Energiewende in kommunalen Fahrzeugflotten in der Regiopolregion Rostock

- Bericht -

Erarbeitet durch:

Dr.-Ing. Grüttner Energie · Umwelt · Strategie GmbH
18239 Hohen Luckow
Bützower Straße 1 a

Rostock / Hohen Luckow, 30. März 2022

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis ... 3
Tabellenverzeichnis ... 5
Abkürzungen ... 6
0. Vorbemerkungen ... 8
0.1 Anlass, Ziel und Gliederung ... 8
0.2 Begriffe und Abgrenzungen ... 8
0.3 Methoden und Daten ... 9
1. Kommunale Fahrzeugflotten und alternative Antriebe ... 12
1.1 Ausgangslage im ÖPNV und in der Abfallentsorgung ... 12
1.1.1 ÖPNV in Deutschland und in Mecklenburg-Vorpommern ... 12
1.1.2 Omnibus-ÖPNV in der Regiopolregion Rostock ... 15
1.1.3 Kommunale Abfallentsorgung ... 18
1.2 Perspektiven im Omnibus-ÖPNV und in der kommunalen Abfallentsorgung ... 20
1.3 Alternative Antriebskonzepte für den ÖPNV und die Stadtentsorgung ... 23
1.3.1 Alternative Antriebskonzepte für Omnibusse ... 25
1.3.2 Alternative Antriebskonzepte für Entsorgungsfahrzeuge ... 29
1.3.3 Prozessketten für Fahrzeuge mit alternativen Antrieben ... 31
1.4 Ausgewählte Infrastrukturen für alternative Antriebskonzepte ... 37
1.4.1 Ladekonzepte und Ladeeinrichtungen für batterieelektrische Omnibusse ... 37
1.4.2 Infrastruktur für Wasserstoffbusse ... 40
1.4.3 Infrastruktur für Biomethanbusse ... 44
2. Betreiber kommunaler Flotten in der Regiopolregion Rostock ... 45
2.1 Rostocker Straßenbahn AG ... 45
2.1.1 Unternehmen ... 45
2.1.2 Fahrzeugbestand und Fahrzeugeinsatz ... 45
2.1.3 Omnibus-Betriebshof ... 47
2.1.4 Energieanlagen und Energieverbrauch ... 49
2.2 rebus Regionalbus Rostock GmbH ... 49
2.2.1 Unternehmen ... 49
2.2.2 Fahrzeugbestand und Kraftstoffverbrauch ... 49
2.2.3 Betriebshöfe ... 52
2.2.4 Energieanlagen und Energieverbrauch ... 53
2.3 Stadtentsorgung Rostock GmbH ... 54

2.3.1 Unternehmen ... 54
2.3.2 Fahrzeugbestand ... 55
2.3.3 Betriebshöfe ... 58
2.3.4 Energieanlagen und Energieverbrauch ... 58
3. Technische Machbarkeit alternativer Antriebskonzepte ... 63
3.1 Energieverbrauch ... 63
3.1.1 Abschätzung des Energieverbrauchs anhand einer Beispiel-Omnibuslinie ... 64
3.1.2 Jahresenergieverbrauch der kommunalen Flotten in der Regiopolregion Rostock ... 68
3.2 Klima- und Umwelteffekte ... 70
3.2.1 Abschätzung der Klima- und Umwelteffekte anhand einer Beispiel-Omnibuslinie ... 70
3.2.2 Jährliche Klima- und Umwelteffekte in der Regiopolregion Rostock ... 72
3.2.3 Erweiterte Betrachtung der CO_2-Emissionen ... 73
3.3 Zwischenfazit ... 75
4. Betriebshofkonzept für alternative Antriebskonzepte ... 77
4.1 Bestimmung wesentlicher Rahmendaten für das Betriebshofkonzept ... 77
4.2 Betriebshöfe für batterieelektrische Nutzfahrzeuge ... 81
4.3 Betriebshöfe für Wasserstoff-Nutzfahrzeuge ... 84
4.4 Betriebshöfe für Biomethan-Nutzfahrzeuge ... 86
4.5 Wartung und Instandhaltung ... 87
4.6 Bauliche und genehmigungsrechtliche Anforderungen ... 89
4.7 Versorgungssicherheit ... 90
4.8 Zwischenfazit ... 91
5. Planungs- und Umsetzungskonzept ... 92
5.1 Best-Practice-Beispiele ... 92
5.2 Ausgangspunkte des Planungs- und Umsetzungskonzepts ... 95
5.3 Planungs- und Umsetzungskonzept ... 97
5.4 Monitoring und Erfolgskontrolle ... 100
6. Zusammenfassung ... 102
7. Literatur- und Quellenverzeichnis ... 109
Anhang ... 115
A.1 Vergleich der Tank-to-Wheel-Emissionen für alternativ angetriebene Nutzfahrzeuge ... 116

