations- und Buchungssysteme besteht. Zwar sind alle Systeme in multimodale Fahrgastinformations-Apps integriert, wobei *Bussi* in die ZÄPP-App, *G-Mobil* in die RVM-On-Demand-App und *LOOPmünster* in die *münster:app* eingebunden sind. Die Buchung und Bezahlung der Angebote ist jedoch ausschließlich in den jeweiligen Buchungs-Apps möglich. Die einzige Ausnahme bildet das *kommit-Shuttle*, bei dem eine Buchung zusätzlich über die *kommit*-App möglich ist. Eine zentrale, multimodale Buchungsplattform würde die Nutzerfreundlichkeit und intermodale Vernetzung im ÖPNV weiter verbessern.

Verlagerungswirkung

Für die ökologische Bewertung von Ridepooling-Systemen ist nicht allein die THG-Bilanzierung ausschlaggebend, sondern insbesondere deren Einfluss auf den Gesamtverkehr. Entscheidend ist, in welchem Umfang Fahrten aus dem MIV oder dem Umweltverbund ersetzt werden und in welchem Maß zusätzliche, induzierte Fahrten entstehen. Bislang ist empirisch nicht nachgewiesen, welche konkreten Auswirkungen Linienbedarfsverkehre auf den Modal Split in den jeweiligen Bedienungsgebieten haben.

Zur Beantwortung dieser Fragestellung wurde ein quantitativer Ansatz gewählt, der das durch Linienbedarfsverkehre erzeugte Verkehrsaufkommen ins Verhältnis zum gesamten Wegeaufkommen setzt. Grundlage bilden Befragungen aus den wissenschaftlichen Begleitforschungen (s. Tabelle 6.7), die Aufschluss über die hypothetische Verkehrsmittelwahl ohne Bedarfsverkehr geben und damit eine Berechnung des Modal Shifts ermöglichen (s. Tabelle 6.8).

Die Berechnung erfolgt in drei Schritten: Erstens wird die Gesamtzahl der täglichen Wege im Bedienungsgebiet aus Einwohnerzahl und durchschnittlicher Wegeanzahl pro Person ermittelt. Zweitens wird die Zahl der im Linienbedarfsverkehr beförderten Fahrgäste pro Betriebstag bestimmt und anhand der Befragungsergebnisse den Kategorien MIV,

Fahrrad, Zufußgehen, ÖPNV und induzierter Verkehr zugeordnet.

Drittens werden diese substituierten bzw. induzierten Wege ins Verhältnis zur Gesamtzahl aller Wege gesetzt und mit dem Modal Split der Ausgangssituation verglichen. Grundlage der Berechnung ist die Annahme, dass ein Fahrgast im Linienbedarfsverkehr einem Weg entspricht; zudem werden die durch Linienbedarfsverkehre generierten Wege dem ÖPNV zugerechnet. Zur Vereinheitlichung der Befragungsergebnisse wurden zudem folgende Anpassungen vorgenommen:

- „Ich hätte die Fahrt sonst nicht gemacht“ wird als induzierter Verkehr interpretiert.
- „Zug, S-Bahn“, „Bus, Straßen-, U- oder Stadtbahn“ sowie „Bürgerbus“ werden dem ÖPNV zugeordnet.
- „Taxi“, „Privates E-Kleinstfahrzeug“, „Sharing-Angebote“ und „Sonstiges“ werden nicht berücksichtigt.
- Die Verteilung der Verkehrsmittelwahl wird mithilfe eines Skalierungsfaktors angepasst, um Unterschiede zwischen Einzel- und Mehrfachnennungen auszugleichen.

Tabelle 6.8 zeigt, dass die untersuchten Systeme eine leichte Verlagerung vom MIV hin

Tab. 6.7: Verkehrsmittelwahlverteilung durch Befragungen (nach Tab. 7-1 Bruder und Klemmer, 2024, S. 102)

Merkmal (2022)	<i>Bussi</i>^a	<i>G-Mobil</i>^b	<i>kommit-Shuttle</i>^c	LOOP-münster^d
Ich wäre zu Fuß gegangen	14 %	26 %	29 %	2 %
Fahrrad	5 %	33 %	29 %	8 %
Bus, Straßen-, U- oder Stadtbahn	33 %	11 %	11 %	53 %
Zug, S-Bahn	5 %	1 %	0 %	n.a.
Auto	7 %	31 %	49 %	19 %
Privates E-Kleinstfahrzeug (z.B. E-Tretroller etc.)	n.a.	2 %	3 %	1 %
Taxi	31 %	16 %	5 %	5 %
Ich hätte die Fahrt sonst nicht gemacht	2 %	6 %	5 %	11 %
Sharing-Angebote	3 %	0 %	0 %	0 %
Bürgerbus	n.a.	4 %	4 %	n.a.
Motorrad	1 %	n.a.	n.a.	n.a.
Sonstiges	1 %	n.a.	n.a.	1 %

^a Evaluierung des *Bussi*-On-Demand-Shuttles in Essen, 21.11.2022, n = 1117 (Wittowsky, Malow, 2022); ausschließlich Einmalnennungen möglich.

^b Evaluation Mobil.NRW: Ergebnisse der Nutzer*innen-Befragung des *G-Mobil*, n = 127 (Koska & Wetzchewald, 2022, S. 25); Mehrfachnennung möglich, außer bei „ich hätte die Fahrt sonst nicht gemacht“.

^c Evaluation Mobil.NRW: Ergebnisse der Nutzer*innen-Befragung des *kommit-Shuttles*, n = 148 (Wetzchewald & Schäfer-Sparenberg, 2022); Mehrfachnennung möglich, außer bei „ich hätte die Fahrt sonst nicht gemacht“.

^d Wissenschaftliche Begleitforschung FH Münster, 2022, n = 272; ausschließlich Einmalnennungen möglich.

zum ÖPNV bewirken, deren Bedeutung für die Gesamtmobilität im jeweiligen Bedienungsgebiet jedoch nur gering ist. Der Anteil der Ridepooling-Angebote am Modal Split variiert je nach System deutlich: Während bei Bussi lediglich ein Anteil von 0,01 % festzustellen ist, liegt dieser beim G-Mobil und beim Kommit-Shuttle jeweils bei 0,16 % und bei LOOPmünster bei 0,26 % des Gesamtverkehrsaufkommens innerhalb der jeweiligen Betriebsgebiete (s. Anhang A.7).

Tab. 6.8: Modal-Shift-Wirkung der Linienbedarfsverkehre (in Anlehnung an Tab. 7.1 und 7.2 Bruder und Klemmer, 2024, S. 102 und 103; Berechnungsgrundlage siehe Anhang A.7)

Merkmal (2022)	<i>Bussi</i>	<i>G-Mobil</i>	<i>kommit-Shuttle</i>	LOOP-münster
Einwohnende Betriebsgebiet	270.000	38.500	20.000	66.000
Tägliche Wegeanzahl	3,2	3,3	3,1	3,2
Wege im Betriebsgebiet	864.000	127.050	62.000	211.200
Linienbedarfs-Fahrgäste pro Betriebstag	40	205	72	545
Substitutionsanteile nach Verkehrsmittel (Befragungen)				
MIV	10 %	28 %	39 %	20 %
Fahrrad	8 %	29 %	23 %	9 %
zu Fuß	21 %	23 %	23 %	2 %
ÖPNV	58 %	14 %	12 %	57 %
Induktion	3 %	5 %	4 %	12 %
Anzahl substituierter Wege (pro Betriebstag)				
MIV	4	57	28	111
Fahrrad	3	60	16	47
zu Fuß	8	48	16	12
ÖPNV	23	29	9	311
Induktion	1	11	3	64
Gesamtwege im Betriebsgebiet (inkl. Substitution)				
MIV	475.196	69.821	34.692	84.369
Fahrrad	60.477	38.055	14.864	71.761
zu Fuß	164.152	16.469	7.424	35.892
ÖPNV	164.176	2.706	5.021	19.178
Induktion	1	11	3	64
Relative Modal-Shift-Wirkung				
MIV	−0,001 %	−0,05 %	−0,05 %	−0,06 %
Fahrrad	0,000 %	−0,05 %	−0,03 %	−0,03 %
zu Fuß	−0,001 %	−0,04 %	−0,03 %	−0,01 %
ÖPNV	+0,002 %	+0,13 %	+0,10 %	+0,08 %
Induktion	+0,000 %	+0,01 %	+0,00 %	+0,03 %

Gleichzeitig treten unerwünschte Substitutionseffekte innerhalb des Umweltverbundes auf, da Wege aus dem Rad- und Fußverkehr in den ÖPNV verlagert werden. Für *LOOPmünster* und *Bussi* deuten die Fahrgastbefragungen zudem auf eine vergleichsweise hohe Kannibalisierung des bestehenden ÖPNV-Angebots hin, während diese Effekte bei den anderen Systemen weniger stark ausgeprägt sind. Dies hängt auch damit zusammen, dass beim *kommit-Shuttle* sowie beim *G-Mobil* zum Zeitpunkt der Befragung kein bzw. nur ein eingeschränktes Linienbusangebot existierte und dort vor allem Pkw-, Rad- und Fußwege ersetzt wurden.

Um solchen Kannibalisierungseffekten entgegenzuwirken, kam im Jahr 2022 bei *LOOPmünster*, dem *G-Mobil* und dem *kommit-Shuttle* bereits eine Parallelverkehrsfunktion zum Einsatz (s. Kapitel 2.3). Diese prüft, ob eine zumutbare Direktverbindung mit dem Linienbus besteht, und lehnt in diesem Fall die Bedienung durch den Bedarfsverkehr ab.

Darüber hinaus führen alle untersuchten Linienbedarfsverkehre zu einer geringen Verkehrsinduktion, da ein Teil der Fahrten ohne das zusätzliche Angebot nicht stattgefunden hätte. Insgesamt zeigt sich zwar eine tendenziell positive, jedoch nur schwach ausgeprägte Verlagerung vom MIV zum ÖPNV. Diese wird durch Verlagerungen vom Rad- und Fußverkehr abgeschwächt, sodass die Gesamteffekte auf die Mobilität in den Bedienungsgebieten insgesamt als gering einzuschätzen sind.

Die Ergebnisse sind jedoch mit Vorsicht zu interpretieren, da methodische und datenbezogene Einschränkungen bestehen. Zum einen ist die Zielgruppenkonformität der Befragungsdaten eingeschränkt, da empirische Untersuchungen zeigen, dass Nutzende von Ridepooling-Angeboten häufig multimodal sind und den öffentlichen Verkehr regelmäßig nutzen (vgl. Kistorz et al., 2021, S. 8–9) sowie bei Linienbedarfsverkehren seltener über einen privaten Pkw verfügen (vgl. Hartz et al., 2024, S. 8–15). Dadurch wird die Verlagerungswirkung gegenüber dem MIV vermutlich überschätzt. Zum anderen beruht die Berechnung auf vereinfachenden Annahmen, etwa der Gleichsetzung eines Fahrgastes mit einem Weg, der proportionalen Skalierung von Mehrfachnennungen sowie Stated-Preference-Angaben auf Basis subjektiver Einschätzungen. Die Ergebnisse sind daher nicht als belastbare Quantifizierung, sondern als explorativer Befund einzuordnen.

Kapitel 7

Sensitivitätsanalyse

In diesem Kapitel wird eine Sensitivitätsanalyse auf Basis des in Kapitel 4 beschriebenen THG-Bilanzierungs-Modells vorgestellt. Ziel der Sensitivitätsanalyse ist es, die Einflussstärke und -richtung zentraler Eingangsparameter auf die Ergebnisse der THG-Bilanzierung zu untersuchen und damit die Robustheit der Ergebnisse sowie die Wirkung einzelner Stellgrößen zu bewerten. Das Vorgehen umfasst zunächst in Kapitel 7.1 eine allgemeine Beschreibung des Wirkungsgefüges von Ridepooling auf Grundlage der erhobenen Realdaten. In den Kapiteln 7.2 bis 7.7 werden anschließend ausgewählte Parameter sukzessiv und systematisch variiert, um deren Einfluss auf die THG-Bilanzierung zu quantifizieren. Dabei werden jeweils einzelne Eingangsgrößen unter der Annahme *ceteris paribus* verändert, das heißt unter Konstanthaltung aller übrigen Parameter. Darauf aufbauend werden in Kapitel 7.8 betriebliche und energetische wie fahrzeugtechnologische Anpassungen an den Systemen in Kombination betrachtet, um das Gesamtreduktionspotenzial der untersuchten Ridepooling-Angebote abschätzen zu können.

7.1 Wirkungsgefüge Ridepooling

Die betriebliche Effizienz von Ridepooling-Systemen sowie deren THG-Bilanzierung sind das Ergebnis eines komplexen Wirkungsgefüges. Dieses wird sowohl durch konzeptionelle Parameter (z. B. Flottengröße, Betriebsgebiet, Betriebszeiten, Dispositionslogik) als auch durch betriebliche Einflussgrößen (z. B. Fahrgastnachfrage, Bündelungsquote, Leerkilometeranteil, Reiseweiten, Auslastungsgrade) bestimmt. Zur Identifikation potenzieller Zusammenhänge zwischen konzeptionellen und betrieblichen Einflussgrößen werden zunächst explorative Korrelationsanalysen durchgeführt.

Methodische Einordnung

Es werden lediglich vier Systeme betrachtet ($n=4$), sodass die Korrelationsanalysen nur auf vier Beobachtungen beruhen und als explorativ zu verstehen sind. Je nach Analyseebene werden sowohl absolute Werte (z. B. Fahrtanfragen zulässig) als auch normierte Kennziffern (z. B. Fahrtanfragen zulässig pro Service-Stunde) verwendet. Aufgrund der sehr kleinen Stichprobe werden keine p -Werte berichtet; zur Orientierung werden ausschließlich Effektstärken (Pearson- r) angegeben. Die Ergebnisse dienen der Hypothesengenerierung und bedürfen zur Bestätigung weiterführender Untersuchungen.

Zusammenhang zwischen Fahrgastnachfrage und Verkehrsleistung

Mit zunehmender Anzahl an Fahrthanfragen_{zulässig} steigt die absolute Zahl der Fahrzeugkilometer_{total} deutlich an ($r = 0,97$). Dieser enge Zusammenhang ist erwartbar, da eine höhere Fahrgastnachfrage, bis zur Erreichung der Kapazitätsgrenze, mit einer größeren Anzahl Buchungen_{durchgeführt} einhergeht.

Parallel dazu steigt auch die absolute Zahl der Fzkm_{leer} mit zunehmender Nachfrage an ($r = 0,97$). Dies ist darauf zurückzuführen, dass ein höheres Auftragsvolumen zusätzliche Zuwegfahrten erfordert, selbst wenn die Fahrten-Bündelung verbessert werden kann.

Zusammenhang von Nachfrage- und Buchungsintensität mit dem Leerkilometer-Anteil

Ergänzend zur absoluten Nachfrage wird die Nachfrageintensität, gemessen als _{zulässig} pro Fahrzeugstunde, betrachtet. Hier zeigt sich ein negativer Zusammenhang mit dem Leerkilometer-Anteil ($r = -0,84$). Eine höhere Anzahl zulässiger Anfragen erweitert den Handlungsspielraum des Dispositionsalgorithmus, da mehr potenziell bedienbare Anfragen für eine effiziente Fahrten-Bündelung zur Verfügung stehen. Dies erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass sich der Abholstandort einer Fahrthanfrage in der Nähe eines verfügbaren Fahrzeugs befindet. In der Folge verkürzen sich Zuwegfahrten, was zu einer Reduktion des relativen Leerkilometer-Anteils führt. Darüber hinaus zeigt sich auch für die tatsächlich durchgeführten Buchungen pro Fahrzeugstunde ein negativer Zusammenhang mit dem Leerkilometer-Anteil ($r = -0,74$). Dies bestätigt, dass nicht nur das verfügbare Anfragevolumen, sondern auch die tatsächlich realisierte Nachfrage zu einer effizienteren Fahrzeugdisposition beitragen kann.

Zusammenhang zwischen Poolingquote und betrieblicher Effizienz

Ein zentraler Effizienzfaktor im Ridepooling ist die Poolingquote des Systems. Die Analyse zeigt, dass mit steigender Zahl an Fahrthanfragen_{zulässig} auch die Anzahl der Buchungen_{gebündelt} stark ansteigt ($r = 0,99$). Da gebündelte Buchungen eine Teilmenge der Gesamtbuchungen darstellen, ist dieser Zusammenhang erwartbar.

Aussagekräftiger ist die Beziehung zwischen der Nachfrageintensität (Fahrthanfragen_{zulässig} pro Fahrzeugstunde) und der Poolingquote, die mit $r = 0,87$ positiv korreliert. Bei höherer Nachfrage steigt die Wahrscheinlichkeit zeitlich und räumlich kompatibler Fahrthanfragen, was die Matching-Möglichkeiten für den Dispositionsalgorithmus erhöht. Infolgedessen können mehr Buchungen gebündelt und Effizienzpotenziale besser ausgeschöpft werden. In diesem Zusammenhang zeigt sich in den vorliegenden Betriebsdaten eine deutliche negative Korrelation zwischen der Poolingquote und dem Leerkilometeranteil ($r = -0,92$). Eine höhere Bündelungsquote reduziert die Zahl der notwendigen Zuwegfahrten, da Fahrzeuge häufiger bereits Fahrgäste an Bord haben, wenn neue Anfragen bedient werden. Dadurch verringert sich der Leerkilometeranteil, was sowohl betriebliche als auch ökologische Vorteile erwarten lässt. Diese Beobachtung steht im Einklang mit simulationsbasierten Befunden, wonach mit zunehmender Nachfrage die Wahrscheinlichkeit räumlich und zeitlich kompatibler Fahrthanfragen steigt und dadurch Poolability, Fahrleistungsreduktion und weitere Effizienzpotenziale von Ridepooling-Systemen verbessert werden können (vgl.

Shulika et al., 2024, S. 7f. vgl. Chen et al., 2017, S. 6–7). Auch empirische Untersuchungen realbetriebener Ridepooling-Angebote zeigen, dass unbesetzte Fahrzeugkilometer in Form von Anfahrts- und Rückkehrwegen einen erheblichen Anteil der Gesamtfahrleistung ausmachen und damit für die betriebliche Effizienz relevant sind (vgl. Knie et al., 2020, S. 12–13).

Stornierungen als Störgröße

Neben Nachfrage und Bündelung wirken sich auch kurzfristige Stornierungen auf die betriebliche Effizienz aus. Der nahezu perfekte Zusammenhang zwischen stornierten Buchungen und Fahrtanfragen_{zulässig} ($r = 0,99$) resultiert daraus, dass Stornierungen eine Teilmenge der Gesamtanfragen bilden und spiegelt die Struktur des sogenannten Buchungstrichters wider (s. Kapitel 4.3).

Entscheidend ist dabei weniger die absolute Zahl, sondern der Zeitpunkt der Stornierung. Kurzfristige Buchungsstornierungen können dazu führen, dass bereits disponierte Fahrzeuge unnötige Zuwegfahrten unternehmen. Eine explorative Analyse zeigt einen positiven Zusammenhang zwischen kurzfristigen Stornierungen und dem Leerkilometer-Anteil ($r = 0,66$), was auf potenzielle Effizienzverluste hinweist. Die zugrundeliegende Kennzahl der *kurzfristigen Stornierungen* wird in Kapitel 7.7 näher erläutert.

Darüber hinaus besteht eine negative Korrelation zwischen der Stornierungsrate und der Angebotsverfügbarkeit ($r = -0,83$). Stornierte Buchungen binden temporär Systemkapazitäten, da Fahrzeuge reserviert und währenddessen anderen Anfragen nicht zugewiesen werden können. Die kurzfristige Stornierung von Fahrtanfragen senkt somit die effektive Verfügbarkeit.

Raumstrukturelle Einflüsse

Abschließend wird untersucht, inwieweit strukturelle Merkmale des Betriebsgebiets die Nachfrage und die Poolingquote beeinflussen. Zwischen Fahrtanfragen_{zulässig} und Bevölkerungsdichte ($r = -0,42$) bzw. Bevölkerungszahl ($r = -0,44$) ergeben sich keine klaren Zusammenhänge. Auch die negative Korrelation zwischen Bevölkerungsdichte und Poolingquote ($r = -0,83$) ist angesichts der geringen Fallzahl sowie der stark unterschiedlichen Systemkonfigurationen, insbesondere hinsichtlich Fahrgastaufkommen und Tarifgestaltung, nur eingeschränkt interpretierbar. Insgesamt lassen die vorliegenden Ergebnisse keine belastbaren Rückschlüsse darauf zu, dass Bevölkerungsgröße oder -dichte die Nachfrageintensität oder den Bündelungserfolg maßgeblich beeinflussen. Vielmehr ist davon auszugehen, dass raumstrukturelle Faktoren differenzierter betrachtet und im Zusammenspiel mit betriebsseitigen Einflussgrößen analysiert werden müssen. Ein Beispiel hierfür ist der deutliche positive Zusammenhang zwischen mittlerer Reiseweite und der Größe des Betriebsgebiets ($r = 0,97$). Berücksichtigt wurde dabei das ursprüngliche Kommit-Betriebsgebiet vor der Ausweitung im August 2022. In größeren Gebieten fallen im Durchschnitt längere Fahrten an. Zusätzlich wirken sich auch Raumstruktur, POI-Lage und algorithmische Einstellungen (z. B. Mindestdistanz, Umwegfaktor; s. Kapitel 2.3) auf die Fahrtweiten aus. Für die THG-Bilanzierung ist die mittlere Reiseweite insofern relevant, als sie die erzeugten Pkm bestimmt und damit die Grundlage der THG-Allokation bildet.

Algorithmische Stellgrößen und Systemwirkung

Neben raumstrukturellen und nachfrageseitigen Faktoren beeinflussen auch algorithmische Serviceparameter maßgeblich die Wirkungsweise von Ridepooling-Systemen (s. Kapitel 2.3). Insbesondere eine Erhöhung des Umwegfaktors und der maximalen Wartezeit erweitert den Spielraum für Fahrtenbündelung und führt tendenziell zu einer höheren Poolingquote. Dies kann die Fahrzeugauslastung verbessern, den Leerkilometer-Anteil senken und die durchschnittliche Reiseweite erhöhen. Allerdings wirken sich längere Umwege und Wartezeiten auch auf das Service-Level und die Fahrgastakzeptanz aus. Höhere Reisezeiten und reduzierte Pünktlichkeit bei kurzfristigen Bündelungen können zu einer verringerten Fahrgastnachfrage oder einer erhöhten Stornierungsrate führen. Da Linienbedarfsverkehre insbesondere für direkte Verbindungen, kurze Zugangswege und eine komfortable Zielerreichung geschätzt werden (vgl. Hartz et al., 2023, S. 27; vgl. Knie et al., 2020, S. 10–11; vgl. Reichow & Ruhrort, 2024, S. 19 und S. 21–22), ist eine ausgewogene Parametrierung zentral für den Betriebserfolg.

Allgemeingültige Empfehlungen zur optimalen Einstellung dieser Parameter lassen sich aufgrund lokal spezifischer Mobilitätsstrukturen und Nachfrageverhältnisse nicht ableiten (vgl. VDV, 2025b, S. 42). Vielmehr ist ein iterativer Anpassungsprozess erforderlich, der betriebliche Rückmeldungen, Systemkennzahlen und Nutzerfeedback berücksichtigt.

Die im Wirkungsgefüge definierten Parameter werden im folgenden sukzessive variiert, um deren Einfluss auf die THG-Bilanzierung im Rahmen einer *ceteris-paribus*-Sensitivitätsanalyse zu quantifizieren. Dabei wird jeweils ein Attribut angepasst, während alle übrigen Modellannahmen konstant bleiben. Bezugsgröße ist der Status quo des Jahres 2022, gegenüber dem die jeweiligen Veränderungen bewertet werden.

7.2 Energiequellen für die Fahrzeugladung: Strommix und Ökostrom

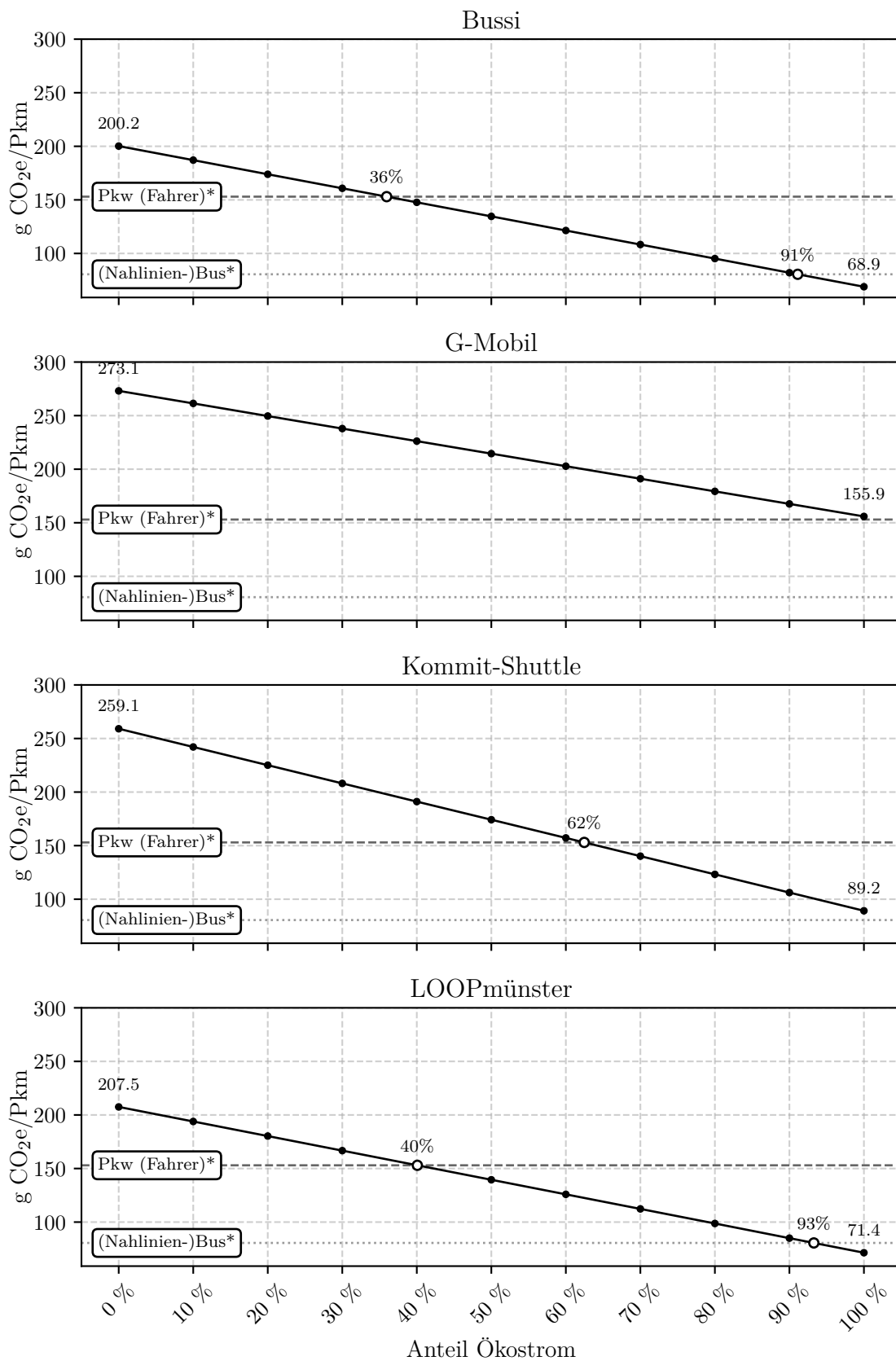
Da im Rahmen der Datenerhebung keine Informationen zur tatsächlichen Herkunft des für die Fahrzeugflotten verwendeten Ladestroms vorlagen, wurden für jedes System zunächst zwei getrennte THG-Bilanzierungen nach *DIN EN 16258* durchgeführt (s. Kapitel 5.1.2, 5.2.2, 5.3.2, 5.4.2). Dabei wurde der gesamte Strombedarf einmal mit dem deutschen Strommix und einmal vollständig mit Ökostrom bilanziert. Diese Varianten bilden jedoch lediglich die Randpunkte möglicher Strombereitstellung ab. In der Praxis können je nach Ladestandort, Stromvertrag, Betreiberstrategie oder lokaler Energieversorgung auch Zwischenwerte auftreten. Daher wird ergänzend eine sukzessive Erhöhung des Ökostromanteils am gesamten Ladestrom modelliert, um dessen Einfluss auf die spezifischen THG-Emissionen zu quantifizieren und Schwellenwerte gegenüber ausgewählten Vergleichswerten zu identifizieren.

Abbildung 7.1 zeigt den Zusammenhang zwischen Ökostromanteil und THG-Emissionen pro Pkm für die untersuchten Systeme. Zusätzlich ist gekennzeichnet, ab welchem Ökostromanteil die spezifischen Emissionen unterhalb der Vergleichswerte eines durchschnittlichen Pkws bzw. eines (Nah-)Linienbusses liegen (UBA, 2021, Tab. 3). Diese Vergleichswerte bilden unterschiedliche Fahrzeugtypen, Betriebsbedingungen und Auslastungen aggregiert ab. Da die zugrunde liegenden Auslastungsannahmen jedoch nicht detailliert ausgewiesen werden, ist die Vergleichbarkeit der spezifischen Emissionswerte nur eingeschränkt nachvollziehbar (UBA, 2021, Tab. 3).

Es zeigt sich ein linearer Rückgang der THG-Emissionen mit steigendem Ökostromanteil. Dieser ergibt sich daraus, dass ein wachsender Teil der elektrischen Fahrleistung mit niedrigeren spezifischen Emissionsfaktoren bilanziert wird. Obwohl für die Systeme identische Fahrzeugtypen und technische Energieverbrauchswerte zugrunde gelegt wurden, unterscheiden sich die Verläufe der Emissionsminderung. Ursache hierfür sind die jeweiligen betrieblichen Rahmenbedingungen, insbesondere Fahrzeugauslastung, Leerfahrtenanteil und erreichte Personenkilometer pro Fahrzeugkilometer. Systeme mit hoher betrieblicher Effizienz, wie *Bussi* oder *LOOPmünster*, erreichen daher bereits bei einem Ökostromanteil von etwa 35–40 % Emissionswerte unterhalb des MIV.

Auffällig ist das *G-Mobil*, dessen Emissionsminderung aufgrund des hohen Anteils an Dieselfahrzeugen selbst bei maximalem Ökostrom vergleichsweise deutlich geringer ausfällt. Der Ökostromanteil wirkt hier nur auf den elektrisch erbrachten Teil der Fahrleistung, während die dieselbedingten Emissionen weitgehend unverändert bleiben.

THG-Emissionen pro Pkm in Abhängigkeit des Ökostromanteils nach Well-to-Wheel-Betrachtung, DIN EN 16258



* Referenzwerte gemäß UBA, Umweltfreundlich mobil!, 2022, Tab. 3

Abb. 7.1: Sensitivitätsanalyse der THG-Emissionen (g CO₂e/Pkm) in Abhängigkeit des Ökostromanteils (in Anlehnung an Abb. 6-6 Bruder und Klemmer, 2024, S. 87)

7.3 Fahrzeugkilometer_{leer}

Der Anteil der Fzkm_{leer} hat einen messbaren Einfluss auf die THG-Bilanz. Dabei handelt es sich um Kilometer, die Emissionen verursachen, ohne unmittelbar zur Beförderung von Fahrgästen beizutragen. Im öffentlichen Personennahverkehr gelten sie als nachteilig, sind jedoch sowohl im klassischen Linienverkehr als auch im Linienbedarfsverkehr unvermeidbar. Ursachen sind unter anderem Zuwegfahrten zu Fahrgästen, Fahrten zwischen Betriebshof und Betriebsgebiet sowie betriebsbedingte Pausen- und Ladefahrten.

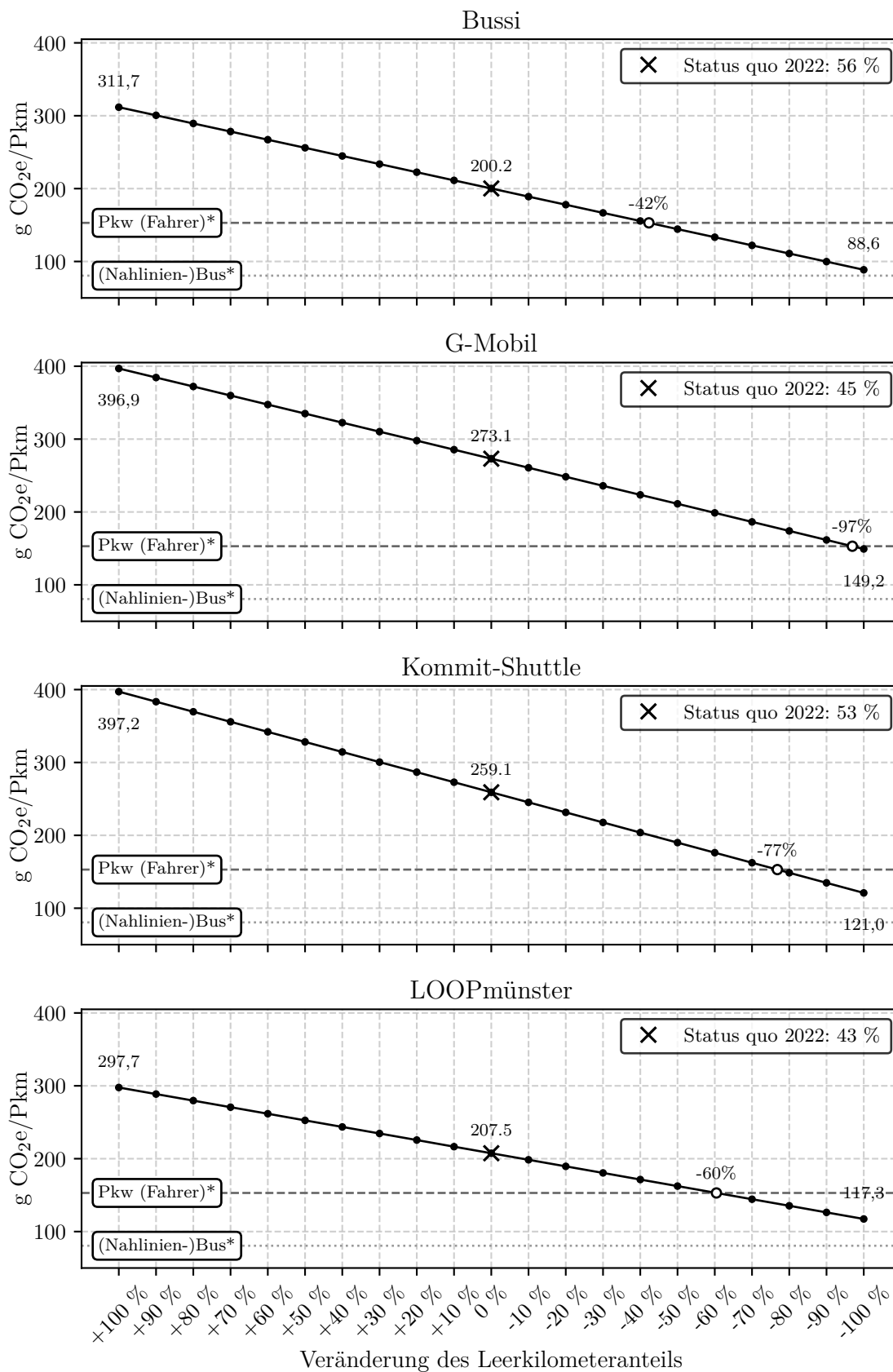
Auf Basis der Betriebsdaten aus 2022 wird untersucht, wie sich prozentuale Veränderungen des Leerkilometeranteils unter Verwendung des deutschen Strommixes auf die THG-Bilanz der Systeme auswirken. Betrachtet wird ausschließlich die relative Veränderung des Anteils, während die nachfrageseitigen Größen, insbesondere die Pkm_{gefahren}, unverändert bleiben. Die Analyse zeigt damit, wie stark sich eine effizientere Betriebsdurchführung bei gleicher Verkehrsleistung auf die spezifischen Emissionswerte auswirken würde.

Eine Verringerung der Leerkilometer kann beispielsweise durch betriebliche und algorithmische Anpassungen erreicht werden. Dazu zählen die Parametrisierung von Warte- und Umwegzeitrestriktionen im Dispositionsalgorithmus sowie die räumliche Verteilung zusätzlicher Lade- und Pausenstandorte, wodurch Rückfahrten zu zentralen Hubs verkürzt werden können (vgl. Zwick, Kuehnel & Hörl, 2022, S. 304–306, 313–316). Eine vollständige Vermeidung von Fzkm_{leer} ist unter realistischen Betriebsbedingungen jedoch nicht erreichbar, wurde aber zu Illustrationszwecken als theoretischer Grenzfall in die Analyse aufgenommen. Abbildung 7.2 zeigt die Auswirkungen einer Reduzierung des Leerkilometeranteils auf die Emissionsbilanz; die Markierungen kennzeichnen jeweils den Ausgangszustand der Systeme im Jahr 2022.

Eine Verringerung der Fzkm_{leer} verbessert die Emissionsbilanz, da hierdurch die Gesamtfahrleistung (Fzkm_{total}) und damit auch die spezifischen THG-Emissionen pro Pkm sinken. Die Modellrechnung zeigt jedoch, dass keines der untersuchten Systeme allein durch eine Reduzierung des Leerkilometeranteils den THG-Referenzwert eines (Nah-)Linienbusses erreichen kann. Der Grund liegt darin, dass auch bei vollständig vermiedenen Leerfahrten weiterhin Emissionen aus der besetzten Fahrleistung verbleiben. Für eine Annäherung an das Linienbusniveau wären daher zusätzlich höhere Auslastungen, längere gebündelte Reiseweiten oder eine weitere Dekarbonisierung der eingesetzten Energie erforderlich.

Deutlich geringere Anpassungen sind hingegen notwendig, um den Emissionswert des MIV zu unterschreiten: Die Systeme *Bussi* und *LOOPmünster* erreichen dieses Niveau bereits bei Reduktionen um 40 % bzw. 52 %, während für *G-Mobil* und *kommit-Shuttle* Einsparungen von 80 % bzw. 90 % erforderlich wären. Dies verdeutlicht, dass die Reduktion von Leerkilometern zwar eine relevante Stellgröße darstellt, ihre Wirkung jedoch stark vom Ausgangsniveau der betrieblichen Effizienz abhängt.

THG-Emissionen pro Pkm in Abhängigkeit des Leerkilometeranteils nach Well-to-Wheel-Betrachtung, DIN EN 16258



* Referenzwerte gemäß UBA, Umweltfreundlich mobil!, 2022, Tab. 3

Abb. 7.2: Sensitivitätsanalyse der THG-Emissionen (g CO₂e/Pkm) in Abhängigkeit des Leerkilometer-Anteils (in Anlehnung an Abb. 6-1 Bruder und Klemmer, 2024, S. 78)

7.4 Besetzungsquote

Die Besetzungsquote beschreibt das Verhältnis von gefahrenen Reiseweiten der Fahrgäste zu Fahrzeugleistungen mit Fahrgästen (vgl. FGSV, 2021, S. 28–32) und wird wie folgt berechnet:

$$\text{Besetzungsquote} = \frac{\text{Pkm}_{\text{gefahren}}}{\text{Fzkm}_{\text{besetzt}}} \quad (6.7)$$

Zentrales Maß sind die $\text{Pkm}_{\text{gefahren}}$. Nach VDV-Definition ergeben sich diese aus den $\text{Fzkm}_{\text{besetzt}}$, die durch die Zahl der Buchungen_{durchgeführt} geteilt und anschließend mit der Anzahl transportierter Fahrgäste multipliziert werden (vgl. VDV, 2025a, Eintrag Personenkilometer) (s. Kapitel 4.3):

$$\text{Besetzungsquote} = \frac{\left(\frac{\text{Fzkm}_{\text{besetzt}}}{\text{Buchungen}_{\text{durchgeführt}}} \right) \cdot \text{Transportierte Fahrgäste}}{\text{Fzkm}_{\text{besetzt}}} \quad (7.1)$$

Kürzen sich die $\text{Fzkm}_{\text{besetzt}}$ heraus, vereinfacht sich die Formel zu:

$$\text{Besetzungsquote} = \frac{\text{Transportierte Fahrgäste}}{\text{Buchungen}_{\text{durchgeführt}}} \quad (7.2)$$

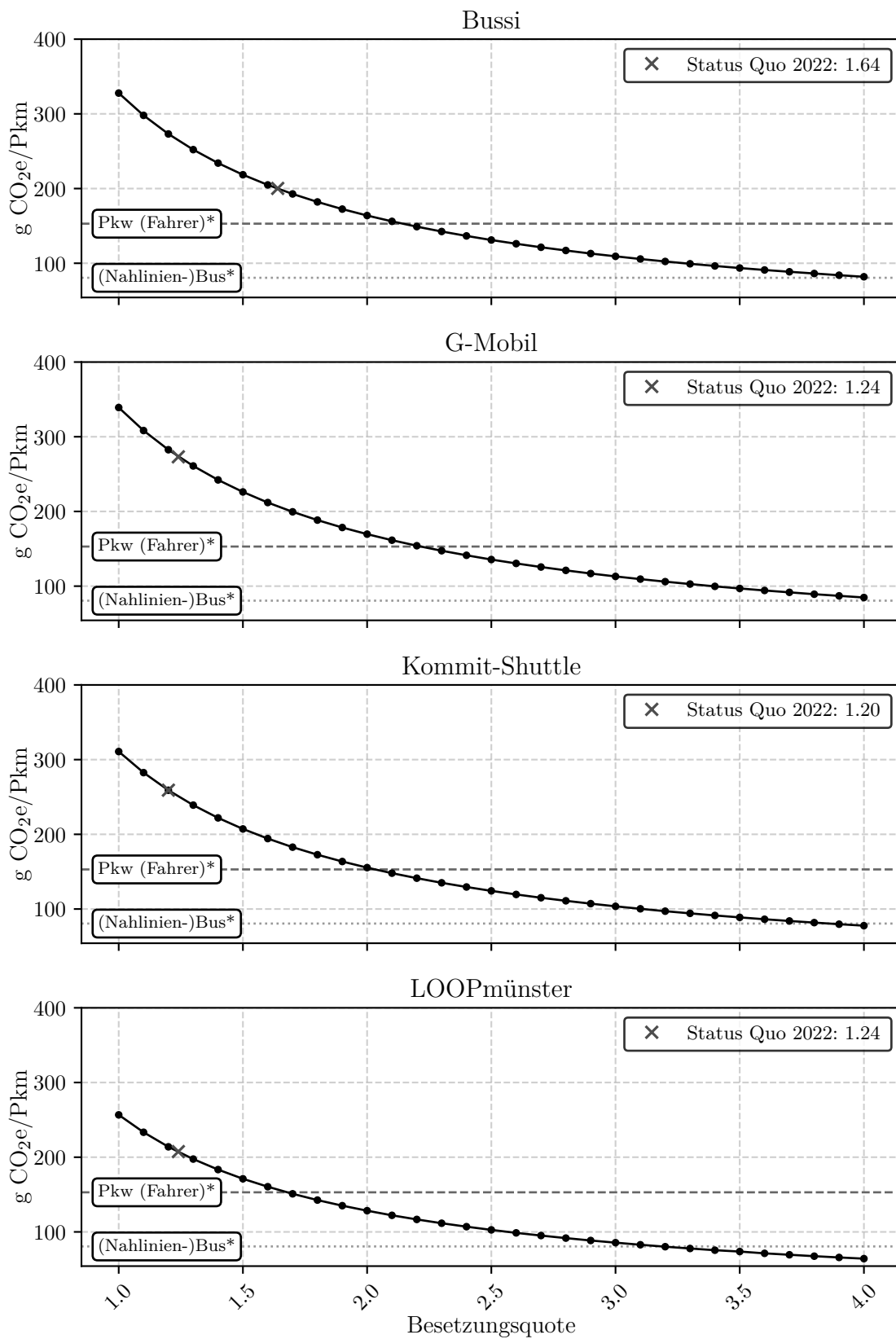
In dieser Arbeit gibt die Besetzungsquote an, wie viele Fahrgäste durchschnittlich pro Buchung_{durchgeführt} transportiert werden. Sie dient als vereinfachtes Maß zur Erfassung der mittleren Auslastung der Fahrzeuge. Betrachtet wird der Einfluss von Gruppenbuchungen auf die THG-Bilanz, indem bei konstanter Buchungsanzahl die durchschnittliche Fahrgastzahl erhöht wird.

Der Zusammenhang zwischen Besetzungsquote und THG-Emissionen pro Pkm verläuft degressiv (s. Abbildung 7.3): Steigt die Besetzungsquote von einem niedrigen Niveau, sinken die Emissionen zunächst stark, da sich die fixen Emissionsanteile auf mehr Fahrgäste verteilen. Mit zunehmender Quote flacht der Rückgang jedoch ab, weil der verbleibende emissionsrelevante Anteil pro Pkm nur noch geringfügig reduziert werden kann. Der stärkste Rückgang ist zwischen den Quoten 2 und 4 zu beobachten.

Am Beispiel des Systems *Bussi* wird die Relevanz deutlich: Trotz geringer Fahrgastnachfrage und niedriger Poolingquote im Jahr 2022 wies *Bussi* aufgrund einer hohen Besetzungsquote die niedrigsten THG-Emissionen pro Pkm auf. Um den THG-Referenzwert eines (Nahlinien-)Busses zu erreichen, wären jedoch sehr hohe Besetzungsquoten erforderlich: für *Bussi* rund 4,0, das *kommit-Shuttle* 3,9 und *LOOPmünster* 3,2. Für *G-Mobil* ist dieses Ziel allein durch eine höhere Besetzungsquote nicht erreichbar. Diese Werte liegen deutlich über der durchschnittlichen Besetzungsquote des MIV von 1,4 (FIS, 2023, Abschn. „Pkw-Besetzungsgrad bei der privaten Autonutzung“) und verdeutlichen den erheblichen Aufwand, der für eine entsprechende Auslastung erforderlich wäre. Moderate Steigerungen reichen hingegen aus, um den MIV-Referenzwert zu unterschreiten: Für *LOOPmünster* genügt eine Quote von 1,7, für das *kommit-Shuttle* 2,0.

THG-Emissionen pro Pkm in Abhängigkeit der Besetzungsquote

nach Well-to-Wheel-Betrachtung, DIN 16258



* Referenzwerte gemäß UBA, Umweltfreundlich mobil!, 2022, Tab. 3

Abb. 7.3: Sensitivitätsanalyse der THG-Emissionen (g CO₂e/Pkm) in Abhängigkeit der Besetzungsquote (in Anlehnung an Abb. 6-2 Bruder und Klemmer, 2024, S. 79)

7.5 Fahrzeugflotte

In diesem Kapitel wird der Einfluss der Fahrzeugflotte auf die THG-Bilanz der untersuchten Systeme analysiert. Hierzu wurde modelliert, wie sich ein vollständiger Austausch der im Status 2022 eingesetzten Fahrzeuge auf die Emissionswerte auswirken würde. Anstelle eines einheitlichen Substitutionsfahrzeugs werden dabei alle in Kapitel 4.3 benannten, in den „Hinweisen zur Ausschreibung von Linienbedarfsverkehren“ des VDV beschriebenen Fahrzeugtypen als Vergleichsvarianten herangezogen (vgl. VDV, 2021, S. 21–25). Für jede Variante wird die Flotte vollständig durch den jeweiligen Fahrzeugtyp ersetzt. Die verwendeten Fahrzeugmodelle und Verbrauchswerte (WLTP) sind in Tabelle 4.2 aufgeführt; die Verbrauchsdaten stammen aus dem DAT-Leitfaden (DAT, 2022, S. 44, 47, 77). Die THG-Bilanzierung der Sensitivitätsanalyse erfolgte nach der *Well-to-Wheel*-Betrachtung gemäß *DIN EN 16258* unter Verwendung des deutschen Strommixes (Umweltbundesamt, 2024, Tab. 1) sowie alternativ unter Annahme von Ökostrom (vgl. LANUK, 2022, Emissionsfaktoren 2022). Die Systemkennzahlen $Fzkm_{\text{leer}}$, $Fzkm_{\text{besetzt}}$ sowie $Buchungen_{\text{durchgeführt}}$ blieben dabei konstant.

Die Ergebnisse (s. Abbildung 7.4) verdeutlichen erhebliche Unterschiede in der THG-Bilanz je nach Fahrzeugtyp. *Bussi* weist unabhängig von der Fahrzeugwahl eine günstigere Bilanz auf als das *kommit-Shuttle*. Das *G-Mobil* zeigt im Status 2022 aufgrund des Einsatzes von Dieselfahrzeugen vergleichsweise hohe Emissionen. Eine vollständige Substitution der Fahrzeugflotte durch das Modell LEVC TX 5 (HRE) Vista Comfort Plus würde die THG-Emissionen des Systems *G-Mobil* auf ein Niveau vergleichbar mit *LOOPmünster* senken. Der Unterschied im Emissionsniveau ist somit primär auf die Fahrzeugwahl zurückzuführen.

Die Ergebnisse zeigen, dass reine Elektroflotten unter Verwendung des deutschen Strommixes nicht automatisch die geringsten Emissionen verursachen. So erzielt der LEVC TX mit Hybridantrieb geringere Emissionswerte als der vollelektrische Mercedes eVito, was insbesondere auf die niedrigere Fahrzeugmasse und den geringeren Energieverbrauch zurückzuführen ist. Unter Annahme von Ökostrom weisen die vollelektrischen Fahrzeuge hingegen die niedrigsten THG-Emissionen auf, da sich die Emissionen des Strombezugs deutlich reduzieren. Der Nissan eNV200 erreicht innerhalb der THG-Bilanzierung die geringsten Emissionswerte, da er unter den untersuchten Fahrzeugtypen den niedrigsten Energieverbrauch aufweist. Ein effizientes Lademanagement stellt im Rahmen der Elektrifizierung der Fahrzeugflotte zudem einen integralen Bestandteil der betrieblichen Planung dar.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass ein gezielter Flottenaustausch erhebliche Potenziale zur Emissionsminderung bietet. Elektrofahrzeuge können insbesondere bei steigendem Anteil erneuerbarer Energien im Strommix oder der Nutzung von Ökostrom einen wesentlichen Beitrag zur Reduktion der THG-Emissionen leisten. Eine ganzheitliche Bewertung technischer, betrieblicher und ökologischer Rahmenbedingungen bleibt hierfür jedoch erforderlich.

THG-Emissionen pro Pkm in Abhängigkeit des vollständigen Austausches der Fahrzeugflotte nach Well-to-Wheel-Betrachtung, DIN 16258

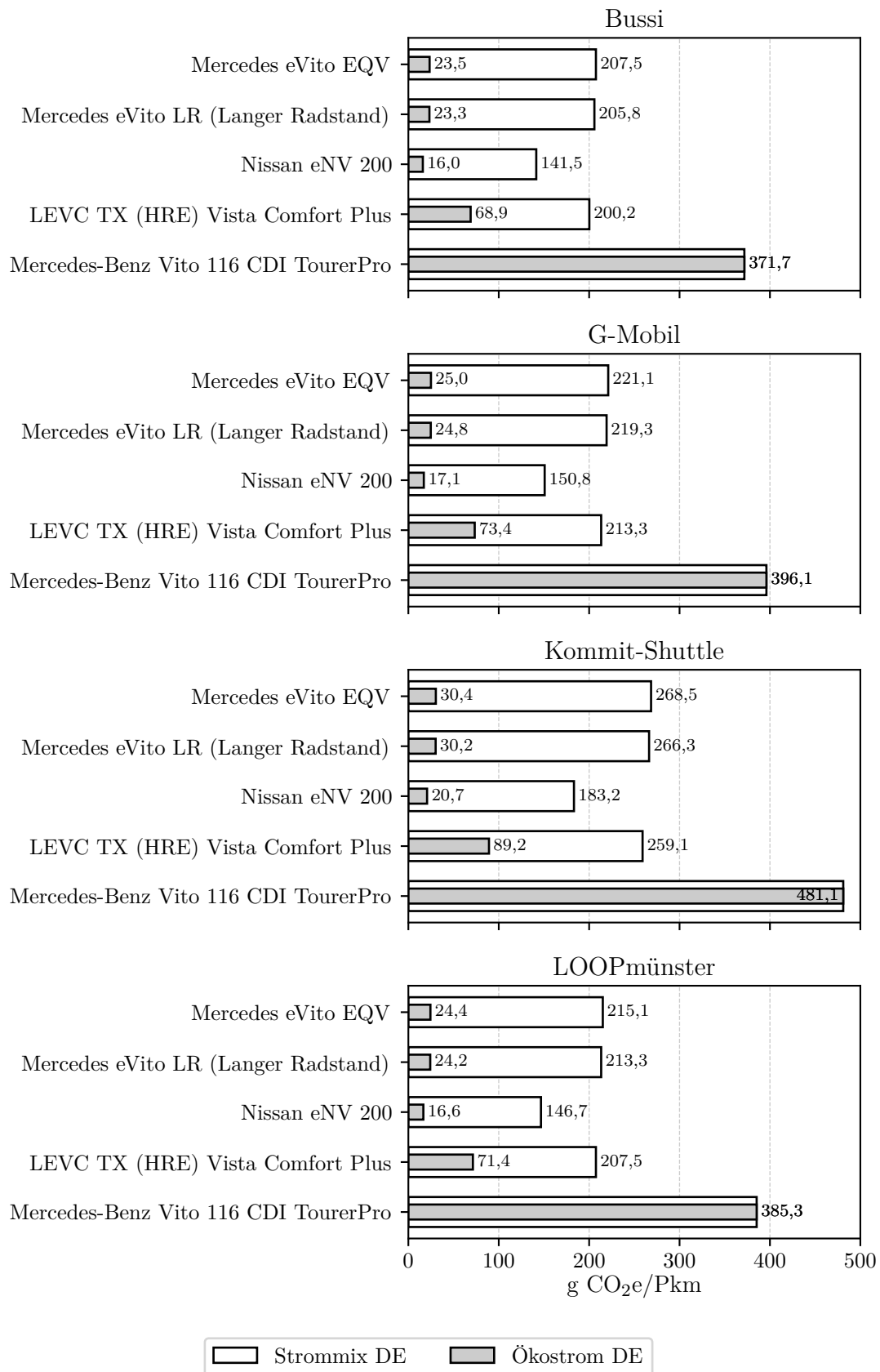


Abb. 7.4: Sensitivitätsanalyse der THG-Emissionen (g CO₂e/Pkm) in Abhängigkeit der Flottenzusammensetzung (in Anlehnung an Abb. 6-5 Bruder und Klemmer, 2024, S. 85)

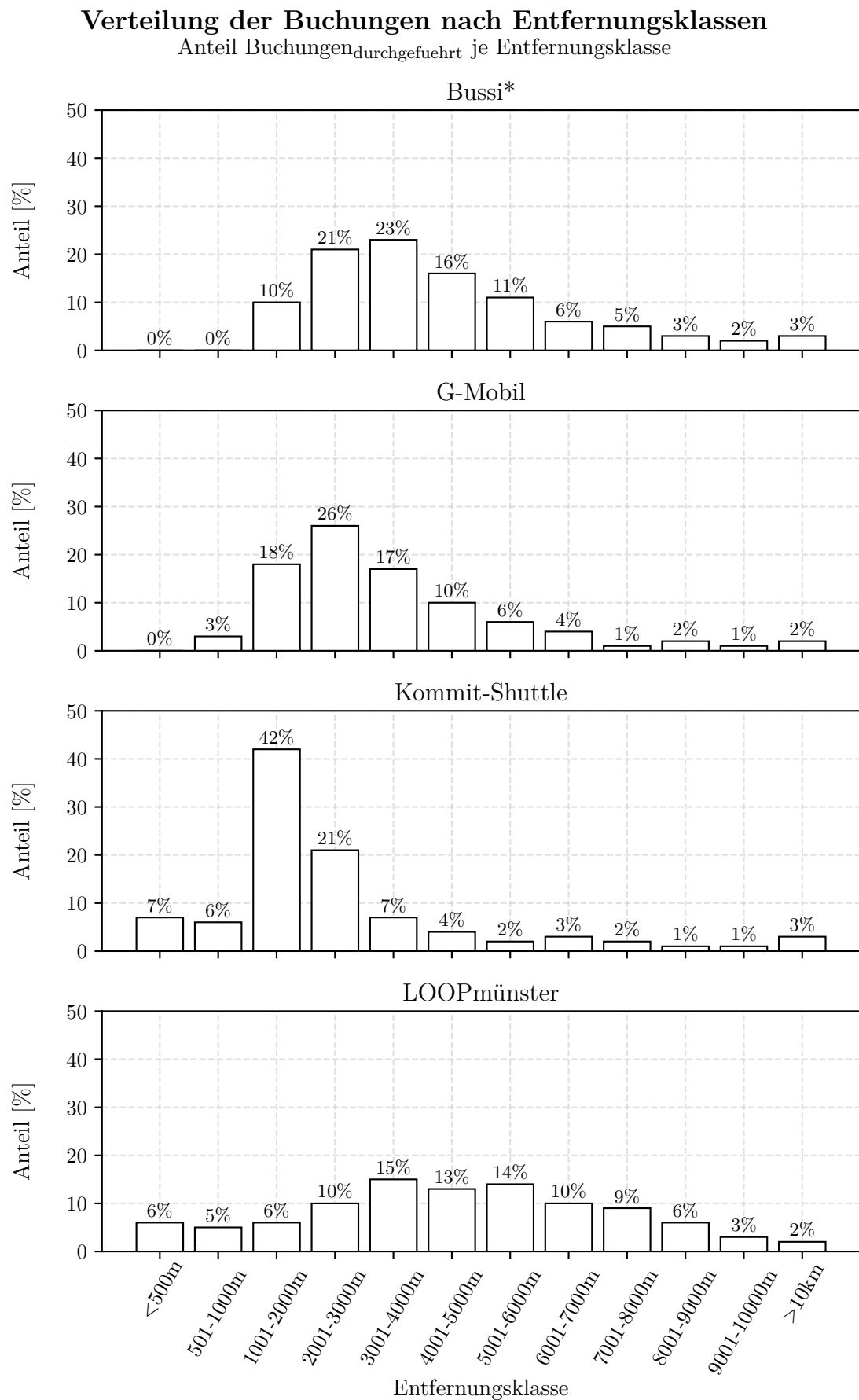
7.6 Durchschnittliche Reiseentfernung

Die durchschnittliche Reiseweite der Fahrgäste stellt eine zentrale Berechnungsgrundlage für die $P_{km_{gefahren}}$ dar, welche als Bezugsgröße und Allokationseinheit in der THG-Bilanzierung verwendet werden. Sie beeinflusst die Emissionsergebnisse unmittelbar. Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse ist eine isolierte Variation der durchschnittlichen Reiseweite jedoch nicht zielführend, da längere Wegerelationen systemisch auf mehrere Modellkomponenten wirken, darunter die Bündelungsquote, die Anzahl der Buchungen_{durchgeführt}, der transportierten Fahrgäste sowie die Verteilung von $F_{zkm_{leer}}$ und $F_{zkm_{besetzt}}$. Diese Wechselwirkungen führen zu komplexen Rückkopplungseffekten, wodurch eine kausal interpretierbare Modellierung des Einflusses nicht möglich ist.

Längere Reiseweiten verbessern das Verhältnis von P_{km} zu $F_{zkm_{leer}}$ und wirken sich positiv auf die THG-Bilanz aus. Einflussfaktoren sind insbesondere die Raumstruktur, die Größe des Betriebsgebiets, die Lage relevanter Points of Interest (POI), die Tarifstruktur sowie konfigurierbare Mindestdistanzen, die durch Disponent*innen oder automatisiert vorgegeben werden. Ihre gezielte Steuerung erfordert eine Abwägung zwischen ökologischen Zielen, Nutzerinteressen und betrieblicher Tragfähigkeit.

Abbildung 7.5 zeigt die Entfernungsverteilungen der durchgeführten Buchungen der jeweiligen Systeme. Zu beachten ist, dass die dargestellten Reiseweiten methodisch unterschiedlich ermittelt wurden: Bei *Bussi* liegt die real gefahrene Distanz pro Buchung vor, einschließlich bündelungsbedingter Umwege. Bei den übrigen Systemen wurde die Reiseweite, sofern Haltestelleninformationen verfügbar waren, GIS-basiert über die Distanz zwischen Ein- und Ausstiegshaltestellen berechnet, wodurch Umweganteile unberücksichtigt bleiben. Eine GIS-basierte Berechnung für *Bussi* entfiel aufgrund fehlender Haltestellenkoordinaten. Für die THG-Bilanzierung wurden die P_{km} hingegen systemübergreifend auf einheitlicher Datengrundlage berechnet (s. Kapitel 4.3).

Die durchschnittliche Reiseweite beträgt bei *LOOPmünster* 4,68 km, bei *Bussi* 4,05 km, beim *G-Mobil* 3,06 km und beim *kommit-Shuttle* 2,49 km. Nahezu die Hälfte der *kommit-Shuttle*-Fahrten liegt im Bereich von 1.001 bis 2.000 m, was auf das bis August 2022 sehr kleine Betriebsgebiet mit einem Durchmesser von etwa 3,5 bis 4 km zurückzuführen ist. Die vergleichsweise hohen Reiseweiten bei *LOOPmünster* lassen sich vermutlich durch ein heterogenes Betriebsgebiet mit mehreren Zentren und Bahnhöfen erklären. Beim *G-Mobil* fällt die mittlere Reiseweite hingegen deutlich geringer aus, was auf ein kompaktes Gebiet mit einem Zentrum und einem angrenzenden Ortsteil zurückzuführen ist. Auffällig ist, dass bei den tarifintegrierten Systemen (*G-Mobil*, *kommit-Shuttle* und *LOOPmünster*) ein höherer Anteil an Buchungen_{durchgeführt} in der Distanzklasse 0 bis 1.000 m auftritt. Eine mögliche Ursache liegt in der Tarifstruktur von *Bussi*: Durch den entfernungsabhängigen Tarif mit Grundpreis werden längere Fahrten relativ begünstigt, während kurze Distanzen vergleichsweise unattraktiver erscheinen können. Dies könnte zur erhöhten durchschnittlichen Reiseweite beitragen. Eindeutige Rückschlüsse auf die Ursachen der Unterschiede ist aufgrund der Vielzahl möglicher Einflussfaktoren jedoch nicht möglich.



* Bussi: reale Fahrdistanzen; andere Systeme: Fahrdistanzen ohne Bündelung

Abb. 7.5: Analyse Reiseentfernungen (in Anlehnung an Abb. 6-3 Bruder und Klemmer, 2024, S. 80)

7.7 Stornierungen

Stornierungen beeinflussen diverse betriebliche Kennzahlen und wirken sich auf Effizienz, Wirtschaftlichkeit und Umweltbilanz bedarfsgesteuerter Verkehre aus. Die Stornierungsrate allein erlaubt jedoch keine verlässliche Bewertung der Systemleistung, da neben der Häufigkeit vor allem der Zeitpunkt entscheidend ist. Je kürzer der Abstand zur geplanten beziehungsweise kommunizierten Abholung, desto größer sind in der Regel die negativen Folgen: Kurzfristige Stornierungen lassen sich nicht in die Disposition integrieren, wodurch Fahrzeuge ohne Fahrgäste fahren oder ungenutzte Kapazität vorhalten. Dies mindert die Angebotsverfügbarkeit, erhöht die $Fzkm_{\text{leer}}$ und kann im Fall sogenannter *No-Shows* sogar zu vollständig unproduktiven Fahrten führen. Auch die Wahrnehmung des Angebots kann leiden, etwa durch längere Wartezeiten oder abgelehnte Fahrtanfragen. Aus ökologischer Sicht sind vor allem Stornierungen problematisch, die zu zusätzlichen Leerkilometern führen, insbesondere wenn sich ein Fahrzeug bereits auf dem Weg zu einem Fahrgast befindet. Daraus ergibt sich die Hypothese, dass Stornierungen, die in zeitlicher Nähe zum geplanten Abholzeitpunkt erfolgen, die betriebliche Effizienz mindern und sich negativ auf die Klimawirkung der Verkehre auswirken. Demnach sind insbesondere Stornierungen während der Fahrzeuganfahrt betrieblich relevant. Da die durchschnittliche Anfahrtszeit jedoch für keines der Systeme ermittelbar war, erfolgt die zeitliche Einordnung näherungsweise über die durchschnittliche Fahrzeit, um kurzfristige Stornierungen mit potenziell negativer Systemwirkung identifizieren zu können.

In der Analyse werden ausschließlich von Fahrgästen initiierte Stornierungen berücksichtigt, da nur sie das tatsächliche Nutzungsverhalten abbilden. Systemseitige Stornierungen, etwa aufgrund technischer Gründe, Kapazitätsengpässe oder fehlerhafter Buchungsangaben (z. B. falsche Tickets, Personenanzahl), beruhen auf internen Prozessen, treten vergleichsweise selten auf (s. Kapitel 2.3) und sind für die Analyse fahrgastseitigen Verhaltens nicht aussagekräftig. Eine Ausnahme stellt *Bussi* dar, da hier technisch keine eindeutige Trennung zwischen fahrgast- und systemseitigen Stornierungen möglich war und daher beide in die Auswertung einbezogen wurden. Zusätzlich konnten acht Stornierungen nicht eindeutig zugeordnet werden.

Abbildung 7.6 zeigt, dass sich die absolute Anzahl der Stornierungen erheblich zwischen den Systemen unterscheidet. Diese Unterschiede sind in erster Linie auf die Fahrgastnachfrage sowie auf tarifliche und organisatorische Rahmenbedingungen zurückzuführen. Ergänzend zur absoluten Betrachtung zeigt ein Vergleich der relativen Stornierungsraten, dass bei den tarifintegrierten Verkehren anteilig deutlich mehr Buchungen storniert werden als bei *Bussi*: Während die Stornierungsrate bei *Bussi* rund 6 % beträgt, liegt sie bei den tarifintegrierten Systemen zwischen 25 und 45 % (s. Kapitel 6).

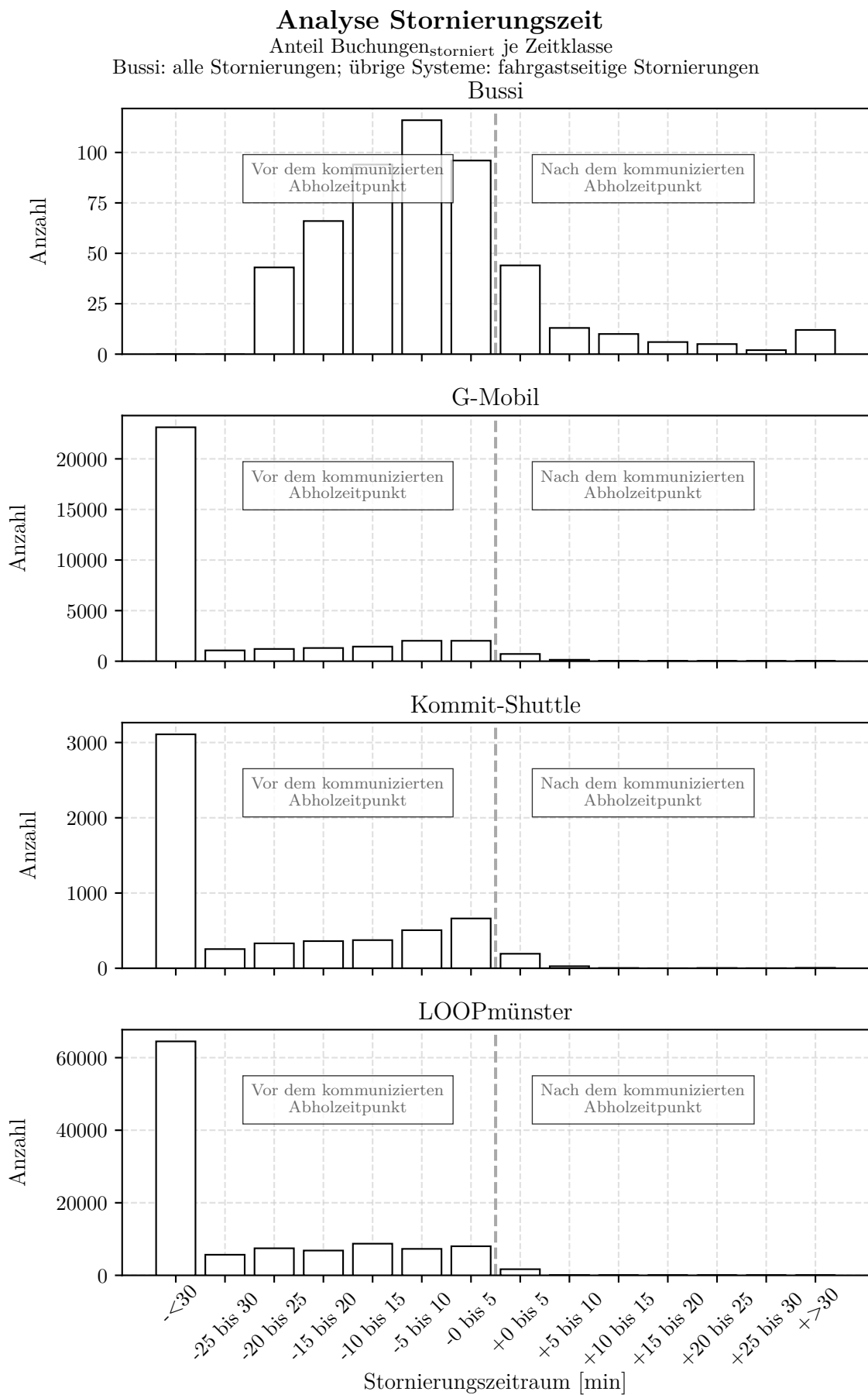


Abb. 7.6: Analyse fahrgastseitiger Stornierungen und deren Zeitpunkt vor vereinbartem Abholzeitpunkt (in Anlehnung an Abb. 6-4 Bruder und Klemmer, 2024, S. 82)

Die geringe Stornierungsrate bei *Bussi* lässt sich vermutlich durch eine Kombination aus Distanztarif und Stornierungsgebühr erklären, die Absagen insgesamt unattraktiv machen. Auffällig ist jedoch der hohe Anteil kurzfristiger Stornierungen im Verhältnis zur Gesamtzahl: 238 von 515 Stornierungen (46 %) erfolgten weniger als eine durchschnittliche Fahrtdauer ($\bar{x} = 10:38$ min) vor dem geplanten Abholzeitpunkt und gelten damit als betrieblich nachteilig. Eine mögliche Erklärung hierfür liegt in der hohen Angebotsverfügbarkeit, die im Vergleich zu den übrigen Systemen eine spontane Nutzung ohne Vorausbuchung erleichtert (s. Kapitel 6).

Bei den tarifintegrierten Verkehren fällt der Anteil solcher kurzfristiger Stornierungen deutlich geringer aus: Beim *G-Mobil* ($\bar{x} = 9:00$ min) entfielen 3.507 von 41.052 Stornierungen (9 %) auf den kritischen Zeitraum, beim *kommit-Shuttle* ($\bar{x} = 6:45$ min) 817 von 7.418 (11 %) und bei *LOOPmünster* ($\bar{x} = 12:16$ min) 19.242 von 121.584 (16 %). In diesen Fällen erfolgte der Großteil der Stornierungen mehr als 30 Minuten vor der geplanten Abholung, sodass eine Neuvergabe der frei werdenden Kapazitäten in der Regel möglich gewesen sein dürfte.

7.8 Kombination betrieblicher, energetischer und fahrzeugtechnologischer Maßnahmen

Zentrale Betriebsparameter des Ridepoolings stehen in einem wechselseitigen Wirkungszusammenhang. Vor diesem Hintergrund erscheint eine Kombination verschiedener betrieblicher sowie fahrzeugtechnologischer und energetischer Maßnahmen zielführender als die isolierte Betrachtung einzelner Einflussgrößen. Aufbauend auf diesen Ergebnissen werden nachfolgend Szenarien formuliert, die betriebliche sowie fahrzeugtechnologische und energetische Maßnahmen zugunsten eines ökologisch effizienteren Betriebs modellieren. Ziel ist die Quantifizierung des Emissionsminderungspotenzials von Ridepooling-Angeboten unter realistischen Rahmenbedingungen.

Da die Auswirkungen einer steigenden Fahrgastnachfrage oder einer höheren Poolingquote nicht zuverlässig quantifiziert werden konnten, bleiben diese Parameter unberücksichtigt. Tabelle 7.1 fasst die Annahmen der Szenarien zusammen, während Abbildung 7.7 die Ausgangslage der Verkehre im Status 2022 sowie die Auswirkungen der Szenarien auf die THG-Bilanzierung darstellt.

Die Szenarien 1-4 untersuchen betriebliche Optimierungsmaßnahmen bestehender Systeme gemäß Tabelle 7.1, ohne Fahrzeugflottenaustausch. Der Ökostromanteil wurde in Stufen von 25 % bis 100 % variiert, um die Emissionsentwicklung sukzessiv zu analysieren. Da die durchschnittliche Reiseweite im Wesentlichen durch Siedlungsstruktur und Betriebsgebiet bestimmt wird (s. Kapitel 7.6) und betriebliche Maßnahmen das Mobilitätsverhalten nur begrenzt beeinflussen, wurde eine konservative Steigerung von 0,1 km der durchschnittlichen Reiseweiten je Szenario angesetzt. Längere Reiseweiten verbessern darüber hinaus das Verhältnis von P_{km} zu $F_{zkm_{leer}}$ und wirken sich positiv auf die THG-Bilanz aus.

Für die Reduktion der $F_{zkm_{leer}}$ wurde die Differenz zwischen *LOOPmünster* (43 % im Jahr

2022) und *Bussi* (30 %) als Referenz herangezogen. Dieser Wert wurde auf 15 % normiert und in Szenario 4 auf eine Reduktion von 20 % erweitert, um zukünftige potenzielle Optimierungsspielräume abzubilden. Für die Besetzungsquoten wurde analog verfahren: Die Differenz zwischen dem *kommit-Shuttle* (1,2) und *Bussi* (1,64) beträgt 0,4 und wurde in den Szenarien in Schritten von + 0,1 angesetzt.

Tab. 7.1: Szenarien für betriebliche, fahrzeugtechnologische und energetische Optimierungsmaßnahmen (nach Tab. 6-2 Bruder und Klemmer, 2024, S. 89)

Szenario	Ökostrom- anteil	Reise- entfernung	Fahrzeug- kilometer _{leer} [*]	Besetzungs- quote
Szenario 1: Minimale betriebliche Optimierung	25 %	+0,1 km	−5 %	+0,1
Szenario 2: Mäßige betriebliche Optimierung	50 %	+0,2 km	−10 %	+0,2
Szenario 3: Umfassende betriebliche Optimierung	75 %	+0,3 km	−15 %	+0,3
Szenario 4: Maximale betriebliche Optimierung	100 %	+0,4 km	−20 %	+0,4
Szenario 5: Fahrzeugtechnologische und energetische Optimierung	100 %	—	—	—
Szenario 6: Maximale betriebliche Optimierung + fahrzeugtechnologische und energetische Optimierung	100 %	+0,4 km	−20 %	+0,4

*Reduktion der ursprünglichen Fzkm_{leer}, nicht des Leerkilometer-Anteils

Szenario 5 untersucht die vollständige Umstellung der Fahrzeugflotte auf den Nissan e-NV200, der die geringsten spezifischen Emissionen unter den untersuchten Fahrzeugtypen aufwies (s. Kapitel 7.5). Die Analyse erfolgt unter der Annahme eines vollständigen Betriebs mit Ökostrom, wobei grundlegende Systemparameter wie durchschnittliche Reiseentfernung, Besetzungsquote und Fzkm gegenüber dem Status 2022 unverändert bleiben. Ziel ist es, die Auswirkungen ausschließlich fahrzeugtechnologischer und energetischer Maßnahmen auf die THG-Bilanzierung darzustellen. Szenario 6 kombiniert hingegen die vollständige Elektrifizierung der Fahrzeugflotte mit dem Nissan e-NV200 und einem Ökostromanteil von 100 % mit den betrieblichen Annahmen aus Szenario 4 („Maximale Optimierung“). Ziel ist es, die kombinierte Wirkung fahrzeugtechnologischer und energetischer Maßnahmen und maximaler betrieblicher Optimierungen auf die THG-Bilanz darzustellen.

Die Ergebnisse der THG-Bilanzierung auf Grundlage der Szenarien sind in Abbildung 7.7 dargestellt. Im Status quo 2022 und bei Nutzung des deutschen Strommixes weisen alle Systeme eine deutlich ungünstigere ökologische Bilanz auf als Pkw, (Nah-)Linienbus und die Substitutionsszenarien V1-V4 (s. Kapitel 4.4). Wie bereits in der Sensitivitätsanalyse zur Energiequelle gezeigt, verbessert der vollständige Einsatz von Ökostrom die THG-

Bilanz erheblich (s. Kapitel 7.2). Systeme mit einer reinen PHEV-Fahrzeugflotte erreichen im Status 2022 dadurch Werte unterhalb des Pkw-Referenzniveaus, bei betrieblich effizienteren Angeboten sogar Werte auf dem Niveau eines Busses oder der Substitutionsszenarien. Eine Ausnahme bildet das *G-Mobil*, da hier Dieselfahrzeuge in der Flotte eingesetzt werden. Im Jahr 2022 wurden rund 25% der $Fzkm_{total}$ mit dieselbetriebenen Fahrzeugen zurückgelegt, was die THG-Bilanz im Vergleich zu rein elektrischen Systemen deutlich verschlechtert.

Innerhalb der Szenarien zeigt sich, dass *Bussi*, *kommit-Shuttle* und *LOOPmünster* ab Szenario 3 bzw. 4 die THG-Referenzwerte eines (Nah-)Linienbusses und der Substitutionsszenarien V1-V4 erreichen oder unterschreiten können. Bei Systemen, bei denen ein relevanter Anteil der Fahrleistung mit Verbrennerfahrzeugen erbracht wird, wie beim *G-Mobil*, bleibt das Emissionsniveau hingegen erhöht. Insgesamt lässt sich daraus ableiten, dass weitgehend elektrifizierte Ridepooling-Verkehre auch unter Berücksichtigung möglicher Kannibalisierungs- und Verkehrsinduktionseffekte das Potenzial besitzen, unter realistischen Annahmen zur THG-Minderung im Untersuchungsgebiet beizutragen.

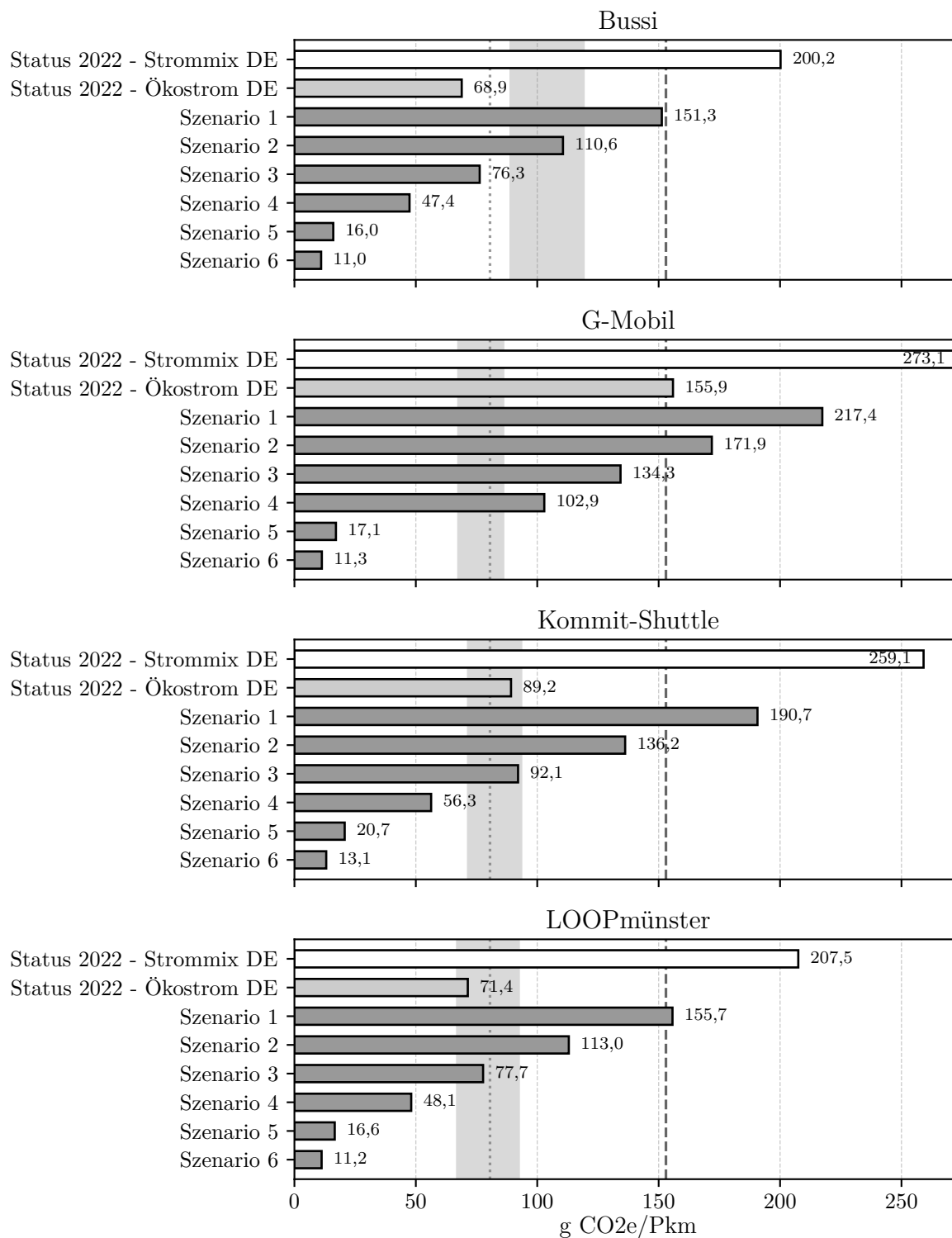
Betriebliche Maßnahmen wie die Reduktion von Leerfahrten, längere durchschnittliche Reiseweiten oder höhere Besetzungsquoten verbessern messbar die THG-Bilanz, ihr Wirkungspotenzial bleibt jedoch begrenzt. Größere Effekte ergeben fahrzeugtechnologische und energetische Anpassungen an Flotte und Energiequelle. Die Szenarien 5 und 6 zeigen, dass eine vollständige Umstellung auf batterieelektrische Antriebe in Kombination mit 100 % Ökostrom bzw. Strom aus erneuerbaren Quellen die Emissionswerte deutlich unter das Niveau der Substitutionsszenarien sowie unter Pkw-Referenzen und teils auch (Nah-)Linienbus drückt. In Szenario 5 ergibt sich aggregiert ein Einsparpotenzial von rund 92 t CO₂e gegenüber den Referenzmobilitäten in den Betriebsgebieten. Der Vergleich erfolgt mit einem durchschnittlich betriebenen Linienbus des Basisjahrs 2022 (UBA, 2021, Tab. 3), nicht mit einem vollelektrischen Bus mit 100 % Ökostrom.

Systeme mit ineffizientem Betrieb profitieren prozentual stärker von betrieblichen und energetischen Optimierungen. So weist das *kommit-Shuttle* im Status quo 2022 trotz teil-elektrifizierter Flotte vergleichsweise hohe Emissionen pro Pkm auf, vor allem wegen geringer Besetzungsquote und hohem Leerkilometeranteil. Mit zunehmender Optimierung nähern sich die THG-Bilanzen der Systeme an; das unterstreicht das Verbesserungspotenzial fahrzeugtechnologischer und energetischer Maßnahmen bei betrieblich suboptimalen Angeboten.

Zusammenfassend zeigen die Sensitivitätsanalysen: Unter bestimmten Anpassungen und Bedingungen können Ridepooling-Angebote THG-Emissionen gegenüber konventionellen Verkehrsmitteln senkenvoll ausgeschöpft wird dieses Potenzial nur bei konsequenter technischer, betrieblicher und energetischer Umsetzung. Werden Vergleichssysteme ebenfalls optimiert, schrumpft dieser Vorsprung.

THG-Emissionen pro Pkm in Abhängigkeit kombinierter Maßnahmen

nach Well-to-Wheel-Betrachtung, DIN EN 16258



* Referenzwerte gemäß UBA, Umweltfreundlich mobil!, 2022, Tab. 3

Abb. 7.7: Kombinierte Sensitivitätsanalyse (in Anlehnung an Abb. 6-7 Bruder und Klemmer, 2024, S. 90)

Kapitel 8

Interpretation der Untersuchungsergebnisse

Ziel dieses Kapitels ist es, die ökologische Wirkung der untersuchten Linienbedarfsverkehre zu interpretieren und die Ergebnisse der THG-Bilanzierung inhaltlich einzuordnen. Die ökologische Betrachtung bildet den Schwerpunkt der folgenden Diskussion und knüpft unmittelbar an die in den Kapiteln 6 und 7 dargestellten Ergebnisse sowie die Sensitivitätsanalyse an. Ergänzend werden verkehrliche und wirtschaftliche Aspekte herangezogen, die nicht Kernbestandteil der entwickelten Bilanzierungsmethodik sind. Diese weiterführenden Betrachtungen basieren auf denselben Datengrundlagen, dienen aber ausschließlich der Kontextualisierung der ökologischen Befunde und deren Einordnung in verkehrs- und umweltpolitische Zielstellungen (s. Kapitel 6).