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Bestandteile der Well-to-Wheel-Prozesskette bei Gas- und Dieselbussen 10
Abbildung 2: Kosten, Erlöse und Finanzierungsbedarf 2018 und 2030 in Mio. EUR 14
Abbildung 3: Hauptverkehrsmittel (Modal Split) im Regionalvergleich 16
Abbildung 4: Entwicklung der Beförderungskapazität im Omnibus-ÖPNV der RSAG 17
Abbildung 5: Entwicklung der Personenbeförderung im Omnibus-ÖPNV der RSAG 17
Abbildung 6: Entwicklung des Aufkommens an Haus- und Geschäftsmüll Rostock 20
Abbildung 7: Entwicklung der realen Reichweite von Batteriebussen mit Depotladekonzept 24
Abbildung 8: Alternative Antriebskonzepte für Omnibusse 26
Abbildung 9: Einsatzszenarien Batterie versus Wasserstoff-Brennstoffzelle in Lkw-Antrieben 30
Abbildung 10: Überblick über die Prozessketten für alternative Nutzfahrzeug-Antriebskonzepte 32
Abbildung 11: Prozessketten für batterieelektrische Nutzfahrzeuge 33
Abbildung 12: Prozessketten für Biomethan- und DME-Nutzfahrzeuge 34
Abbildung 13: Prozessketten für Wasserstoff-Nutzfahrzeuge 35
Abbildung 14: Grundstruktur einer LH_2/CGH_2-Tankstelle der Linde AG 36
Abbildung 15: Ladeeinrichtungen 150 kW zum Laden von Batteriebussen 38
Abbildung 16: Schematische Darstellung einer Ladestation mit drei Ladepunkten 39
Abbildung 17: Zuführungsmöglichkeiten der manuellen Kontaktierung 39
Abbildung 18: Optimierungsziele für das Lade- und Lastmanagement 39
Abbildung 19: Wasserstofftankstelle - Beispiel ESWE Wiesbaden 41
Abbildung 20: Flächenbedarf von Wasserstofftankstellen für Omnibusse 42
Abbildung 21: Beispiel einer Wasserstofftankstelle 600 kg/d bei CGH_2-Anlieferung 42
Abbildung 22: Beispiel einer Biomethantankstelle mit Speichersystem 44
Abbildung 23: Entwicklung des Omnibus-Bestands der RSAG 46
Abbildung 24: Altersstruktur des Omnibus-Bestands der RSAG 46
Abbildung 25: Omnibus-Betriebshof der RSAG in Rostock-Schmarl 48
Abbildung 26: Altersstruktur des Omnibus-Bestands von rebus 50
Abbildung 27: Kraftstoffverbrauch des Omnibus-Bestands von rebus 51
Abbildung 28: Betriebshöfe von rebus 52
Abbildung 29: Stromverbrauch und -erzeugung von rebus 53
Abbildung 30: Altersstruktur des Fahrzeugbestands der Stadtentsorgung Rostock 56
Abbildung 31: Abfallsammeltour der Stadtentsorgung Rostock (Beispiel) 57
Abbildung 32: Betriebshof Petridamm 26 der Stadtentsorgung Rostock 58
Abbildung 33: Jahresenergieverbrauch der Stadtentsorgung Rostock in GWh 59
Abbildung 34: Stromverbrauch des Betriebshofs Petridamm 2021 61
Abbildung 35: Lastgang Strom auf dem Betriebshof Petridamm im Juni 2021 61
Abbildung 36: Jahresgang des Stromverbrauchs des Betriebshofs Petridamm 2021 62
Abbildung 37: Linien-/Fahrprofil eines Stadtbusses auf der Buslinie 31 der RSAG in Rostock 65
Abbildung 38: Energieverbrauch eines Batteriebusses auf der Buslinie 31 der RSAG 67
Abbildung 39: CO_2-Emissionen in den Prozessketten alternativerAntriebe 74
Abbildung 40: Erweiterte CO_2-Bilanzen von Prozessketten mit alternativenAntrieben 75
Abbildung 41: Ladeinfrastruktur für betriebseigene Elektro-Pkw bei SR 80
Abbildung 42: Betriebliche Auslegungsproblematik bei batterieelektrischen Omnibussen 81
Abbildung 43: Elektrotechnische Infrastruktur für einen großen Betriebshof für Batteriebusse 84
Abbildung 44: Mögliche Anordnungen der Wasserstofftankstelle rebus-Betriebshof Güstrow 86