8.1 Methodische Einordnung und Grenzen der Aussagekraft

Die Beschränkung auf den *Well-to-Wheel*-Ansatz führt dazu, dass nur Emissionen aus der Betriebsphase einschließlich der Energiebereitstellung erfasst werden. Herstellung, Wartung und Entsorgung der Fahrzeuge bleiben unberücksichtigt. Dadurch werden emissionsrelevante Lebenszyklusbestandteile ausgeklammert, die insbesondere bei Elektrofahrzeugen aufgrund der energieintensiven Batterieherstellung für die Gesamtbilanz relevant sind (vgl. Kämper et al., 2020, S. 1–4). Über die Lebensdauer relativiert sich dieser Effekt jedoch, sodass die langfristigen Vorteile erhalten bleiben. Für Busse wurde dieser Aspekt nicht untersucht; insgesamt ist der Einfluss auf die Ergebnisse als moderat einzuschätzen. Die tatsächliche Zusammensetzung des Ladestroms ist unbekannt. Weder Ladeorte noch konkrete Stromtarife lassen sich belastbar dokumentieren. Zur Einordnung wurden daher sowohl der bundesweite Strommix als auch ein regionaler Ökostrom berücksichtigt und durch Sensitivitätsanalysen ergänzt. Die Ausweisung von Ergebnissen als Bandbreite schwächt die Unsicherheit deutlich ab und macht den Einfluss der Stromquelle transparent. Regionale und kurzfristige Schwankungen werden dadurch zwar nicht vollständig erfasst, sind jedoch plausibel eingegrenzt.

Intermodale Wegeketten, wie sie in der *DIN EN 16258* vorgesehen sind, konnten nicht berücksichtigt werden (vgl. DIN, 2013, S. 14). Die Ergebnisse der THG-Bilanzierung beziehen sich ausschließlich auf den Linienbedarfsverkehr selbst und entsprechen damit einer Direktverbindung ohne Vor- und Nachläufe, sodass die ausgewiesenen THG-Werte als Untergrenze zu verstehen sind. Unter Einbeziehung dieser Vor- und Nachläufe lägen die

Emissionswerte entsprechend höher. Diese Einschränkung ist als wesentlich einzustufen. Die Abschätzung substituierter Wege basiert auf modellierten Szenarien (V1 bis V4) (s. Kapitel 7.1). Da eine Mobilität im Betriebsgebiet ohne Linienbedarfsverkehr nicht empirisch beobachtbar ist, weisen die Ergebnisse eine Sensitivität gegenüber der gewählten Methodik auf. Die Bandbreite der Szenarien dient als Unsicherheitsintervall. Liegen die THG-Bilanzierungsergebnisse unterhalb dieser Intervalle, ist von einer ökologischen Vorteilhaftigkeit auszugehen. Befinden sich die Ergebnisse hingegen innerhalb des Unsicherheitsintervalls der Referenzszenarien, lässt sich keine eindeutige ökologische Vorteilhaftigkeit ableiten.

Eine weitere Einschränkung betrifft die nur eingeschränkt berücksichtigte Parallelverkehrsfunktion (Modalfilter). Solche Funktionen können Fahrtanfragen mit einer als zumutbar bewerteten ÖPNV-Alternative softwareseitig unterbinden und dadurch insbesondere Kannibalisierungseffekte gegenüber dem bestehenden Linienverkehr reduzieren. Im Rahmen der Analyse zeigte sich, dass entsprechende Mechanismen zum betrachteten Zeitpunkt bereits in *LOOPmünster* integriert waren und bestimmte Relationen in der Testphase ausgeschlossen wurden. Grundsätzlich ist daher von einer potenziell positiven Wirkung auf die Netto-THG-Bilanz auszugehen, da Verlagerungen innerhalb des Umweltverbunds, insbesondere vom Busverkehr, begrenzt werden können. Eine vollständige Vermeidung von Substitutionen des Fuß- und Radverkehrs ist hierdurch jedoch nicht möglich. Der konkrete Einfluss auf die Netto-THG-Bilanz hängt zudem stark von der lokalen Ausgestaltung, der Qualität des bestehenden ÖPNV-Angebots sowie den jeweiligen Nachfragebedingungen ab und konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht quantitativ bestimmt werden.

Eine wesentliche Einschränkung der vorliegenden Analyse betrifft die Datenbasis für den Energieverbrauch. Für die Emissionsabschätzung wurden Energieverbräuche auf Basis standardisierter Testzyklen verwendet, sofern verfügbar nach WLTP (s. Kapitel 4.3). Diese Werte ermöglichen eine vergleichbare Datengrundlage, bilden reale Fahrprofile, Ladehäufigkeiten und Nutzungsbedingungen jedoch nur eingeschränkt ab. Dies ist insbesondere bei Plug-in-Hybridfahrzeugen relevant, da deren tatsächliche Emissionswirkung stark davon abhängt, welcher Anteil der Fahrleistung elektrisch erbracht wird. Empirische Untersuchungen zeigen, dass reale Verbrauchswerte von Plug-in-Hybridfahrzeugen deutlich über den WLTP-Typgenehmigungswerten liegen können. Für privat genutzte Fahrzeuge werden durchschnittliche Realverbräuche von 4,0 bis 4,4 l/100 km ermittelt, für dienstlich genutzte Fahrzeuge 7,6 bis 8,4 l/100 km (vgl. Plötz et al., 2022, S. 1–2). Der im Modell berücksichtigte LEVC TX 5 (HRE) Vista Comfort Plus weist demgegenüber einen kombinierten WLTP-Verbrauch von 1,35 l Benzin und 21,55 kWh Strom je 100 km auf (DAT, 2022, S. 77). Die Gegenüberstellung verdeutlicht, dass normbasierte Verbrauchswerte bei Plug-in-Hybridfahrzeugen unter realen Einsatzbedingungen mit erheblichen Unsicherheiten verbunden sind. Abweichungen können sich insbesondere aus dem tatsächlichen Ladeverhalten, der Länge der Fahrten, dem Anteil rein elektrischer Fahrten sowie dem Betrieb mit Verbrennungsmotor ergeben. Da für die untersuchten Systeme keine realen Verbrauchsdaten vorlagen, kann das Ausmaß dieser möglichen Verzer-

rung nicht quantifiziert werden. Die Ergebnisse sind daher als normbasierte Emissionsabschätzung zu interpretieren und können die tatsächlichen THG-Emissionen insbesondere bei Plug-in-Hybridfahrzeugen unterschätzen. Empirische Realdaten, etwa aus Fahrtenbüchern, Telematikdaten oder fahrzeugspezifischen Energieverbrauchsaufzeichnungen, hätten die Aussagekraft und Validität der Ergebnisse deutlich erhöht.

Emissionen administrativer Prozesse, etwa von Servern oder mobilen Endgeräten, sind nicht Bestandteil der Bilanzierung (vgl. DIN, 2013, S. 12). Deren Einfluss ist im Verhältnis zum Energieverbrauch der Transportleistung gering und fällt nur in stark digitalisierten Systemen messbar ins Gewicht.

Die Aussagekraft der Ergebnisse ist zeitlich und räumlich begrenzt. Sie beziehen sich auf Deutschland im Jahr 2022 und sind somit stark vom damaligen Kontext geprägt. Der Untersuchungszeitraum fiel in die Phase des 9-Euro-Tickets, das die Auslastung und Effizienz der Systeme beeinflusst haben dürfte. Zudem verändern sich die Emissionsfaktoren des Strommixes kontinuierlich (UBA, 2024, Abschn. „CO₂-Emissionen pro Kilowattstunde Strom 2023 gesunken“), und auch Betriebseigenschaften wie Flottengröße, Dispositionslogik oder Lade- und Pausenmanagement entwickeln sich dynamisch weiter. Insgesamt handelt es sich daher um eine Momentaufnahme in einer frühen Entwicklungsphase von Ridepooling-Angeboten. Eine Übertragung der hier ausgewiesenen Ergebnisse auf andere Jahre, Regionen oder künftige Betriebsumgebungen erfordert daher aktualisierte Annahmen und eine erneute Parametrisierung.

Insgesamt ist zu berücksichtigen, dass die Analyse lediglich auf vier untersuchten Systemen basiert, die sich hinsichtlich ihrer konzeptionellen Ausprägung unterscheiden. Die geringe Stichprobengröße erlaubt daher nur bedingte Aussagen über die Übertragbarkeit der THG-Bilanzierungsergebnisse.

Zusammenfassend wirken die Limitationen in unterschiedlicher Richtung: Der Ausschluss von Produktions- und intermodalen Emissionen sowie die Nutzung standardisierter Verbrauchswerte führen tendenziell zu einer Überschätzung ökologischer Vorteile. Gleichzeitig unterschätzt die Verwendung der aktuellen Emissionsfaktoren für den Strommix die Reduktionen elektrisch betriebener Szenarien. Die Unsicherheit bei der Substitution beeinflusst die Robustheit der Aussagen zur ökologischen Vorteilhaftigkeit. Insgesamt schränken diese Faktoren die Präzision der Ergebnisse ein, ohne die grundlegende Vergleichbarkeit und Aussagekraft der Analyse auf Systemebene in Frage zu stellen.

Fazit zur Einordnung der Ergebnisse

Die Ergebnisse sind trotz methodischer und datenspezifischer Einschränkungen als grundsätzlich belastbar einzuschätzen. Sie liefern richtungssichere Erkenntnisse zu relativen Unterschieden; die ausgewiesenen Werte sind als größenordnungstreu zu verstehen. Für präzise Emissionsquantifizierungen oder Übertragungen auf andere Kontexte sind aktualisierte Annahmen und eine differenziertere Datenbasis erforderlich.

8.2 Gesamtbewertung der THG-Bilanzierung im Kontext betrieblicher, verkehrlicher und ökologischer Zielstellungen

Aufbauend auf den in Kapitel 6 und 7 dargestellten Ergebnissen der THG-Bilanzierung und der Sensitivitätsanalyse werden im Folgenden die ökologischen Wirkungen von Linienbedarfsverkehren diskutiert. Dabei geht es nicht um die erneute Darstellung quantitativer Befunde, sondern um deren Einordnung im Hinblick auf ökologische Potenziale und zentrale Herausforderungen.

Erwartungshaltung und gesellschaftlich-politischer Kontext

Die Transformation des Verkehrssektors gilt als eine der zentralen gesellschaftlichen Herausforderungen der aktuellen und kommenden Dekaden. Angesichts der Klimakrise, wachsender Mobilitätsbedarfe und des Ziels gleichwertiger Lebensverhältnisse zwischen Stadt und Land besteht breiter Konsens über die Notwendigkeit einer grundlegenden Mobilitätswende (vgl. Agora Verkehrswende, 2023, S. 51). In diesem Kontext geraten klassische Linienverkehre vielerorts an Grenzen, etwa durch eine unzureichende Abdeckung peripherer Räume, geringe Wirtschaftlichkeit bei schwacher Nachfrage, fehlende Flexibilität im Bedienkonzept und eingeschränkte Attraktivität gegenüber dem motorisierten Individualverkehr. Flexible, digital organisierte Angebote wie Ridepooling werden daher zunehmend als ergänzender Baustein einer nachhaltigen Mobilitätsversorgung diskutiert (vgl. Agora Verkehrswende, 2023, S. 13; vgl. VDV, 2025b, S. 4–5, 9–10). Eine zentrale Erwartung besteht darin, Ridepooling dort einzusetzen, wo klassische Linienverkehre Angebotslücken aufweisen oder aufgrund geringer Nachfrage nur eingeschränkt wirtschaftlich betrieben werden können (vgl. Agora Verkehrswende, 2023, S. 13; vgl. VDV, 2025b, S. 4–5, 9–10). In der Fachliteratur wird Ridepooling entsprechend vor allem als mögliche Ergänzung und Attraktivierung des öffentlichen Verkehrs verstanden (vgl. Knie et al., 2020, S. 4–5, 14–15; vgl. Kostorz et al., 2021, S. 2, 17). Kostorz et al. zeigen am Beispiel MOIA, dass Ridepooling als ergänzende Mobilitätsoption insbesondere dann relevant sein kann, wenn Busse und Bahnen räumlich oder zeitlich nicht verfügbar sind, etwa in den Abend- und Nachtstunden, oder wenn keine direkte Verbindung besteht (vgl. Kostorz et al., 2021, S. 17). Darüber hinaus werden entsprechende Angebote als Möglichkeit diskutiert, in Räumen mit begrenzter ÖPNV-Bedienungsqualität neue Erreichbarkeiten zu schaffen, inter- und multimodale Wegeketten zu unterstützen und das bestehende öffentliche Verkehrsangebot für zusätzliche Nutzergruppen zu ergänzen (vgl. Kostorz et al., 2021, S. 2, 17; vgl. Zwick, Kuehnel & Axhausen, 2022, S. 1–2, 12–15). Diese Erwartungen an eine bessere räumliche und zeitliche Verfügbarkeit öffentlicher Mobilität haben maßgeblich zur Intensivierung der Umsetzung von Ridepooling-Verkehren in Deutschland beigetragen.

Bis 2022 wurden bundesweit über 80 Projekte realisiert. Laut VDV werden On-Demand-Ridepooling-Verkehre überwiegend in Kleinstädten und ländlichen Räumen eingesetzt (47 %), während ihr Anteil in Mittel- und Oberzentren (26 %), in suburbanen Räumen sowie Metro- und Regiopolenregionen (14 %) und in urbanen Räumen sowie Metro-

polregionen (13 %) deutlich geringer ist (vgl. VDV, 2022, Abschn. „Branchenumfrage“). Dies unterstreicht die in Deutschland vorherrschende Wahrnehmung von Ridepooling-Verkehren als Ergänzung klassischer Linienangebote in nachfrageschwachen Räumen und Zeiten. In der öffentlichen Kommunikation betonen Politik, Aufgabenträger und Betreibende regelmäßig die Umweltfreundlichkeit von Ridepooling-Angeboten, insbesondere durch den Verweis auf „emissionsfreie“ Fahrzeugflotten bzw. Antriebe (vgl. VDV, 2025b, S. 8). Dabei bleiben vorgelagerte Emissionen der Energieerzeugung sowie reale Fahrzeugzusammensetzungen weitgehend unberücksichtigt: Im Jahr 2022 waren lediglich 68 % der eingesetzten Fahrzeuge batterieelektrisch oder mit Plug-in-Hybridantrieb ausgestattet, während 32 % weiterhin über konventionelle Verbrenner-Antriebe verfügten (vgl. VDV, 2022, Abschn. „Branchenumfrage“). Modellstudien prognostizieren deutliche Effizienzgewinne, allerdings insbesondere unter Bedingungen großer Flotten, hoher Nachfrage und ausreichender Bündelungspotenziale (vgl. Alonso-Mora et al., 2017, S. 462–466; vgl. Zwick et al., 2021, S. 665–666). Die Übertragbarkeit dieser Potenziale auf kleinmaßstäbliche Realangebote ist jedoch begrenzt, da empirische Befunde auf hohe Leerkilometeranteile und kontextabhängige Effizienzeinschränkungen hinweisen (vgl. Zwick, Kuehnel & Axhausen, 2022, S. 10, 14–15).

Insgesamt ergibt sich ein Spannungsfeld zwischen normativer Erwartung und betrieblicher Realität. Empirische Untersuchungen realer Systeme sind begrenzt und führen zu uneinheitlichen Befunden sowie divergierenden Interpretationen (vgl. hierzu exemplarisch Hartz et al., 2024; Kostorz et al., 2021; Reichow & Ruhrort, 2024; Zwick, Kuehnel & Axhausen, 2022). Besonders in suburbanen und ländlichen Räumen, wo Ridepooling politisch als Lösung struktureller Angebotsdefizite gilt, ist die Evidenzlage schwach. Wissenschaftliche Begleituntersuchungen realer Angebote verweisen z. T. auf eine geringe Nachfrage, niedrige Besetzungsquoten und hohe Leerkilometeranteile (vgl. Hartz et al., 2024, S. 40–44). Diese Befunde fügen sich in die übergeordnete Forschungslage ein, wonach die Effizienz von Ridepooling-Angeboten stark von Nachfrage, Systemgröße und Bündelungspotenzial abhängt (vgl. Zwick, Kuehnel & Axhausen, 2022, S. 9–10; vgl. Zwick et al., 2021, S. 665–666). Auch marktbezogene Auswertungen deuten darauf hin, dass viele On-Demand-Angebote klein skaliert sind und Effizienzerwartungen nur eingeschränkt erfüllen (vgl. Foljanty, 2025, Abschn. „Project Characteristics“).

Diese Diskrepanz begründet einen erheblichen Forschungsbedarf. Gefordert sind empirisch fundierte Analysen, die reale Nutzungsmuster, betriebliche Rahmenbedingungen und ökologische Wirkungen integrativ erfassen. Die vorliegende Arbeit leistet hierzu einen Beitrag, indem sie vier ausgewählte Ridepooling-Systeme in Nordrhein-Westfalen (*Bussi, G-Mobil, kommt-Shuttle* und *LOOPmünster*) unter realen Einsatzbedingungen im Jahr 2022 untersucht. Zentraler Ausgangspunkt der Dissertation ist die Frage, ob Ridepooling-Systeme in ihrer derzeitigen Ausgestaltung einen quantifizierbaren ökologischen Beitrag zur Erreichung klimapolitischer Ziele in städtischen, öffentlichen Verkehrssystemen leisten können.

Betriebliche Effizienz unter realen Bedingungen

Die Auswertung der Betriebsdaten zeigt, dass die untersuchten Ridepooling-Systeme durch eine Reihe struktureller Effizienzdefizite gekennzeichnet sind (s. Kapitel 6). Auffällig sind insbesondere hohe Leerkilometeranteile (Median der vier Systeme: 49 %, Wertebereich: 43-56 %), niedrige Besetzungsquoten (Median: 1,24 Personen pro Buchung_{durchgeführt}; Wertebereich: 1,20-1,64) sowie geringe Bündelungsquoten (Median: 0,69; Wertebereich: 0,56-0,72). Im systemübergreifenden Median wurden pro Fahrzeugstunde 3,1 Fahrgäste befördert (Wertebereich: 2,9-4,0), was im Median einer Verkehrsleistung von 12,35 Personenkilometern_{gefahren} pro Fahrzeugstunde entspricht (Wertebereich: 7,3-14,7). Diese Werte verdeutlichen, dass die im Jahr 2022 realisierten Ridepooling-Systeme unter realen Betriebsbedingungen vielfach hinter den erwarteten betrieblichen Effizienzpotenzialen zurückblieben. Insbesondere die Kombination aus hohen Leerkilometeranteilen und niedrigen Fahrzeugauslastungen weist darauf hin, dass die Systeme häufig noch nicht die Nachfrage- und Bündelungsdichten erreichten, die für einen ökologisch und betriebswirtschaftlich effizienten Betrieb erforderlich wären.

Besonders deutlich werden die begrenzten Bündelungspotenziale bei den realisierten Poolingquoten: Mit 11 % (*Bussi*), 23 % (*kommit-Shuttle*), 29 % (*G-Mobil*) und 30 % (*LOOPmünster*) liegen die untersuchten Systeme deutlich unter den in der Literatur berichteten Werten urbaner Vergleichsangebote. Für *CleverShuttle* werden Poolingquoten von rund 40-50 % berichtet; in Berlin, München und Leipzig lag die Quote bei etwa 50 %, in Dresden bei 40 % (vgl. Knie et al., 2020, S. 3). Auffällig ist dabei, dass *Bussi* als einziges urbanes Angebot die mit Abstand geringste Poolingquote aufweist. Ursache hierfür ist weniger der räumliche Einsatzkontext als vielmehr die vergleichsweise geringe Nachfrageintensität von durchschnittlich 4,0 zulässigen Fahrtanfragen pro Fahrzeugstunde, wodurch die Potenziale zur Bündelung verschiedener Fahrtanfragen deutlich eingeschränkt werden. Zwar könnten höhere Poolingquoten grundsätzlich auch durch eine Reduktion der eingesetzten Fahrzeugflotte erzielt werden, dies würde jedoch voraussichtlich mit einer geringeren Bedienqualität, höheren Wartezeiten sowie einer sinkenden Verfügbarkeit des Angebots einhergehen. Die Poolingquote ist daher nicht isoliert zu interpretieren, sondern im Zusammenhang mit weiteren Kennzahlen wie Nachfrageintensität, Besetzungsquote, Fahrzeugauslastung und Leerkilometeranteilen zu bewerten. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass Gruppenbuchungen trotz geringer algorithmischer Bündelung zu hohen Fahrzeugauslastungen beitragen können, wodurch die Aussagekraft der Poolingquote als alleiniger Effizienzindikator zusätzlich eingeschränkt ist.

Die geringe Nachfrage, gemessen an den Fahrtanfragen_{zulässig} pro Fahrzeugstunde, ist vermutlich auf das distanzbasierte Tarifmodell *Bussis* zurückzuführen. Tarifintegrierte Angebote wie das *G-Mobil*, das *kommit-Shuttle* und *LOOPmünster* verzeichnen hingegen eine deutlich höhere Nachfrage (Median: 12,9 Fahrtanfragen_{zulässig} pro Fahrzeugstunde; Wertebereich: 9,8–18,9) und weisen entsprechend höhere Poolingquoten auf. Damit wird deutlich, dass die Bündelung von Fahrtanfragen als zentrales Abgrenzungsmerkmal zwischen Ridepooling und nicht bündelnden Angeboten wie Taxi- oder Ridehailing-Diensten weniger durch die räumliche Lage oder die Bevölkerungsdichte, sondern primär durch die

zugrunde liegende Fahrgastnachfrage bestimmt wird. Es ist naheliegend, dass sie zwar mit der Bevölkerungsdichte korreliert, im Fall der betrachteten Systeme jedoch primär durch die tarifliche und konzeptionelle Einbettung geprägt wird.

Auf der anderen Seite zeigt sich, dass eine hohe Fahrgastnachfrage oder eine hohe Poolingquote isoliert nicht ausschlaggebend für eine geringe THG-Bilanz sind. Zwar stellt eine hohe Fahrgastnachfrage in der Regel eine notwendige Voraussetzung für das Erreichen hoher Poolingquoten dar, doch führen beide Faktoren nicht zwangsläufig zu niedrigen Emissionen. So weist *Bussi* trotz der niedrigsten Poolingquote und des geringsten Fahrtanfragenaufkommens die günstigste THG-Bilanz aller untersuchten Systeme auf. Dies ist vor allem auf den hohen Anteil von Gruppenbuchungen zurückzuführen, bei denen mehrere Fahrgäste eine Fahrt zusammen anfragen und damit bereits vor der Disposition eine Fahrtenbündelung stattfindet. Dadurch entfällt ein fahrzeugseitiger Umweg und es entsteht eine höhere mittlere Auslastung, wodurch sich die Emissionsbilanz messbar verbessert. Um die Befunde der betrieblichen Effizienz einordnen zu können, werden sie mit nationalen und internationalen Vergleichswerten abgeglichen. Der VDV definiert den KPI „Auslastung“ als Anzahl beförderter Fahrgäste pro Fahrzeugstunde und nennt hierfür „typische Vergleichswerte (Mittelwerte)“ zwischen 0,3 und 3,5 für ländliche, zwischen 1,0 und 4,1 für suburbane sowie zwischen 2,0 und 5,0 für urbane Räume (vgl. VDV, 2025b, S.24-40).

Die untersuchten Systeme bewegen sich sämtlich innerhalb dieser vom VDV angegebenen Spannweiten typischer Vergleichswerte: *Bussi* erreicht mit 3,1 Fahrgästen pro Fahrzeugstunde einen Wert innerhalb des für urbane Räume typischen Bereichs. Das *G-Mobil* weist mit 4,0 Fahrgästen pro Fahrzeugstunde einen Wert im oberen Bereich der typischen Vergleichswerte auf, obwohl das System außerhalb eines großstädtischen Kontextes betrieben wird. Das *kommit-Shuttle* erzielt mit 2,9 Fahrgästen pro Fahrzeugstunde einen Wert innerhalb des ländlichen Vergleichsbereichs. *LOOPmünster* erreicht mit 3,1 Fahrgästen pro Fahrzeugstunde ebenfalls einen Wert im oberen Bereich der vom VDV für suburbane Räume angegebenen Spannweite. Insgesamt erreichen die betrachteten Systeme damit Auslastungen, die im Bereich typischer nationaler Vergleichswerte liegen.

Im internationalen Vergleich liegen die untersuchten Systeme auf einem überdurchschnittlichen Niveau. Foljanty weist auf Basis von 111 untersuchten On-Demand-Angeboten aus 22 Ländern einen Mittelwert von 2,34 Fahrgästen pro Fahrzeugstunde aus (vgl. Foljanty, 2025, Abschn. „Project Characteristics“). Alle vier Systeme übertreffen diesen Referenzwert.

Ein weiteres Maß zur Beurteilung der betrieblichen Realität stellt die Systemeffizienz η_{RP} dar, definiert als das Verhältnis der Buchungskilometer zu den $Fzkm_{total}$ (vgl. Liebchen et al., 2020, S. 5–7). Die Kennzahl erlaubt Rückschlüsse auf die Effizienz des Systems im Vergleich zum motorisierten Individualverkehr (MIV). Ein Effizienzvorteil gegenüber dem MIV besteht nur dann, wenn der Besetzungsgrad von Ridepooling den durchschnittlichen Besetzungsgrad privater Pkw übersteigt. Ein Effizienzvorteil gegenüber dem MIV besteht nur dann, wenn die Systemeffizienz von Ridepooling den durchschnittlichen Besetzungsgrad privater Pkw übersteigt. Werte unterhalb dieses Schwellenwerts weisen darauf hin,

dass pro beförderter Person mehr Fzkm zurückgelegt werden als im motorisierten Individualverkehr, was potenziell nachteilig im Hinblick auf Verkehrsaufkommen und Emissionen ist. Die Systemeffizienzen der untersuchten Systeme liegen deutlich unter dem Pkw-Besetzungsgrad: *G-Mobil* 0,58, *kommit-Shuttle* 0,51 und *LOOPmünster* 0,72. *Bus-si* konnte aufgrund fehlender Daten nicht berücksichtigt werden. Damit verursachen die untersuchten Systeme mehr Fzkm je befördertem Fahrgast, als bei einer hypothetischen Abwicklung derselben Nachfrage mit privaten Pkw angefallen wären.

Die betrieblichen Kennzahlen sind das Ergebnis eines komplexen Zusammenspiels aus Nachfrageintensität, tariflicher Einbettung, Flottengröße und algorithmischen Steuerungsparametern. Dabei wird sichtbar, dass zwischen betrieblicher Effizienz und Service-Level ein Spannungsverhältnis besteht, das sich in späteren Analysen detailliert zeigt.

Kontextualisierung der Ergebnisse

Die in dieser Arbeit ermittelten Auslastungskennwerte liegen oberhalb nationaler und internationaler Vergleichswerte (vgl. VDV, 2025b, S. 24–40; vgl. Foljanty, 2025, Abschn. „Project Characteristics“), bleiben jedoch deutlich hinter den Potenzialen einschlägiger simulationsbasierter Studien zurück (vgl. Alonso-Mora et al., 2017, S. 462, 466; vgl. Bischoff et al., 2017, S. 1, 5; vgl. ITF, 2017, S. 7 ff.). Diese Diskrepanz ist wesentlich auf unterschiedliche Einsatzkontexte zurückzuführen. Während Simulationsstudien häufig urbane Untersuchungsräume mit hoher Bevölkerungsdichte, starkem Nachfragepotenzial und großen beziehungsweise hypothetisch skalierbaren Flotten zugrunde legen, operieren die hier betrachteten Systeme überwiegend in suburbanen und ländlichen Räumen mit deutlich kleineren Fahrzeugflotten.

Diese Verortung entspricht den bereits in der Einleitung beschriebenen bundesweiten Strukturen realer On-Demand-Ridepooling-Verkehre. Die Mehrzahl der Systeme wird in Kleinstädten und ländlichen Räumen umgesetzt, während urbane Räume beziehungsweise Metropolregionen bislang eine untergeordnete Rolle spielen (vgl. VDV, 2022, Abschn. „Branchenumfrage“). Die strukturellen Unterschiede zwischen den von der Quelle unterschiedenen Raum- und Zentrentypen sind erheblich: In Kleinstädten und ländlichen Räumen beträgt die durchschnittliche Betriebsgebietsgröße 204 km² bei einem mittleren Fahrzeugeinsatz von 2,9 Fahrzeugen. In urbanen Räumen beziehungsweise Metropolregionen liegt die durchschnittliche Gebietsausdehnung hingegen bei lediglich 67 km², wobei im Mittel 10,3 Fahrzeuge eingesetzt werden. Auch für suburbane Räume beziehungsweise Metro- und Regiopole (Ø 40 km²; Ø 7,6 Fahrzeuge) sowie Mittel- und Oberzentren (Ø 97 km²; Ø 4,6 Fahrzeuge) zeigen sich klar differenzierte Betriebsparameter (vgl. VDV, 2022, Abschn. „Branchenumfrage“).

Insbesondere eine geringe Nachfrageintensität pro Fahrzeugeinheit verhindert das Erreichen der für Ridepooling charakteristischen kritischen Masse, ab der Bündelungsquoten stark ansteigen und Leerkilometer sinken. In vielen suburbanen und ländlichen Systemen resultiert dies in niedrigen Bündelungsraten und hohen Leerkilometeranteilen. Gleichwohl bestehen Ausnahmen: So verzeichnete etwa *LOOPmünster* trotz hoher Nachfrage und vergleichsweise niedriger Leerkilometeranteile eine große Zahl abgelehnter Anfragen,

was auf kapazitative und algorithmische Restriktionen zurückzuführen ist. Dieses Beispiel verdeutlicht, dass nicht allein die Nachfragehöhe, sondern auch Flottenumfang und Dispositionslogik maßgeblich für die betriebliche Effizienz der Systeme sind.

Die in dieser Arbeit beobachteten Muster werden durch empirische Befunde aus Begleitforschungen und Evaluationen real betriebener Ridepooling-Systeme gestützt. Auch dort zeigen sich kontextabhängige Ausprägungen zentraler Leistungsindikatoren, insbesondere hinsichtlich Besetzung, Bündelung, Leerkilometern, Verfügbarkeit und Nachfrageverteilung (vgl. hierzu exemplarisch Knie et al., 2020; vgl. Reichow & Ruhrort, 2024, S. 19–22; vgl. Hartz et al., 2024, S. 38–44). Sie unterstreichen die Bedeutung kontextueller Faktoren wie Siedlungsstruktur, Bevölkerungsdichte, Tarifintegration und Flottengröße für die tatsächliche Systemeffizienz. Demnach erscheinen die auf Basis der hier analysierten Angebote gewonnenen Erkenntnisse im Vergleich mit strukturell ähnlichen Systemen als robust. Allerdings lassen sich die Ergebnisse aufgrund der spezifischen Einsatzbedingungen, vor allem der geringen Flottengrößen, nur eingeschränkt auf andere Systeme übertragen.

Vor diesem Hintergrund wird deutlich, dass die in wissenschaftlichen Studien häufig prognostizierten Umweltwirkungen, etwa durch reduzierte Fzkm oder eine Verlagerung von Pkw- und Ridehailing-Fahrten, unter realen Einsatzbedingungen bislang kaum eintreten. Für eine belastbare Bewertung der ökologischen Wirkung ist daher eine differenzierte Bilanzierung der THG-Emissionen unerlässlich.

Einordnung der Klimawirkung der untersuchten Ridepooling-Systeme

Um die Klimawirkung der Ridepooling-Systeme konkret zu bewerten, wurden auf Basis der Betriebsdaten die THG-Emissionen mit der Allokationseinheit Pkm bilanziert und anschließend den Referenzwerten des Umweltbundesamtes für Pkw und (Nah-)Linienbusse gegenübergestellt. Da der tatsächlich verwendete Ladestrom der Linienbedarfsverkehre nicht bekannt war, erfolgte die THG-Bilanzierung gemäß DIN EN 16258 in zwei Szenarien: unter Annahme des deutschen Strommixes und unter Annahme einer vollständigen Versorgung mit Ökostrom. Die Ergebnisse zeigen deutliche Unterschiede zwischen beiden Szenarien.

Im Szenario Strommix liegen die spezifischen Emissionen der Systeme im Median bei 233,3 g CO₂e/Pkm (Wertebereich: 200–273 g CO₂e/Pkm) und damit rund 52 % über den THG-Emissionen eines durchschnittlichen Pkw (153 g CO₂e/Pkm) sowie deutlich über dem Bus-Referenzwert von 81 g CO₂e/Pkm (UBA, 2021, Tab. 3). Alle untersuchten Systeme überschreiten in diesem Szenario somit sowohl die Pkw- als auch die (Nah-)Linienbus-Referenzwerte erheblich.

Wird dagegen eine ausschließliche Nutzung von Ökostrom unterstellt, sinken die spezifischen Emissionen auf Medianwerte von 80 g CO₂e/Pkm (Wertebereich 70–156 g CO₂e/Pkm). In diesem Szenario liegen einzelne Systeme (*LOOPmünster*, *Bussi*) unterhalb des Bus-Referenzwertes, während das *kommit-Shuttle* diesen annähernd erreicht. Das *G-Mobil* verbleibt hingegen aufgrund des Umstands, dass rund 25 % der Fzkm_{total} mit Diesel-Fahrzeugen zurückgelegt wurden, auch bei vollständiger Ökostromladung oberhalb des Referenzwertes eines durchschnittlichen Pkw.

Zur Ermittlung der Nettoemissionen wurden fünf Substitutionsszenarien entwickelt, die auf Fahrgastbefragungen und ermittelten Modal-Split-Anteilen basieren. Sie bilden den hypothetischen CO₂-Ausstoß ohne Ridepooling ab und unterscheiden zwischen Pkw-, Bus-, Rad- und Fußnutzung sowie Verkehrsinduktion. Da kein eindeutig realistisches Basisszenario vorliegt, wurde eine Bandbreite vom emissionsgünstigen *Minimal* bis zum emissionsintensiven *Maximalszenario* betrachtet. Der Vergleich mit den realen Systemen erlaubt eine Abschätzung des Netto-THG-Effekts, der als robuste Indikation, nicht aber als exakte Quantifizierung zu verstehen ist (s. Kapitel 4.4).

Bei Betrachtung der aggregierten THG-Nettoeffekte unter Berücksichtigung der Substitutionsszenarien ergibt sich für das Jahr 2022 unter Status-quo-Bedingungen mit deutschem Strommix ein zusätzlicher THG-Ausstoß von +160 t CO₂e im *Minimalszenario* bis +189 t CO₂e im *Maximalszenario*, jeweils im Vergleich zu den substituierten Verkehrsmitteln. Auch bei ausschließlicher Nutzung von Ökostrom liegen die Emissionen in den meisten Fällen über den Vergleichswerten; lediglich in Einzelfällen lässt sich ein geringfügiger Minderungsbeitrag feststellen. Erst unter der Annahme eines vollständigen Flottenaustauschs auf batterieelektrische Fahrzeuge in Kombination mit 100 % Ökostrom ergibt sich ein konsistentes, wenn auch begrenztes aggregiertes Einsparpotenzial je nach Szenario von –63 t CO₂e bis –92 t CO₂e (s. Kapitel 6.4).

Die Sensitivitätsanalysen (s. Kapitel 7) zeigen, dass betriebliche Optimierungen wie eine Reduktion von Leerkilometern oder eine Erhöhung der Besetzungsquote zwar positive Effekte auf die THG-Bilanz entfalten können, die hierfür erforderlichen Veränderungen unter realen Betriebsbedingungen jedoch vielfach nur eingeschränkt erreichbar erscheinen. Deutlich größere Potenziale ergeben sich auf fahrzeugtechnologischer und energetischer Ebene: Ein theoretischer vollständiger Austausch der Flotten auf batterieelektrische Fahrzeuge in Kombination mit einer Versorgung durch 100 % Ökostrom kann die Emissionen bei gleichbleibender betrieblicher Effizienz um bis zu 94 % senken. Unter diesen Bedingungen erreichen selbst Systeme mit vergleichsweise geringer betrieblicher Effizienz Emissionswerte unterhalb der Pkw- und (Nah-)Linienbus-Referenzwerte sowie der Minimalannahmen der betrachteten Substitutionsszenarien. Dies verdeutlicht, dass die ökologische Wirkung von Ridepooling-Angeboten maßgeblich durch die Fahrzeugtechnologie und die zugrunde liegende Energieversorgung beeinflusst wird, während rein betriebliche Optimierungen allein nur begrenzte Effekte erzielen.

Zugleich wird erkennbar, dass der Einsatz von Verbrennerfahrzeugen dem Anspruch widerspricht, durch Ridepooling einen Beitrag zur klimafreundlichen Mobilität zu leisten. Am Beispiel des *G-Mobil*-Systems zeigt sich dies deutlich, das trotz eines überwiegenden Anteils batterieelektrischer und plug-in-hybrider Fahrzeuge aufgrund der mit Diesel-Fahrzeugen erbrachten rund 25% der Fzkm selbst im Ökostrom-Szenario oberhalb des Pkw-Referenzwerts verbleibt. Die Ergebnisse dieser THG-Bilanzierung sind als größenordnungstreu zu interpretieren. Aufgrund fehlender exakter Angaben zum verwendeten Ladestrom sowie Unsicherheiten bei den realen Verbrauchswerten der eingesetzten Fahrzeuge wurde auf standardisierte Testwerte zurückgegriffen. Diese methodischen Einschränkungen beeinflussen jedoch nicht die grundsätzliche Tendenz der Befunde.

Soziale, verkehrliche und wirtschaftliche Dimensionen

Die Wirkung von Ridepooling-Angeboten lässt sich nicht allein anhand betrieblicher Effizienzkennziffern oder ökologischer Bilanzen erfassen. Entscheidend ist, wie die Dienste von den Nutzenden angenommen werden, welche verkehrlichen Effekte sie erzeugen und mit welcher Wirtschaftlichkeit sie betrieben werden können. Erst das Zusammenspiel dieser drei Perspektiven, ergänzt um die ökologische Bewertung, ermöglicht eine realistische Gesamtbeurteilung der Angebote. Auf dieser Grundlage lassen sich zentrale Bewertungsperspektiven und strategische Handlungsempfehlungen für die Integration von Ridepooling-Systemen in nachhaltige Verkehrsplanungsprozesse ableiten. Zur kontextuellen Einordnung der Ergebnisse werden im Folgenden ausgewählte Befunde wissenschaftlicher Begleitforschungen herangezogen.

Die Nutzendenbewertungen fallen systemübergreifend insgesamt positiv aus: Komfort, Schnelligkeit und die einfache digitale Buchung werden in den Fahrgastbefragungen besonders häufig mit „sehr gut“ oder „gut“ bewertet (vgl. Hartz et al., 2024, S. 8–15; vgl. Wittowsky & Malow, 2022, S. 27; vgl. Wetzchewald & Schäfer-Sparenberg, 2022, S. 9; vgl. Koska & Wetzchewald, 2022, S. 9–11). Diese Aspekte tragen wesentlich zur Wahrnehmung der Ridepooling-Dienste als attraktive Alternative zum privaten Pkw bei. Gleichzeitig äußern Fahrgäste auch Kritik, insbesondere an der Angebotsverfügbarkeit und Zuverlässigkeit tarifintegrierter Angebote, vor allem in Zeiten hoher Nachfrage (vgl. Hartz et al., 2024, S. 12–13; vgl. Koska & Wetzchewald, 2022, S. 9–11; vgl. Wetzchewald & Schäfer-Sparenberg, 2022, S. 14–15).

Dabei wird ein zentrales Dilemma sichtbar. Je stärker die Nachfrage steigt, desto eher geraten die Systeme an die Grenzen ihrer Angebotsverfügbarkeit. Effizienzgewinne durch höhere Auslastung stehen somit in einem Zielkonflikt mit der Servicequalität, insbesondere Verfügbarkeit, Wartezeit und Umwegen, die für die Akzeptanz der Angebote entscheidend bleibt. Dieses Spannungsfeld verdeutlicht, dass Ridepooling nur dann einen Beitrag zur Verkehrswende leisten kann, wenn betriebliche Leistungsfähigkeit und Nutzerorientierung in einem ausgewogenen Verhältnis zueinander stehen. Daraus lässt sich ableiten, dass in Nachfragespitzen eine gezielte Nichtbedienung einzelner Anfragen erforderlich werden kann, um den Betrieb effizient zu gestalten. Dies steht jedoch im Kontrast zum Anspruch der Daseinsvorsorge, dem Ridepooling-Angebote gerecht werden sollen, wenn sie nicht lediglich als Form von Bequemlichkeitsmobilität verstanden werden. Die vom VDV formulierten Zielgrößen zur Angebotsverfügbarkeit geraten dadurch in ein erklärungsbedürftiges Spannungsverhältnis (vgl. VDV, 2023, S. 8). Dass Ridepooling neue Zielgruppen für den ÖPNV erschließen kann, wird unter anderem von Kostorz et al. (vgl. 2021, S. 2, 16–17), Kagerbauer et al. (vgl. 2021, S. ii, S. 64–66) sowie dem VDV (vgl. 2023, S. 9–10) angenommen. Ein praktisches Beispiel für die Integration eines solchen Angebots in die öffentliche Verkehrsversorgung ist die Stadt Gronau, in der der konventionelle Liniennahverkehr vollständig durch das flexible Ridepooling-Angebot *G-Mobil* ersetzt wurde. Dieser Sonderfall ermöglicht eine Auswertung unter nahezu experimentellen Bedingungen, wie sie in anderen Kontexten kaum gegeben sind. Vor der Einführung des *G-Mobil* wurde das Gebiet durch drei Stadtbuslinien, zwei Taxibuslinien sowie einen weiterhin verkehrenden

Bürgerbus erschlossen, der das On-Demand-Angebot bis heute ergänzt. Nach Einführung des Linienbedarfsverkehrs konnte ein Zuwachs von rund 50 % der Fahrgastzahlen gegenüber einer Fahrgastzählung des Stadtbusverkehrs vor der Umstellung (2018/2019) festgestellt werden (vgl. Schöne [Schöne], 2024, S. 1). Zwar liegt zwischen den Erhebungen ein längerer Zeitraum, in dem externe Faktoren die ÖV-Nutzung ebenfalls beeinflusst haben könnten und methodisch handelt es sich daher nicht um einen Nachweis kausaler Wirkung, sondern um eine korrelative Beobachtung unter spezifischen Rahmenbedingungen. Dennoch ist der empirisch belegte Fahrgastanstieg in Gronau ein selten dokumentierter Einzelfall, der wichtige Hinweise auf das Potenzial flexibler Bedienformen zur Erweiterung der ÖPNV-Nutzerbasis liefert. Er verweist darauf, dass durch digital gestützte, bedarfsgerechte Angebote zusätzliche Nachfrage im Umweltverbund generiert werden kann, insbesondere bei bisher nicht oder nur unzureichend erreichten Zielgruppen.