Abbildung 45: Phasen der Umstellung von Nutzfahrzeugflotten (schematisch) 96
Abbildung 46: Phasen der Umstellung von Nutzfahrzeugflotten 98

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Preiserhöhung ausgewählter Energieträger im nationalen Emissionshandel 21
Tabelle 2: Flächennutzung auf den Betriebshöfen von RSAG, rebus und SR 48
Tabelle 3: Größenstruktur des Omnibus-Bestands von rebus 50
Tabelle 4: Durchschnittsalter und Kraftstoffverbrauch des Busbestands von rebus 2020 51
Tabelle 5: Fahrzeuge - Bestand und Durchschnittsalter der SR-Gruppe 2021 56
Tabelle 6: Fahrzeugbezogener Verbrauch an Dieselkraftstoff der SR-Gruppe 2021 60
Tabelle 7: Energieverbrauchswerte von Omnibussen mit alternativen Antriebskonzepten 64
Tabelle 8: Typischer Energie- und Leistungsbedarf von Batteriebussen 66
Tabelle 9: Vergleich des Energieverbrauchs von Omnibussen auf der RSAG-Buslinie 31 68
Tabelle 10: Jahresenergieverbrauch alternativ angetriebener kommunaler Fahrzeugflotten 69
Tabelle 11: Emissionsfaktoren für die direkten Emissionen von schweren Nutzfahrzeugen 71
Tabelle 12: Vergleich der Tank-to-Wheel-Emissionen von Omnibussen auf der RSAG-Buslinie 31 72
Tabelle 13: Jährliche Emissionen alternativ angetriebener kommunaler Fahrzeugflotten 73
Tabelle 14: Kommunale Nutzfahrzeugflotten in der Regiopolregion Rostock 104
Tabelle 15: Energieverbrauch und THG-Emissionen der drei kommunalen Nutzfahrzeugflotten 106
Tabelle 16: Vergleich der Tank-to-Wheel-Emissionen - RSAG 116
Tabelle 17: Vergleich der Tank-to-Wheel-Emissionen - rebus 116
Tabelle 18: Vergleich der Tank-to-Wheel-Emissionen – SR-Gruppe 117