Inwiefern Ridepooling zur Attraktivierung des ÖPNV und zur Reduktion privater Pkw-Flotten beiträgt, konnte im Rahmen dieser Studie nicht quantifiziert werden. Auf Basis externer Begleitforschungen lassen sich jedoch Rückschlüsse auf relevante Potenziale ziehen: Diese legen nahe, dass Ridepooling nicht lediglich als ergänzendes Angebot für klassische ÖPNV-Nutzende verstanden werden kann, sondern auch das Potenzial zur Ansprache von Zielgruppen mit hoher Pkw-Nutzung und -Besitzquote bietet. Die Befragungsergebnisse der untersuchten Begleitforschungen zeigen, dass Ridepooling-Angebote nicht ausschließlich von Personen ohne Pkw-Besitz bzw. ohne Zugang zu Pkw-basierter Mobilität genutzt werden. Vielmehr sprechen die Ergebnisse dafür, dass entsprechende Angebote auch Nutzergruppen erreichen, die im Alltag regelmäßig den Pkw nutzen oder gelegentlich bzw. dauerhaft über einen Pkw verfügen (vgl. Koska & Wetzchewald, 2022, S.24; vgl. Wittowsky & Malow, 2022, S. 17; vgl. Hartz et al., 2024, S. 11). Auch die Begleitforschung weiterer deutscher Projekte bestätigt diesen Befund. Ergebnisse aus Hamburg weisen für MOIA auf überdurchschnittliche Pkw-Besitz- und Nutzungsraten innerhalb der Kundschaft hin (vgl. Kistorz et al., 2021, S. 8). Ridepooling erreicht demnach nicht nur klassische ÖPNV-Nutzende, sondern auch Haushalte mit Pkw-Verfügbarkeit und bietet damit grundsätzlich das Potenzial, pkw-zentrierte Mobilitätsmuster zumindest teilweise in Richtung geteilter Mobilität zu verändern. Ähnlich zeigte sich bei *CleverShuttle*, dass rund 45 % der Kund:innen mit Pkw im Haushalt sich vorstellen konnten, dass entsprechende Angebote zukünftig das eigene Fahrzeug ersetzen könnten (vgl. Knie et al., 2020, S. 11, 14).

Befragungsergebnisse deuten zudem auf Veränderungen in der Alltagsmobilität hin: Zwischen 38 und 48 % der Befragten bei *G-Mobil*, dem *kommit-Shuttle* und *LOOPmünster* gaben an, seit Einführung der Dienste den privaten Pkw seltener zu nutzen (Koska & Wetzchewald, 2022, S. 29; Wetzchewald & Schäfer-Sparenberg, 2022, S. 29). Ergänzend äußerte eine Mehrheit der *LOOPmünster*-Nutzenden, ihre Abhängigkeit vom Auto habe abgenommen (vgl. Hartz et al., 2024, S. 14).

Begleitforschungsübergreifend ist jedoch zu berücksichtigen, dass insbesondere Aussagen zum zukünftigen Substitutionspotenzial von Ridepooling-Diensten häufig auf Stated-Preference-Angaben beruhen. Diese unterliegen bekannten methodischen Unsicherheiten

und können den tatsächlichen Einfluss auf das Mobilitätsverhalten überschätzen. Ergänzend sind auch verhaltensnahe, aber retrospektiv selbst eingeschätzte Nutzungsänderungen kritisch zu interpretieren.

Es zeigt sich jedoch auch, dass die Realisierung solcher Wirkpotenziale an strukturelle Voraussetzungen gebunden ist. Problematisch ist insbesondere die Finanzierungssituation der Angebote: Mit *LOOPmünster* und dem *kommit-Shuttle* wurden zwei der untersuchten Dienste bereits eingestellt, sodass sie keine dauerhaft verlässliche Mobilitätsoption darstellen konnten. Im Kontext der Angebotszuverlässigkeit tritt zudem erneut das Spannungsfeld zwischen Servicequalität und betrieblicher Effizienz zutage. Insbesondere in nachfragestarken Phasen kann es zu eingeschränkter Buchbarkeit kommen, was die wahrgenommene Verlässlichkeit des Angebots beeinträchtigen kann. Eine nachhaltige Reduktion privater Pkw-Flotten erscheint daher nur dann realistisch, wenn Ridepooling-Angebote dauerhaft als verlässlich wahrgenommen werden und systematisch in bestehende ÖPNV-Strukturen integriert werden.

Die untersuchten Systeme tragen zu einer deutlichen Verbesserung der räumlichen Erschließung bei. Georeferenzierte Analysen zeigen, dass nahezu die gesamte Bevölkerung innerhalb der jeweiligen Betriebsgebiete fußläufigen Zugang zu einer (virtuellen) Haltestelle im definierten Einzugsbereich erhielt, die zudem auch in Schwachlastzeiten bedient wurde. Darüber hinaus weisen die Systeme eine relevante Vernetzung mit dem öffentlichen Verkehr auf: Im Median beginnen oder enden 24 % der Buchungen an schienenengebundenen Umstiegspunkten (bzw. beim *kommit-Shuttle* an Regionalbusverkehren); die Werte der Systeme reichen von 8 % bis 37 %. Da vorwiegend nur Bahnhofpunkte berücksichtigt wurden, ist von einem unterschätzten Anteil an Umstiegen zu weiteren ÖV-Angeboten auszugehen. Gleichwohl erfolgte die Nutzung überwiegend für Direktverbindungen, was die Rolle von Ridepooling als eigenständiges Verkehrsmittel im Alltagsgebrauch unterstreicht. Hinsichtlich des Modal Split erscheint der Einfluss gering: Der Anteil an allen Wegen liegt im Median der betrachteten Systeme bei lediglich 0,09 %, wobei sich eine leichte Stärkung des ÖV bei gleichzeitig geringen Rückgängen im Rad- und Fußverkehr sowie im MIV zeigt. Ergänzend wurde ein Anteil induzierter Fahrten festgestellt, der zwischen 3 % (*Bussi*) und 12 % (*LOOPmünster*) liegt und damit systemabhängig durchaus eine relevante Größenordnung erreichen kann (Wittowsky & Malow, 2022, S. 65; Koska & Wetzchewald, 2022, S. 25; Wetzchewald & Schäfer-Sparenberg, 2022, S.24; Hartz et al., 2023, S. 55). Insgesamt verdeutlichen die Ergebnisse, dass Ridepooling aufgrund der im Vergleich zu Linienverkehren geringen Transportkapazität derzeit nur eine begrenzte verkehrliche Wirkung entfaltet und primär als Ergänzung zum bestehenden Linienverkehr fungiert.

Aus wirtschaftlicher Perspektive bleibt die Bilanz der untersuchten Systeme herausfordernd. Die Kostendeckungsgrade liegen deutlich unter denen konventioneller Linienverkehre, die aufgrund hoher Auslastung und etablierter Strukturen im ÖPNV in der Regel eine wesentlich höhere Kostendeckung erzielen. Hauptursächlich für die Defizite im Ridepooling sind die hohen Personalkosten, die den größten Anteil an den Gesamtausgaben ausmachen.

Unter spezifischen Rahmenbedingungen können jedoch auch kostengünstigere Ergebnisse erzielt werden: So weist *Bussi* im Essener Nachtverkehr einen höheren Kostendeckungsgrad auf als vergleichbare Linienbus-Angebote (vgl. Stadt Essen, 2024, S. 3), vermutlich begünstigt durch den dort angewendeten Distanztarif. Dieses Beispiel verdeutlicht, dass Ridepooling insbesondere in nachfrageschwachen Zeiten und Räumen eine ökonomisch vertretbare Ergänzung bieten kann, wenn klassische Linienangebote nur eingeschränkt wirtschaftlich betrieben werden können. Gleichwohl bleibt festzuhalten, dass es sich überwiegend um Leistungen öffentlicher Daseinsvorsorge handelt und nicht um wirtschaftlich tragfähige Geschäftsmodelle.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass Ridepooling aus Nutzendensicht attraktiv ist und punktuell positive Effekte auf Erschließung und Nachfrage entfaltet, gesamtverkehrlich jedoch nur eine geringe Wirkung erzielt und ökonomisch auf dauerhafte Förderung angewiesen bleibt. Der Mehrwert von Ridepooling liegt daher weniger in isolierter Wirtschaftlichkeit oder in einer maßgeblichen Verschiebung des Modal Split, sondern in seiner Rolle als ergänzendes Angebot zur Sicherung von Mobilität und zur Attraktivitätssteigerung des öffentlichen Verkehrs im Gesamtsystem. Erst in Kombination verschiedener Bausteine, die gemeinsam die Anforderungen an die persönliche Mobilität abdecken, kann eine Reduzierung der Abhängigkeit vom privaten Pkw realistisch werden (vgl. VDV, 2025b, S. 4–5, 9–13, 48–50).

Langfristig könnten externe Faktoren wie steigende Kraftstoffpreise, die Einführung von City-Maut-Systemen, eine Reform der Pendlerpauschale oder eine konsequente CO₂-Bepreisung die strukturellen Vorteile des motorisierten Individualverkehrs abbauen. Solche Push-Maßnahmen erhöhen die relative Attraktivität alternativer Angebote. Ergänzend sind Pull-Maßnahmen erforderlich, darunter der flächendeckende Ausbau von Lade- und Schnellladeinfrastruktur, die tarifliche Integration von Ridepooling in den ÖPNV (z. B. durch Anschlussfähigkeit an das Deutschlandticket und kommunale Verbundtarife), die Förderung digitaler Buchungs- und Plattformlösungen sowie Investitionen in intermodale Infrastruktur, wie Mobilstationen und vernetzte Knotenpunkte. Erst die Kombination beider Ansätze schafft die politischen und infrastrukturellen Voraussetzungen, damit Ridepooling ökologisch wirksam werden kann.

Einordnung in den verkehrs- und klimapolitischen Gesamtkontext

Vor dem Hintergrund nationaler Klimaschutzziele relativiert sich die ökologische Wirkung von Ridepooling deutlich. Gemäß Bundes-Klimaschutzgesetz muss der Verkehrssektor seine jährlichen Emissionen bis 2030 um rund 61 Mio. t CO₂e reduzieren. Demgegenüber steht die aggregierte Einsparung der vier untersuchten Systeme, die selbst bei einem vollständig elektrischen Betrieb mit Ökostrom lediglich rund 92 t CO₂e pro Jahr beträgt. Die Ursache für diesen geringen Beitrag liegt in der insgesamt begrenzten Transportleistung von Ridepooling, sodass sowohl die absoluten Emissionen als auch die Einsparpotenziale im Verhältnis zur Gesamtbilanz des Verkehrssektors nur marginal ausfallen.

Die ungünstige THG-Bilanz im Status quo (2022) ist nicht primär Ausdruck ineffizienter Betriebsführung, sondern strukturell in der Einsatzlogik der Angebote begründet. In

Deutschland werden Linienbedarfsverkehre überwiegend in nachfrageschwachen Räumen und zu Randzeiten betrieben, um Versorgungslücken im ÖPNV zu schließen. Unter diesen Bedingungen bleibt das Nachfragevolumen pro Fahrzeugeinheit gering, sodass trotz algorithmischer Bündelung nur niedrige Besetzungsquoten erreicht werden. Dies führt zu hohen Leerkilometeranteilen und begrenzt die ökologischen Einsparpotenziale. Demgegenüber entfalten liniengebundene ÖPNV-Angebote auf nachfragestarken Relationen ihre Stärken: Dichtere Takte und größere Sitzplatzkapazitäten ermöglichen hohe Auslastungsgrade und damit eine deutlich günstigere Emissionsbilanz pro Pkm.

In der deutschen Praxis dient Ridepooling derzeit vor allem der qualitativen Verbesserung des ÖPNV-Angebots in peripheren Räumen oder Schwachlastzeiten. Die ökologische Legitimation von Ridepooling-Angeboten ergibt sich daher weniger aus unmittelbaren THG-Einsparungen, sondern vor allem aus ihrer Funktion als ergänzendes Mobilitätsangebot in Räumen, in denen ein liniengebundener Betrieb nicht wirtschaftlich oder attraktiv realisierbar ist. Durch eine bessere Erreichbarkeit kann langfristig die Abhängigkeit vom privaten Pkw verringert, die Nutzung des Umweltverbunds gestärkt und der Bedarf an privaten Fahrzeugflotten reduziert werden. Im urbanen Kontext besteht ein spezifisches ökologisches Potenzial von Ridepooling darin, durch systematische Fahrtenbündelung eine geringere Anzahl zurückgelegter Fzkm pro Person zu erreichen als herkömmliche Taxi- oder Ridehailing-Systeme. Aufgrund dieser Effizienzvorteile ist bei entsprechender Auslastung eine deutlich günstigere Emissionsbilanz zu erwarten.

Von hoher praktischer Relevanz ist daher die Frage, unter welchen Bedingungen Ridepooling gegenüber dem Linienverkehr vorteilhaft eingesetzt werden kann. Praxisbezogene Einschätzungen nennen hierfür eine Größenordnung von etwa 8 bis 10 Fahrgästen pro Fahrzeugstunde als möglichen Orientierungsbereich, wobei dauerhaft zweistellige Werte über den Tagesverlauf hinweg eher für die Prüfung eines liniengebundenen Busbetriebs sprechen können (vgl. Via Transportation, 2025, Min. 50:50–51:20). Für Forschung und Planung ergibt sich daraus die Notwendigkeit, entsprechende Schwellenwerte systematisch zu quantifizieren und mit Parametern wie Taktung, Nachfrageverteilung und Gebietstruktur in Beziehung zu setzen.

Vor diesem Hintergrund wird deutlich, dass pauschalisierte Aussagen über die ökologische Effizienz von Ridepooling-Systemen nicht zielführend sind. Es zeigt sich eine Parallele zur ökonomischen Fragestellung, ob und unter welchen Bedingungen ein Linienbusbetrieb gegenüber alternativen Bedienformen sinnvoll ist, wie dies am Beispiel des Essener Angebots *Bussi* gezeigt werden konnte. Auch im ökologischen Kontext von Ridepooling ist daher eine Einzelfallabwägung erforderlich, um den potenziellen Beitrag zur klimafreundlichen Mobilität zu bestimmen. Das in dieser Arbeit entwickelte Tool ermöglicht eine systematische THG-Bilanzierung von Ridepooling-Systemen. Die Ergebnisse können anschließend mit Referenzwerten von Linienbussen verglichen werden, sodass eine direkte Gegenüberstellung der ökologischen Effizienz beider Bedienformen möglich ist.

Die hier präsentierten Ergebnisse sind zugleich als Momentaufnahme zu verstehen, da sich Ridepooling noch am Anfang seiner Entwicklung befindet. Künftige Verbesserungen an Dispositionsalgorithmen, eine stärkere Elektrifizierung der Flotten, ein steigender Anteil

erneuerbarer Energien sowie eine bessere organisatorische Einbettung in lokale Strukturen oder automatisierte Fahrzeuge können die THG-Bilanzierung der Dienste weiter verbessern. Bereits 2022 zeigte sich innerhalb der untersuchten Systeme eine Abnahme des Leerkilometeranteils (s. Anhang). Besonders deutlich war dieser Trend beim *Kommit-Shuttle* sowie beim *G-Mobil*, wo die wöchentlichen Auswertungen signifikante Abwärtstendenzen erkennen ließen. Für *Bussi* ergab sich hingegen lediglich eine schwache, statistisch nicht abgesicherte Tendenz, während sich für *LOOPmünster* kein relevanter Trend feststellen ließ (s. Anhang A.9). Besonders deutlich war dieser Trend beim Kommit-Shuttle sowie beim G-Mobil, wo die wöchentlichen Auswertungen signifikante Abwärtstendenzen erkennen ließen. Für Bussi ergab sich hingegen lediglich eine schwache, statistisch nicht abgesicherte Tendenz, während sich für LOOPmünster kein relevanter Trend feststellen ließ. (s. Anhang A.9), was diese Dynamik verdeutlicht. Gleichwohl ist davon auszugehen, dass sowohl die durchschnittliche Besetzungsquote als auch der Leerkilometeranteil und somit auch die THG-Bilanz aufgrund des spezifischen Einsatzzwecks dauerhaft hinter den Werten klassischer Massenverkehrsmittel zurückbleiben werden.

Insgesamt lässt sich Ridepooling damit als Baustein im Mosaik nachhaltiger Verkehrssysteme verstehen. Ökologisch sinnvoll sind die Verkehre in nachfrageschwachen Zeiten und Räumen nur bei konsequenter Elektrifizierung der Flotten, der Nutzung erneuerbarer Energiequellen und insbesondere dann, wenn sie schwach ausgelastete Linienfahrten oder Pkw-Fahrten ersetzen. Gesellschaftlich wertvoll ist Ridepooling vor allem durch seine komplementäre Funktion: Die Sicherung von Mobilität in nachfrageschwachen Räumen, die Erschließung neuer Zielgruppen sowie die Attraktivitätssteigerung des ÖPNV. Ob Ridepooling eine Nische bleibt oder sich zu einer tragenden Säule entwickelt, wird sich nicht allein an der betrieblichen Effizienz entscheiden, sondern an einer verlässlichen Finanzierung, den politischen Rahmenbedingungen und der Fähigkeit, es in ein leistungsfähiges Gesamtsystem des öffentlichen Verkehrs zu integrieren.

Kapitel 9

Schlussfolgerungen und Ausblick

9.1 Zusammenfassung

Vor dem Hintergrund der Diskussion um nachhaltige Mobilitätsformen untersucht die Arbeit die ökologischen Wirkungen von Ridepooling-Angeboten. Vorhandene Untersuchungen sind bislang überwiegend simulationsbasiert und beziehen sich häufig auf großskalige, urbane Verkehre. In der praktischen Umsetzung werden Ridepooling-Angebote dagegen vielfach kleinmaßstäblich sowie in ländlichen und suburbanen Räumen oder in nachfrageschwachen Zeitlagen eingesetzt (vgl. VDV, 2022, Abschn. „Branchenumfrage“; vgl. Foljanty, 2025, Abschn. „Project Characteristics“). Diese Einsatzkontexte weisen strukturell ungünstigere Rahmenbedingungen für eine effiziente Fahrtenbündelung auf. Vor diesem Hintergrund leistet die Studie einen Beitrag zur realdatenbasierten und standardisierten ökologischen Bewertung von Ridepooling-Systemen und stellt die Ergebnisse in den Kontext internationaler Forschungsbefunde. Ziel war die Entwicklung einer Methodik zur THG-Bilanzierung nach *DIN EN 16258* im *Well-to-Wheel*-Ansatz. Analysiert wurden vier Systeme in Nordrhein-Westfalen (*Bussi*, *G-Mobil*, *kommit-Shuttle*, *LOOPmünster*) auf Grundlage von Buchungs-, Schicht- und Flottendaten des Betriebsjahres 2022. Da die Datenstrukturen der Anbieter z. T. stark voneinander abwichen, wurde ein Verfahren zur Vereinheitlichung entwickelt, um eine konsistente Auswertung zu ermöglichen. Für die Bilanzierung wurden Verbrauchsvorgaben der Deutschen Automobil Treuhand und Emissionsfaktoren des LANUK herangezogen (DAT, 2022, S. 44, 47, 77; vgl. LANUK, 2022, Emissionsfaktoren 2022). Die Emissionen wurden auf Pkm normiert und mit Referenzwerten des Umweltbundesamtes sowie Substitutionsszenarien verglichen.

Da der eingesetzte Ladestrom nicht dokumentiert war, wurden zwei Szenarien bilanziert: 100 % Strommix und 100 % Ökostrom. Im Strommix-Szenario liegen die spezifischen Emissionen der untersuchten Ridepooling-Systeme im Median bei 233 g CO₂e/Pkm (200-273 g CO₂e/Pkm) und damit rund 52 % über den Referenzwerten eines durchschnittlichen Pkw (153 g CO₂e/Pkm). Ursache hierfür sind ein hoher Leerkilometeranteil, niedrige Poolingquoten und kurze Reiseweiten, die insgesamt zu überdurchschnittlich vielen Fzkm pro Pkm führen. Erst unter der Annahme von 100 % Ökostrom entfaltet sich bei einigen Systemen ein messbares ökologisches Potenzial, da die verringerten THG-Emissionen des Stroms die betrieblichen Ineffizienzen überlagern.

Die für 2022 durchgeführten Sensitivitätsanalysen zeigen zunächst, dass betriebliche Maßnahmen zur Effizienzsteigerung, etwa durch Anpassungen von Umwegfaktor oder Wartezeit, nur unter stark optimistischen Annahmen nennenswerte Effekte entfalten. Ihre Umsetzung ist zudem langwierig und komplex, und längere Umwege oder Wartezeiten können

die Nutzungsakzeptanz mindern und damit die Verlagerungswirkung gegenüber dem MIV schwächen. Da Ridepooling in Deutschland vorwiegend in nachfrageschwachen Zeiten und Räumen eingesetzt wird, sind die Potenziale solcher Optimierungen ohnehin gering.

Deutlich größere Potenziale weisen dagegen fahrzeugtechnologische und energetische Maßnahmen auf. So ergibt ein vollständiger Flottenwechsel auf batterieelektrische Fahrzeuge (z. B. Nissan e-NV200) in Verbindung mit 100 % Ökostrom eine Reduktion der THG-Emissionen um rund 92 % (Wertebereich: 92-94 %) gegenüber dem Status quo bei unveränderter betrieblicher Effizienz. In diesem Szenario unterschreiten selbst betrieblich weniger effiziente Systeme das Emissionsniveau eines durchschnittlichen Busses. Gerade in nachfrageschwachen Räumen und Zeiten wird damit deutlich, dass die ökologische Wirkung maßgeblich von Antriebs- und Energieform bestimmt wird. Auch wenn es sich um einen idealisierten Fall handelt, unterstreicht dies das erhebliche Potenzial solcher Umstellungen und den entscheidenden Einfluss der Flottenzusammensetzung auf die THG-Bilanz von Ridepooling-Systemen.

Auf Grundlage der THG-Bilanzierungsergebnisse, die den Status quo der Systeme im Jahr 2022 abbilden und auf Substitutionsszenarien unter Berücksichtigung von Kannibalisierung und Induktionseffekten beruhen, ergibt sich ein klares Bild: Unter Strommix liegen die THG-Emissionen aller untersuchten Systeme pro Pkm oberhalb der Referenzwerte eines durchschnittlichen Pkw. Ein ähnliches Ergebnis zeigt sich auch bei Flotten, deren Laufleistung zu 25 % durch Verbrennerfahrzeuge erbracht wird. Bei vollständig aus hybriden LEVC-TX-Systemen bestehenden Flotten führt eine Umstellung auf 100 % Ökostrom dagegen bereits zu einer spürbaren Verbesserung, die abhängig von der betrieblichen Effizienz, entweder in einem geringen Mehrausstoß oder in einer leichten Einsparung von THG-Emissionen resultiert. Ein Einsparpotenzial wird erst im Szenario einer vollständig elektrifizierten Flotte mit 100 % Ökostrom erreicht. Das absolute Einsparpotenzial bleibt jedoch marginal und liegt mit rund 92 t CO₂e pro Jahr deutlich unterhalb der jährlich erforderlichen 61 Mio. t CO₂e, die der Verkehrssektor gemäß Bundes-Klimaschutzgesetz bis 2030 einsparen muss.

Damit liegt die Bedeutung von Ridepooling im suburbanen Raum weniger in einer direkten Emissionsminderung, sondern vielmehr in seiner Rolle als lokal wirksame Ergänzung des ÖPNV und als Baustein einer nachhaltigen Angebotsgestaltung. Dies fördert die modale Verlagerung zugunsten des Umweltverbundes und bewirkt mittelbar eine Emissionsminderung. Analysen zeigen bei allen vier Systemen eine erhöhte Feinerschließung der Bevölkerung durch das Zusatzangebot (im Median aller Verkehre +9,5 %, Wertebereich 4-20 %), eine gewisse Nutzung innerhalb intermodaler Wegekette (im Median aller Verkehre 24 %, Wertebereich 8-37 %) sowie eine überwiegend positive Wahrnehmung der Angebote aufgrund direkter Wegführungen und Zeitersparnissen, kurzer Haltestellenzugewegungen und eines hohen Komforts. Fahrgastbefragungen deuten zudem darauf hin, dass Ridepooling-Verkehre zur Verringerung der privaten Pkw-Flotten beitragen können. Ein merkbarer Effekt auf den Modal Split ist bei der Betriebsleistung auf Grundlage 2022, nicht auszugehen (+0,009 % Modal Split ÖPNV, Wertebereich 0,002-0,13 %).

Die Ergebnisse ordnen sich in die bestehende wissenschaftliche Diskussion ein: Sie be-

stätigen Befunde modell- und simulationsbasierter Arbeiten, wonach die Effizienz dynamischer Ridesharing- und Ridepooling-Systeme ausreichende Nachfrage, räumlich und zeitlich kompatible Fahrtanfragen sowie eine hohe Auslastung bei möglichst geringem Anteil leer gefahrener Kilometer voraussetzt (vgl. Agatz et al., 2012, S. 295–296, 302–303; vgl. Zwick et al., 2021, S. 665–666; vgl. Bischoff et al., 2017, S. 4–5). Zugleich relativieren sie urban geprägte Simulationsbefunde, die unter günstigen Nachfrage- und Bündelungsbedingungen deutliche Effizienzpotenziale ausweisen. Für ländlich-suburbane Räume zeigen die Ergebnisse, dass diese Potenziale aufgrund geringerer Nachfragedichte, begrenzter Bündelungsmöglichkeiten und höherer Leerfahrten nur eingeschränkt übertragbar sind. Die Arbeit leistet einen Beitrag zur wissenschaftlichen Diskussion, indem sie erstmals für Ridepooling-Angebote in Deutschland eine standardisierte, realdatenbasierte THG-Bewertung vorlegt, Bandbreiten ausweist, Substitutionsannahmen explizit berücksichtigt und die absolute Einsparwirkung im Kontext nationaler Klimaziele einordnet.

Für die Wissenschaft zeigt sich der Bedarf an realdatenbasierten Bewertungsansätzen, die Kannibalisierungseffekte und induzierten Verkehr systematisch erfassen. Für die Praxis wird deutlich, dass insbesondere die Elektrifizierung der Fahrzeugflotte und der Bezug von Ökostrom beziehungsweise erneuerbarer Energien prioritär für eine Verbesserung der THG-Bilanz sind. Betriebliche Optimierungen sind ebenfalls wichtig, sollten jedoch stets unter Abwägung des Service-Levels umgesetzt werden. Für die Politik ergibt sich, dass Ridepooling als Ergänzung des Linienverkehrs gefördert werden sollte. Dabei ist es weniger als universelles Klimainstrument zu verstehen, sondern vielmehr als Attraktivierungselement des öffentlichen Verkehrs sowie als Instrument zum gezielten Ausgleich von defizitären Erschließungssituationen (vgl. VDV, 2025b, S. 26).

Die Studie weist mehrere Einschränkungen auf, darunter die Beschränkung auf den *Well-to-Wheel*-Ansatz ohne Produktions- und Entsorgungsprozesse, Unsicherheiten bei der Zusammensetzung des Ladestroms, die fehlende Berücksichtigung intermodaler Wegeketten, modellhafte Substitutionsannahmen sowie standardisierte Verbrauchswerte, die insbesondere bei Plug-in-Hybriden abweichen können (vgl. Plötz et al., 2022, S. 1–2). Zudem wurden administrative Prozesse nicht erfasst und die Stichprobengröße ist mit vier untersuchten Systemen in Deutschland im Jahr 2022 begrenzt. Dennoch sind die Resultate als grundsätzlich belastbar einzuschätzen: Sie liefern richtungssichere Erkenntnisse zu relativen Unterschieden und größenordnungstreue Werte, auch wenn präzisere Quantifizierungen oder Übertragungen aktualisierte Annahmen und eine erweiterte Datengrundlage erfordern.

Offene Forschungslücken bestehen in der Evaluation von Algorithmen unter realen Bedingungen, in einer erweiterten Ökobilanzierung, in Strategien zur Fahrzeugpositionierung ohne Fahrauftrag, in der Mehrfachnutzung von Fahrzeugflotten sowie in der Integration automatisierten Fahrens. Zudem wird eine größere und vergleichbare Datenbasis benötigt, um kontextspezifische Einsatzbedingungen belastbar bewerten zu können. Aufbauend auf den hier gewonnenen Erkenntnissen erscheint es insbesondere sinnvoll, Simulationen für ländliche Räume mit geringer Nachfrage durchzuführen, um die Übertragbarkeit und Wirksamkeit von Ridepooling-Angeboten in diesen Kontexten zu untersuchen.

9.2 Handlungsempfehlungen für Stakeholder

Die Ergebnisse der ökologischen Bewertung verdeutlichen, dass Ridepooling-Systeme nur unter spezifischen Rahmenbedingungen zu einer Reduktion von THG-Emissionen beitragen können. Maßgeblich sind dabei unter anderem die Zusammensetzung und Antriebsart der Fahrzeugflotte, der Emissionsfaktor des eingesetzten Ladestroms, die Höhe der Fahrgastnachfrage sowie der Anteil an Leerkilometern. Diese Faktoren bestimmen in ihrer Wechselwirkung die Auslastung und betriebliche Effizienz und damit die ökologische Wirkung der Verkehre. Vor diesem Hintergrund ergibt sich die Notwendigkeit, zentrale Akteursgruppen gezielt zu adressieren und deren jeweilige Handlungsspielräume für eine ökologisch sinnvolle Ausgestaltung von Ridepooling-Angeboten aufzuzeigen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich Handlungsempfehlungen inhaltlich überschneiden können und je nach Akteursgruppe unterschiedliche Rollen, von strategischer Steuerung bis hin zur operativen Umsetzung, einnehmen. Empfehlungen für Kommunen und Aufgabenträgerinnen und Aufgabenträger, politische Entscheidungsträgerinnen und Entscheidungsträger, Betreiberinnen und Betreiber, die Wissenschaft sowie Fahrgäste und die Öffentlichkeit.

Empfehlungen für Kommunen und Aufgabenträger

Kommunen und Aufgabenträger übernehmen eine zentrale Rolle bei der Gestaltung und Steuerung von Linienbedarfsverkehren. Auf Grundlage der Ergebnisse lassen sich folgende Empfehlungen ableiten:

- **Vergabemodelle, Monitoring und Evaluation:** Vergabemodelle sollten eine kontinuierliche Datenauswertung sicherstellen. Monitoring ermöglicht die Beobachtung zentraler Betriebsparameter und deren Anpassung im Zeitverlauf, Evaluationen unterstützen den Wissenstransfer und die Weiterentwicklung von Ridepooling.
- **Qualitäts- und Zielgrößen im Nahverkehrsplan verankern:** Zur Sicherung der Qualität und Vergleichbarkeit sollten zentrale Anforderungen an Linienbedarfsverkehr, etwa Angebotsverfügbarkeit, mittlere Wartezeiten, ÖPNV-Integration und betriebliche Kennzahlen, in Nahverkehrsplänen als klare, aber flexible Qualitätsvorgaben verankert werden (vgl. VDV, 2025b, S. 45–46).
- **Förderung nachhaltiger Rahmenbedingungen:** Diese Studie verdeutlicht, dass ein ökologisch sinnvoller Betrieb vor allem durch die Kombination aus elektrifizierter Flotte, Nutzung von Ökostrom und intelligentem Lademanagement erreicht werden kann. Entsprechende Rahmenbedingungen sind daher in Ausschreibung und Steuerung zu berücksichtigen, wobei eine ausreichende Ladeinfrastruktur Voraussetzung ist und nicht überall gegeben sein muss.
- **Wirtschaftliche Rahmenbedingungen sichern:** Kommunen können Ridepooling-Angebote unterstützen, indem sie Fahrzeuge in einer dem Nachfragepotenzial entsprechenden Zahl zulassen und Betriebsgebiete so zuschneiden, dass sich das öffentliche Verkehrsinteresse wirtschaftlich darstellen lässt. In weniger geeigneten Räumen, etwa in Stadt-Land-Grenzlagen, kann das Angebot durch öffentliche Zuzahlungen abgesichert werden, wobei eine kontextabhängig angemessene Pooling-Quote transparent nachzuweisen ist (vgl. Knie et al., 2020, S. 15).

- **Klare Ziel- und Zielgruppendefinition:** Bedarfsverkehre sind kein universelles Allheilmittel für Defizite im ÖPNV. Jedes Angebot sollte auf präzisen Zielen und einer klaren Definition der Zielgruppen beruhen, um eine passgenaue Ausgestaltung und größtmöglichen verkehrlichen und ökologischen Nutzen zu ermöglichen.
- **Rolle und Integration von On-Demand-Verkehren:** Bedarfsverkehre sollten als ergänzender Bestandteil eines integrierten ÖPNV-Systems verstanden und dort eingesetzt werden, wo sie schwach ausgelastete Linien ersetzen, Angebotslücken schließen oder den ÖPNV in nachfrageschwachen Zeiten sowie in ländlich-suburbanen Räumen sinnvoll ergänzen. Ein paralleler Betrieb zu bestehenden Linien ist möglichst zu vermeiden, um Kannibalisierungseffekte zu begrenzen und die Kosteneffizienz des Gesamtsystems sicherzustellen. Ihre Wirtschaftlichkeit sollte daher nicht isoliert am Kostendeckungsgrad einzelner Bedarfsverkehre, sondern im Zusammenspiel mit dem Linienverkehr bewertet werden (vgl. VDV, 2025b, S. 48–50)(vgl. Via Transportation, 2025, Min. 24:40–44:40).
- **Datenbasierte und integrierte Planung fördern:** Die Integration von Bedarfsverkehren in den ÖPNV sollte auf den hochaufgelösten Buchungs- und Anfragedaten der Systeme aufbauen. Analysen des *G-Mobil* in Gronau zeigen, dass solche Daten zur Identifikation räumlicher und zeitlicher Nachfragemuster beitragen und damit eine präzisere Abstimmung von On-Demand-Angeboten und liniengebundenem ÖPNV unterstützen können (vgl. Bruder & Kersten, 2024, S. 691–692, 698–699).
- **Dezentrales Lademanagement:** Zwick, Kuehnel und Hörl (vgl. 2022, S. 313–316) zeigen, dass dezentral verteilte Pausen- und Ladepunkte (sogenannte *in-field facilities*) zu kürzeren Leerkilometern führen und den Fahrzeugeinsatz effizienter gestalten. Damit sinken nicht nur die Betriebskosten, sondern auch die spezifischen THG-Emissionen pro Pkm. Eine Optimierung der betrieblichen Infrastruktur über zentrale Hub-Rückfahrten hinaus kann somit einen wesentlichen Beitrag zur ökologischen Effizienz von Ridepooling-Angeboten leisten.
- **Einsatzgebiete gezielt auswählen:** In Räumen mit hohem MIV-Anteil am Modal Split sind tendenziell positivere ökologische Wirkungen zu erwarten, da weniger Wege aus dem Umweltverbund verdrängt werden und zusätzliche Effekte, wie die Reduktion von Zweitwagen möglich sind. Die tatsächliche ökologischen Wirkung hängt jedoch stark von Faktoren, wie Fahrgastnachfrage, Siedlungsdichte, Poolingquoten und Flottenausstattung ab.
- **Digitale Integration sicherstellen:** Buchung und Bezahlung erfolgen bislang getrennt über Einzellösungen. Kommunen und Aufgabenträger sollten daher zentrale, systemübergreifende Plattformen fördern, um im Sinne von *MaaS* (Mobility as a Service) Nutzerfreundlichkeit und intermodale Anschlussfähigkeit zu erhöhen.
- **Technische Vermeidung von Kannibalisierung:** Um Verdrängungseffekte im Umweltverbund zu verhindern, ist eine enge Abstimmung mit bestehenden Linienverkehren erforderlich. Dies kann durch eine *Parallelverkehrsfunktion* bzw. einen Modal-Filter (s. Kapitel 2.3) technisch unterstützt werden. Unter ökologischen Gesichtspunkten und im Sinne der komplementären Rolle von Bedarfsverkehren erscheint diese Maßnahme

- zweckmäßig und sollte daher systematisch in Ausschreibungen berücksichtigt werden.
- **Tariffliche Nachfragesteuerung:** Preisdifferenzierungen können eingesetzt werden, um Kannibalisierungseffekten entgegenzuwirken. Moderate Komfortaufschläge können Verlagerungen aus dem Umweltverbund begrenzen (Hartz et al., 2024). Dynamische Zuschläge für Kurzstrecken oder Relationen, die bereits durch den Linienverkehr bedient werden, schützen den bestehenden ÖPNV. Ergänzend können Preisvariationen die Nachfrage in verkehrsärmere Zeiten lenken und Pooling fördern; Check-in/Be-out-Systeme erhöhen die Leistungsgerechtigkeit (vgl. VDV, 2023, S. 12). Aufpreise sind jedoch kontextspezifisch einzusetzen und nur dort angemessen, wo Bedarfsverkehre über die Grundversorgung hinaus zusätzliche Leistungen erbringen; Dienste der Daseinsvorsorge sollten vollständig in den ÖPNV-Tarif integriert bleiben (vgl. Agora Verkehrswende, 2023, S. 44; vgl. VDV, 2023, S. 12).
 - **Planung, Skalierung und Service-Design:** Bedarfsverkehre sollten in klar strukturierten Projektphasen eingeführt werden. Dazu gehören eine sorgfältige Wahl der Gebietsgröße, um längere Reiseweiten zu ermöglichen und zugleich die Verfügbarkeit kleinerer Flotten zu sichern, sowie ein sukzessiver Ausbau nach tatsächlicher Nachfrage, um ineffiziente Ressourcennutzung zu vermeiden. Betriebsgebiete und -zeiten sollten intermodal ausgerichtet sein, um Verflechtungen und Anschlussmöglichkeiten zu fördern. Zunächst sollte ein attraktives Angebot geschaffen werden, bevor betriebliche Optimierungen erfolgen.
 - **Mitnutzung bestehender Flotten prüfen:** Die Einbindung vorhandener Fahrzeugflotten, etwa im Modell des ÖPNV-Taxis, kann eine sinnvolle Ergänzung darstellen. Voraussetzung sind jedoch klare Regelungen zu Systemleistung, ÖPNV-Integration und Dispositionshoheit (vgl. VDV, 2022, Abschn. „Branchenumfrage“).

Empfehlungen für Politik und Regulierung

Politische Entscheidungsträger setzen den rechtlichen und finanziellen Rahmen für den Einsatz von Linienbedarfsverkehren. Aus den Ergebnissen ergeben sich folgende Empfehlungen:

- **Rechtliche Rahmenbedingungen weiterentwickeln:** Mit der Novellierung des Personenbeförderungsgesetzes (PBefG) wurde die Rückkehrpflicht für Linienbedarfsverkehre (§ 42 PBefG) bereits aufgehoben. Dennoch besteht weiterhin Bedarf, die rechtlichen Rahmenbedingungen so auszugestalten, dass Linienbedarfsverkehre zuverlässig in den ÖPNV integriert werden und eine klare Abgrenzung zu kommerziellen Ride-Hailing-Angeboten gewahrt bleibt.
- **Förderinstrumente an Nachhaltigkeit koppeln:** Förderungen sollten konsequent an ökologische Mindestkriterien gebunden werden, um negative Klimaeffekte, wie sie im Status quo bei Verbrennerflotten unter Strommix-Bedingungen auftreten, zu vermeiden. Einzelne Indikatoren wie die Bündelungsquote (nach § 50 PBefG) reichen nicht aus, da auch hohe Auslastungen bei konventionellen Antrieben keine positiven Klimaeffekte bewirken. Grundlage für Förderentscheidungen sollte daher eine ganzheitliche Methodik sein, wie sie in dieser Arbeit vorgestellt wird.

- **Standardisierung und Datenzugang:** Um überregionale Vergleichbarkeit und Steuerbarkeit zu gewährleisten, sollten verbindliche Standards eingeführt werden. Dazu gehören einheitliche KPIs, offene Datenzugänge und ein transparentes Berichtswesen als Grundlage für Monitoring, Steuerung und politische Entscheidungen.
- **Dauerhafte Finanzierung sichern:** Über befristete Förderprogramme hinaus braucht es tragfähige Modelle zur langfristigen Finanzierung. Dazu gehören Transparenz bei Regionalisierungsmitteln, flexible Strukturen und eine enge Zusammenarbeit von Bund, Ländern und Kommunen. Der VDV fordert hierfür eine Regelfinanzierung, die bis 2030 auf 3,8 Milliarden Euro jährlich anwachsen soll (vgl. VDV, 2023, S. 4, 13). Erfolgreiche Pilotprojekte sollten frühzeitig durch Anschlussfinanzierungen abgesichert werden, um Verstetigung und Verlässlichkeit der Angebote zu gewährleisten (vgl. VDV, 2025b, S. 13; vgl. Reichow & Ruhrort, 2024, S. 23). Einnahmeverteilungen im ÖPNV sind so anzupassen, dass ländliche Räume nicht benachteiligt werden. Angebotsausweitungen erfordern zudem eine gesicherte Grundfinanzierung, wobei freiwerdende Mittel aus eingesparten Linienverkehren für den ÖV genutzt werden sollten.
- **Gesamtwirtschaftliche Effekte und externe Kosten berücksichtigen:** Die ökonomische Bewertung sollte neben Betriebskosten auch externe Kosten, etwa Umwelt-, Gesundheits-, Unfall-, Stau- und Infrastrukturfolgekosten, sowie weitere volkswirtschaftliche Effekte einbeziehen. Für den öffentlichen Verkehr zeigen Peiseler et al. (vgl. 2024, S. 11–20, 26–29), dass eine Verlagerung vom MIV zum ÖV gesamtgesellschaftliche Kosten reduzieren kann. Linienbedarfsverkehre können hierzu beitragen, sofern sie als Bestandteil des ÖPNV MIV-Fahrten substituieren, schwach erschlossene Gebiete anbinden und intermodale Wegeketten stärken. Diese Effekte sollten in Förder- und Finanzierungsentscheidungen systematisch berücksichtigt werden.
- **Flankierende Maßnahmen für eine nachhaltige Verkehrswende:** Politische Entscheidungsträgerinnen und -träger sollten den Umstieg auf klimafreundliche Flotten und die Integration in den Umweltverbund unterstützen. Dazu gehören Förderinstrumente für Elektromobilität, Vorgaben zur Nutzung erneuerbarer Energien und der Ausbau der Ladeinfrastruktur ebenso wie Push-Maßnahmen zur Stärkung des ÖPNV, etwa Parkraumbewirtschaftung, Verkehrsberuhigung oder die Priorisierung des Umweltverbunds. Der Einsatz von Verbrennerfahrzeugen sollte auf unvermeidbare Fälle beschränkt bleiben.

Empfehlungen für Verkehrsunternehmen und Betreibende

Verkehrsunternehmen und Betreibende sind unmittelbar für die Umsetzung von Linienbedarfsverkehren verantwortlich. Ihre Entscheidungen beeinflussen maßgeblich die betriebliche Effizienz und die ökologische Bilanz. Die folgenden Empfehlungen lassen sich in vier Handlungsfelder gliedern:

- **Pooling und Nachfragebündelung:**
 - Erhöhung der Poolingquote und Reduktion von Leerkilometern durch betriebsraumspezifische und konzeptionelle Feinjustierung von Parametern, wie Umwegfaktor und Wartezeit, innerhalb der Dispositions- und Routingalgorithmen (s. Kapitel 2.3). Da-

bei sind sowohl die angestrebte Servicequalität als auch die lokalen verkehrlichen Zielstellungen zu berücksichtigen. Einheitliche Vorgaben sind hier nicht möglich; die Einstellungen müssen jeweils kontextabhängig festgelegt werden.

- Iterative Feinjustierung: Betreibende sollten Umweg- und Wartezeiten nicht statisch vorgeben, sondern sukzessive anpassen. Empirische Erfahrungen aus den untersuchten Verkehren und weiteren Forschungsvorhaben zeigen, dass sich die betriebliche Effizienz (z. B. sinkende Leerkilometer-Anteile) im Zeitverlauf durch eine solche iterative Anpassung deutlich verbessern lässt.
- Förderung von Gruppenbuchungen durch technische Erleichterungen, tarifliche Anreize und bevorzugte Disposition, da sie höhere Besetzungsquoten ermöglichen, ohne zusätzliche Leerkilometer zu generieren.
- **Buchungs- und Haltestellenmanagement:**
 - Einführung einer *Parallelverkehrsfunktion* (s. Kapitel 2.3) in der Fahrgast-App, um Kannibalisierungseffekte abzumindern.
 - Einschränkung sehr kurzer Fahrten durch Mindestdistanzen, unter Wahrung der Barrierefreiheit.
 - Reduktion von Stornierungen und No-Shows durch transparente Informationen und Anreizsysteme für zuverlässiges Nutzungsverhalten. Ergänzend können Maßnahmen wie Stornierungsgebühren oder zeitweise Sperrungen von Nutzenden eingesetzt werden.
 - Betreibende sollten die Anschlusssicherung zu Bus- und Bahnverkehren perspektivisch in ihre Dispositionsalgorithmen integrieren. Dazu gehören etwa Zeitpuffer bei der Routenplanung, die Berücksichtigung von Fahrplandaten sowie die transparente Kommunikation mit Fahrgästen über erreichbare Anschlüsse.
- **Flottenplanung und Antrieb:**
 - Anpassung von Fahrzeuggröße und -anzahl an die tatsächliche Nachfrage (größere Fahrzeuge in Spitzenzeiten, kleinere in Schwachlastzeiten, schrittweise Skalierung).
 - Elektrifizierung der Flotte und Bezug von Ökostrom als zentrale Stellschraube für die THG-Bilanz (498 g CO₂e/kWh im deutschen Strommix (Umweltbundesamt, 2024, Tab. 1) gegenüber 56,4 g CO₂e/kWh bei Ökostrom (vgl. LANUK, 2022, Emissionsfaktoren 2022)).
 - Erhöhung der elektrischen Fahrleistung durch eine anwendungsorientierte Fahrzeugwahl (z. B. Reichweite, Ladeleistung, Sitzplatzkapazität) und die Sicherstellung einer bedarfsgerechten Ladeinfrastruktur. So lassen sich fossile Fahranteile verringern und ein stabiler, emissionsarmer Betrieb gewährleisten (vgl. VDV, 2022, Abschn. „Branchenumfrage“).
- **Datenbasiertes Management und Personal:**
 - Kontinuierliche Auswertung von Buchungs- und Betriebsdaten zur vorausschauenden Planung von Fahrzeugen und Personal.
 - Relokationsstrategien für Fahrzeuge ohne Fahrauftrag, von einfachen Regeln wie der Positionierung an festen Punkten nach Wartezeit bis hin zu reoptimierten Verfahren mit Nachfrageprognosen (vgl. Wilkes et al., 2021, S. 3–4).

- Intelligentes Lade- und Energiemanagement im Betriebsalltag (Integration von Ladezyklen in Pausen, Nutzung von Schnellladeoptionen, strategische Platzierung von Ladepunkten).
- Schulungen des Fahrpersonals zu energie- und umweltbewusstem Fahrverhalten zur Senkung des Verbrauchs und Erhöhung der Lebensdauer der Fahrzeuge.
- Betreibende sollten Fahrgäste aktiv und transparent über die ökologischen Effekte ihres Verhaltens informieren. Dazu gehören Hinweise auf die Folgen kurzfristiger Stornierungen für Leerkilometer und Angebotsverfügbarkeit, Erläuterungen zu maximalen Umweg- und Fahrzeiten sowie Informationen zu fehlender Anschlusssicherung. Nur so können Fahrgäste fundierte Entscheidungen treffen und zur Effizienz und Akzeptanz des Angebots beitragen.

Empfehlungen für die Wissenschaft

Die Wissenschaft übernimmt eine Schlüsselrolle, um Linienbedarfsverkehre fundiert zu bewerten, weiterzuentwickeln und deren Wirkungen transparent darzustellen. Daraus ergeben sich folgende Empfehlungen:

- **Standardisierung und Methodenentwicklung:** Wissenschaftlich fundierte Bewertungsverfahren sollten entwickelt und harmonisiert werden, um eine Vergleichbarkeit von Systemen zu ermöglichen. Dazu gehören einheitliche Indikatoren, transparente Berechnungsgrundlagen sowie die systematische Berücksichtigung von Kannibalisierung- und Induktionseffekten. Die Indikatoren des VDV (vgl. VDV, 2025b, S. 22–23) bilden eine erste sinnvolle Grundlage, ausgenommen des Indikators „Klimaschutz - Emissionseinsparungen“ (s. Kapitel 3).
- **Nutzungs- und Nachfrageanalysen vertiefen:** Das reale Nutzungsverhalten sollte intensiver untersucht werden, um räumliche, zeitliche und soziodemografische Muster zu identifizieren. Dies trägt dazu bei, Zielgruppen besser zu verstehen und Barrieren bei der Nutzung abzubauen.
- **Zielgrößen und Effizienzanforderungen:** Wie in dieser Arbeit mehrfach hervorgehoben, besteht ein Zielkonflikt zwischen einem hohen Service-Level und einer betrieblich effizienten Leistungserbringung. Derzeit liegen jedoch noch keine verbindlichen Vorgaben zu zentralen verkehrlichen Zielgrößen vor, etwa zur Zuverlässigkeit des Angebots (Angebotsverfügbarkeit), zur Pünktlichkeit oder zu einem angemessenen Reisezeitverhältnis im Vergleich zum ÖPNV. Vor diesem Hintergrund sind insbesondere Forschungsorganisationen wie die FGSV gefordert, verbindliche Zielgrößen unter Berücksichtigung räumlicher und struktureller Rahmenbedingungen zu entwickeln.
- **Interdisziplinäre Integration fördern:** Ökonomische, soziale, ökologische und technische Perspektiven sollten stärker verknüpft werden, um ein umfassendes Verständnis der Systemwirkungen zu gewinnen. Kooperationen zwischen Verkehrsplanung, Informatik, Ökonomie und Umweltwissenschaften sind hierfür zentral.
- **Politik- und Praxisberatung ausbauen:** Forschungsergebnisse sollten so aufbereitet werden, dass sie Entscheidungsträger*innen in Politik und Praxis als Grundlage für Steuerungsinstrumente, Förderprogramme und Angebotsgestaltung dienen können.

- **Pilotprojekte systematisch evaluieren:** Laufende und abgeschlossene Pilotprojekte sollten konsequent ausgewertet werden, um erfolgreiche Konzepte zu identifizieren und für die Weiterentwicklung sowie die Regelplanung im ÖPNV nutzbar zu machen.
- **Parametrisierung weiterentwickeln:** Rückschlüsse über eine sinnvolle Parametrisierung von Umweg- und Wartezeiten unter Berücksichtigung des jeweiligen Betriebsgebiets fehlen bislang. Hier besteht erheblicher Forschungsbedarf, um die ökologischen und betrieblichen Zielgrößen in Einklang zu bringen.
- **Ökologische Wirkung präzisieren:** Unter ökologischen Gesichtspunkten existieren bislang keine belastbaren Bewertungsverfahren. Bestehende Ansätze, wie etwa die VDV-Empfehlungen, beziehen sich überwiegend auf Pkw-Verlagerungen. Auch die im Personenbeförderungsgesetz (§ 50 PBefG) vorgesehene Besetzungsquote zur Abgrenzung von gebündelten Bedarfsverkehren gegenüber Ridehailing und Taxi berücksichtigt weder Antriebsarten noch den eingesetzten Ladestrom. Hier sollte die Wissenschaft fundierte Verfahren entwickeln, die diese Faktoren systematisch einbeziehen.

Empfehlungen für Fahrgäste und Öffentlichkeit

Auch Fahrgäste und die breite Öffentlichkeit tragen durch ihr Verhalten und ihre Akzeptanz maßgeblich zur ökologischen Wirkung von Linienbedarfsverkehren bei. Daraus lassen sich folgende Empfehlungen ableiten:

- **Pooling akzeptieren und fördern:** Die Bündelung von Fahrtanfragen bildet die Grundlage für die ökologische Effizienz von Ridepooling gegenüber Ridehailing-Angeboten. Fahrgäste sollten bereit sein, einen gewissen Umweg und geteilte Fahrten in Kauf zu nehmen, um die Effizienz des Angebots zu stärken. Dies erfordert ein grundlegendes Verständnis für die Funktionsweise von Bedarfsverkehren.
- **Zuverlässigkeit im Buchungsverhalten:** Verbindliche Buchungen ohne kurzfristige Stornierungen oder No-Shows tragen dazu bei, Leerfahrten zu vermeiden und die Auslastung der Systeme zu sichern. Fahrgäste sollten über die Auswirkungen von kurzfristigen Stornierungen auf den Anteil an Leerkilometern sowie die verringerte Verfügbarkeit des Angebots informiert werden. Gleichzeitig sollten sie sich der ökologischen Effekte ihres Verhaltens bewusst sein und diese in ihre Entscheidungen einbeziehen.
- **Vorausbuchungen nutzen:** Durch die Nutzung von Vorausbuchungen können Fahrgäste aktiv zur Planbarkeit und Effizienz beitragen. Vorausbuchungen erleichtern die Bündelung von Fahrtanfragen und verbessern dadurch sowohl die Auslastung der Fahrzeuge und somit die THG-Bilanz.
- **Anschlusssicherung und Transparenz:** Da in den meisten Systemen aktuell keine garantierte Anschlusssicherung besteht, sollten Fahrgäste klar über die maximale Umweg- und Fahrzeit informiert werden. Nur so können sie die Bedeutung möglicher Verzögerungen einschätzen und negative Erfahrungen beim Erreichen von Anschlüssen an andere Verkehrsmittel vermeiden.

Die vorliegende Arbeit hat verdeutlicht, dass Linienbedarfsverkehre nur unter geeigneten Rahmenbedingungen einen Beitrag zu einer ökologisch und verkehrlich sinnvollen Ausgestaltung des öffentlichen Verkehrs leisten können (s. Kapitel 8). Entscheidend sind abge-

stimmte Maßnahmen auf allen Ebenen: Kommunen und Aufgabenträger*innen sollten eine normierte Einbettung in den ÖPNV sicherstellen, politische Entscheidungsträger*innen geeignete regulatorische und förderrechtliche Rahmenbedingungen bereitstellen, Betreiber*innen die betriebliche Effizienz durch Pooling und Flottenmanagement erhöhen, die Wissenschaft methodische Standards für eine vergleichbare Bewertung weiterentwickeln und Fahrgäste durch verlässliches und kooperatives Nutzungsverhalten zur Effizienz beitragen. Nur durch ein abgestimmtes Zusammenspiel dieser Akteur*innen lassen sich die Potenziale von Linienbedarfsverkehren für den Klimaschutz voll entfalten.

Rahmenbedingungen und Governance

Für den zielführenden Einsatz von Linienbedarfsverkehren sollten bestehende Projekte ausdrücklich als Reallabore verstanden werden, die Flexibilität und Weiterentwicklung ermöglichen. Der Gesetzgeber ist gefordert, eine agile Projektdynamik zuzulassen und Anpassungen an den Betriebsvorgaben rechtlich zu erleichtern. Dabei erscheint es sinnvoll, eine verpflichtende Dokumentation algorithmischer, betrieblicher und konzeptioneller Änderungen während der Pilotphasen vorzusehen, um die Nachvollziehbarkeit und Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Ergänzend sollten projektübergreifende Kommunikations- und Austauschformate zwischen relevanten Akteuren etabliert werden. Um die erforderliche Evaluation leisten zu können, ist es notwendig, Verkehrsunternehmen mit ausreichenden Ressourcen auszustatten oder durch wissenschaftliche Begleitstudien zu unterstützen.

9.3 Ableitung des weiteren Forschungsbedarfs

Die Forschungslage zu Bedarfsverkehren hat sich in den vergangenen Jahren deutlich verdichtet. Dies zeigen beispielhaft Arbeiten zu vergleichenden Bewertungsansätzen, betrieblicher Effizienz und Nutzerstrukturen von Ridepooling-Angeboten (vgl. Liebchen et al., 2020, S. 5–7; vgl. Zwick, Kuehnel & Axhausen, 2022, S. 3–5; vgl. Kostorz et al., 2021, S. 3–5, 7–9). Parallel dazu wurden auch auf Ebene der Branchenverbände zunehmend standardisierte Bewertungs- und Indikatorensysteme entwickelt (VDV, 2025b, S.21-22). Gleichzeitig zeigen die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit, dass weiterhin Forschungsbedarf hinsichtlich methodischer Standardisierung, der Vergleichbarkeit von Bewertungsergebnissen sowie der Analyse langfristiger ökologischer Wirkungen besteht. Dies betrifft sowohl methodische Grundlagen der THG-Bilanzierung als auch die betrieblichen und institutionellen Rahmenbedingungen, unter denen diese Verkehre in Deutschland umgesetzt werden.

Systemintegration

Spätestens mit der VDV-Mitteilung „Linien- und Bedarfsverkehre in der Region: Integriert, datenbasiert, effizient“ wird deutlich, dass Bedarfsverkehre im suburbanen und ländlichen Raum grundsätzlich integriert in den Linienverkehr zu planen sind (vgl. VDV, 2025b, S. 13, 16). Gleichwohl liegen bislang nur wenige belastbare Erkenntnisse vor, unter welchen Bedingungen ein effizienter und zielführender Einsatz bei gleichzeitig attraktivem Service-Level gelingt. Dies ist insbesondere darauf zurückzuführen, dass Ergebnisse aus (Pilot-)Projekten nur begrenzt generalisierbar sind (vgl. VDV, 2025b, S. 50). „Jede Regi-

on erfordert eine individuelle Betrachtung, geprägt von spezifischen Rahmenbedingungen“ (VDV, 2025b, S. 50). Zukünftige Forschung sollte daher belastbare Evidenz generieren, wie sich Ridepooling in bestehende Netzstrukturen einbetten lässt, um Kannibalisierungseffekte zu vermeiden und komplementäre Wirkungen zu stärken. Offene Punkte betreffen insbesondere Regulierung, Tarifintegration und Finanzierung. Von hoher praktischer Relevanz ist zudem die Frage nach den Schwellenwerten, ab denen ein On-Demand-Verkehr dem Linienverkehr vorzuziehen ist. Praxisbezogene Einschätzungen nennen etwa acht bis zehn Fahrgäste pro Fahrzeugstunde als möglichen Orientierungsbereich für einen wirtschaftlich tragfähigen Ridepooling-Betrieb. Bei dauerhaft zweistelligen Werten über den Tagesverlauf hinweg sollte dagegen geprüft werden, ob ein Linienbusbetrieb effizienter ist (vgl. Via Transportation, 2025, Min. 50:50–51:20). Daraus ergibt sich Forschungsbedarf zur systematischen Quantifizierung solcher Effizienzgrenzen in Abhängigkeit von Taktung, Nachfrageverteilung, Betriebsgebiet, Fahrtweiten und Kostenstruktur.

Evaluationsstandards und Datenstrukturen

Für eine integrierte Planung ist die Generierung belastbarer Erkenntnisse aus realen Projekten von zentraler Bedeutung. Zu verschiedenen Ridepooling-Systemen liegen bereits Evaluations- und Begleitstudien vor, die empirische Erkenntnisse zu Nutzung, Betriebsqualität und verkehrlichen Wirkungen bereitstellen (vgl. hierzu exemplarisch Hartz et al., 2024; Kagerbauer et al., 2021; Reichow & Ruhrort, 2024). Dennoch zeigen sich in der praktischen Umsetzung wiederkehrende methodische und strukturelle Herausforderungen. Ein zentrales Beispiel für die bestehenden Unsicherheiten bei der Evaluation von Ridepooling-Systemen ist die unterschiedliche Berechnung der Poolingquote. Teilweise erfolgt die Berechnung der Poolingquote auf Basis des Anteils der Fahrten mit mehr als einer gleichzeitig beförderten Person, teilweise anhand des Anteils gebündelter Buchungen am Gesamtbuchungsaufkommen und teilweise durch das Verhältnis der gebuchten Pkm zu den gefahrenen Fzkm. Die ermittelten Kennzahlen erfassen unterschiedliche Dimensionen und sind daher nicht unmittelbar vergleichbar. Eine Standardisierung im Sinne allgemein anerkannter Regeln der Technik steht bislang aus. Die bereits erwähnte Mitteilung des VDV bietet zwar eine umfassende Übersicht relevanter Messgrößen samt Berechnungsgrundlagen (VDV, 2025b, S.22-23), ist jedoch noch nicht verbindlich. Zudem gestaltet sich die Vereinheitlichung der Datenstrukturen zwischen Anbietern von Ridepooling-Algorithmen als zeitaufwendig. In den vorliegenden Datenstrukturen der Anbieter fehlt zudem die zentrale Information über die Buchungskilometer bzw. Personenkilometer_{gebucht}, wodurch die Systemeffizienz nach Liebchen et al. (vgl. 2020, S. 5–7) oder der Umwegfaktor (vgl. VDV, 2025b, S. 23; vgl. FGSV, 2021, S. 28–32) nicht berechnet werden können.

Darüber hinaus besteht weiterer Entwicklungsbedarf hinsichtlich der Evaluationsstandards zur ökologischen Bewertung von Linienbedarfsverkehren. Derzeit existieren lediglich standardisierte Zielgrößen, die in der genannten VDV-Mitteilung (2025) definiert ist. Diese bezieht sich auf die Reduktion von THG-Emissionen durch eine Verlagerung vom MIV zum ÖPNV (vgl. VDV, 2025b, S. 21) (s. Kapitel 3.2). Die vorliegende Arbeit zeigt jedoch, dass diese Definition zentrale Einflussfaktoren nicht berücksichtigt und somit nur einge-

schränkt aussagekräftige Ergebnisse liefert. Die Berücksichtigung von Kannibalisierungs- und Induktionseffekten sowie der Antriebs- und Ladebedingungen der Linienbedarfsverkehre ist notwendig, um belastbare ökologische Wirkungsabschätzungen zu ermöglichen. Eine inhaltliche Überarbeitung dieses Indikators erscheint daher erforderlich. Auch im Bereich der Nutzendenbefragungen besteht Standardisierungsbedarf. Bislang liegt kein einheitliches Fragebogendesign für die Erhebung von Nutzungs- und Wirkungsdaten bei Bedarfsverkehren vor. Zwar weisen die eingesetzten Erhebungsinstrumente häufig ähnliche Strukturmerkmale auf, sie unterscheiden sich jedoch inhaltlich und formal, was die Vergleichbarkeit und Übertragbarkeit der Ergebnisse erheblich einschränkt. Die genannten Herausforderungen verdeutlichen die Notwendigkeit zur Entwicklung standardisierter Schnittstellen und Datenformate, eines erweiterten öffentlich zugänglichen und verbindlichen Indikatoren- und Datenschemas sowie eines einheitlichen Fragebogendesigns für Bedarfsverkehre. Entwicklungen in diese Richtung würden die Vergleichbarkeit und Übertragbarkeit der Ergebnisse unterstützen und deren Nutzen für Planung und Politik erhöhen.

Methodische Weiterentwicklungen der THG-Bilanzierung

Der folgende Forschungsbedarf ergibt sich aus den in Kapitel 8.1 dargestellten Limitationen der vorliegenden Arbeit. Die angewandte Methodik folgt dem *Well-to-Wheel*-Ansatz nach *DIN EN 16258* und erfasst Emissionen der Betriebsphase (s. Kapitel 8.1). Für eine umfassendere ökologische Bewertung sind Life-Cycle-Assessments gemäß *DIN EN ISO 14040* und *14044* erforderlich, die Fahrzeug- und Batterieproduktion, Infrastruktur und Entsorgung einbeziehen. Ergänzend sollten weitere Emissionen wie Feinstaub, Stickstoffoxide, Versauerung und Eutrophierung berücksichtigt werden. Standardisierte Testzyklen bilden reales Fahr- und Ladeverhalten nur eingeschränkt ab. Zukünftige Arbeiten sollten daher verstärkt auf empirische Verbrauchsdaten zurückgreifen, insbesondere bei Plug-in-Hybriden. Aktuelle, regional differenzierte und zeitvariable Emissionsfaktoren der eingesetzten Energieträger sind ebenfalls einzubeziehen. Intermodale Wegeketten einschließlich Vor- und Nachläufen wurden in der THG-Bilanzierung nicht berücksichtigt, wodurch die THG-Werte tendenziell unterschätzt sind. Die Bestimmung substituierter Wege sollte methodisch weiterentwickelt werden, um Unsicherheiten aus modellierten Szenarien zu verringern. Verkehrsmodellierung und Simulation, ähnlich dem Ansatz von Kagerbauer et al. (vgl. 2021, S. 2, S. 21–22), können hierfür eine geeignete Grundlage bilden. Schließlich ist die Erweiterung der Untersuchungsbasis über vier Systeme hinaus erforderlich, um generalisierbare Aussagen zu ermöglichen. Die vorliegende Studie liefert bereits richtungssichere und größenordnungstreue Ergebnisse. Durch die in diesem Abschnitt skizzierten Entwicklungen wäre künftig zudem eine verlässlichere Quantifizierung der Emissionen von Bedarfsverkehren möglich.

Intermodale Wege

Linienbedarfsverkehre sind als Bestandteil des öffentlichen Verkehrs so auszurichten, dass sie intermodale Wegeketten unterstützen und den Umstieg auf andere Verkehrsmittel und ÖV-Angebote erleichtern. In den untersuchten Systemen konnten relevante, jedoch hetero-

gene intermodale Nutzungen beobachtet werden. Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit sowie bestehende Forschung deuten darauf hin, dass Schnittstellen zum schienen- und straßengebundenen öffentlichen Verkehr, MaaS-Integration, Anschlusssicherheit durch Echtzeitinformationen sowie tarifliche und finanzielle Anreize die intermodale Nutzung maßgeblich beeinflussen können. Empirische Befunde zu MOIA zeigen, dass Ridepooling als ergänzende Mobilitätsoption zum öffentlichen Verkehr verstanden wird, in digitale ÖPNV-Plattformen integriert werden kann und vor allem multimodal orientierte Nutzergruppen erreicht (vgl. Kostorz et al., 2021, S. 2, 8–9, 17). Befunde zu CleverShuttle verweisen ergänzend darauf, dass Ridepooling den öffentlichen Verkehr als Tür-zu-Tür-Baustein ergänzen und Mobilität ohne eigenes Auto attraktiver machen kann (vgl. Knie et al., 2020, S. 4–5, 11, 14–15). Zukünftige Forschung sollte daher systematisch untersuchen, unter welchen Rahmenbedingungen diese Faktoren zur Stärkung intermodaler Wegeketten beitragen.

Tarifliche Anpassungen

Tarifliche Anpassungen beeinflussen mutmaßlich die Nachfrage, die Systemintegration und die ökologischen Wirkungen von Bedarfsverkehren. Da Preisvorteile die Akzeptanz geteilter Fahrten und das Nachfragepotenzial von Ridepooling-Angeboten beeinflussen können, sind tarifliche Ausgestaltungen auch für mögliche Modal-Shift-Effekte relevant (vgl. Zwick, Kuehnel & Axhausen, 2022, S. 7–8, 12). Forschungsbedarf besteht insbesondere zu den Wirkungen konkreter Preismodelle in realen Bedarfsverkehren sowie zu Ausgestaltungen, die Kannibalisierung im ÖPNV vermeiden und gleichzeitig die Poolingquote erhöhen. Dabei sind auch soziale Aspekte zu berücksichtigen, etwa Auswirkungen auf die Inklusion einkommensschwächerer Nutzergruppen und die Sicherstellung der Daseinsvorsorge.

Einsatzgrenzen und Skalierungspotenziale

Internationale Simulationen verweisen auf erhebliche Effizienz- und Entlastungspotenziale insbesondere bei großskaligen, stark nachgefragten Flotten in dicht besiedelten Räumen. Voraussetzung hierfür ist, dass durch Fahrtenbündelung Fahrzeugkilometer reduziert und Fahrzeugkapazitäten effizienter genutzt werden (vgl. Alonso-Mora et al., 2017, S. 462, 466; vgl. Bischoff et al., 2017, S. 1, S. 4–5; vgl. Zwick et al., 2021, S. 665–666). Derartige Rahmenbedingungen unterscheiden sich jedoch deutlich von den derzeit in Deutschland dominierenden Einsatzkontexten, die überwiegend durch suburbane und ländliche Angebotsstrukturen geprägt sind. Bislang liegen nur wenige belastbare Erkenntnisse dazu vor, wie sich Ridepooling-Systeme unter den spezifischen Bedingungen peripherer Räume verhalten und welche ökologischen sowie betrieblichen Wirkungen dort realistisch erreichbar sind. Zukünftige Forschung sollte daher insbesondere untersuchen, unter welchen räumlichen und nachfrageseitigen Bedingungen Ridepooling-Systeme gegenüber klassischen liniengebundenen Angeboten Vorteile aufweisen und ab welchen Nachfrageintensitäten ein Übergang zu liniengebundenen Bedienformen sinnvoll erscheint.

Automatisierung der Fahrzeugflotte

Ein zentraler Forschungsbedarf betrifft die Integration automatisierter und autonomer Fahrsysteme in den Linienbedarfsverkehr. Die in dieser Arbeit analysierten Systeme zei-

gen, dass Personalkosten den dominanten Kostenblock darstellen (s. Kapitel 6.5). Vor diesem Hintergrund sollte untersucht werden, in welchem Umfang automatisierte Fahrzeuge diese Kostenstruktur grundlegend verändern können. Modellbasierte Kostenanalysen zeigen, dass insbesondere der Wegfall des Fahrpersonals die Kostenstruktur von Taxi- und On-Demand-Flotten erheblich verändern kann (vgl. Bösch et al., 2018, S. 81–83). Für München weisen Studien zudem darauf hin, dass die Kosten pro Fzkm durch Automatisierung und den Einsatz von Teleoperatoren von über 1 €/km auf unter 0,5 €/km sinken könnten (vgl. Negro et al., 2021, S. 5–8). Mit dem Projekt ALIKE wird in Hamburg derzeit ein autonomer On-Demand-Dienst im öffentlichen Verkehr vorbereitet, bei dem bis zu 20 autonome Forschungsfahrzeuge verschiedener Hersteller integriert, digital buchbar gemacht und ab 2025 im Realbetrieb erprobt werden sollen. Die wissenschaftliche Begleitung soll dabei unter anderem Akzeptanz, Verkehrsverhalten sowie verkehrliche und ökologische Auswirkungen untersuchen (vgl. Bundesministerium für Verkehr, 2023, Abschnitt Projektziel und Durchführung). Da tarifintegrierte Angebote im Linienbedarfsverkehr häufig niedrige Kostendeckungsgrade aufweisen, kann die wirtschaftliche Tragfähigkeit langfristig wesentlich von der Automatisierung beeinflusst werden. Besonders relevant ist dies in nachfrageschwächeren Einsatzgebieten, in denen fahrerlose Betriebsformen eine Schlüsselrolle für die langfristige Etablierung solcher Angebote spielen könnten. Zukünftige Forschung sollte daher untersuchen, unter welchen Bedingungen Automatisierung die Wirtschaftlichkeit von Linienbedarfsverkehren verbessert und welche ökologischen Potenziale durch die Kombination mit einer wirksamen Fahrtenbündelung erschlossen werden können. Insgesamt ist zu klären, wie automatisierte Flotten strategisch eingesetzt werden können, um Linienbedarfsverkehre langfristig sowohl ökonomisch tragfähiger als auch ökologisch wirksamer zu gestalten.

Betriebliche Optimierung

Die in dieser Arbeit durchgeführten Sensitivitätsanalysen und das abgeleitete Wirkungsgefüge (s. Kapitel 7.1) haben überwiegend explorativen Charakter. Gründe sind die geringe Stichprobengröße von vier Systemen, der Black-Box-Charakter der Algorithmen sowie variierende Rahmenbedingungen, die direkte Vergleiche erschweren. Daraus ergibt sich Forschungsbedarf zur Vergleichbarkeit und Übertragbarkeit von Systemalgorithmen. Besonders relevant wären identische Dispatching-Algorithmen in unterschiedlichen Räumen, Zeitlagen und Nachfragestrukturen, um belastbare Aussagen über deren Leistungsfähigkeit zu gewinnen. Von zentraler Bedeutung ist die Parametrierung der Algorithmen. Einstellungen wie maximale Wartezeiten oder zulässige Umwegfaktoren beeinflussen direkt Poolingquoten, Leerfahrten, Bedienquote und THG-Emissionen. Sie bestimmen damit Effizienz, Nutzerakzeptanz und ökologische Wirkungen. In der Praxis werden diese Parameter meist initial durch Technologieunternehmen festgelegt und anschließend heuristisch angepasst. Unabhängige Vorher-nachher-Studien sollten systematisch untersuchen, wie unterschiedliche Parametrierungen Effizienz und Umweltwirkung verändern und welche kontextabhängigen Schwellenwerte gelten. Auch konzeptionelle Rahmenbedingungen wie Betriebsgebiet, Betriebszeiten und tarifliche Einbettung prägen das Effizienzpotenzial.

Künftige Arbeiten sollten diese Faktoren in vergleichenden Studien isoliert analysieren, stets unter Berücksichtigung der jeweiligen Mobilitätsausgangslage, um generalisierbare, zugleich lokal anschlussfähige Erkenntnisse zu gewinnen. Ein weiterer Bedarf betrifft Strategien für Fahrzeugbewegungen ohne Auftrag. Prädiktive Repositionierung ist gegenüber strategischem Parken zu prüfen, um Leerfahrten zu senken und Servicequalität sowie ökologische Wirkungen zu verbessern. Die Ergebnisse dieser Arbeit liefern erste Bewertungsperspektiven und Handlungshinweise als Grundlage für die strategische Integration von Ridepooling-Systemen in nachhaltige Verkehrsplanungsprozesse. Weitere Forschung kann diese explorativen Ansätze vertiefen und durch systematische Vergleichsstudien zu robusten Planungsinstrumenten ausbauen.

Daten und Analysepotenziale

Die in Linienbedarfsverkehren anfallenden georeferenzierten Buchungs-, Anfrage- und Betriebsdaten besitzen eine hohe räumliche und zeitliche Auflösung. Daraus ergeben sich Möglichkeiten zur Analyse realer Mobilitätsmuster, zur Bewertung der Systemperformance und zur evidenzbasierten Angebotsplanung (vgl. Bruder & Kersten, 2024, S. 691–692). Zugleich bestehen methodische Herausforderungen, etwa durch die Unterscheidung zwischen Anfragen und realisierten Buchungen, mögliche Verzerrungen durch intensive Nutzergruppen, algorithmische Dispositionslogiken und datenschutzrechtliche Einschränkungen (vgl. Bruder & Kersten, 2024, S. 698–699). Zukünftige Forschung sollte daher prüfen, wie diese Daten systematisch mit ÖPNV-Bestandsdaten, Zählraten und externen Einflussgrößen verknüpft und für eine integrierte Angebotsplanung genutzt werden können.

Technologische und strategische Perspektiven

Mit Blick auf die langfristige Wirtschaftlichkeit und ökologische Wirksamkeit von Linienbedarfsverkehren ist die Integration automatisierter und autonomer Fahrzeuge ein zentrales Zukunftsthema. Forschungsbedarf besteht insbesondere hinsichtlich der Auswirkungen auf Kostendeckungsgrade und Emissionsbilanzen, insbesondere in weniger rentablen Einsatzgebieten. Ergänzend sollte die Mehrfachnutzung von Fahrzeugflotten untersucht werden, etwa für logistische Aufgaben in Schwachlastzeiten oder im Rahmen von ÖPNV-Taxi-Konzepten.

Literaturverzeichnis

- Agatz, N., Erera, A., Savelsbergh, M., & Wang, X. (2012). Optimization for dynamic ride-sharing: A review. *European Journal of Operational Research*, 223(2), 295–303. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.05.028>
- Agora Verkehrswende. (2023). *Mobilitätsoffensive für das Land. Wie Kommunen mit flexiblen Kleinbussen den ÖPNV von morgen gestalten können* (Techn. Ber.) (Online verfügbar, abgerufen am 9. Juni 2025). Agora Verkehrswende. https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2023/Bedarfsverkehr/92_Leitfaden-Bedarfsverkehr.pdf
- Alonso-Mora, J., Samaranayake, S., Wallar, A., Frazzoli, E., & Rus, D. (2017). On-demand high-capacity ride-sharing via dynamic trip-vehicle assignment. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, 114(3), 462–467. <https://doi.org/10.1073/pnas.1611675114>
- Asatryan, H., Gaul, D., Gottschalk, H., Klamroth, K., & Stiglmayr, M. (2023). Ridepooling and Public Bus Services: A Comparative Case Study. *arXiv preprint arXiv:2302.01709*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.01709>
- Becker, H., Balac, M., Ciari, F., & Axhausen, K. W. (2020). Assessing the welfare impacts of Shared Mobility and Mobility as a Service (MaaS). *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 131(100), 228–243. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2019.09.027>
- Bischoff, J., Maciejewski, M., & Nagel, K. (2017). City-wide shared taxis: A simulation study in Berlin. *2017 IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 275–280. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2017.8317926>
- Bösch, P. M., Becker, F., Becker, H., & Axhausen, K. W. (2018). Cost-based analysis of autonomous mobility services. *Transport Policy*, 64, 76–91. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2017.09.005>
- Brilon Bondzio Weiser, I. f. V. (2015). Fortschreibung des Verkehrskonzepts für den Ortskern Senden [Zugriff am 15. Dezember 2024].
- Bruder, P., & Kersten, R. (2024). Geografische Analyse von On-Demand-Ridepooling-Daten - Chancen und Grenzen der Anwendung. *Journal für Mobilität und Verkehr*, 48–56. <https://doi.org/10.34647/jmv.nr21.id148>
- Bruder, P., & Klemmer, J. (2024, Dezember). *Bewertung der ökologischen Effekte von Ridepooling-Systemen anhand von vier Fallbeispielen in NRW* (Abschlussbericht). FH Münster, Fachbereich Bauingenieurwesen, Forschungsgruppe Verkehrswesen. Münster.
- Bundesministerium für Verkehr. (2023, 10. November). *Integration von autonomen Fahrzeugen in Mobilitätsanwendungen: ALIKE* [Projektlaufzeit 10/2023 bis 10/2026]. Verfügbar 25. Juni 2026 unter <https://www.bmv.de/SharedDocs/DE/Artikel/StV/AVF-projekte/alike>

- Chen, M., Jauhri, A., & Shen, J. (2017). Data Driven Analysis of the Potentials of Dynamic Ride Pooling. *Proceedings of the 10th ACM SIGSPATIAL Workshop on Computational Transportation Science*, 7–12. <https://doi.org/10.1145/3151547.3151549>
- Deutsche Automobil Treuhand GmbH. (2022). *Leitfaden zum Energieverbrauch und zu den CO₂-Emissionen, Kraftstoffverbrauch, Stromverbrauch und Emissionswerte von Neufahrzeugen im Vergleich*. Deutsche Automobil Treuhand GmbH. Verfügbar 15. Dezember 2024 unter <https://www.dat.de/co2/>
- Deutscher Speditions- und Logistikverband e. V. (2013). *Leitfaden Berechnung von Treibhausgasemissionen in Spedition und Logistik gemäß DIN EN 16258*. DSLV Deutscher Speditions- und Logistikverband e. V. Verfügbar 15. Dezember 2024 unter https://www.dslv.org/fileadmin/Redaktion/PDFs/07_Publikationen/Leitfaeden/DSLV-Leitfaden_Berechnung_von_THG-Emissionen_Stand_03-2013.pdf
- Deutsches Institut für Normung. (2013, März). *DIN EN 16258:2013-03: Methode zur Berechnung und Deklaration des Energieverbrauchs und der THG-Emissionen bei Transportdienstleistungen (Güter- und Personenverkehr); Deutsche Fassung EN 16258:2012*.
- Deutsches Institut für Normung. (2021a, Februar). *DIN EN ISO 14040:2021-02: Umweltmanagement. Ökobilanz. Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006 + Amd 1:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14040:2006 + A1:2020*.
- Deutsches Institut für Normung. (2021b, Februar). *DIN EN ISO 14044:2021-02: Umweltmanagement. Ökobilanz. Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006 + Amd 1:2017 + Amd 2:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14044:2006 + A1:2018 + A2:2020*.
- Deutsches Institut für Normung. (2024, Juni). *DIN EN ISO 14083:2024-06: Treibhausgase. Quantifizierung und Berichterstattung über Treibhausgasemissionen von Transportvorgängen (ISO 14083:2023); Deutsche Fassung EN ISO 14083:2023*. <https://doi.org/10.31030/3532135>
- Engelhardt, R., Dandl, F., Bilali, A., & Bogenberger, K. (2019). Quantifying the Benefits of Autonomous On-Demand Ride-Pooling: A Simulation Study for Munich, Germany. *2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*, 2992–2997. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2019.8917411>
- Foljanty, L. (2025, 8. Februar). *On-Demand Transit Market Report 2024: Recap*. Verfügbar 11. Juli 2025 unter <https://lukas-foljanty.medium.com/on-demand-transit-market-report-2024-recap-2751810cd482>
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. (2010). *Empfehlungen für Planung und Betrieb des öffentlichen Personennahverkehrs* [Forschungsprojekt des Forschungsprogramms Stadtverkehr (FoPS), FA-Nr. 70.837/2009 im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung]. FGSV Verlag.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. (2020, Juni). *Begriffsbestimmungen für das Straßen- und Verkehrswesen: BBSV*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Querschnittsausschuss Begriffsbestimmungen. Köln.

- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. (2021, Dezember). *Hinweise für Kenngrößen zur Beschreibung und Bewertung von Ridepooling-Systemen* (1. Aufl.) [FGSV-Nr. 170/1, Kategorie W1, Arbeitsgruppe „Verkehrsplanung“]. FGSV Verlag. <https://www.fgsv-verlag.de>
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. (2022). *E Klima 2022: Empfehlungen zur Anwendung und Weiterentwicklung von FGSV-Veröffentlichungen im Bereich Verkehr zur Erreichung von Klimaschutzziele* [Kostenfreier Download als PDF. Enthält Steckbriefe zu klimarelevanten Vorgaben und Standards im Verkehrswesen]. FGSV Verlag.
- Forschungsinformationssystem des BMVI. (2023, 10. August). *Pkw-Besetzungsgrad bei der privaten Autonutzung* [Erstellt am 29.03.2004; Stand des Wissens 10.08.2023. Synthesebericht im Themenbereich Personenverkehr, Mobilität und Raum, Motorisierter Individualverkehr]. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. Verfügbar 14. August 2025 unter <https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/79638/>
- Hartz, B., Klemmer, J., Kersten, R., & Bruder, P. (2023, Juni). *3. Umfrage zur Nutzung von LOOPmünster* [Entwurf, unveröffentlicht], FH Münster, Forschungsgruppe Verkehrswesen.
- Hartz, B., Klemmer, J., Kersten, R., & Bruder, P. (2024, Januar). *Wissenschaftliche Begleitung LOOPmünster – Abschlussbericht* (Projektbericht) (Online verfügbar, abgerufen am 9. Juni 2025). FH Münster, Fachbereich Bauingenieurwesen, Forschungsgruppe Verkehrswesen. <https://www.stadtwerke-muenster.de/Stadtwerke/Dokumente/Unterwegs/LOOPm%C3%BCnster-Abschlussbericht.pdf>
- Heinitz, F. (2020). *Potenziale und Hemmnisse für Pkw-Fahrgemeinschaften in Deutschland. Teilbericht* (TEXTE 216/2020 Nr. FKZ 3717171050, FB000155/ZW,5) (5. Teilbericht des Forschungsprojekts „RechtSInnMobil“ im Auftrag des Umweltbundesamtes). Fachhochschule Erfurt, Fachgebiet Transportwirtschaft. Verfügbar 15. Dezember 2024 unter https://www.umweltbundesamt.de/system/files/medien/5750/publikationen/2020_11_19_texte_216_2020_personenbefoerderung_tb_5.pdf
- Ingenieurbüro Helmert. (2023, 17. Mai). *Mobilitätsbefragung 2022 zum werktäglichen Verkehrsverhalten der Bevölkerung in der Stadt Münster: Kurzbericht*. Stadt Münster, Amt für Mobilität und Tiefbau, Abteilung Mobilitätsplanung. Aachen. Verfügbar 15. Dezember 2024 unter https://www.stadt-muenster.de/fileadmin/user_upload/stadt-muenster/61_verkehrsplanung/pdf/haushaltsbefragung_2022/Mobilitaetsbefragung_2022.pdf
- International Transport Forum. (2017). *Transition to shared mobility: How large cities can deliver inclusive transport services*. International Transport Forum. Paris, OECD Publishing. Verfügbar 24. Juli 2025 unter <https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/transition-shared-mobility.pdf>
- Kagerbauer, M., Kistorz, N., Wilkes, G., Dandl, F., Engelhardt, R., Glöckl, U., Fraedrich, E., & Zwick, F. (2021, Dezember). *Ridepooling in der Modellierung des Gesamt-*

- verkehrs: Methodenbericht zur MOIA Begleitforschung* (Techn. Ber.) (Im Auftrag der MOIA GmbH, Berlin). Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Verkehrswesen (IfV) und Technische Universität München (TUM), Lehrstuhl für Verkehrstechnik. Karlsruhe und München. <https://doi.org/10.5445/IR/1000141282>
- Kämper, C., Helms, H., & Biemann, K. (2020). *Wie klimafreundlich sind Elektroautos? Update Bilanz 2020* (Techn. Ber.). Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU). Verfügbar 15. Dezember 2024 unter https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Verkehr/emob_klimabilanz_bf.pdf
- Knie, A., Ruhrort, L., Gödde, J., & Pfaff, T. (2020). *Ride-Pooling-Dienste und ihre Bedeutung für den Verkehr: Nachfragemuster und Nutzungsmotive am Beispiel von CleverShuttle – eine Untersuchung auf Grundlage von Buchungsdaten und Kundenbefragungen in vier deutschen Städten* (Bd. SP III 2020-601). Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung gGmbH.
- Kompetenzcenter Digitalisierung NRW (KCD) & civity Management Consultants. (2022, April). *Potenzialanalyse On-Demand-Ridepooling im Ruhrgebiet – Abschlussbericht* (Studie) (Gefördert vom Ministerium für Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen. Zitierhinweis: Kompetenzcenter Digitalisierung NRW (KCD) / civity Management Consultants (Hrsg.), 04/2022). Verkehrsverbund Rhein-Ruhr AöR (VRR) – Kompetenzcenter Digitalisierung (KCD). Gelsenkirchen und Berlin.
- Koska, T. (2021, März). Chancen, Risiken und Effizienzpotenziale durch die Digitalisierung im Verkehr mit Schwerpunkt On-Demand-Angebote [Inputpapier zur 3. Sitzung der AG Verkehr der Roadmap 2045 am 24.03.2021]. Verfügbar 15. Dezember 2024 unter <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/P-R/roadmap-2045-ag-verkehr-inputpapier-dritte-sitzung.pdf>
- Koska, T., & Wetzchewald, A. (2022, 4. August). *Evaluation Mobil.NRW: Ergebnisse der Nutzer*innen-Befragung des G-Mobil* [Unveröffentlicht].
- Kostorz, N., Fraedrich, E., & Kagerbauer, M. (2021). Usage and User Characteristics—Insights from MOIA, Europe’s Largest Ridepooling Service. *Sustainability*, 13(2), 958. <https://doi.org/10.3390/su13020958>
- Kreis Coesfeld and Zweckverband Mobilität Münsterland. (2024). *Der kommit-Shuttle*. Verfügbar 15. Juni 2026 unter <https://www.muensterland.com/muensterland-kommit/mobilitaetsangebot/kommit-shuttle/>
- Landesamt für Natur, Umwelt und Klima Nordrhein-Westfalen. (2022). *Emissionsfaktoren der KNLV nach Jahren bis 2022*. Landesamt für Natur, Umwelt und Klima Nordrhein-Westfalen. Verfügbar 18. Juni 2025 unter <https://www.lanuv.nrw.de/themen/klima/klimaschutz/emissionsfaktoren-der-knlv>
- Liebchen, C., Lehnert, M., Mehlert, C., & Schiefelbusch, M. (2020). *Betriebliche Effizienzgrößen für Ridepooling-Systeme* (Techn. Ber.). Fachbereich Ingenieur- und Naturwissenschaften. <https://doi.org/10.15771/1318>

- Mehlert, C. (2019). Flexibel unterwegs – Nahverkehr der Zukunft? Geschichte und Marktübersicht zu fahrplanfreien Mobilitätsangeboten (On-Demand-Verkehr) [Göttingen, 22. Mai 2019]. https://www.harz-nah-dran.de/news/details/flexible-angebot-im-oepnv.html?file=files/vsn/downloads/2019_05_22%20KCW%20Christian%20Mehlert%20ZVSN%20%20Flexible%20Angebote%20Mehlert.pdf
- Mehlert, C., & Weißhand, M. (2023). On-Demand: Wirtschaftlich tragfähig als digitales AST 2.0? *Der Nahverkehr*, (1+2), 56–59.
- MOIA. (2023, 13. April). *MOIA erreicht Vor-Corona-Niveau und wächst unter neuer Konzession weiter*. Verfügbar 27. Juni 2026 unter <https://www.moia.io/de-DE/news/moia-erreicht-vor-corona-niveau-und-waechst-unter-neuer-konzession-weiter>
- Negro, P., Ridderskamp, D., Paul, M., Fehn, F., Belzner, H., & Bogenberger, K. (2021). Cost Structures of Ride-Hailing Providers in the Context of Vehicle Electrification and Automation. *2021 7th International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS)*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/MT-ITS49943.2021.9529308>
- Nobis, C., & Kuhnimhof, T. (2018). *Mobilität in Deutschland – MiD Ergebnisbericht* [Ergebnisse der Studie „Mobilität in Deutschland 2017“]. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI).
- OpenStreetMap contributors. (2023). *OpenStreetMap* [Kartendaten veröffentlicht unter der Open Database License (ODbL) v1.0]. Verfügbar 15. Juli 2023 unter <https://www.openstreetmap.org>
- Peiseler, F., Runkel, M., Collmer, F., & Zahn, P. (2024). MIV und ÖPNV im Kostenvergleich – Einsparung gesellschaftlicher Kosten durch den öffentlichen Personennahverkehr. Verfügbar 15. Dezember 2024 unter https://foes.de/publikationen/2024/2024-04_FOES_OEPNV.pdf
- Personenbeförderungsgesetz (PBefG) [Zuletzt geändert durch Art. 1 G v. 5.12.2023 I 4062]. (2023). <https://www.gesetze-im-internet.de/pbefg/>
- Planersocietät. (2021). *Stadt Gronau – Zwischenbericht Mobilitätskonzept Gronau* (Techn. Ber.) (Projektleitung: Dipl.-Ing. Jan Diesfeld; Mitarbeit: M.Sc. Markus Bednarek, M.Sc. Sophia Middendorf, M.Sc. Christian Schipplick, cand. M.Sc. Joel Jost, cand. B.Sc. Julian Kley-Holsteg). Dr.-Ing. Frehn, Steinberg & Partner – Stadt- und Verkehrsplaner. Gutenbergstraße 34, 44139 Dortmund. <https://www.planersocietaet.de>
- Plötz, P. (2022). *Der Anfang vom Ende für Plug-in-Hybridfahrzeuge in Europa* [Letzter Zugriff am 15.12.2024]. <https://www.isi.fraunhofer.de/de/blog/2022/Anfang-vom-Ende-Plug-in-Hybrid-Fahrzeuge-Europa.html>
- Plötz, P., Link, S., Ringelschwender, H., Keller, M., Moll, C., Bieker, G., Dornoff, J., & Mock, P. (2022). *Real-world usage of plug-in hybrid vehicles in Europe: A 2022 update on fuel consumption, electric driving, and CO₂ emissions* (Techn. Ber.) (Bildnachweis: shutterstock.com, Blue Planet Studio, Stock-Foto ID: 2021600951). International Council on Clean Transportation (ICCT).

- Regionalverkehr Münsterland. (2024). *Buelamo – Mit viel Rückenwind den Verkehr der Zukunft testen*. Regionalverkehr Münsterland. Verfügbar 15. Dezember 2024 unter <https://www.kreis-coesfeld-digital.de/aktuelle-projekte/kommit-mobilit%C3%A4tsangebote/>
- Regionalverkehr Münsterland GmbH. (2021). *FAQs zum G-Mobil*. Verfügbar 16. September 2025 unter https://www.rvm-online.de/fileadmin/startseite_rvm/rvm/projekte/gronau___mein_g-mobil/g-mobil_faqs.pdf
- Reichow, V., & Ruhrort, L. (2024, Dezember). *On-Demand besser ans Ziel – Praxistest für die ÖPNV-Integration von On-Demand-Verkehren* (Techn. Ber.) (Zukunft Mobilität – Projekt „Nachhaltig unterwegs“). Agora Verkehrswende. <https://www.zukunft-nachhaltige-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2024/12/On-Demand-besser-ans-Ziel-Praxistest-fuer-die-OePNV-Integration-von-On-Demand-Verkehren.pdf>
- Ruhrbahn GmbH. (2021). Allgemeine Geschäftsbedingungen (AGB) der Ruhrbahn GmbH für Beförderungsleistungen On Demand „Bussi“ [Zugriff am 15. Dezember 2024].
- Ruhrbahn GmbH. (2025). *bussi. Kommt wie bestellt. On-Demand-Shuttle in Essen*. Verfügbar 16. September 2025 unter <https://bussi.ruhrbahn.de/>
- Schlüter, J., Bossert, A., Rössy, P., & Kersting, M. (2021). Impact assessment of autonomous demand responsive transport as a link between urban and rural areas [Urban Transport Planning and Policy in a changing world: Bridging the gap between theory and practice]. *Research in Transportation Business and Management*, 39, 100613. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2020.100613>
- Schneider, P., Koska, T., & Schäfer-Sparenberg, C. (2024). On-Demand-Ridepooling als Beitrag zu Mobilitätswende und Daseinsvorsorge – Erkenntnisse zum Status quo in Deutschland und Entwurf einer Systemtypologie [Verfügbar unter: <https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/8611/file/WP202.pdf>. Letzter Zugriff am 15.12.2024].
- Schöne, D. (2024, 4. November). *On-Demand im Münsterland – Potentiale und Grenzen des ländlichen Raums* [Plakat, unveröffentlicht, präsentiert im Rahmen des Zukunftsnetz NRW].
- Shell. (2024a). *Was sagt die Diesel-Kraftstoffnorm (B7)?* [Zugriff am 15.12.2024]. Verfügbar 15. Dezember 2024 unter <https://support.shell.de/hc/de/articles/360010825958-Was-sagt-die-Diesel-Kraftstoffnorm-B7>
- Shell. (2024b). *Was sagt die Ottokraftstoff-Norm (E5 und E10) aus?* [Zugriff am 15.12.2024]. Verfügbar 15. Dezember 2024 unter <https://support.shell.de/hc/de/articles/360010714417-Was-sagt-die-Ottokraftstoff-Norm-E5-und-E10-aus>
- Shulika, O., Bujak, M., Ghasemi, F., & Kucharski, R. (2024). Spatiotemporal variability of ride-pooling potential – Half a year New York City experiment. *Journal of Transport Geography*, 114, 103767. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2023.103767>
- Sozialverband Deutschland. (2022). *Stellungnahme Reform Personenbeförderungsrecht*. Verfügbar 15. Dezember 2024 unter <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anl>

- age/Gesetze/Gesetze-19/entwurf-gesetz-personenbefoerderung-recht-stellungnahme-22.pdf
- Stadt Essen. (2019). Haushaltsbefragung zum Mobilitätsverhalten in Essen 2019 [Zugriff am 15. Dezember 2024].
- Stadt Essen. (2023). Weitere Fortführung des On-Demand-Shuttles „Bussi“ beschlossen [Zugriff am 15. Dezember 2024].
- Stadt Essen. (2024, 16. September). *Weiterführung des On-Demand-Verkehrs Bussi*. Stadt Essen, Geschäftsbereich 6. Verfügbar 15. Dezember 2024 unter https://ris.essen.de/.../Vorlage_0866-2024-6.pdf
- Stadtwerke Münster. (n. d.). *LOOPt leider nicht weiter: Über das Projekt LOOPmünster*. Verfügbar 14. Juni 2026 unter <https://www.stadtwerke-muenster.de/unterwegs/mobilitaetsangebote/loopmuenster>
- Statista. (2021). *Verteilung der Kostendeckung im öffentlichen Personennahverkehr in Deutschland von 1995 bis 2021*. Verfügbar 15. Dezember 2024 unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1243184/umfrage/verteilung-der-kostendeckung-im-oepnv-in-deutschland/>
- Statistische Ämter des Bundes und der Länder. (2011). *Zensus 2011: Ergebnisse auf Gitterebene: Bevölkerung in INSPIRE-konformen 100-Meter-Gitterzellen*. Verfügbar 14. Juni 2026 unter https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Zensus2022/_inhalt.html
- Umweltbundesamt. (2021). *Umweltfreundlich mobil! Ein ökologischer Verkehrsartenvergleich für den Personen- und Güterverkehr in Deutschland*. Umweltbundesamt. Verfügbar 15. Dezember 2024 unter https://www.umweltbundesamt.de/system/files/medien/5750/publikationen/2021_fb_umweltfreundlich_mobil_bf.pdf
- Umweltbundesamt. (2024). *CO₂-Emissionen pro Kilowattstunde Strom 2023 gesunken*. Umweltbundesamt. Verfügbar 15. Dezember 2024 unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/co2-emissionen-pro-kilowattstunde-strom-2023>
- Umweltbundesamt. (2024). *Entwicklung der spezifischen Treibhausgas-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990–2023* (Nr. 23/2024). Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/system/files/medien/11850/publikationen/23_2024_cc_strommix_11_2024.pdf
- Umweltbundesamt. (2025, 30. Januar). *Wie hoch sind die Treibhausgasemissionen pro Person in Deutschland und wie viel wäre klimaverträglich?* Umweltbundesamt. Verfügbar 6. August 2025 unter <https://www.umweltbundesamt.de/service/uba-fragen/wie-hoch-sind-die-treibhausgasemissionen-pro-person>
- Verband Deutscher Verkehrsunternehmen. (2021). *Hinweise zur Ausschreibung von Linienbedarfsverkehren – Erste Erkenntnisse aus der Praxis von On-Demand-Verkehren* (VDV-Mitteilungen Nr. 10016) (Gemeinsame Arbeitsgruppe Multimodale Mobilität (AG „MMM“); Tabelle: Quelle: CleverShuttle). VDV – Verband Deutscher Verkehrsunternehmen.

- Verband Deutscher Verkehrsunternehmen. (2022). *VDV-Umfrage zu On-Demand-Verkehren in Deutschland (2022)*. VDV – Verband Deutscher Verkehrsunternehmen. Verfügbar 11. Juni 2025 unter <https://www.vdv.de/ondemandumfrage22.aspx>
- Verband Deutscher Verkehrsunternehmen. (2023, März). *Linienbedarfsverkehr: zukunfts-gerecht, integriert und nachfragegesteuert* (Positionspapier). Verband Deutscher Verkehrsunternehmen.
- Verband Deutscher Verkehrsunternehmen. (2025a). *Personenkilometer*. VDV – Verband Deutscher Verkehrsunternehmen. Verfügbar 4. Juli 2025 unter <https://www.mobi-wissen.de/Verkehr/Personenkilometer>
- Verband Deutscher Verkehrsunternehmen. (2025b, Mai). *Linien- und Bedarfsverkehre in der Region: Integriert, datenbasiert, effizient. Ein Leitfaden zur Planung, Konzeption und Umsetzung von On-Demand-Angeboten* (A. Maatz, Hrsg.; VDV-Mitteilungen Nr. 10017) (VDV-AG „Multimodale Mobilität“. Obmann: Andreas Maatz, Kreisverkehrsgesellschaft Offenbach mbH. Stand: Mai 2025). VDV – Verband Deutscher Verkehrsunternehmen. <https://www.zukunft-nachhaltige-mobilitaet.de/publikationen/linien-und-bedarfsverkehre-in-der-region>
- Via Transportation. (2023, 19. September). *sprinti wird zum größten On-Demand-ÖPNV-System in Deutschland*. Verfügbar 14. Juni 2026 unter <https://ridewithvia.com/news/sprinti-wird-zum-grossten-on-demand-opnv-system-in-deutschland>
- Via Transportation. (2025, 28. Mai). *Microtransit – Webinar: Neue Wege im Nahverkehr: Wie Hanau integrierte Mobilität plant* [Webinar gemeinsam mit Corinna-Maria Schulte, Geschäftsführerin der Hanauer Straßenbahn GmbH]. Verfügbar 1. September 2025 unter <https://ridewithvia.com/resources/integrierte-mobilitaet>
- Wetzchewald, A., & Schäfer-Sparenberg, C. (2022, 5. Januar). *Evaluation Mobil.NRW: Ergebnisse der Nutzer:innen-Befragung des Kommit-Shuttles* [Unveröffentlichtes Dokument], Mobil.NRW.
- Wilkes, G., Briem, L., Heilig, M., & Vortisch, P. (2021). Determining service provider and transport system related effects of ridesourcing services by simulation within the travel demand model mobiTopp. *European Transport Research Review*, 13(34). <https://doi.org/10.1186/s12544-021-00493-3>
- Wittowsky, D., & Malow, K. (2022, 21. November). *Evaluierung des Bussi-On-Demand-Shuttles in Essen: Ergebnisdokumentation* [imobis, unveröffentlichtes Dokument], Institut für Mobilitäts- und Stadtplanung, Universität Duisburg-Essen.
- Zwick, F., Kuehnel, N., & Axhausen, K. W. (2022). Review on theoretical assessments and practical implementations of ride-pooling. *Conference Paper*. <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000548675>
- Zwick, F., Kuehnel, N., & Hörl, S. (2022). Shifts in perspective: Operational aspects in (non-)autonomous ride-pooling simulations. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 165, 300–320. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2022.09.001>
- Zwick, F., Kuehnel, N., Moeckel, R., & Axhausen, K. W. (2021). Ride-Pooling Efficiency in Large, Medium-Sized and Small Towns – Simulation Assessment in the Munich Metropolitan Region [The 12th International Conference on Ambient Systems,

Networks and Technologies (ANT) / The 4th International Conference on Emerging Data and Industry 4.0 (EDI40) / Affiliated Workshops]. *Procedia Computer Science*, 184, 662–667. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.03.083>

Kapitel A

Anhang

A.1 Zentrale KPIs von Ridepooling-Systemen

Tab. A.1: Zentrale Messgrößen, Berechnungslogik und Dimensionen im Kontext von On-Demand-Verkehren (nach VDV, 2025b, S. 22-23)

Messgröße	Berechnungslogik	Dimension
Fahrgäste	Summe der beförderten Fahrgäste	–
Produktive Fahrzeugstunden	Summe der Zeit in Schichten zwischen Schichtstart und Schichtende (Events in der Fahrpersonal-App), ausgenommen die tatsächliche Pausenzeit. Fahrten zwischen Depot und Betriebsgebiet sind einbezogen, da sie vom Aufgabenträger bezahlt werden.	h
Mittlere Wartezeit	Mittelwert der Wartezeit zwischen Buchung und bei der Buchung avisierter Ankunft des Fahrzeugs am Abholort. Nur für Sofortbuchungen.	min
Pünktlichkeit	Anteil der durchgeführten Fahrten ohne Verspätung (Verspätung = Abweichung des tatsächlichen Abholzeitpunkts vom Ende des Abholfensters). Bei Sofortbuchungen gilt eine Karenzzeit von 3 Minuten. Zu frühe Abholungen gelten als pünktlich, wenn der Fahrer bis zum Abholfenster wartet.	%
Fahrzeugkilometer (Fzkm)	Summe der gefahrenen Kilometer von Schichtstart bis Schichtende (mit und ohne Fahrgäste). Datenbasis: GPS-Daten der Fahrpersonal-App. Abweichung zum Odometer < 2%.	km
... mit Fahrgästen	Summe der gefahrenen Kilometer mit mindestens einem Fahrgast an Bord.	km
... ohne Fahrgäste	Summe der gefahrenen Kilometer ohne Fahrgast an Bord zwischen Schichtstart und Schichtende.	km

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Messgröße	Berechnungslogik	Dimension
Personenkilometer (Pkm)	Summe der gefahrenen Kilometer multipliziert mit der Anzahl der Fahrgäste an Bord.	km
Buchungskilometer (Bukm)	Summe der direkten Distanzen (schnellste Route laut Google Maps o. ä.) zwischen Abhol- und Absetzpunkt, multipliziert mit der Fahrgastanzahl.	km
Poolingquote	„Personenkilometer“ geteilt durch „Fahrzeugkilometer“ ; entspricht der Bündelungsquote gemäß § 50 PBefG.	–
Auslastung	„Fahrgäste“ geteilt durch „Produktive Fahrzeugstunden“ .	–
Produktivität	„Fahrgäste“ geteilt durch „Produktive Fahrzeugstunden“ zwischen erster Abholung und letztem Absetzen eines Fahrgasts. Vergleichbar mit der Produktivität einer Buslinie.	–
Angebotsverfügbarkeit	Der Anteil der Fahrtanfragen, für die eine On-Demand-Option bereitgestellt werden konnte, bezieht sich auf theoretisch mögliche Fahrten innerhalb der Bedienzeiten, unter technisch korrekten Bedingungen und ohne Anwendung eines Modalfilters. Berücksichtigt wird dabei, ob ein Angebot unter Einhaltung der maximal zulässigen Wartezeit und Laufdistanz unterbreitet wurde, unabhängig davon, ob es vom Fahrgast angenommen wurde.	%
Systemeffizienz	„Buchungskilometer“ geteilt durch „Fahrzeugkilometer“ .	–
Besetzungsquote	„Personenkilometer“ geteilt durch „Fahrzeugkilometer mit Fahrgästen“.	–
Umwegfaktor	„Personenkilometer“ geteilt durch „Buchungskilometer“ .	–
Leerkilometeranteil	„Fahrzeugkilometer ohne Fahrgäste“ geteilt durch „Fahrzeugkilometer“ .	–
Buchungsart	Anteil Sofortbuchung und Anteil Vorausbuchung (gemeinsam 100 %).	% / %

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Messgröße	Berechnungslogik	Dimension
Mittlere Laufdistanz	Mittelwert der Summe der Laufdistanzen von angefragtem Startpunkt bis zum Abholpunkt und von Absetzpunkt bis zum angefragten Zielpunkt für alle durchgeführten Fahrten. Die Laufdistanz wird jeweils im Fußwegenetz berechnet.	m
Mittlere Fahrt ­ distanz	Mittelwert der tatsächlichen Fahrt ­ distanzen von Abholung bis Absetzen, inkl. aller Umwege aufgrund von Pooling und Verkehrsumgehung. Entspricht „Personenkilometer“ geteilt durch „Fahrgäste“ .	km
Mittlere Fahrt ­ dauer	Mittelwert der tatsächlichen Fahrt ­ dauern von Abholung (Einchecken des Fahrgastes) bis Absetzen (Auschecken des Fahrgastes), inkl. aller Umwege aufgrund von Pooling und Verkehrsumgehung.	min

A.2 Energie- und THG-Bilanzierung sowie Deklaration des Systems *Bussi* (*DIN EN 16258*)

A.2.1 *Bussi* Strommix

Tab. A.2: Energie- und THG-Bilanzierung sowie Deklaration des Systems *Bussi* unter Strombezug des deutschen Strommixes (in Anlehnung an Bruder und Klemmer, 2024, Tab. 0-1, S. 130)

Voraussetzungen
Die Transportdienstleistung von <i>Bussi</i> erfolgt durch Hybridfahrzeuge (Ottokraftstoff-E5 und Strommix Deutschland) in einem Linienbedarfsverkehr und findet in Deutschland statt.
Die Fahrzeugflotte besteht vollständig aus fünf LEVC TX 5 (HRE) Vista Comfort Plus Vista-Fahrzeugen.
Die Gesamtfahrleistung des VOS_{Bussi} betrug im Jahr 2022 insgesamt 77.609 km, einschließlich 43.248 km, die ohne Fahrgast zurückgelegt wurden. Entsprechend wurden 34.361 km mit mindestens einem Fahrgast zurückgelegt. Es waren insgesamt 8.475 Buchungen _{durchgeführt} (Abholvorgänge) zu verzeichnen und es wurden 13.876 Fahrgäste transportiert.
Die Verbrauchswerte des LEVC TX 5 (HRE) Vista Comfort Plus Fahrzeugs beruhen auf den Angaben des Chassis des Fahrzeugmodells Volvo Recharge T8 AWD und wurden entsprechend des WLTP-Verfahrens ermittelt. Der durchschnittliche Verbrauch liegt demnach bei 1,35 l Ottokraftstoff E5 und 21,55 kWh Strom pro 100 km (nach DAT, 2022, S. 77). Das Reservefahrzeug vom Typ Nissan eNV200 wurde in der betriebsbezogenen THG-Bilanzierung nicht berücksichtigt, da es in den Buchungs- und Fahrleistungsdaten nicht als regulär eingesetztes Fahrzeug erfasst wurde. Im Rahmen der fahrzeugbezogenen Sensitivitätsanalyse wurde der Nissan eNV200 jedoch als Vergleichsfahrzeug berücksichtigt.
Die Transporttätigkeit des gesamten Fahrzeugbestandes betrug im Jahr 2022 56.259 Pkm und wurde durch eine Analyse der Datenschnittstellen ermittelt (siehe Kapitel 4.3).
Die Energiefaktoren für Ottokraftstoff-E5 (im Folgenden als Ottokraftstoff abgekürzt) wurden aus <i>DIN EN 16258</i> Tabelle A.2 (Anhang A) entnommen (nach DIN, 2013, S. 25).
Die Emissionsfaktoren für Strommix wurden vom Umweltbundesamt entnommen (nach Umweltbundesamt, 2024, Tab. 1).

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Die <i>WtW</i> -Energie- und THG-Emissionsfaktoren für den Strommix Deutschlands (im Folgenden abgekürzt als SM-DE) stammen aus den KLVN des LANUK bzw. des Umweltbundesamtes und stammen aus 2022 (nach LANUK, 2022, Emissionsfaktoren 2022 und Umweltbundesamt, 2024, Tab. 1).
Die <i>TtW</i> - Energie- und THG-Emissionsfaktoren für den Strommix Deutschland stammen aus der <i>DIN EN 16258</i> Anhang A.2.3 und A.2.4. (DIN, 2013, S. 30)
Schritt 1: Bestimmung der unterschiedlichen Teilstrecken der Transportdienstleistung
Die Transportdienstleistung besteht aus den gesamten Strecken, die durch Passagiere des Linienbedarfsverkehr im gesamten Betriebsgebiet <i>Bussis</i> in 2022 stattfanden.
Schritt 2: Berechnung des Energieverbrauchs und der THG-Emissionen jeder einzelnen Teilstrecke
Teilschritt 2.1: Festlegung des Fahrzeugeinsatz-Systems für dieses VOS
Das gewählte VOS_{Bussi} ist die Transportleistung für eine Person, die einen Kilometer mit dem Linienbedarfsverkehr zurücklegt.
Teilschritt 2.2: Berechnung des gesamten Kraftstoffverbrauchs für dieses VOS
$F(VOS_{Bussi}, \text{Ottokraftstoff}) = 77.609 \text{ km} \cdot \frac{1,351}{100 \text{ km}} = 1.047,71$
$F(VOS_{Bussi}, \text{Elektrizität}) = 77.609 \text{ km} \cdot \frac{21,55 \text{ kWh}}{100 \text{ km}} = 16.724,7 \text{ kWh}$
Teilschritt 2.3: Berechnung des gesamten Energieverbrauchs und der THG-Emissionen für dieses VOS
$E_W(VOS_{Bussi}, \text{Ottokraftstoff}) = F(VOS) \cdot e_W = 1.047,71 \cdot 38,4 \frac{\text{MJ}}{\text{l}} = 40.233 \text{ MJ}$
$G_W(VOS_{Bussi}, \text{Ottokraftstoff}) = F(VOS) \cdot g_W = 1.047,71 \cdot 2,8 \frac{\text{kg CO}_2\text{e}}{\text{l}} = 2.934 \text{ kg CO}_2\text{e}$
$E_t(VOS_{Bussi}, \text{Ottokraftstoff}) = F(VOS) \cdot e_t = 1.047,71 \cdot 31,7 \frac{\text{MJ}}{\text{l}} = 33.213 \text{ MJ}$
$G_t(VOS_{Bussi}, \text{Ottokraftstoff}) = F(VOS) \cdot g_t = 1.047,71 \cdot 2,3 \frac{\text{kg CO}_2\text{e}}{\text{l}} = 2.410 \text{ kg CO}_2\text{e}$
$E_W(VOS_{Bussi}, \text{SM-DE}) = F(VOS) \cdot e_W = 16.724,7 \text{ kWh} \cdot 9,7 \frac{\text{MJ}}{\text{kWh}} = 162.230 \text{ MJ}$
$G_W(VOS_{Bussi}, \text{SM-DE}) = F(VOS) \cdot g_W = 16.724,7 \text{ kWh} \cdot 0,498 \frac{\text{kg CO}_2\text{e}}{\text{kWh}} = 8.329 \text{ kg CO}_2\text{e}$
$E_t(VOS_{Bussi}, \text{SM-DE}) = F(VOS) \cdot e_t = 16.724,7 \text{ kWh} \cdot 3,6 \frac{\text{MJ}}{\text{kWh}} = 60.209 \text{ MJ}$
$G_t(VOS_{Bussi}, \text{SM-DE}) = F(VOS) \cdot g_t = 16.724,7 \text{ kWh} \cdot 0 \frac{\text{kg CO}_2\text{e}}{\text{kWh}} = 0 \text{ kg CO}_2\text{e}$
$E_W(VOS_{Bussi}, \text{Total}) = E_W(VOS_{Bussi}, \text{Ottokraftstoff}) + E_W(VOS_{Bussi}, \text{SM-DE}) = 202.463 \text{ MJ}$
$G_W(VOS_{Bussi}, \text{Total}) = G_W(VOS_{Bussi}, \text{Ottokraftstoff}) + G_W(VOS_{Bussi}, \text{SM-DE}) = 11.263 \text{ kg CO}_2\text{e}$
$E_t(VOS_{Bussi}, \text{Total}) = E_t(VOS_{Bussi}, \text{Ottokraftstoff}) + E_t(VOS_{Bussi}, \text{SM-DE}) = 93.422 \text{ MJ}$
Teilschritt 2.4: Allokation eines Anteils

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Die Transporttätigkeit wird in Personenkilometern [Pkm] angegeben.
$S(\text{pkm}_{Bussi}) = \frac{T(\text{pkm})}{T(\text{VOS}_{Bussi, \text{Total}})} = \frac{1}{56.259 \text{ pkm}} = 1,78 \cdot 10^{-5}$
$E_W(\text{pkm}_{Bussi, \text{Total}}) = E_W(\text{VOS}_{Bussi, \text{Total}}) \cdot S(\text{pkm}_{Bussi}) = 202.463 \text{ MJ} \cdot 1,78 \cdot 10^{-5} \text{ pkm}^{-1} = 3,6 \frac{\text{MJ}}{\text{pkm}}$
$G_W(\text{pkm}_{Bussi, \text{Total}}) = G_W(\text{VOS}_{Bussi, \text{Total}}) \cdot S(\text{pkm}_{Bussi}) = 11.263 \text{ kg CO}_2\text{e} \cdot 1,78 \cdot 10^{-5} \text{ pkm}^{-1} = 200 \frac{\text{g CO}_2\text{e}}{\text{pkm}}$
$E_t(\text{pkm}_{Bussi, \text{Total}}) = E_t(\text{VOS}_{Bussi, \text{Total}}) \cdot S(\text{pkm}_{Bussi}) = 93.422 \text{ MJ} \cdot 1,78 \cdot 10^{-5} \text{ pkm}^{-1} = 1,7 \frac{\text{MJ}}{\text{pkm}}$
$G_t(\text{pkm}_{Bussi, \text{Total}}) = G_t(\text{VOS}_{Bussi, \text{Total}}) \cdot S(\text{pkm}_{Bussi}) = 2.410 \text{ kg CO}_2\text{e} \cdot 1,78 \cdot 10^{-5} \text{ pkm}^{-1} = 43 \frac{\text{g CO}_2\text{e}}{\text{pkm}}$
Schritt 3: Addition der Ergebnisse für jede Teilstrecke
$E_W(\text{TS}) = E_W(\text{pkm}_{Bussi, \text{Total}}) = 3,6 \frac{\text{MJ}}{\text{pkm}}$
$G_W(\text{TS}) = G_W(\text{pkm}_{Bussi, \text{Total}}) = 200 \frac{\text{g CO}_2\text{e}}{\text{pkm}}$
$E_t(\text{TS}) = E_t(\text{pkm}_{Bussi, \text{Total}}) = 1,7 \frac{\text{MJ}}{\text{pkm}}$
$G_t(\text{TS}) = G_t(\text{pkm}_{Bussi, \text{Total}}) = 43 \frac{\text{g CO}_2\text{e}}{\text{pkm}}$

A.2.2 *Bussi* Ökostrom

Tab. A.3: Energie- und THG-Bilanzierung sowie Deklaration des Systems *Bussi* unter Strombezug von Ökostrom (in Anlehnung an Bruder und Klemmer, 2024, Tab. 0-2, S. 132)

Voraussetzungen
Die Transportdienstleistung von <i>Bussi</i> erfolgt durch Hybridfahrzeuge (Ottokraftstoff-E5 und Strommix Deutschland) in einem Linienbedarfsverkehr und findet in Deutschland statt.
Die Fahrzeugflotte besteht vollständig aus fünf LEVC TX 5 (HRE) Vista Comfort Plus-Fahrzeugen.
Die Gesamtfahrleistung des VOS_{Bussi} betrug im Jahr 2022 insgesamt 77.609 km, einschließlich 43.248 km, die ohne Fahrgast zurückgelegt wurden. Entsprechend wurden 34.361 km mit mindestens einem Fahrgast zurückgelegt. Es waren insgesamt 8.475 Buchungen durchgeführt (Abholvorgänge) zu verzeichnen und es wurden 13.876 Fahrgäste transportiert.
Die Verbrauchswerte des LEVC TX 5 (HRE) Vista Comfort Plus-Fahrzeugs beruhen auf den Angaben des Chassis des Fahrzeugmodells Volvo Recharge T8 AWD und wurden entsprechend des WLTP-Verfahrens ermittelt. Der durchschnittliche Verbrauch liegt demnach bei 1,35 l Ottokraftstoff E5 und 21,55 kWh Strom pro 100 km (nach DAT, 2022, S. 77).
Die Transporttätigkeit des gesamten Fahrzeugbestandes betrug im Jahr 2022 56.259 Pkm und wurde durch eine Analyse der Datenschnittstellen ermittelt (siehe Kapitel 4.3).
Die Energiefaktoren für Ottokraftstoff-E5 (im Folgenden als Ottokraftstoff abgekürzt) wurden aus <i>DIN EN 16258</i> Tabelle A.2 (Anhang A) entnommen (nach DIN, 2013, S. 25).
Die Emissionsfaktoren für Strommix wurden vom Umweltbundesamt entnommen (nach Umweltbundesamt, 2024, Tab. 1).
Die <i>WtW</i> -Energie- und THG-Emissionsfaktoren für den Ökostrom Deutschlands (im Folgenden abgekürzt als ÖS-DE) stammen aus den KLVN des LANUK bzw. des Umweltbundesamtes und stammen aus 2022 (nach LANUK, 2022, Emissionsfaktoren 2022 und Umweltbundesamt, 2024, Tab. 1).
Die <i>TtW</i> -Energie- und THG-Emissionsfaktoren für den Strommix Deutschland stammen aus der <i>DIN EN 16258</i> Anhang A.2.3 und A.2.4. (DIN, 2013, S. 30)

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Schritt 1: Bestimmung der unterschiedlichen Teilstrecken der Transportdienstleistung
Die Transportdienstleistung besteht aus den gesamten Strecken, die durch Passagiere des Linienbedarfsverkehr im gesamten Betriebsgebiet <i>Bussis</i> in 2022 stattfanden.
Schritt 2: Berechnung des Energieverbrauchs und der THG-Emissionen jeder einzelnen Teilstrecke
Teilschritt 2.1: Festlegung des Fahrzeugeinsatz-Systems für dieses VOS
Das gewählte VOS_{Bussi} ist die Transportleistung für eine Person, die einen Kilometer mit dem Linienbedarfsverkehr zurücklegt.
Teilschritt 2.2: Berechnung des gesamten Kraftstoffverbrauchs für dieses VOS
$F(VOS_{Bussi}, \text{Ottokraftstoff}) = 77.609 \text{ km} \cdot \frac{1,35 \text{ l}}{100 \text{ km}} = 1.047,71$
$F(VOS_{Bussi}, \text{Elektrizität}) = 77.609 \text{ km} \cdot \frac{21,55 \text{ kWh}}{100 \text{ km}} = 16.724,7 \text{ kWh}$
Teilschritt 2.3: Berechnung des gesamten Energieverbrauchs und der THG-Emissionen für dieses VOS
$E_W(VOS_{Bussi}, \text{Ottokraftstoff}) = F(VOS) \cdot e_W = 1.047,71 \cdot 38,4 \frac{\text{MJ}}{\text{l}} = 40.233 \text{ MJ}$
$G_W(VOS_{Bussi}, \text{Ottokraftstoff}) = F(VOS) \cdot g_W = 1.047,71 \cdot 2,8 \frac{\text{kg CO}_2\text{e}}{\text{l}} = 2.934 \text{ kg CO}_2\text{e}$
$E_t(VOS_{Bussi}, \text{Ottokraftstoff}) = F(VOS) \cdot e_t = 1.047,71 \cdot 31,7 \frac{\text{MJ}}{\text{l}} = 33.213 \text{ MJ}$
$G_t(VOS_{Bussi}, \text{Ottokraftstoff}) = F(VOS) \cdot g_t = 1.047,71 \cdot 2,3 \frac{\text{kg CO}_2\text{e}}{\text{l}} = 2.410 \text{ kg CO}_2\text{e}$
$E_W(VOS_{Bussi}, \text{ÖS-DE}) = F(VOS) \cdot e_W = 16.724,7 \text{ kWh} \cdot 9,7 \frac{\text{MJ}}{\text{kWh}} = 162.230 \text{ MJ}$
$G_W(VOS_{Bussi}, \text{ÖS-DE}) = F(VOS) \cdot g_W = 16.724,7 \text{ kWh} \cdot 0,056 \frac{\text{kg CO}_2\text{e}}{\text{kWh}} = 937 \text{ kg CO}_2\text{e}$
$E_t(VOS_{Bussi}, \text{ÖS-DE}) = F(VOS) \cdot e_t = 16.724,7 \text{ kWh} \cdot 3,6 \frac{\text{MJ}}{\text{kWh}} = 60.209 \text{ MJ}$
$G_t(VOS_{Bussi}, \text{ÖS-DE}) = F(VOS) \cdot g_t = 16.724,7 \text{ kWh} \cdot 0 \frac{\text{kg CO}_2\text{e}}{\text{kWh}} = 0 \text{ kg CO}_2\text{e}$
$E_W(VOS_{Bussi}, \text{Total}) = E_W(VOS_{Bussi}, \text{Ottokraftstoff}) + E_W(VOS_{Bussi}, \text{ÖS-DE}) = 202.462 \text{ MJ}$
$G_W(VOS_{Bussi}, \text{Total}) = G_W(VOS_{Bussi}, \text{Ottokraftstoff}) + G_W(VOS_{Bussi}, \text{ÖS-DE}) = 3.877 \text{ kg CO}_2\text{e}$
$E_t(VOS_{Bussi}, \text{Total}) = E_t(VOS_{Bussi}, \text{Ottokraftstoff}) + E_t(VOS_{Bussi}, \text{ÖS-DE}) = 93.422 \text{ MJ}$
Teilschritt 2.4: Allokation eines Anteils
Die Transporttätigkeit wird in Personenkilometern [Pkm] angegeben.
$S(\text{pkm}_{Bussi}) = \frac{T(\text{pkm})}{T(VOS_{Bussi}, \text{Total})} = \frac{1}{56.259 \text{ pkm}} = 1,78 \cdot 10^{-5}$
$E_W(\text{pkm}_{Bussi}, \text{Total}) = E_W(VOS_{Bussi}, \text{Total}) \cdot S(\text{pkm}_{Bussi}) = 202.462 \text{ MJ} \cdot 1,78 \cdot 10^{-5} \text{ pkm}^{-1} = 3,6 \frac{\text{MJ}}{\text{pkm}}$

Fortsetzung auf der nächsten Seite

$G_W(\text{pkm}_{Bussi, \text{Total}}) = G_W(\text{VOS}_{Bussi, \text{Total}}) \cdot S(\text{pkm}_{Bussi}) = 3.877 \text{ kg CO}_2\text{e} \cdot 1,78 \cdot 10^{-5} \text{ pkm}^{-1} = 69 \frac{\text{g CO}_2\text{e}}{\text{pkm}}$
$E_t(\text{pkm}_{Bussi, \text{Total}}) = E_t(\text{VOS}_{Bussi, \text{Total}}) \cdot S(\text{pkm}_{Bussi}) = 93.422 \text{ MJ} \cdot 1,78 \cdot 10^{-5} \text{ pkm}^{-1} = 1,7 \frac{\text{MJ}}{\text{pkm}}$
$G_t(\text{pkm}_{Bussi, \text{Total}}) = G_t(\text{VOS}_{Bussi, \text{Total}}) \cdot S(\text{pkm}_{Bussi}) = 2.410 \text{ kg CO}_2\text{e} \cdot 1,78 \cdot 10^{-5} \text{ pkm}^{-1} = 43 \frac{\text{g CO}_2\text{e}}{\text{pkm}}$
Schritt 3: Addition der Ergebnisse für jede Teilstrecke
$E_W(\text{TS}) = E_W(\text{pkm}_{Bussi, \text{Total}}) = 3,6 \frac{\text{MJ}}{\text{pkm}}$
$G_W(\text{TS}) = G_W(\text{pkm}_{Bussi, \text{Total}}) = 69 \frac{\text{g CO}_2\text{e}}{\text{pkm}}$
$E_t(\text{TS}) = E_t(\text{pkm}_{Bussi, \text{Total}}) = 1,7 \frac{\text{MJ}}{\text{pkm}}$
$G_t(\text{TS}) = G_t(\text{pkm}_{Bussi, \text{Total}}) = 43 \frac{\text{g CO}_2\text{e}}{\text{pkm}}$

A.3 Energie- und THG-Bilanzierung sowie Deklaration des Systems *G-Mobil* (*DIN EN 16258*)

A.3.1 *G-Mobil* Strommix

Tab. A.4: Energie- und THG-Bilanzierung sowie Deklaration des Systems *G-Mobils* unter Strombezug des deutschen Strommixes (in Anlehnung an Bruder und Klemmer, 2024, Tab. 0-3, S. 134)

Voraussetzungen
Die Transportdienstleistung des <i>G-Mobil</i> (im Folgenden mit <i>G-Mobil</i> abgekürzt) erfolgt durch mehrere Fahrzeugtypen in einem Linienbedarfsverkehr und findet in Deutschland statt.
<i>Die Fahrzeugflotte setzt sich aus vier LEVC TX 5 (HRE) Vista Comfort Plus und sechs Sitzplätzen, zwei eVito Tourer PRO lang als batterieelektrische Fahrzeuge mit jeweils drei Sitzplätzen und barrierefreiem Zugang, einem Mercedes Vito lang 114 CDI mit Dieselmotor und sechs Sitzplätzen sowie einem Sprinter Tourer 319 CDI mit Dieselmotor und acht Sitzplätzen zusammen.</i>
Die Gesamtfahrleistung des VOS _{<i>G-Mobil</i>} betrug im Jahr 2022 insgesamt 335.437 km, einschließlich 151.682 km, die ohne Fahrgast zurückgelegt wurden. Entsprechend wurden 183.755 km mit mindestens einem Fahrgast zurückgelegt. Es waren insgesamt 60.043 Buchungen _{durchgeführt} (Abholvorgänge) zu verzeichnen und es wurden 74.561 Fahrgäste transportiert.
Die Verbrauchswerte des LEVC TX 5 (HRE) Vista Comfort Plus-Fahrzeugs (im Folgenden als FZ1 bezeichnet) beruhen auf den Angaben des Chassis des Fahrzeugmodells Volvo Recharge T8 AWD und wurden entsprechend des WLTP-Verfahrens ermittelt. Der durchschnittliche Verbrauch liegt demnach bei 1,35 l Ottokraftstoff E5 und 21,55 kWh Strom pro 100 km (nach DAT, 2022, S. 77).
Die Verbrauchswerte des eVito Tourer PRO lang (90 kWh) (im Folgenden als FZ2 bezeichnet) wurden entsprechend des NEFZ-Verfahrens ermittelt. Der durchschnittliche Verbrauch liegt bei 29,95 kWh Strom (Strommix Deutschland) pro 100 km (nach DAT, 2022, S. 44).
Die Verbrauchswerte des Sprinter (Tourer) 319 CDI lang (im Folgenden als FZ3 bezeichnet) wurden entsprechend des NEFZ-Verfahrens ermittelt. Der durchschnittliche Verbrauch liegt bei 12,3 l Dieselmotor-B7 pro 100 km (nach DAT, 2022, S. 44–45).
Die Verbrauchswerte des Vito lang 114 CDI (im Folgenden als FZ4 bezeichnet) wurden entsprechend des NEFZ-Verfahrens ermittelt. Der durchschnittliche Verbrauch liegt bei 8,5 l Dieselmotor-B7 pro 100km (nach DAT, 2022, S. 44).