Abkürzungen

BEV - Batteriefahrzeug (Battery Electric Vehicle),
BAuA - Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin mit Sitz in Dortmund,
BZ - Brennstoffzelle,
CBM - komprimiertes Biomethan (Compressed Biomethane),
CC/CV - Konstantstrom/Konstantspannung (Constant Current/Constant Voltage),
CCS - Kombiniertes Ladesystem (Combined Charging System),
CCU - CO_2-Abscheidung und -nutzung (Carbon Capture and Utilization),
CGH_2 - komprimierter gasförmiger Wasserstoff (Compressed Gaseous Hydrogen),
CNG - Komprimiertes Erdgas (Compressed Natural Gas),
CtL - Umwandlung von Kohle zu Kraftstoff (Coal-to-liquids),
CVD - Saubere-Fahrzeuge-Richtlinie der Europäischen Union (Clean Vehicles Directive),
DME - Dimethylether (Oxymethylenether),
DWW - Druckwasserwäsche,
EBS - Ersatzbrennstoff,
EW - Einwohner,
EWZ - Einwohnerzahl,
GAP - Gasanlagenprüfung,
GF - Gleichzeitigkeitsfaktor,
GtL - Umwandlung von Gas zu Kraftstoff (Gas-to-liquids),
HVAC - Heizung, Lüftung und Klimatisierung (Heating, Ventilation und Air Conditioning),
HLKT - Heizungs-, Lüftungs- und Klimatechnik,
ICE - Motor mit interner Verbrennung (Internal Combustion Engines),
ITCS - Rechnergestütztes Betriebsleitsystem (Intermodal Transport Control System),
JIVE - Joint Initiative for hydrogen Vehicles across Europe,
KBA - Kraftfahrtbundesamt mit Sitz in Flensburg,
LBM - Flüssiges Biomethan (Liquified Biomethane),
LCA - Lebenszyklus-Analyse (Live Cycle Assessment),
MCS - Megawatt-Ladesystem (Megawatt Charging System),
MS - Mittelspannung,
NMC - Nickel-Mangan-Kobalt-Batterie,
LFP - Lithium-Eisenphosphat-Batterie,
LH_2 - flüssiger Wasserstoff (Liquified Gaseous Hydrogen),
LNG - Flüssiges Erdgas (Liquified Natural Gas),
LSA - Lichtsignalanlage,
LTO - Lithiumtitanatoxid-Batterie,
LVP - Leichtverpackungen,
nEHS - nationales Emissionshandelssystem,
NMC - Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid (Lithium-Ionen-Batterie),
NS - Niederspannung,
öDA - öffentlicher Dienstleistungsauftrag,
OBC - fahrzeugintegriertes Ladegerät (On-Board-Charger),
OEM - Originalgerätehersteller (Original Equipment Manufacturer),
ÖPNV - Öffentlicher Personennahverkehr,
örE - öffentlich-rechtlicher Entsorgungsträger,
PEM - Protonen-Austausch-Membran (Proton Exchange Membrane),
PPK - Papier, Pappe, Kartonagen,
PTC - Positiver Temperaturkoeffizient (positive temperature coefficient),
PtL - Umwandlung von Strom in Kraftstoff (Power-to-liquids),
RBL - Rechnergestütztes Betriebsleitsystem,
RLM - Registrierende Leistungsmessung (Strom),
SOC - Ladezustand (State of Charge),

SORT - Standardtestzyklus für Busse (Standardized On-Road Test Cycles),
TCO - Gesamtbetriebskosten (Total Cost of Ownership),
THG - Treibhausgas,
TRBS - Technische Regeln für Betriebssicherheit,
TRGS - Technische Regeln für Gefahrstoffe,
UW - Umspannwerk,
ÜNB - Übertragungsnetzbetreiber,
VDV - Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e. V. mit Sitz in Köln,
VHH - Verkehrsbetriebe Hamburg-Holstein GmbH mit Sitz in Hamburg,
VLP - Verkehrsgesellschaft Ludwigslust-Parchim mbH,
VNB - Verteilnetzbetreiber,

0. Vorbemerkungen

0.1 Anlass, Ziel und Gliederung

Der Energieverbrauch im Verkehrssektor der Regiopolregion Rostock hat einen erheblichen Anteil am Gesamtverbrauch der Region und konnte bislang im Hinblick auf den Klimaschutz kaum beeinflusst werden. Ein vielversprechender Ansatz zu einem wirksamen Klimaschutz im Verkehr besteht in der Ablösung fossiler Kraftstoffe durch erneuerbare Energieträger wie Wasserstoff. Hier kommt den Kommunen zum einen eine wichtige Vorbildrolle zu, indem sie die Machbarkeit demonstrieren. Zum anderen betreiben sie größere Fahrzeugflotten, deren Umstellung auf Wasserstoff bereits heute wirtschaftlich sein kann.

Die vorliegende Untersuchung zielte deshalb auf die Anwendung von Wasserstofftechnologien und anderen alternativen Antrieben und damit auf die Umsetzung der Energiewende in kommunalen Fahrzeugflotten. Hierzu wurden der kommunale Anbieter Rostocker Straßenbahn AG (RSAG), die rebus Regionalbus Rostock GmbH sowie die Stadtentsorgung Rostock GmbH (SR) untersucht.

Inhaltlich ist die Untersuchung in drei Teile gegliedert: Im ersten Teil werden die technische Machbarkeit alternativer Antriebskonzepte in kommunalen Fahrzeugflotten einschließlich Energiebilanz und Umwelteffekte untersucht. Darauf aufbauend wird im zweiten Teil ein Konzept für einen Betriebshof entworfen, welcher den Einsatz von Fahrzeugen mit konventionellen und alternativen Antrieben sowohl im Mischbetrieb als auch in der Vollumstellung ermöglicht. Gegenstand des dritten Teils ist eine Strategie, mit welcher dieses Betriebshofkonzept in der Regiopolregion Rostock „ausgerollt“ werden kann.

Die Untersuchung wurde im Rahmen des Bundesprojektes „Regiopolen und Regiopolregionen für Deutschland: Ein Beitrag zur nachhaltigen Sicherung gleichwertiger Lebensverhältnisse in städtischen und ländlichen Räumen Deutschlands“ im Bundesprogramm „Region gestalten“ (BULE–BMI) erarbeitet. Sie ist Teil des Moduls 1 des Bundesprojekts, in dem sich die Regiopolregion Rostock mit der Analyse der zentralen Funktionen im Infrastrukturbereich Energie befasst hat.

0.2 Begriffe und Abgrenzungen

In der vorliegenden Studie werden ausschließlich solche Fahrzeuge betrachtet, die als Straßenfahrzeuge der Klassen M und N gemäß Art. 4, Abs. 1 a und b der Verordnung (EU) 2018/858 der Europäischen Union über die Genehmigung und die Marktüberwachung von Kraftfahrzeugen /*1*/ klassifiziert sind.

Soweit nicht-schienengebundene Straßenfahrzeuge im öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) eingesetzt werden, handelt es sich um im Linienverkehr eingesetzte Omnibusse, die – im Gegensatz zu den Fahrzeugen im Individualverkehr – jedermann zugänglich sind. Dieser Linienverkehr deckt einen Teil des Mobilitätsbedarfs im Stadt-, Vorort- oder Regionalverkehr, bei denen die Fahrtdistanz und die Fahrtdauer in der Mehrzahl der Beförderungsfälle 50 km bzw. 1 Stunde nicht übersteigen.

In Straßenfahrzeugen können verschiedene Antriebskonzepte realisiert sein. Als konventionelles Antriebskonzept wird in dieser Studie ausschließlich das mit einem Dieselmotor angetriebene Nutzfahrzeug betrachtet. Als alternative Antriebskonzepte werden demgegenüber alle Antriebe bezeichnet, welche teilweise oder vollständig auf der Nutzung Erneuerbarer Energien basieren und daher teilweise oder vollständig klimaneutral sind. Fahrzeuge mit alternativen Antriebskonzepten schließen saubere leichte und schwere Nutzfahrzeuge ebenso ein wie emissionsfreie schwere Nutzfahrzeuge im Sinne der CVD (EU) 2019/1161 /*28*/ bzw. des Gesetzes zur Umsetzung der Richtlinie (EU) 2019/1161 /*29*/.

Die operative Basis für den Einsatz von Fahrzeugflotten ist der Betriebshof (synonym verwendete Bezeichnungen sind Verkehrshof oder Depot). Der Betriebshof ist der Stationierungsort der Fahrzeuge, von dem aus sie zum Einsatz ausfahren und zu dem sie anschließend zurückkehren. Außerdem finden dort im Allgemeinen alle Vorgänge der Ver- und Entsorgung sowie der Wartung und Instandhaltung der Fahrzeuge statt. Dementsprechend umfasst ein Betriebshof typischerweise die folgende Infrastruktur:

- Ein- und Ausfahrt, Stauräume, Fahrstraßen, Abstellanlagen, Fußwege, Parkplätze für Pkw,
- Anlagen und Einrichtungen für die Instandhaltung, Versorgung und Reinigung der Fahrzeuge und
- Räume und Einrichtungen für das Personal sowie gegebenenfalls
- Räume und Einrichtungen für die Leitung und Verwaltung des Unternehmens (Hauptbetriebshof).