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Die Transporttätigkeit des gesamten Fahrzeugbestandes betrug im Jahr 2022 228.185 Pkm und wurde durch eine Analyse der Datenschnittstellen ermittelt (siehe Kapitel 4.3).
Die Energiefaktoren für Ottokraftstoff-E5 (im Folgenden als Ottokraftstoff abgekürzt) wurden aus <i>DIN EN 16258</i> Tabelle A.2 (Anhang A) entnommen (nach DIN, 2013, S. 25).
Die Energie- und THG-Emissionsfaktoren für Dieselmotoren-B7 (im Folgenden als Dieselmotoren abgekürzt) wurden aus <i>DIN EN 16258</i> Tabelle A.4 (Anhang A) entnommen (nach DIN, 2013, S. 27).
Die Emissionsfaktoren für den Strommix wurden den Angaben des Umweltbundesamtes entnommen (Umweltbundesamt, 2024, Tab. 1).
Die <i>WtW</i> -Energie- und THG-Emissionsfaktoren für den Strommix Deutschlands (im Folgenden abgekürzt als SM-DE) stammen aus den KLV des LANUK bzw. des Umweltbundesamtes und stammen aus 2022 (nach LANUK, 2022, Emissionsfaktoren 2022 und Umweltbundesamt, 2024, Tab. 1).
Die TtW- Energie- und THG-Emissionsfaktoren für den Strommix Deutschland stammen aus der <i>DIN EN 16258</i> Anhang A.2.3 und A.2.4. (DIN, 2013, S. 30)
Schritt 1: Bestimmung der unterschiedlichen Teilstrecken der Transportdienstleistung
Die Transportdienstleistung besteht aus den gesamten Strecken, die durch Passagiere des Linienbedarfsverkehr im gesamten Betriebsgebiet <i>G-Mobils</i> in 2022 stattfanden.
Schritt 2: Berechnung des Energieverbrauchs und der THG-Emissionen jeder einzelnen Teilstrecke
Teilschritt 2.1: Festlegung des Fahrzeugeinsatz-Systems für dieses VOS
Das gewählte VOS _{<i>G-Mobil</i>} ist die Transportleistung für eine Person, die einen Kilometer mit dem Linienbedarfsverkehr zurücklegt.
Teilschritt 2.2: Berechnung des gesamten Kraftstoffverbrauchs für dieses VOS
$F(\text{VOS}_{G-Mobil, FZ1, \text{Ottokraftstoff}}) = 172.243 \text{ km} \cdot \frac{1,351}{100 \text{ km}} = 2.325,31$
$F(\text{VOS}_{G-Mobil, FZ1, \text{Elektrizität}}) = 172.243 \text{ km} \cdot \frac{21,55 \text{ kWh}}{100 \text{ km}} = 37.118,4 \text{ kWh}$
$F(\text{VOS}_{G-Mobil, FZ2, \text{Elektrizität}}) = 78.244 \text{ km} \cdot \frac{29,95 \text{ kWh}}{100 \text{ km}} = 23.434,1 \text{ kWh}$
$F(\text{VOS}_{G-Mobil, FZ3, \text{Dieselmotoren}}) = 22.900 \text{ km} \cdot \frac{12,31}{100 \text{ km}} = 2.816,71$
$F(\text{VOS}_{G-Mobil, FZ4, \text{Dieselmotoren}}) = 62.050 \text{ km} \cdot \frac{8,51}{100 \text{ km}} = 5.274,31$
$F(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{Ottokraftstoff}}) = F(\text{VOS}_{G-Mobil, FZ1, \text{Ottokraftstoff}}) = 2.325,31$

Fortsetzung auf der nächsten Seite

$F(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{Dieselkraftstoff}}) = F(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{FZ3, Dieselkraftstoff}}) + F(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{FZ4, Dieselkraftstoff}}) = 8.090,91$
$F(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{Elektrizität}}) = F(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{FZ1, Elektrizität}}) + F(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{FZ2, Elektrizität}}) = 60.552,4 \text{ kWh}$
Teilschritt 2.3: Berechnung des gesamten Energieverbrauchs und der THG-Emissionen für dieses VOS
$E_W(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{Ottokraftstoff}}) = F(\text{VOS}) \cdot e_W = 2.325,31 \cdot 38,4 \frac{\text{MJ}}{\text{l}} = 89.291 \text{ MJ}$
$G_W(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{Ottokraftstoff}}) = F(\text{VOS}) \cdot g_W = 2.325,31 \cdot 2,8 \frac{\text{kg CO}_2\text{e}}{\text{l}} = 6.511 \text{ kg CO}_2\text{e}$
$E_t(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{Ottokraftstoff}}) = F(\text{VOS}) \cdot e_t = 2.325,31 \cdot 31,7 \frac{\text{MJ}}{\text{l}} = 73.711 \text{ MJ}$
$G_t(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{Ottokraftstoff}}) = F(\text{VOS}) \cdot g_t = 2.325,31 \cdot 2,3 \frac{\text{kg CO}_2\text{e}}{\text{l}} = 5.348 \text{ kg CO}_2\text{e}$
$E_W(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{Dieselkraftstoff}}) = F(\text{VOS}) \cdot e_W = 8.090,91 \cdot 44,5 \frac{\text{MJ}}{\text{l}} = 360.046 \text{ MJ}$
$G_W(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{Dieselkraftstoff}}) = F(\text{VOS}) \cdot g_W = 8.090,91 \cdot 3,17 \frac{\text{kg CO}_2\text{e}}{\text{l}} = 25.648 \text{ kg CO}_2\text{e}$
$E_t(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{Dieselkraftstoff}}) = F(\text{VOS}) \cdot e_t = 8.090,91 \cdot 35,7 \frac{\text{MJ}}{\text{l}} = 288.846 \text{ MJ}$
$G_t(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{Dieselkraftstoff}}) = F(\text{VOS}) \cdot g_t = 8.090,91 \cdot 2,48 \frac{\text{kg CO}_2\text{e}}{\text{l}} = 20.066 \text{ kg CO}_2\text{e}$
$E_W(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{SM-DE}}) = F(\text{VOS}) \cdot e_W = 60.552,4 \text{ kWh} \cdot 9,7 \frac{\text{MJ}}{\text{kWh}} = 587.358 \text{ MJ}$
$G_W(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{SM-DE}}) = F(\text{VOS}) \cdot g_W = 60.552,4 \text{ kWh} \cdot 0,498 \frac{\text{kg CO}_2\text{e}}{\text{kWh}} = 30.155 \text{ kg CO}_2\text{e}$
$E_t(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{SM-DE}}) = F(\text{VOS}) \cdot e_t = 60.552,4 \text{ kWh} \cdot 3,6 \frac{\text{MJ}}{\text{kWh}} = 217.989 \text{ MJ}$
$G_t(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{SM-DE}}) = F(\text{VOS}) \cdot g_t = 60.552,4 \text{ kWh} \cdot 0 \frac{\text{kg CO}_2\text{e}}{\text{kWh}} = 0 \text{ kg CO}_2\text{e}$
$E_W(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{Total}}) = E_W(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{Ottokraftstoff}}) + E_W(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{Dieselkraftstoff}}) + E_W(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{SM-DE}}) = 1.036.695 \text{ MJ}$
$G_W(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{Total}}) = G_W(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{Ottokraftstoff}}) + G_W(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{Dieselkraftstoff}}) + G_W(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{SM-DE}}) = 62.314 \text{ kg CO}_2\text{e}$
$E_t(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{Total}}) = E_t(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{Ottokraftstoff}}) + E_t(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{Dieselkraftstoff}}) + E_t(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{SM-DE}}) = 580.546 \text{ MJ}$
$G_t(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{Total}}) = G_t(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{Ottokraftstoff}}) + G_t(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{Dieselkraftstoff}}) + G_t(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{SM-DE}}) = 25.414 \text{ kg CO}_2\text{e}$
Teilschritt 2.4: Allokation eines Anteils
Die Transporttätigkeit wird in Personenkilometern [Pkm] angegeben.
$S(\text{pkm}_{G-Mobil}) = \frac{T(\text{pkm})}{T(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{Total}})} = \frac{1}{228.186 \text{ pkm}} = 4,38 \cdot 10^{-6}$
$E_W(\text{pkm}_{G-Mobil, \text{Total}}) = E_W(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{Total}}) \cdot S(\text{pkm}_{G-Mobil}) = 1.036.695 \text{ MJ} \cdot 4,38 \cdot 10^{-6} \text{ pkm}^{-1} = 4,5 \frac{\text{MJ}}{\text{pkm}}$

Fortsetzung auf der nächsten Seite

$G_W(\text{pkm}_{G-Mobil, \text{Total}}) = G_W(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{Total}}) \cdot S(\text{pkm}_{G-Mobil}) = 62.314 \text{ kg CO}_2\text{e} \cdot 4,38 \cdot 10^{-6} \text{ pkm}^{-1} = 273 \frac{\text{g CO}_2\text{e}}{\text{pkm}}$
$E_t(\text{pkm}_{G-Mobil, \text{Total}}) = E_t(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{Otto}}) \cdot S(\text{pkm}_{G-Mobil, \text{Total}}) = 580.546 \text{ MJ} \cdot 4,38 \cdot 10^{-6} \text{ pkm}^{-1} = 2,5 \frac{\text{MJ}}{\text{pkm}}$
$G_t(\text{pkm}_{G-Mobil, \text{Total}}) = G_t(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{Otto}}) \cdot S(\text{pkm}_{G-Mobil, \text{Total}}) = 25.414 \text{ kg CO}_2\text{e} \cdot 4,38 \cdot 10^{-6} \text{ pkm}^{-1} = 111,4 \frac{\text{g CO}_2\text{e}}{\text{pkm}}$
Schritt 3: Addition der Ergebnisse für jede Teilstrecke
$E_W(\text{TS}) = E_W(\text{pkm}_{G-Mobil, \text{Total}}) = 4,5 \frac{\text{MJ}}{\text{pkm}}$
$G_W(\text{TS}) = G_W(\text{pkm}_{G-Mobil, \text{Total}}) = 273 \frac{\text{g CO}_2\text{e}}{\text{pkm}}$
$E_t(\text{TS}) = E_t(\text{pkm}_{G-Mobil, \text{Total}}) = 2,5 \frac{\text{MJ}}{\text{pkm}}$
$G_t(\text{TS}) = G_t(\text{pkm}_{G-Mobil, \text{Total}}) = 111,4 \frac{\text{g CO}_2\text{e}}{\text{pkm}}$

A.3.2 *G-Mobil* Ökostrom

Tab. A.5: Energie- und THG-Bilanzierung sowie Deklaration des Systems *G-Mobil* unter Strombezug von Ökostrom (in Anlehnung an Bruder und Klemmer, 2024, Tab. 0-4, S. 136)

Voraussetzungen
Die Transportdienstleistung des <i>G-Mobil</i> (im Folgenden mit <i>G-Mobil</i> abgekürzt) erfolgt durch mehrere Fahrzeugtypen in einem Linienbedarfsverkehr und findet in Deutschland statt.
Die Fahrzeugflotte setzt sich aus vier LEVC TX 5 (HRE) Vista Comfort Plus und sechs Sitzplätzen, zwei eVito Tourer PRO lang als batterieelektrische Fahrzeuge mit jeweils drei Sitzplätzen und barrierefreiem Zugang, einem Mercedes Vito lang 114 CDI mit Dieselmotor und sechs Sitzplätzen sowie einem Sprinter Tourer 319 CDI mit Dieselmotor und acht Sitzplätzen zusammen.
Die Gesamtfahrleistung des $VOS_{G-Mobil}$ betrug im Jahr 2022 insgesamt 335.437 km, einschließlich 151.682 km, die ohne Fahrgast zurückgelegt wurden. Entsprechend wurden 183.755 km mit mindestens einem Fahrgast zurückgelegt. Es waren insgesamt 60.043 Buchungen _{durchgeführt} (Abholvorgänge) zu verzeichnen und es wurden 74.561 Fahrgäste transportiert.
Die Verbrauchswerte des LEVC TX 5 (HRE) Vista Comfort Plus-Fahrzeugs (im Folgenden als FZ1 bezeichnet) beruhen auf den Angaben des Chassis des Fahrzeugmodells Volvo Recharge T8 AWD und wurden entsprechend des WLTP-Verfahrens ermittelt. Der durchschnittliche Verbrauch liegt demnach bei 1,35 l Ottokraftstoff E5 und 21,55 kWh Strom pro 100 km (nach DAT, 2022, S. 77).
Die Verbrauchswerte des eVito Tourer PRO lang (90 kWh) (im Folgenden als FZ2 bezeichnet) wurden entsprechend des NEFZ-Verfahrens ermittelt. Der durchschnittliche Verbrauch liegt bei 29,95 kWh Strom pro 100 km (nach DAT, 2022, S. 44).
Die Verbrauchswerte des Sprinter (Tourer) 319 CDI lang (im Folgenden als FZ3 bezeichnet) wurden entsprechend des NEFZ-Verfahrens ermittelt. Der durchschnittliche Verbrauch liegt bei 12,3 l Dieselkraftstoff-B7 pro 100 km (nach DAT, 2022, S. 44–45).
Die Verbrauchswerte des Vito lang 114 CDI (im Folgenden als FZ4 bezeichnet) wurden entsprechend des NEFZ-Verfahrens ermittelt. Der durchschnittliche Verbrauch liegt bei 8,5 l Dieselkraftstoff-B7 pro 100km (nach DAT, 2022, S. 44).
Die Transporttätigkeit des gesamten Fahrzeugbestandes betrug im Jahr 2022 228.185 Pkm und wurde durch eine Analyse der Datenschnittstellen ermittelt (siehe Kapitel 4.3).

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Die Energiefaktoren für Ottokraftstoff-E5 (im Folgenden als Ottokraftstoff abgekürzt) wurden aus <i>DIN EN 16258</i> Tabelle A.2 (Anhang A) entnommen (nach DIN, 2013, S. 25).
Die Energie- und THG-Emissionsfaktoren für Dieselkraftstoff-B7 (im Folgenden als Dieselkraftstoff abgekürzt) wurden aus <i>DIN EN 16258</i> Tabelle A.4 (Anhang A) entnommen (nach DIN, 2013, S. 27).
Die Emissionsfaktoren für den Strommix wurden den Angaben des Umweltbundesamtes entnommen (Umweltbundesamt, 2024, Tab. 1).
Die <i>WtW</i> -Energie- und THG-Emissionsfaktoren für den Ökostrom Deutschlands (im Folgenden abgekürzt als SM-DE) stammen aus den KLV des LANUK bzw. des Umweltbundesamtes und stammen aus 2022 (nach LANUK, 2022, Emissionsfaktoren 2022 und Umweltbundesamt, 2024, Tab. 1).
Die <i>TtW</i> - Energie- und THG-Emissionsfaktoren für den Ökostrom Deutschland stammen aus der <i>DIN EN 16258</i> Anhang A.2.3 und A.2.4. (DIN, 2013, S. 30)
Schritt 1: Bestimmung der unterschiedlichen Teilstrecken der Transportdienstleistung
Die Transportdienstleistung besteht aus den gesamten Strecken, die durch Passagiere des Linienbedarfsverkehr im gesamten Betriebsgebiet <i>G-Mobils</i> in 2022 stattfanden.
Schritt 2: Berechnung des Energieverbrauchs und der THG-Emissionen jeder einzelnen Teilstrecke
Teilschritt 2.1: Festlegung des Fahrzeugeinsatz-Systems für dieses VOS
Das gewählte $VOS_{G-Mobil}$ ist die Transportleistung für eine Person, die einen Kilometer mit dem Linienbedarfsverkehr zurücklegt.
Teilschritt 2.2: Berechnung des gesamten Kraftstoffverbrauchs für dieses VOS
$F(VOS_{G-Mobil}, FZ1, \text{Ottokraftstoff}) = 172.243 \text{ km} \cdot \frac{1,351}{100 \text{ km}} = 2,325,31$
$F(VOS_{G-Mobil}, FZ1, \text{Elektrizität}) = 172.243 \text{ km} \cdot \frac{21,55 \text{ kWh}}{100 \text{ km}} = 37.118,4 \text{ kWh}$
$F(VOS_{G-Mobil}, FZ2, \text{Elektrizität}) = 78.244 \text{ km} \cdot \frac{29,95 \text{ kWh}}{100 \text{ km}} = 23.434,1 \text{ kWh}$
$F(VOS_{G-Mobil}, FZ3, \text{Dieselkraftstoff}) = 22.900 \text{ km} \cdot \frac{12,31}{100 \text{ km}} = 2.816,71$
$F(VOS_{G-Mobil}, FZ4, \text{Dieselkraftstoff}) = 62.050 \text{ km} \cdot \frac{8,51}{100 \text{ km}} = 5.274,31$
$F(VOS_{G-Mobil}, \text{Ottokraftstoff}) = F(VOS_{G-Mobil}, FZ1, \text{Ottokraftstoff}) = 2.325,31$
$F(VOS_{G-Mobil}, \text{Dieselkraftstoff}) = F(VOS_{G-Mobil}, FZ3, \text{Dieselkraftstoff}) + F(VOS_{G-Mobil}, FZ4, \text{Dieselkraftstoff}) = 8.090,91$
$F(VOS_{G-Mobil}, \text{Elektrizität}) = F(VOS_{G-Mobil}, FZ1, \text{Elektrizität}) + F(VOS_{G-Mobil}, FZ2, \text{Elektrizität}) = 60.552,4 \text{ kWh}$

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Teilschritt 2.3: Berechnung des gesamten Energieverbrauchs und der THG-Emissionen für dieses VOS
$E_W(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{Ottokraftstoff}}) = F(\text{VOS}) \cdot e_W = 2.325,31 \cdot 38,4 \frac{\text{MJ}}{\text{l}} = 89.291 \text{ MJ}$
$G_W(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{Ottokraftstoff}}) = F(\text{VOS}) \cdot g_W = 2.325,31 \cdot 2,8 \frac{\text{kg CO}_2\text{e}}{\text{l}} = 6.511 \text{ kg CO}_2\text{e}$
$E_t(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{Ottokraftstoff}}) = F(\text{VOS}) \cdot e_t = 2.325,31 \cdot 31,7 \frac{\text{MJ}}{\text{l}} = 73.711 \text{ MJ}$
$G_t(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{Ottokraftstoff}}) = F(\text{VOS}) \cdot g_t = 2.325,31 \cdot 2,3 \frac{\text{kg CO}_2\text{e}}{\text{l}} = 5.348 \text{ kg CO}_2\text{e}$
$E_W(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{Dieselkraftstoff}}) = F(\text{VOS}) \cdot e_W = 8.090,91 \cdot 44,5 \frac{\text{MJ}}{\text{l}} = 360.046 \text{ MJ}$
$G_W(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{Dieselkraftstoff}}) = F(\text{VOS}) \cdot g_W = 8.090,91 \cdot 3,17 \frac{\text{kg CO}_2\text{e}}{\text{l}} = 25.684 \text{ kg CO}_2\text{e}$
$E_t(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{Dieselkraftstoff}}) = F(\text{VOS}) \cdot e_t = 8.090,91 \cdot 35,7 \frac{\text{MJ}}{\text{l}} = 288.846 \text{ MJ}$
$G_t(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{Dieselkraftstoff}}) = F(\text{VOS}) \cdot g_t = 8.090,91 \cdot 2,48 \frac{\text{kg CO}_2\text{e}}{\text{l}} = 20.066 \text{ kg CO}_2\text{e}$
$E_W(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{ÖS-DE}}) = F(\text{VOS}) \cdot e_W = 60.552,4 \text{ kWh} \cdot 9,7 \frac{\text{MJ}}{\text{kWh}} = 587.358 \text{ MJ}$
$G_W(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{ÖS-DE}}) = F(\text{VOS}) \cdot g_W = 60.552,4 \text{ kWh} \cdot 0,056 \frac{\text{kg CO}_2\text{e}}{\text{kWh}} = 3.390,93 \text{ kg CO}_2\text{e}$
$E_t(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{ÖS-DE}}) = F(\text{VOS}) \cdot e_t = 60.552,4 \text{ kWh} \cdot 3,6 \frac{\text{MJ}}{\text{kWh}} = 217.989 \text{ MJ}$
$G_t(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{ÖS-DE}}) = F(\text{VOS}) \cdot g_t = 60.552,4 \text{ kWh} \cdot 0 \frac{\text{kg CO}_2\text{e}}{\text{kWh}} = 0 \text{ kg CO}_2\text{e}$
$E_W(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{Total}}) = E_W(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{Ottokraftstoff}}) + E_W(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{Dieselkraftstoff}}) + E_W(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{ÖS-DE}}) = 1.036.695 \text{ MJ}$
$G_W(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{Total}}) = G_W(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{Ottokraftstoff}}) + G_W(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{Dieselkraftstoff}}) + G_W(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{ÖS-DE}}) = 35.585 \text{ kg CO}_2\text{e}$
$E_t(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{Total}}) = E_t(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{Ottokraftstoff}}) + E_t(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{Dieselkraftstoff}}) + E_t(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{ÖS-DE}}) = 580.546 \text{ MJ}$
$G_t(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{Total}}) = G_t(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{Ottokraftstoff}}) + G_t(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{Dieselkraftstoff}}) + G_t(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{ÖS-DE}}) = 35.585 \text{ kg CO}_2\text{e}$
Teilschritt 2.4: Allokation eines Anteils
Die Transporttätigkeit wird in Personenkilometern [Pkm] angegeben.
$S(\text{pkm}_{G-Mobil}) = \frac{T(\text{pkm})}{T(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{Total}})} = \frac{1}{228.185 \text{ pkm}} = 4,38 \cdot 10^{-6}$
$E_W(\text{pkm}_{G-Mobil, \text{Total}}) = E_W(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{Total}}) \cdot S(\text{pkm}_{G-Mobil}) = 1.036.695 \text{ MJ} \cdot 4,38 \cdot 10^{-6} \text{ pkm}^{-1} = 4,5 \frac{\text{MJ}}{\text{pkm}}$
$G_W(\text{pkm}_{G-Mobil, \text{Total}}) = G_W(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{Total}}) \cdot S(\text{pkm}_{G-Mobil}) = 35.585 \text{ kg CO}_2\text{e} \cdot 4,38 \cdot 10^{-6} \text{ pkm}^{-1} = 156 \frac{\text{g CO}_2\text{e}}{\text{pkm}}$
$E_t(\text{pkm}_{G-Mobil, \text{Total}}) = E_t(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{Otto}}) \cdot S(\text{pkm}_{G-Mobil, \text{Total}}) = 580.546 \text{ MJ} \cdot 4,38 \cdot 10^{-6} \text{ pkm}^{-1} = 2,5 \frac{\text{MJ}}{\text{pkm}}$

Fortsetzung auf der nächsten Seite

$$G_t(\text{pkm}_{G-Mobil, \text{Total}}) = G_t(\text{VOS}_{G-Mobil, \text{Otto}}) \cdot S(\text{pkm}_{G-Mobil, \text{Total}}) = 25,414 \text{ kg CO}_2\text{e} \cdot 4,38 \cdot 10^{-6} \text{ pkm}^{-1} = 111,4 \frac{\text{g CO}_2\text{e}}{\text{pkm}}$$

Schritt 3: Addition der Ergebnisse für jede Teilstrecke

$$E_W(\text{TS}) = E_W(\text{pkm}_{G-Mobil, \text{Total}}) = 4,5 \frac{\text{MJ}}{\text{pkm}}$$

$$G_W(\text{TS}) = G_W(\text{pkm}_{G-Mobil, \text{Total}}) = 156 \frac{\text{g CO}_2\text{e}}{\text{pkm}}$$

$$E_t(\text{TS}) = E_t(\text{pkm}_{G-Mobil, \text{Total}}) = 2,5 \frac{\text{MJ}}{\text{pkm}}$$

$$G_t(\text{TS}) = G_t(\text{pkm}_{G-Mobil, \text{Total}}) = 111,4 \frac{\text{g CO}_2\text{e}}{\text{pkm}}$$

A.4 Energie- und THG-Bilanzierung sowie Deklaration des Systems *kommit-Shuttle* (*DIN EN 16258*)

A.4.1 *kommit-Shuttle* Strommix

Tab. A.6: Energie- und THG-Bilanzierung sowie Deklaration des Systems *kommit-Shuttle* unter Strombezug des deutschen Strommixes (in Anlehnung an Bruder und Klemmer, 2024, Tab. 0-5, S. 137)

Voraussetzungen
Die Transportdienstleistung des <i>kommit-Shuttles</i> (im Folgenden mit Kommit abgekürzt) erfolgt durch Hybridfahrzeuge (Ottokraftstoff-E5 und Strommix DE) in einem Linienbedarfsverkehr und findet in Deutschland statt.
Die Fahrzeugflotte besteht aus zwei LEVC TX 5 (HRE) Vista Comfort Plus-Fahrzeugen.
Die Gesamtfahrleistung des VOS_{kommit} betrug im Jahr 2022 insgesamt 116.958 km, einschließlich 62.351 km, die ohne Fahrgast zurückgelegt wurden. Entsprechend wurden 54.607 km mit mindestens einem Fahrgast zurückgelegt. Es waren insgesamt 21.908 Buchungen _{durchgeführt} (Abholvorgänge) zu verzeichnen und es wurden 26.280 Fahrgäste transportiert.
Die Verbrauchswerte des LEVC TX 5 (HRE) Vista Comfort Plus-Fahrzeugs beruhen auf den Angaben des Chassis des Fahrzeugmodells Volvo Recharge T8 AWD und wurden entsprechend des WLTP-Verfahrens ermittelt. Der durchschnittliche Verbrauch liegt demnach bei 1,35 l Ottokraftstoff E5 und 21,55 kWh Strom pro 100 km (nach DAT, 2022, S. 77).
Die Transporttätigkeit des gesamten Fahrzeugbestandes betrug im Jahr 2022 65.504 Pkm und wurde durch eine Analyse der Datenschnittstellen ermittelt (siehe Kapitel 4.3).
Die Energiefaktoren für Ottokraftstoff-E5 (im Folgenden als Ottokraftstoff abgekürzt) wurden aus <i>DIN EN 16258</i> , Tabelle A.2 (Anhang A), entnommen (nach DIN, 2013, S. 25).
Die Emissionsfaktoren für den Strommix wurden den Angaben des Umweltbundesamtes entnommen (Umweltbundesamt, 2024, Tab. 1).
Die <i>WtW</i> -Energie- und THG-Emissionsfaktoren für den Strommix Deutschlands (im Folgenden abgekürzt als SM-DE) stammen aus den KLVN des LANUK bzw. aus Angaben des Umweltbundesamtes für das Jahr 2022 (nach LANUK, 2022, Emissionsfaktoren 2022 und Umweltbundesamt, 2024, Tab. 1).
<i>Fortsetzung auf der nächsten Seite</i>

Die TtW-Energie- und THG-Emissionsfaktoren für den Strommix Deutschland stammen aus der <i>DIN EN 16258</i> , Anhang A.2.3 und A.2.4 (DIN, 2013, S. 30).
Schritt 1: Bestimmung der unterschiedlichen Teilstrecken der Transportdienstleistung
Die Transportdienstleistung besteht aus den gesamten Strecken, die durch Passagiere des Linienbedarfsverkehrs im gesamten Betriebsgebiet des <i>kommit-Shuttles</i> im Jahr 2022 stattfanden.
Schritt 2: Berechnung des Energieverbrauchs und der THG-Emissionen jeder einzelnen Teilstrecke
Teilschritt 2.1: Festlegung des Fahrzeugeinsatz-Systems für dieses VOS
Das gewählte VOS_{kommit} ist die Transportleistung für eine Person, die einen Kilometer mit dem Linienbedarfsverkehr zurücklegt.
Teilschritt 2.2: Berechnung des gesamten Kraftstoffverbrauchs für dieses VOS
$F(VOS_{\text{Kommit}}, \text{Ottokraftstoff}) = 116.958 \text{ km} \cdot \frac{1,351}{100 \text{ km}} = 1.578,91$
$F(VOS_{\text{Kommit}}, \text{Elektrizität}) = 116.958 \text{ km} \cdot \frac{21,55 \text{ kWh}}{100 \text{ km}} = 25.204,4 \text{ kWh}$
Teilschritt 2.3: Berechnung des gesamten Energieverbrauchs und der THG-Emissionen für dieses VOS
$E_W(VOS_{\text{Kommit}}, \text{Ottokraftstoff}) = F(VOS) \cdot e_W = 1.578,91 \cdot 38,4 \frac{\text{MJ}}{\text{l}} = 60.631 \text{ MJ}$
$G_W(VOS_{\text{Kommit}}, \text{Ottokraftstoff}) = F(VOS) \cdot g_W = 1.578,91 \cdot 2,8 \frac{\text{kg CO}_2\text{e}}{\text{l}} = 4.421 \text{ kg CO}_2\text{e}$
$E_t(VOS_{\text{Kommit}}, \text{Ottokraftstoff}) = F(VOS) \cdot e_t = 1.578,91 \cdot 31,7 \frac{\text{MJ}}{\text{l}} = 50.052 \text{ MJ}$
$G_t(VOS_{\text{Kommit}}, \text{Ottokraftstoff}) = F(VOS) \cdot g_t = 1.578,91 \cdot 2,3 \frac{\text{kg CO}_2\text{e}}{\text{l}} = 3.632 \text{ kg CO}_2\text{e}$
$E_W(VOS_{\text{Kommit}}, \text{SM-DE}) = F(VOS) \cdot e_W = 25.204,4 \text{ kWh} \cdot 9,7 \frac{\text{MJ}}{\text{kWh}} = 244.483 \text{ MJ}$
$G_W(VOS_{\text{Kommit}}, \text{SM-DE}) = F(VOS) \cdot g_W = 25.204,4 \text{ kWh} \cdot 0,498 \frac{\text{kg CO}_2\text{e}}{\text{kWh}} = 12.551 \text{ kg CO}_2\text{e}$
$E_t(VOS_{\text{Kommit}}, \text{SM-DE}) = F(VOS) \cdot e_t = 25.204,4 \text{ kWh} \cdot 3,6 \frac{\text{MJ}}{\text{kWh}} = 90.736 \text{ MJ}$
$G_t(VOS_{\text{Kommit}}, \text{SM-DE}) = F(VOS) \cdot g_t = 25.204,4 \text{ kWh} \cdot 0 \frac{\text{kg CO}_2\text{e}}{\text{kWh}} = 0 \text{ kg CO}_2\text{e}$
$E_W(VOS_{\text{Kommit}}, \text{Total}) = E_W(VOS_{\text{Kommit}}, \text{Ottokraftstoff}) + E_W(VOS_{\text{Kommit}}, \text{SM-DE}) = 305.114 \text{ MJ}$
$G_W(VOS_{\text{Kommit}}, \text{Total}) = G_W(VOS_{\text{Kommit}}, \text{Ottokraftstoff}) + G_W(VOS_{\text{Kommit}}, \text{SM-DE}) = 16.973 \text{ kg CO}_2\text{e}$
$E_t(VOS_{\text{Kommit}}, \text{Total}) = E_t(VOS_{\text{Kommit}}, \text{Ottokraftstoff}) + E_t(VOS_{\text{Kommit}}, \text{SM-DE}) = 140.788 \text{ MJ}$
$G_t(VOS_{\text{Kommit}}, \text{Total}) = G_t(VOS_{\text{Kommit}}, \text{Ottokraftstoff}) + G_t(VOS_{\text{Kommit}}, \text{SM-DE}) = 3.632 \text{ kg CO}_2\text{e}$
<i>Fortsetzung auf der nächsten Seite</i>

Teilschritt 2.4: Allokation eines Anteils
Die Transporttätigkeit wird in Personenkilometern [Pkm] angegeben.
$S(\text{pkm}_{\text{Kommit}}) = \frac{T(\text{pkm})}{T(\text{VOS}_{\text{Kommit,Total}})} = \frac{1}{65.504 \text{ pkm}} = 1,53 \cdot 10^{-5}$
$E_W(\text{pkm}_{\text{Kommit,Total}}) = E_W(\text{VOS}_{\text{Kommit,Total}}) \cdot S(\text{pkm}_{\text{Kommit}}) = 305.114 \text{ MJ} \cdot 1,53 \cdot 10^{-5} \text{ pkm}^{-1} = 4,7 \frac{\text{MJ}}{\text{pkm}}$
$G_W(\text{pkm}_{\text{Kommit,Total}}) = G_W(\text{VOS}_{\text{Kommit,Total}}) \cdot S(\text{pkm}_{\text{Kommit}}) = 16.973 \text{ kg CO}_2\text{e} \cdot 1,53 \cdot 10^{-5} \text{ pkm}^{-1} = 259 \frac{\text{g CO}_2\text{e}}{\text{pkm}}$
$E_t(\text{pkm}_{\text{Kommit,Total}}) = E_t(\text{VOS}_{\text{Kommit,Total}}) \cdot S(\text{pkm}_{\text{Kommit}}) = 140.788 \text{ MJ} \cdot 1,53 \cdot 10^{-5} \text{ pkm}^{-1} = 2,1 \frac{\text{MJ}}{\text{pkm}}$
$G_t(\text{pkm}_{\text{Kommit,Total}}) = G_t(\text{VOS}_{\text{Kommit,Total}}) \cdot S(\text{pkm}_{\text{Kommit}}) = 3.632 \text{ kg CO}_2\text{e} \cdot 1,53 \cdot 10^{-5} \text{ pkm}^{-1} = 55,4 \frac{\text{g CO}_2\text{e}}{\text{pkm}}$
Schritt 3: Addition der Ergebnisse für jede Teilstrecke
$E_W(\text{TS}) = E_W(\text{pkm}_{\text{Kommit,Total}}) = 4,7 \frac{\text{MJ}}{\text{pkm}}$
$G_W(\text{TS}) = G_W(\text{pkm}_{\text{Kommit,Total}}) = 259 \frac{\text{g CO}_2\text{e}}{\text{pkm}}$
$E_t(\text{TS}) = E_t(\text{pkm}_{\text{Kommit,Total}}) = 2,1 \frac{\text{MJ}}{\text{pkm}}$
$G_t(\text{TS}) = G_t(\text{pkm}_{\text{Kommit,Total}}) = 55,4 \frac{\text{g CO}_2\text{e}}{\text{pkm}}$

A.4.2 *kommit-Shuttle* Ökostrom

Tab. A.7: Energie- und THG-Bilanzierung sowie Deklaration des Systems *kommit-Shuttle* unter Strombezug von Ökostrom (in Anlehnung an Bruder und Klemmer, 2024, Tab. 0-6, S. 140)

Voraussetzungen
Die Transportdienstleistung des <i>kommit-Shuttles</i> (im Folgenden mit Kommit abgekürzt) erfolgt durch Hybridfahrzeuge (Ottokraftstoff-E5 und Strommix DE) in einem Linienbedarfsverkehr und findet in Deutschland statt.
Die Fahrzeugflotte besteht aus zwei LEVC TX 5 (HRE) Vista Comfort Plus-Fahrzeugen.
Die Gesamtfahrleistung des VOS _{kommit} betrug im Jahr 2022 insgesamt 116.958 km, einschließlich 62.351 km, die ohne Fahrgast zurückgelegt wurden. Entsprechend wurden 54.607 km mit mindestens einem Fahrgast zurückgelegt. Es waren insgesamt 21.908 Buchungen _{durchgeführt} (Abholvorgänge) zu verzeichnen und es wurden 26.280 Fahrgäste transportiert.
Die Verbrauchswerte des LEVC TX 5 (HRE) Vista Comfort Plus-Fahrzeugs beruhen auf den Angaben des Chassis des Fahrzeugmodells Volvo Recharge T8 AWD und wurden entsprechend des WLTP-Verfahrens ermittelt. Der durchschnittliche Verbrauch liegt demnach bei 1,35 l Ottokraftstoff E5 und 21,55 kWh Strom pro 100 km (nach DAT, 2022, S. 77).
Die Transporttätigkeit des gesamten Fahrzeugbestandes betrug im Jahr 2022 65.504 Pkm und wurde durch eine Analyse der Datenschnittstellen ermittelt (siehe Kapitel 4.3).
Die Energiefaktoren für Ottokraftstoff-E5 (im Folgenden als Ottokraftstoff abgekürzt) wurden aus <i>DIN EN 16258</i> Tabelle A.2 (Anhang A) entnommen (nach DIN, 2013, S. 25).
Die Emissionsfaktoren für den Strommix wurden den Angaben des Umweltbundesamtes entnommen (Umweltbundesamt, 2024, Tab. 1).
Die <i>WtW</i> -Energie- und THG-Emissionsfaktoren für den Ökostrom Deutschlands (im Folgenden abgekürzt als SM-DE) stammen aus den KLVN des LANUK bzw. des Umweltbundesamtes und stammen aus 2022 (nach LANUK, 2022, Emissionsfaktoren 2022 und Umweltbundesamt, 2024, Tab. 1).
Die <i>TtW</i> - Energie- und THG-Emissionsfaktoren für den Ökostroms Deutschland stammen aus der <i>DIN EN 16258</i> Anhang A.2.3 und A.2.4. (DIN, 2013, S. 30)

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Schritt 1: Bestimmung der unterschiedlichen Teilstrecken der Transportdienstleistung
Die Transportdienstleistung besteht aus den gesamten Strecken, die durch Passagiere des Linienbedarfsverkehr im gesamten Betriebsgebiet des <i>kommit-Shuttles</i> in 2022 stattfanden.
Schritt 2: Berechnung des Energieverbrauchs und der THG-Emissionen jeder einzelnen Teilstrecke
Teilschritt 2.1: Festlegung des Fahrzeugeinsatz-Systems für dieses VOS
Das gewählte VOS_{kommit} ist die Transportleistung für eine Person, die einen Kilometer mit dem Linienbedarfsverkehr zurücklegt.
Teilschritt 2.2: Berechnung des gesamten Kraftstoffverbrauchs für dieses VOS
$F(VOS_{\text{Kommit}}, \text{Ottokraftstoff}) = 116,958 \text{ km} \cdot \frac{1,35 \text{ l}}{100 \text{ km}} = 1.578,91$
$F(VOS_{\text{Kommit}}, \text{Elektrizität}) = 116,958 \text{ km} \cdot \frac{21,55 \text{ kWh}}{100 \text{ km}} = 25.204,4 \text{ kWh}$
Teilschritt 2.3: Berechnung des gesamten Energieverbrauchs und der THG-Emissionen für dieses VOS
$E_W(VOS_{\text{Kommit}}, \text{Ottokraftstoff}) = F(VOS) \cdot e_W = 1.578,91 \cdot 38,4 \frac{\text{MJ}}{\text{l}} = 60.631 \text{ MJ}$
$G_W(VOS_{\text{Kommit}}, \text{Ottokraftstoff}) = F(VOS) \cdot g_W = 1.578,91 \cdot 2,8 \frac{\text{kg CO}_2\text{e}}{\text{l}} = 4.421 \text{ kg CO}_2\text{e}$
$E_t(VOS_{\text{Kommit}}, \text{Ottokraftstoff}) = F(VOS) \cdot e_t = 1.578,91 \cdot 31,7 \frac{\text{MJ}}{\text{l}} = 50.052 \text{ MJ}$
$G_t(VOS_{\text{Kommit}}, \text{Ottokraftstoff}) = F(VOS) \cdot g_t = 1.578,91 \cdot 2,3 \frac{\text{kg CO}_2\text{e}}{\text{l}} = 3.632 \text{ kg CO}_2\text{e}$
$E_W(VOS_{\text{Kommit}}, \text{ÖS-DE}) = F(VOS) \cdot e_W = 25.204,4 \text{ kWh} \cdot 9,7 \frac{\text{MJ}}{\text{kWh}} = 244.483 \text{ MJ}$
$G_W(VOS_{\text{Kommit}}, \text{ÖS-DE}) = F(VOS) \cdot g_W = 25.204,4 \text{ kWh} \cdot 0,056 \frac{\text{kg CO}_2\text{e}}{\text{kWh}} = 1.422 \text{ kg CO}_2\text{e}$
$E_t(VOS_{\text{Kommit}}, \text{ÖS-DE}) = F(VOS) \cdot e_t = 25.204,4 \text{ kWh} \cdot 3,6 \frac{\text{MJ}}{\text{kWh}} = 90.736 \text{ MJ}$
$G_t(VOS_{\text{Kommit}}, \text{ÖS-DE}) = F(VOS) \cdot g_t = 25.204,4 \text{ kWh} \cdot 0 \frac{\text{kg CO}_2\text{e}}{\text{kWh}} = 0 \text{ kg CO}_2\text{e}$
$E_W(VOS_{\text{Kommit}}, \text{Total}) = E_W(VOS_{\text{Kommit}}, \text{Ottokraftstoff}) + E_W(VOS_{\text{Kommit}}, \text{ÖS-DE}) = 305.114 \text{ MJ}$
$G_W(VOS_{\text{Kommit}}, \text{Total}) = G_W(VOS_{\text{Kommit}}, \text{Ottokraftstoff}) + G_W(VOS_{\text{Kommit}}, \text{ÖS-DE}) = 5.843 \text{ kg CO}_2\text{e}$
$E_t(VOS_{\text{Kommit}}, \text{Total}) = E_t(VOS_{\text{Kommit}}, \text{Ottokraftstoff}) + E_t(VOS_{\text{Kommit}}, \text{ÖS-DE}) = 140.788 \text{ MJ}$
$G_t(VOS_{\text{Kommit}}, \text{Total}) = G_t(VOS_{\text{Kommit}}, \text{Otto}) + G_t(VOS_{\text{Kommit}}, \text{SM-DE}) = 3,632 \text{ kg CO}_2\text{e}$
Teilschritt 2.4: Allokation eines Anteils
Die Transporttätigkeit wird in Personenkilometern [Pkm] angegeben.

Fortsetzung auf der nächsten Seite

$S(\text{pkm}_{\text{Kommit}}) = \frac{T(\text{pkm})}{T(\text{VOS}_{\text{Kommit,Total}})} = \frac{1}{65,504 \text{ pkm}} = 1,53 \cdot 10^{-5}$
$E_W(\text{pkm}_{\text{Kommit,Total}}) = E_W(\text{VOS}_{\text{Kommit,Total}}) \cdot S(\text{pkm}_{\text{Kommit}}) = 305.114 \text{ MJ} \cdot 1,53 \cdot 10^{-5} \text{ pkm}^{-1} = 4,7 \frac{\text{MJ}}{\text{pkm}}$
$G_W(\text{pkm}_{\text{Kommit,Total}}) = G_W(\text{VOS}_{\text{Kommit,Total}}) \cdot S(\text{pkm}_{\text{Kommit}}) = 5.843 \text{ kg CO}_2\text{e} \cdot 1,53 \cdot 10^{-5} \text{ pkm}^{-1} = 89 \frac{\text{g CO}_2\text{e}}{\text{pkm}}$
$E_t(\text{pkm}_{\text{Kommit,Total}}) = E_T(\text{VOS}_{\text{Kommit,Total}}) \cdot S(\text{pkm}_{\text{Kommit}}) = 140.788 \text{ MJ} \cdot 1,53 \cdot 10^{-5} \text{ pkm}^{-1} = 2,1 \frac{\text{MJ}}{\text{pkm}}$
$G_t(\text{pkm}_{\text{Kommit,Total}}) = G_T(\text{VOS}_{\text{Kommit,Total}}) \cdot S(\text{pkm}_{\text{Kommit}}) = 3.632 \text{ kg CO}_2\text{e} \cdot 1,53 \cdot 10^{-5} \text{ pkm}^{-1} = 55,4 \frac{\text{g CO}_2\text{e}}{\text{pkm}}$
Schritt 3: Addition der Ergebnisse für jede Teilstrecke
$E_W(\text{TS}) = E_W(\text{pkm}_{\text{Kommit,Total}}) = 4,7 \frac{\text{MJ}}{\text{pkm}}$
$G_W(\text{TS}) = G_W(\text{pkm}_{\text{Kommit,Total}}) = 89 \frac{\text{g CO}_2\text{e}}{\text{pkm}}$
$E_t(\text{TS}) = E_t(\text{pkm}_{\text{Kommit,Total}}) = 2,1 \frac{\text{MJ}}{\text{pkm}}$
$G_t(\text{TS}) = G_t(\text{pkm}_{\text{Kommit,Total}}) = 55,4 \frac{\text{g CO}_2\text{e}}{\text{pkm}}$

A.5 Energie- und THG-Bilanzierung sowie Deklaration des Systems *LOOPmünster* (*DIN EN 16258*)

A.5.1 *LOOPmünster* Strommix

Tab. A.8: Energie- und THG-Bilanzierung sowie Deklaration des Systems *LOOPmünster* unter Strombezug des deutschen Strommixes (in Anlehnung an Bruder und Klemmer, 2024, Tab. 0-7, S. 142)

Voraussetzungen
Die Transportdienstleistung von <i>LOOPmünster</i> (im Folgenden mit LOOP abgekürzt) erfolgt durch Hybridfahrzeuge (Ottokraftstoff-E5 und Strommix DE) in einem Linienbedarfsverkehr und findet in Deutschland statt.
Die Fahrzeugflotte besteht vollständig aus zehn sich maximal im Einsatz befindlichen LEVC TX 5 (HRE) Vista Comfort Plus-Fahrzeugen.
Die Gesamtfahrleistung des VOS_{LOOP} betrug im Jahr 2022 insgesamt 1.253.194 km, einschließlich 544.798 km, die ohne Fahrgast zurückgelegt wurden. Entsprechend wurden 708.396 km mit mindestens einem Fahrgast zurückgelegt. Es waren insgesamt 151.415 Buchungen _{durchgeführt} (Abholvorgänge) zu verzeichnen und es wurden 187.309 Fahrgäste transportiert.
Die Verbrauchswerte des LEVC TX 5 (HRE) Vista Comfort Plus-Fahrzeugs beruhen auf den Angaben des Chassis des Fahrzeugmodells Volvo Recharge T8 AWD und wurden entsprechend des WLTP-Verfahrens ermittelt. Der durchschnittliche Verbrauch liegt demnach bei 1,35 l Ottokraftstoff E5 und 21,55 kWh Strom pro 100 km (nach DAT, 2022, S. 77).
Die Transporttätigkeit des gesamten Fahrzeugbestandes betrug im Jahr 2022 876.326 Pkm und wurde durch eine Analyse der Datenschnittstellen ermittelt (siehe Kapitel 4.3).
Die Energiefaktoren für Ottokraftstoff-E5 (im Folgenden als Ottokraftstoff abgekürzt) wurden aus <i>DIN EN 16258</i> Tabelle A.2 (Anhang A) entnommen (nach DIN, 2013, S. 25).
Die Emissionsfaktoren für den Strommix wurden den Angaben des Umweltbundesamtes entnommen (Umweltbundesamt, 2024, Tab. 1).
Die <i>WtW</i> -Energie- und THG-Emissionsfaktoren für den Strommix Deutschlands (im Folgenden abgekürzt als SM-DE) stammen aus den KLVN des LANUK bzw. des Umweltbundesamtes und stammen aus 2022 (nach LANUK, 2022, Emissionsfaktoren 2022 und Umweltbundesamt, 2024, Tab. 1).

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Die TtW-Energie- und THG-Emissionsfaktoren für den Strommix Deutschland stammen aus der <i>DIN EN 16258</i> Anhang A.2.3 und A.2.4 (DIN, 2013, S. 30).
Schritt 1: Bestimmung der unterschiedlichen Teilstrecken der Transportdienstleistung
Die Transportdienstleistung besteht aus den gesamten Strecken, die durch Passagiere des Linienbedarfsverkehrs im gesamten Betriebsgebiet <i>LOOPmünsters</i> in 2022 stattfanden.
Schritt 2: Berechnung des Energieverbrauchs und der THG-Emissionen jeder einzelnen Teilstrecke
Teilschritt 2.1: Festlegung des Fahrzeugeinsatz-Systems für dieses VOS
Das gewählte VOS_{LOOP} ist die Transportleistung für eine Person, die einen Kilometer mit dem Linienbedarfsverkehr zurücklegt.
Teilschritt 2.2: Berechnung des gesamten Kraftstoffverbrauchs für dieses VOS
$F(VOS_{LOOP}, \text{Ottokraftstoff}) = 1.253.194 \text{ km} \cdot \frac{1,351}{100 \text{ km}} = 16.918,11$
$F(VOS_{LOOP}, \text{Elektrizität}) = 1.253.194 \text{ km} \cdot \frac{21,55 \text{ kWh}}{100 \text{ km}} = 270.063,3 \text{ kWh}$
Teilschritt 2.3: Berechnung des gesamten Energieverbrauchs und der THG-Emissionen für dieses VOS
$E_W(VOS_{LOOP}, \text{Ottokraftstoff}) = F(VOS) \cdot e_W = 16.918,11 \cdot 38,4 \frac{\text{MJ}}{\text{l}} = 649.656 \text{ MJ}$
$G_W(VOS_{LOOP}, \text{Ottokraftstoff}) = F(VOS) \cdot g_W = 16.918,11 \cdot 2,8 \frac{\text{kg CO}_2\text{e}}{\text{l}} = 47.371 \text{ kg CO}_2\text{e}$
$E_t(VOS_{LOOP}, \text{Ottokraftstoff}) = F(VOS) \cdot e_t = 16.918,11 \cdot 31,7 \frac{\text{MJ}}{\text{l}} = 536.304 \text{ MJ}$
$G_t(VOS_{LOOP}, \text{Ottokraftstoff}) = F(VOS) \cdot g_t = 16.918,11 \cdot 2,3 \frac{\text{kg CO}_2\text{e}}{\text{l}} = 38.912 \text{ kg CO}_2\text{e}$
$E_W(VOS_{LOOP}, \text{SM-DE}) = F(VOS) \cdot e_W = 270.063,3 \text{ kWh} \cdot 9,7 \frac{\text{MJ}}{\text{kWh}} = 2.619.614 \text{ MJ}$
$G_W(VOS_{LOOP}, \text{SM-DE}) = F(VOS) \cdot g_W = 270.063,3 \text{ kWh} \cdot 0,498 \frac{\text{kg CO}_2\text{e}}{\text{kWh}} = 134.491 \text{ kg CO}_2\text{e}$
$E_t(VOS_{LOOP}, \text{SM-DE}) = F(VOS) \cdot e_t = 270.063,3 \text{ kWh} \cdot 3,6 \frac{\text{MJ}}{\text{kWh}} = 972.228 \text{ MJ}$
$G_t(VOS_{LOOP}, \text{SM-DE}) = F(VOS) \cdot g_t = 270.063,3 \text{ kWh} \cdot 0 \frac{\text{kg CO}_2\text{e}}{\text{kWh}} = 0 \text{ kg CO}_2\text{e}$
$E_W(VOS_{LOOP}, \text{Total}) = E_W(VOS_{LOOP}, \text{Ottokraftstoff}) + E_W(VOS_{LOOP}, \text{SM-DE}) = 3.269.270 \text{ MJ}$
$G_W(VOS_{LOOP}, \text{Total}) = G_W(VOS_{LOOP}, \text{Ottokraftstoff}) + G_W(VOS_{LOOP}, \text{SM-DE}) = 181.862 \text{ kg CO}_2\text{e}$
$E_t(VOS_{LOOP}, \text{Total}) = E_t(VOS_{LOOP}, \text{Ottokraftstoff}) + E_t(VOS_{LOOP}, \text{SM-DE}) = 1.508.532 \text{ MJ}$

Fortsetzung auf der nächsten Seite

$G_t(\text{VOS}_{\text{LOOP, Total}}) = G_t(\text{VOS}_{\text{LOOP, Ottokraftstoff}}) + G_t(\text{VOS}_{\text{LOOP, SM-DE}}) = 38.912 \text{ kg CO}_2\text{e}$
Teilschritt 2.4: Allokation eines Anteils
Die Transporttätigkeit wird in Personenkilometern [Pkm] angegeben.
$S(\text{pkm}_{\text{LOOP}}) = \frac{T(\text{pkm})}{T(\text{VOS}_{\text{LOOP, Total}})} = \frac{1}{876.326 \text{ pkm}} = 1,14 \cdot 10^{-6}$
$E_W(\text{pkm}_{\text{LOOP, Total}}) = E_W(\text{VOS}_{\text{LOOP, Total}}) \cdot S(\text{pkm}_{\text{LOOP}}) = 3.269.270 \text{ MJ} \cdot 1,14 \cdot 10^{-6} \text{ pkm}^{-1} = 3,7 \frac{\text{MJ}}{\text{pkm}}$
$G_W(\text{pkm}_{\text{LOOP, Total}}) = G_W(\text{VOS}_{\text{LOOP, Total}}) \cdot S(\text{pkm}_{\text{LOOP}}) = 181.862 \text{ kg CO}_2\text{e} \cdot 1,14 \cdot 10^{-6} \text{ pkm}^{-1} = 208 \frac{\text{g CO}_2\text{e}}{\text{pkm}}$
$E_t(\text{pkm}_{\text{LOOP, Total}}) = E_t(\text{VOS}_{\text{LOOP, Total}}) \cdot S(\text{pkm}_{\text{LOOP}}) = 1.508.532 \text{ MJ} \cdot 1,14 \cdot 10^{-6} \text{ pkm}^{-1} = 1,7 \frac{\text{MJ}}{\text{pkm}}$
$G_t(\text{pkm}_{\text{LOOP, Total}}) = G_t(\text{VOS}_{\text{LOOP, Total}}) \cdot S(\text{pkm}_{\text{LOOP}}) = 38.912 \text{ kg CO}_2\text{e} \cdot 1,14 \cdot 10^{-6} \text{ pkm}^{-1} = 44,4 \frac{\text{g CO}_2\text{e}}{\text{pkm}}$
Schritt 3: Addition der Ergebnisse für jede Teilstrecke
$E_W(\text{TS}) = E_W(\text{pkm}_{\text{LOOP, Total}}) = 3,7 \frac{\text{MJ}}{\text{pkm}}$
$G_W(\text{TS}) = G_W(\text{pkm}_{\text{LOOP, Total}}) = 208 \frac{\text{g CO}_2\text{e}}{\text{pkm}}$
$E_t(\text{TS}) = E_t(\text{pkm}_{\text{LOOP, Total}}) = 1,7 \frac{\text{MJ}}{\text{pkm}}$
$G_t(\text{TS}) = G_t(\text{pkm}_{\text{LOOP, Total}}) = 44,4 \frac{\text{g CO}_2\text{e}}{\text{pkm}}$

A.5.2 *LOOPmünster* Ökostrom

Tab. A.9: Energie- und THG-Bilanzierung sowie Deklaration des Systems *LOOPmünster* unter Strombezug von Ökostrom (in Anlehnung an Bruder und Klemmer, 2024, Tab. 0-8, S. 144)

Voraussetzungen
Die Transportdienstleistung von <i>LOOPmünster</i> (im Folgenden mit LOOP abgekürzt) erfolgt durch Hybridfahrzeuge (Ottokraftstoff-E5 und Ökostrom DE) in einem Linienbedarfsverkehr und findet in Deutschland statt.
Die Fahrzeugflotte besteht vollständig aus zehn sich maximal im Einsatz befindlichen LEVC TX 5 (HRE) Vista Comfort Plus-Fahrzeugen.
Die Gesamtfahrleistung des VOS _{LOOP} betrug im Jahr 2022 insgesamt 1.253.194 km, einschließlich 544.798 km, die ohne Fahrgast zurückgelegt wurden. Entsprechend wurden 708.396 km mit mindestens einem Fahrgast zurückgelegt. Es waren insgesamt 151.415 Buchungen _{durchgeführt} (Abholvorgänge) zu verzeichnen und es wurden 187.309 Fahrgäste transportiert.
Die Verbrauchswerte des LEVC TX 5 (HRE) Vista Comfort Plus-Fahrzeugs beruhen auf den Angaben des Chassis des Fahrzeugmodells Volvo Recharge T8 AWD und wurden entsprechend des WLTP-Verfahrens ermittelt. Der durchschnittliche Verbrauch liegt demnach bei 1,35 l Ottokraftstoff E5 und 21,55 kWh Strom pro 100 km (nach DAT, 2022, S. 77).
Die Transporttätigkeit des gesamten Fahrzeugbestandes betrug im Jahr 2022 876.326 Pkm und wurde durch eine Analyse der Datenschnittstellen ermittelt (siehe Kapitel 4.3).
Die Energiefaktoren für Ottokraftstoff-E5 (im Folgenden als Ottokraftstoff abgekürzt) wurden aus <i>DIN EN 16258</i> Tabelle A.2 (Anhang A) entnommen (nach DIN, 2013, S. 25).
Die Emissionsfaktoren für den Strommix wurden den Angaben des Umweltbundesamtes entnommen (Umweltbundesamt, 2024, Tab. 1).
Die <i>WtW</i> -Energie- und THG-Emissionsfaktoren für den Ökostrom Deutschlands (im Folgenden abgekürzt als ÖS-DE) stammen aus den KLVN des LANUK bzw. des Umweltbundesamtes und stammen aus 2022 (nach LANUK, 2022, Emissionsfaktoren 2022 und Umweltbundesamt, 2024, Tab. 1).
Die <i>TtW</i> -Energie- und THG-Emissionsfaktoren für den Ökostrom Deutschland stammen aus der <i>DIN EN 16258</i> Anhang A.2.3 und A.2.4 (DIN, 2013, S. 30).

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Schritt 1: Bestimmung der unterschiedlichen Teilstrecken der Transportdienstleistung
Die Transportdienstleistung besteht aus den gesamten Strecken, die durch Passagiere des Linienbedarfsverkehrs im gesamten Betriebsgebiet <i>LOOPmünsters</i> in 2022 stattfanden.
Schritt 2: Berechnung des Energieverbrauchs und der THG-Emissionen jeder einzelnen Teilstrecke
Teilschritt 2.1: Festlegung des Fahrzeugeinsatz-Systems für dieses VOS
Das gewählte VOS_{LOOP} ist die Transportleistung für eine Person, die einen Kilometer mit dem Linienbedarfsverkehr zurücklegt.
Teilschritt 2.2: Berechnung des gesamten Kraftstoffverbrauchs für dieses VOS
$F(VOS_{LOOP}, \text{Ottokraftstoff}) = 1.253.194 \text{ km} \cdot \frac{1,351}{100 \text{ km}} = 16.918,11$
$F(VOS_{LOOP}, \text{Elektrizität}) = 1.253.194 \text{ km} \cdot \frac{21,55 \text{ kWh}}{100 \text{ km}} = 270.063,3 \text{ kWh}$
Teilschritt 2.3: Berechnung des gesamten Energieverbrauchs und der THG-Emissionen für dieses VOS
$E_W(VOS_{LOOP}, \text{Ottokraftstoff}) = F(VOS) \cdot e_W = 16.918,11 \cdot 38,4 \frac{\text{MJ}}{\text{l}} = 649.656 \text{ MJ}$
$G_W(VOS_{LOOP}, \text{Ottokraftstoff}) = F(VOS) \cdot g_W = 16.918,11 \cdot 2,8 \frac{\text{kg CO}_2\text{e}}{\text{l}} = 47.371 \text{ kg CO}_2\text{e}$
$E_t(VOS_{LOOP}, \text{Ottokraftstoff}) = F(VOS) \cdot e_t = 16.918,11 \cdot 31,7 \frac{\text{MJ}}{\text{l}} = 536.304 \text{ MJ}$
$G_t(VOS_{LOOP}, \text{Ottokraftstoff}) = F(VOS) \cdot g_t = 16.918,11 \cdot 2,3 \frac{\text{kg CO}_2\text{e}}{\text{l}} = 38.912 \text{ kg CO}_2\text{e}$
$E_W(VOS_{LOOP}, \text{ÖS-DE}) = F(VOS) \cdot e_W = 270.063,3 \text{ kWh} \cdot 9,7 \frac{\text{MJ}}{\text{kWh}} = 2.619.614 \text{ MJ}$
$G_W(VOS_{LOOP}, \text{ÖS-DE}) = F(VOS) \cdot g_W = 270.063,3 \text{ kWh} \cdot 0,056 \frac{\text{kg CO}_2\text{e}}{\text{kWh}} = 15.123 \text{ kg CO}_2\text{e}$
$E_t(VOS_{LOOP}, \text{ÖS-DE}) = F(VOS) \cdot e_t = 270.063,3 \text{ kWh} \cdot 3,6 \frac{\text{MJ}}{\text{kWh}} = 972.228 \text{ MJ}$
$G_t(VOS_{LOOP}, \text{ÖS-DE}) = F(VOS) \cdot g_t = 270.063,3 \text{ kWh} \cdot 0 \frac{\text{kg CO}_2\text{e}}{\text{kWh}} = 0 \text{ kg CO}_2\text{e}$
$E_W(VOS_{LOOP}, \text{Total}) = E_W(VOS_{LOOP}, \text{Ottokraftstoff}) + E_W(VOS_{LOOP}, \text{ÖS-DE}) = 3.269.270 \text{ MJ}$
$G_W(VOS_{LOOP}, \text{Total}) = G_W(VOS_{LOOP}, \text{Ottokraftstoff}) + G_W(VOS_{LOOP}, \text{ÖS-DE}) = 62.494 \text{ kg CO}_2\text{e}$
$E_t(VOS_{LOOP}, \text{Total}) = E_t(VOS_{LOOP}, \text{Ottokraftstoff}) + E_t(VOS_{LOOP}, \text{ÖS-DE}) = 1.508.532 \text{ MJ}$
$G_t(VOS_{LOOP}, \text{Total}) = G_t(VOS_{LOOP}, \text{Ottokraftstoff}) + G_t(VOS_{LOOP}, \text{ÖS-DE}) = 38.912 \text{ kg CO}_2\text{e}$
Teilschritt 2.4: Allokation eines Anteils
Die Transporttätigkeit wird in Personenkilometern [Pkm] angegeben.

Fortsetzung auf der nächsten Seite

$S(\text{pkm}_{\text{LOOP}}) = \frac{T(\text{pkm})}{T(\text{VOS}_{\text{LOOP, Total}})} = \frac{1}{876.326 \text{ pkm}} = 1,14 \cdot 10^{-6}$
$E_W(\text{pkm}_{\text{LOOP, Total}}) = E_W(\text{VOS}_{\text{LOOP, Total}}) \cdot S(\text{pkm}_{\text{LOOP}}) = 3.269.270 \text{ MJ} \cdot 1,14 \cdot 10^{-6} \text{ pkm}^{-1} = 3,7 \frac{\text{MJ}}{\text{pkm}}$
$G_W(\text{pkm}_{\text{LOOP, Total}}) = G_W(\text{VOS}_{\text{LOOP, Total}}) \cdot S(\text{pkm}_{\text{LOOP}}) = 62.494 \text{ kg CO}_2\text{e} \cdot 1,14 \cdot 10^{-6} \text{ pkm}^{-1} = 71 \frac{\text{g CO}_2\text{e}}{\text{pkm}}$
$E_t(\text{pkm}_{\text{LOOP, Total}}) = E_t(\text{VOS}_{\text{LOOP, Total}}) \cdot S(\text{pkm}_{\text{LOOP}}) = 1.508.532 \text{ MJ} \cdot 1,14 \cdot 10^{-6} \text{ pkm}^{-1} = 1,7 \frac{\text{MJ}}{\text{pkm}}$
$G_t(\text{pkm}_{\text{LOOP, Total}}) = G_t(\text{VOS}_{\text{LOOP, Total}}) \cdot S(\text{pkm}_{\text{LOOP}}) = 38.912 \text{ kg CO}_2\text{e} \cdot 1,14 \cdot 10^{-6} \text{ pkm}^{-1} = 44,4 \frac{\text{g CO}_2\text{e}}{\text{pkm}}$
Schritt 3: Addition der Ergebnisse für jede Teilstrecke
$E_W(\text{TS}) = E_W(\text{pkm}_{\text{LOOP, Total}}) = 3,7 \frac{\text{MJ}}{\text{pkm}}$
$G_W(\text{TS}) = G_W(\text{pkm}_{\text{LOOP, Total}}) = 71 \frac{\text{g CO}_2\text{e}}{\text{pkm}}$
$E_t(\text{TS}) = E_t(\text{pkm}_{\text{LOOP, Total}}) = 1,7 \frac{\text{MJ}}{\text{pkm}}$
$G_t(\text{TS}) = G_t(\text{pkm}_{\text{LOOP, Total}}) = 44,4 \frac{\text{g CO}_2\text{e}}{\text{pkm}}$

A.6 Berechnung der THG-Nettoeffekte

Tab. A.10: Spezifische Emissionen der untersuchten Ridepooling-Systeme

Szenario	Bussi	G-Mobil	kommit-Shuttle	LOOPmünster
<i>Spezifische Emissionen in g CO₂e/Pkm</i>				
Energieszenarien				
Strommix	200,2	273,1	259,1	207,5
Ökostrom	68,9	155,9	89,2	71,4
Szenarien Referenzmobilität				
V1	96,8	85,5	93,4	68,3
V2	119,1	–	–	92,4
V3	89,2	67,5	71,5	89,2
V4	89,2	67,5	71,5	89,2
V5	–	86,0	–	67,0
Zusammenfassung				
V1–V4 Min	89,2	67,5	71,5	68,3
V1–V4 Max	119,1	85,5	93,4	92,4

Tab. A.11: Personenkilometer_{gefahren} der untersuchten Systeme

Kenngroße	Bussi	G-Mobil	kommit-Shuttle	LOOPmünster
<i>Personenkilometer in Pkm</i>				
Pkm _{gefahren}	56.259	228.185	65.504	876.326

Tab. A.12: THG-Gesamtbilanz und Netto-THG-Effekte der untersuchten Systeme

Szenario	Bussi	G-Mobil	kommit-Shuttle	LOOP-münster
<i>THG-Emissionen in kg CO₂e</i>				
Linienbedarfsverkehr				
Linienbedarfsverkehr Strommix	11.263	62.317	16.972	181.838
Linienbedarfsverkehr Ökostrom	3.876	35.574	5.843	62.570
Referenzmobilität				
Referenzmobilität Min	5.018	15.414	4.684	59.895
Referenzmobilität Max	6.701	19.502	6.118	80.957
Netto-THG-Effekte Strommix				
Nettoeffekt Min vs. Strommix	6.245	46.904	12.288	121.943
Nettoeffekt Max vs. Strommix	4.562	42.815	10.855	100.881
Netto-THG-Effekte Ökostrom				
Nettoeffekt Min vs. Ökostrom	-1.141	20.161	1.159	2.675
Nettoeffekt Max vs. Ökostrom	-2.824	16.072	-275	-18.387

Hinweis: Positive Werte der Netto-THG-Effekte kennzeichnen einen zusätzlichen THG-Ausstoß des Linienbedarfsverkehrs gegenüber der jeweiligen Referenzmobilität. Negative Werte kennzeichnen THG-Einsparungen gegenüber der Referenzmobilität.

A.7 Modal-Shift-Wirkung

Tab. A.13: Modal-Shift Effekte der Linienbedarfsverkehre (2022) (nach Tab. 7-1 Bruder und Klemmer, 2024, S. 102)

Merkmal	<i>Bussi</i>	<i>G-Mobil</i>	<i>kommit-Shuttle</i>	LOOP-münster
Grunddaten				
Einwohnende im Betriebsgebiet	270.000	38.500	20.000	66.000
Durchschnittliche tägliche Wegeanzahl pro Person	3,2	3,3	3,1	3,2
Gesamtanzahl der Wege im Betriebsgebiet	864.000	127.050	62.000	211.200
Modal Split (Wegeanteile)				
MIV	55%	55%	56%	40%
Fahrrad	7%	30%	24%	34%
zu Fuß	19%	13%	12%	17%
ÖPNV	19%	2%	8%	9%
Anzahl der täglichen Wege im Betriebsgebiet				
MIV	475.200	69.878	34.720	84.480
Fahrrad	60.480	38.115	14.880	71.808
zu Fuß	164.160	16.517	7.440	35.904
ÖPNV	164.160	2.541	4.960	19.008
Ridepooling-Performance				
Durchschnittliche Ridepooling-Fahrgäste pro Betriebstag	40	205	72	545
Anteil des Ridepoolings am Modal Split	0,00%	0,16%	0,12%	0,26%
Anteile der durch Ridepooling substituierten Verkehrsmittel				
MIV	10%	28%	39%	20%
Fahrrad	8%	29%	23%	9%
zu Fuß	21%	23%	23%	2%
ÖPNV	58%	14%	12%	57%
Verkehrsinduktion	3%	5%	4%	12%
Anzahl der durch Ridepooling verlagerten Fahrten (täglich)				
MIV	4	57	28	111

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Merkmal	<i>Bussi</i>	<i>G-Mobil</i>	<i>kommit-Shuttle</i>	LOOP-münster
Fahrrad	3	60	16	47
zu Fuß	8	48	16	12
ÖPNV	23	29	9	311
Verkehrsinduktion	1	11	3	64
Anzahl der täglichen Wege im Betriebsgebiet nach Verlagerung durch Ridepooling				
MIV	475.196	69.821	34.692	84.369
Fahrrad	60.477	38.055	14.864	71.761
zu Fuß	164.152	16.469	7.424	35.892
ÖPNV	164.176	2.706	5.021	19.178
Verkehrsinduktion	1	11	3	64
Modal-Shift-Wirkung durch Ridepooling				
MIV	−0,001%	−0,05%	−0,05%	−0,06%
Fahrrad	0,000%	−0,05%	−0,03%	−0,03%
zu Fuß	−0,001%	−0,04%	−0,03%	−0,01%
ÖPNV	+0,002%	+0,13%	+0,10%	+0,08%
Verkehrsinduktion	0,000%	+0,01%	0,00%	+0,03%

A.8 Erschließungswirkung

Tab. A.14: Erschließungsfaktor mit und ohne Linienbedarfsverkehr (300 m Puffer Bushaltestellen / 250 m virtuelle Haltestellen)(nach Abb. 7-1 Bruder und Klemmer, 2024, S. 105)

		Gesamtes Betriebs- gebiet	Ohne Linienbe- darfsverkehr	Mit Linienbe- darfsverkehr	Differenz
<i>Bussi</i>	Fläche insg.	55,5 km ²	42,1 km ² (67 %)	54,3 km ² (98 %)	+12,2 km ² (+31 %)
	Siedlungsfläche ^a	27 km ²	21,1 km ² (78 %)	27 km ² (100 %)	+5,87 km ² (+22 %)
	Bevölkerung ^b	269.160 EW	215.331 EW (80 %)	269.160 EW (100 %)	+53.829 EW (+20 %)
<i>G-Mobil</i>	Fläche insg.	21,56 km ²	10,34 km ² (48 %)	15,3 km ² (71 %)	+4,96 km ² (+23 %)
	Siedlungsfläche ^a	10,41 km ²	7,14 km ² (69 %)	8,42 km ² (81 %)	+1,28 km ² (+12 %)
	Bevölkerung ^b	38.542 EW	28.936 EW (75 %)	32.275 EW (84 %)	+3.339 EW (+9 %)
<i>kommit-Shuttle</i>	Fläche insg.	109,48 km ²	38,21 km ² (35 %)	40,55 km ² (37 %)	+2,34 km ² (+2 %)
	Siedlungsfläche ^a	4,66 km ²	4,13 km ² (89 %)	4,46 km ² (96 %)	+0,33 km ² (+7 %)
	Bevölkerung ^b	20.143 EW	17.899 EW (89 %)	18.789 EW (93 %)	+890 EW (+4 %)
<i>LOOPmünster</i>	Fläche insg.	56,88 km ²	24,0 km ² (42 %)	36,73 km ² (65 %)	+12,73 km ² (+22 %)
	Siedlungsfläche ^a	11,9 km ²	10,19 km ² (86 %)	11,66 km ² (98 %)	+1,47 km ² (+12 %)
	Bevölkerung ^b	63.153 EW	55.445 EW (88 %)	61.783 EW (98 %)	+6.338 EW (+10 %)

^a OpenStreetMap contributors, 2023

^b **eigene Berechnung auf Grundlage des Zensus 2011 Statistische Ämter, 2011

A.9 Reduktion des Leerkilometer-Anteils im Jahresverlauf

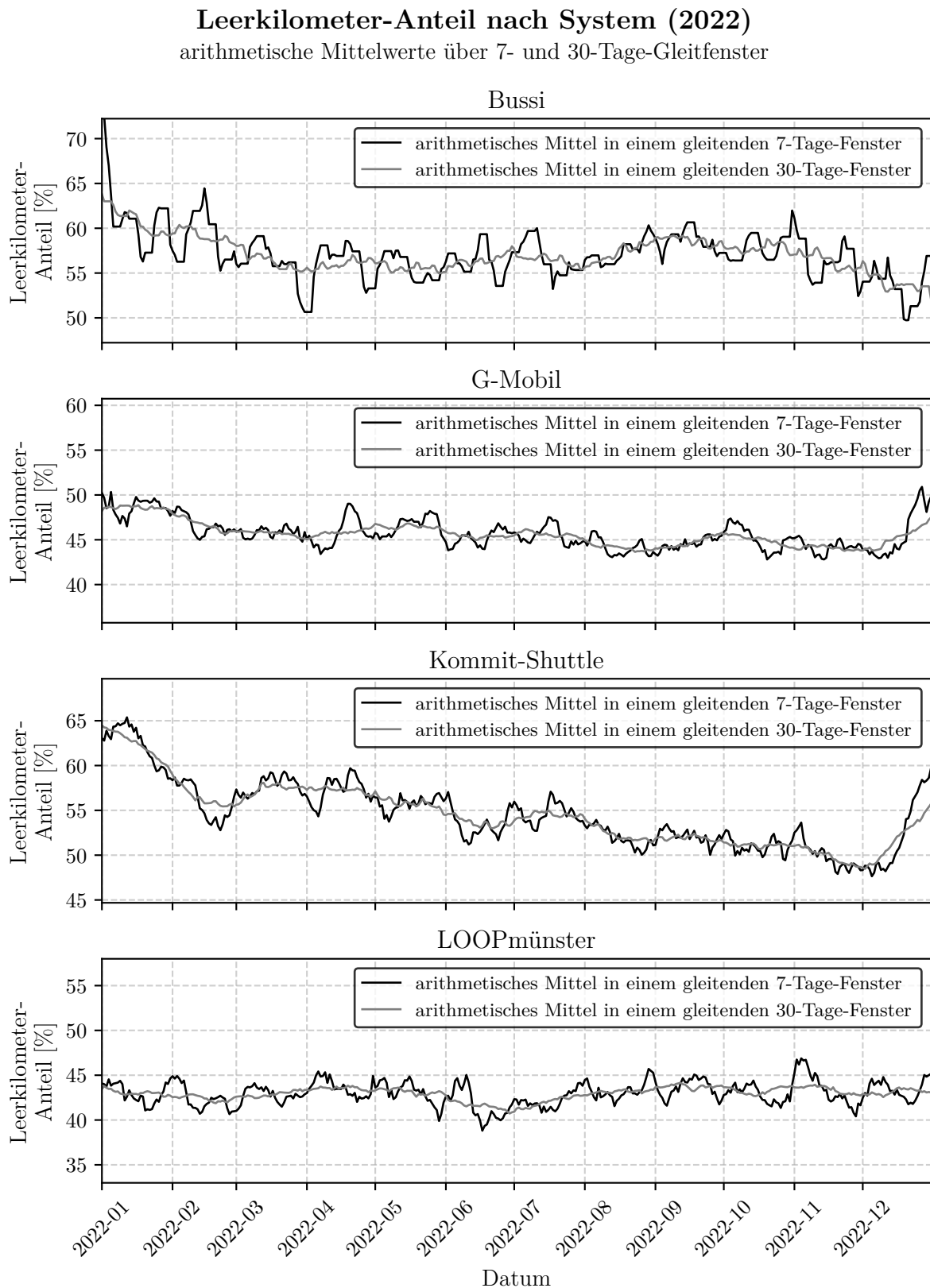


Abb. A.1: Fahrzeugkilometer_{leer}-Anteile im Laufe des Jahres 2022

A.10 Intermodalität

Tab. A.15: Georeferenzierte Buchungen und Nähe zu Bahnhaltepunkten (250 m Luftlinienradius, 2022)(nach Abb. 7-2 Bruder und Klemmer, 2024, S. 107)

	<i>Bussi</i>	G-Mobil	<i>kommit-Shuttle</i>	<i>LOOPmünster</i>
	8.403	60.185	21.908	152.632
Georeferenzierbare	Einstiege;	Einstiege;	Einstiege;	Einstiege;
Buchungen _{durchgeführt}	8.429	60.185	21.908	152.632
	Ausstiege	Ausstiege	Ausstiege	Ausstiege
Einstiege um ÖV-Umstiegspunkt ^a	1.295 (15%)	7.593 (13%)	3.719 (17%) ^b ; 191 (0%) ^c	6.785 (4%)
Ausstiege um ÖV-Umstiegspunkt ^a	565 (7%)	7.894 (13%)	4.338 (20%) ^b ; 228 (1%) ^c	5.605 (4%)
Ein- und Ausstiege um ÖV-Umstiegspunkt	69 (1%)	-	-	1 (0%)

^a Ein- und Ausstiege im 250 m Luftlinienradius eines Bahnhaltepunktes (inkl. S-Bahn-Stationen).

^b Ein- und Ausstiege im 250 m Luftlinienradius des Bahnhaltepunktes „Bahnhof Bösen-sell“.

^c Ein- und Ausstiege im 250 m Luftlinienradius des „Busbahnhofs Senden“.

A.11 Lebenslauf

Aus Gründen des Datenschutzes wird in der öffentlich zugänglichen Fassung dieser Dissertation auf die Darstellung des persönlichen Lebenslaufs verzichtet.

A.12 Hinweise zum Einsatz von Künstlicher Intelligenz

AI Usage Card für „Entwicklung und Anwendung einer Methodik zur ökologischen Bewertung von Ridepooling-Systemen“		
KORRESPONDENZAUTOR Peter Bruder	KONTAKT peter.bruder@fh-muenster.de	INSTITUTION FH Münster
	PROJEKTTITEL Entwicklung und Anwendung einer Methodik zur ökologischen Bewertung von Ridepooling-Systemen	ZENTRALE ANWENDUNGSBEREICHE Ridepooling-Systeme, On-Demand Mobilität, THG-Bilanzierung, Mobilitätsdatenanalyse
MODELL(E) OpenAI ChatGPT	NUTZUNGSZEITRAUM 2023/02/07–2025/09/26	VERSION(EN) GPT-3.5, GPT-4, GPT-4o und GPT-5. Die jeweils konkrete technische Modellversion wurde nicht dokumentiert.
IDEENENTWICKLUNG OpenAI ChatGPT	VERBESSERUNG BESTEHENDER IDEEN ChatGPT wurde genutzt, um vom Autor entwickelte Ideen, Gliederungen und Forschungsfragen sprachlich zu präzisieren, zu strukturieren und weiterzuentwickeln.	IDENTIFIZIERUNG VON LÜCKEN UND VERGLEICH VON ASPEKTEN ChatGPT wurde genutzt, um mögliche fehlende Aspekte aufzuzeigen und alternative Ansätze zu vergleichen. Die fachliche Bewertung und Auswahl erfolgte durch den Autor.
	UNTERSTÜTZUNG BEI DER VERBESSERUNG EIGENER INHALTE ChatGPT wurde genutzt, um eigene Textentwürfe und vom Autor vorgegebene Inhalte sprachlich zu überarbeiten, umzuformulieren und zu strukturieren. Die wissenschaftlichen Inhalte, Argumentationen, Quellen, Ergebnisse und Schlussfolgerungen wurden vom Autor erarbeitet. Sämtliche KI-gestützten Formulierungen wurden fachlich geprüft und bei Bedarf überarbeitet.	
TEXTERSTELLUNG OpenAI ChatGPT		
DARSTELLUNG OpenAI ChatGPT	GENERIERUNG NEUER ARTEFAKTE ChatGPT wurde genutzt, um auf Grundlage der vom Autor bereitgestellten Inhalte und Daten Entwürfe für Tabellen, Abbildungen und Diagramme zu erstellen. Die fachliche Prüfung, Auswahl und finale Ausgestaltung erfolgten durch den Autor.	VERBESSERUNG DER GESTALTUNG ChatGPT wurde genutzt, um bestehende Tabellen, Abbildungen und Diagramme hinsichtlich Struktur, Beschriftung, Übersichtlichkeit und Lesbarkeit zu verbessern. Die dargestellten Inhalte und Ergebnisse wurden durch den Autor festgelegt und geprüft.
PROGRAMMIERUNG OpenAI ChatGPT	GENERIERUNG NEUEN CODES AUF GRUNDLAGE VON BESCHREIBUNGEN ChatGPT wurde genutzt, um auf Grundlage fachlicher Vorgaben des Autors Code für Datenaufbereitung, Auswertung und Visualisierung zu erstellen. Die Auswahl der Methoden, die Prüfung der Ergebnisse und die fachliche Interpretation erfolgten durch den Autor.	ÜBERARBEITUNG UND OPTIMIERUNG BESTEHENDEN CODES ChatGPT wurde genutzt, um bestehenden Code zu korrigieren, zu strukturieren, zu vereinfachen und hinsichtlich seiner Ausführbarkeit zu verbessern. Sämtliche Änderungen und Ergebnisse wurden durch den Autor geprüft.
ETHISCHE ASPEKTE OpenAI ChatGPT	AUSWIRKUNGEN DES KI-EINSATZES AUF DAS PROJEKT ChatGPT unterstützte die sprachliche Ausarbeitung, Strukturierung, Datenaufbereitung, Codeerstellung und Ergebnisdarstellung. Die inhaltliche Verantwortung verblieb dabei stets beim Autor, sodass der Einsatz unterstützend, aber nicht inhaltlich bestimmend war.	MAßNAHMEN ZUR VERMEIDUNG VON KI-BEDINGTEN FEHLERN KI-generierte Inhalte wurden fachlich geprüft, bei Bedarf überarbeitet oder verworfen und anhand von Primärliteratur sowie gegebenenfalls im fachlichen Austausch validiert. Eine ungeprüfte Übernahme erfolgte nicht.
	MAßNAHMEN ZUR VERMEIDUNG VON SCHÄDEN ODER UNANGEMESSENER KI-NUTZUNG ChatGPT wurde nicht zur Bewertung von Personen oder Personengruppen eingesetzt. Die Ausgaben wurden auf unangemessene oder verzerrende Inhalte geprüft. Sensible, personenbezogene oder vertrauliche Daten wurden nicht eingegeben.	PRÜFUNG UND ZUSTIMMUNG ZU KI-GENERIERTEN ODER KI-VERÄNDERTEN INHALTEN Alle KI-generierten oder KI-gestützten Inhalte wurden vom Autor geprüft und freigegeben. Die Verantwortung für sämtliche Aussagen und Ergebnisse liegt beim Autor.
AI Usage Card v1.0 https://ai-cards.org PDF BibTeX XML JSON CSV		

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, dass ich diese Dissertation selbständig angefertigt, alle Hilfen und Hilfsmittel angegeben und alle wörtlich oder dem Sinne nach aus Veröffentlichungen oder anderen Quellen, insbesondere dem Internet, entnommenen Inhalte kenntlich gemacht habe.

Münster, den 26.09.2025
Ort, Datum


Peter Bruder