Die Betreiber kommunaler Flotten im ÖPNV und in der Stadtentsorgung haben oft Fahrzeuge mit verschiedenen Einsatzzwecken zeitlich parallel im Bestand und im Einsatz. Darüber hinaus werden zunehmend auch Fahrzeuge mit unterschiedlichen Antriebskonzepten parallel betrieben. Während der konventionelle Dieselbetrieb, also der alleinige Einsatz von Dieselfahrzeugen auf einer Betankung mit Dieselkraftstoff und dementsprechend auf einer Dieseltankstelle basiert, erfordert der Parallel- oder Mischbetrieb jeweils die Realisierung unterschiedlicher betrieblicher Prozesse und daher die Vorhaltung verschiedener Infrastrukturen zur Energieversorgung der Fahrzeuge. Die vollständige Ablösung des etablierten, konventionellen dieselmotorischen Antriebskonzepts durch ein alternatives Antriebskonzept wird als Vollumstellung bezeichnet. Sie ist erreicht, wenn das letzte konventionell angetriebene Fahrzeug einer Fahrzeugflotte durch solche mit alternativen Antrieben ersetzt ist. Dabei können wiederum Fahrzeuge mit verschiedenen alternativen Antriebskonzepten zeitlich parallel zueinander betrieben werden.

0.3 Methoden und Daten

Die vorliegende Untersuchung gliedert sich in die drei Teile Machbarkeitsanalyse, Betriebshofkonzept sowie Planungs- und Umsetzungskonzept. Entsprechend den in diesen Teilen zu gewinnenden Erkenntnisse wurden jeweils spezifische Methoden und Daten eingesetzt bzw. verwendet:

Im ersten Teil der vorliegenden Untersuchung, also in der Analyse und Bewertung der technischen Machbarkeit einschließlich Energiebilanz und Umwelteffekte wurden zunächst die Ausgangslage im nicht-schienengebundenen ÖPNV und in der Stadtentsorgung sowie die derzeit verfügbaren Antriebskonzepte und die zugehörigen Prozessketten im Überblick dargestellt. Hierzu wurden Daten und Informationen zum einen durch die Auswertung des gegenwärtig erreichten Standes von Forschung und Entwicklung (Hochschulschriften, Studien, Fachjournale etc.) und zum anderen durch Fachgespräche mit den drei Unternehmen gewonnen, welche in der Regiopolregion Rostock in diesen beiden Branchen angesiedelt sind (Abschnitt 0.1). Diese Informations- und Datenrecherche lieferte zugleich auch für die Analyse und Bewertung der technischen Machbarkeit notwendige Daten. Die Analysen selbst erfolgten zum einen durch die modellbasierte Berechnung des Energieverbrauchs und der Umweltbelastungen von Omnibussen auf einer konkreten Buslinie im ÖPNV, also entlang eines Fahrprofils. Für die Bewertung wurden diese für verschiedene Antrieben ermittelten Ergebnisse vergleichend gegenübergestellt. Dabei bildet ein typischer Diesel-Omnibus das Referenzfahrzeug. Zum anderen wurden dieser linienspezifische Energieverbrauch und die zugehörigen Umweltbelastungen auf den Omnibusbetrieb in der Regiopole bzw. im Verflechtungsraum hochgerechnet, wofür wiederum besonders auch Daten der drei Unternehmen zu ihrem jeweiligen Energieverbrauch herangezogen wurden. Bei diesen Daten handelt es sich beispielsweise um die Jahreslaufleistungen der eingesetzten Omnibusse bzw. Entsorgungsfahrzeuge, um die Jahreskraftstoffverbräuche der Fahrzeuge bzw. Flotten sowie um kraftstoff- bzw. antriebsspezifische Emissionsfaktoren zur Bilanzierung der direkten Treibhausgasemissionen. Für den Vergleich werden die Energieverbräuche und die Umweltbelastungen in Form von Kennziffern angegeben, also auf die Jahreslaufleistung bzw. auf den Energieverbrauch bezogen.

Bei der Bilanzierung der Treibhausgasemissionen werden in einer Vielzahl von Untersuchungen verschiedene Bilanzierungsrahmen zugrunde gelegt. Dabei können zunächst Well-to-Tank- und Tank-to-Wheel-Bilanzen voneinander unterschieden werden, welche die Emissionen innerhalb der Kraftstoffbereitstellungskette („vom Bohrloch bis zum Kraftstofftank“) bzw. bei der Kraftstoffnutzung im Nutzfahrzeug („vom Kraftstofftank bis zum Rad“) bilanzieren. Zusammen ergeben sie die Well-to-Wheel-Emissionen[1]. Sie beinhalten somit neben den Hauptprozessen wie Förderung, Aufbereitung und Bereitstellung der Rohstoffe oder Produktion und Verteilung der Kraftstoffe auch sämtliche stoff- und energieliefernden Nebenprozesse. Abbildung *1* zeigt beispielhaft die Bestandteile der Well-to-Wheel-Prozessketten von Gas- und Dieselbussen.

[1] Die Durchführung von Well-to-Wheel-Analysen bei Transportdienstleistungen im Güter- und Personenverkehr wird in Deutschland durch die Norm DIN EN 16258 /*2*/ beschrieben.

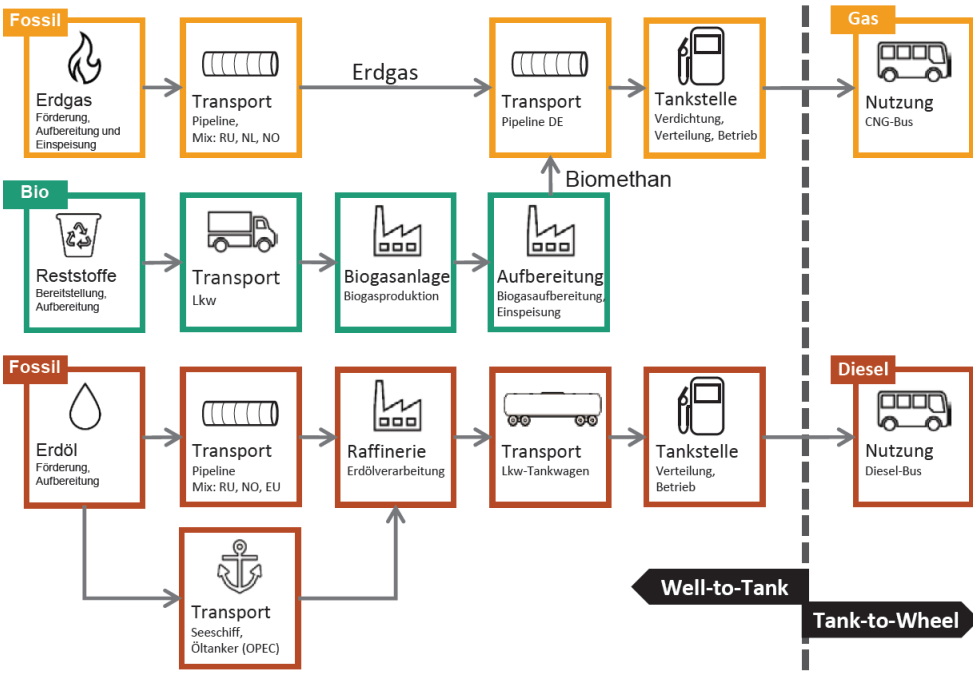

Abbildung 1: Bestandteile der Well-to-Wheel-Prozesskette bei Gas- und Dieselbussen[2]

Gleichwohl sind im Gegensatz zu einer vollständigen Ökobilanz gemäß ISO 14040 und ISO 14044 bestimmte Leistungen und Prozesse nicht berücksichtigt, beispielsweise Bauvorleistungen, Wartungs- und Instandhaltungsprozesse sowie die Entsorgung von Abfallstoffen. Diese Einschränkung stellt grundsätzlich einen Nachteil der Well-to-Wheel-Methodik dar und kann zu Verzerrungen in der Bewertung der verschiedenen alternativen Antriebstechnologien führen. Um dies zu vermeiden, müsste anstelle der Well-to-Wheel-Analyse eine vollständige LCA-Analyse durchgeführt werden, die neben der Bereitstellung und dem Verbrauch der Energieträger auch sämtliche Materialvorketten berücksichtigt. Die Durchführung solcher Analysen stößt allerdings auf erhebliche Schwierigkeiten bei der Bereitstellung der erforderlichen Daten und ist zudem mit einem erheblichen Aufwand verbunden[3]. Aus diesen Gründen werden hier ausschließlich die Tank-to-Wheel-Emissionen abgeschätzt.

Diese Abschätzung der Tank-to-Wheel-Emissionen wird anschließend durch eine erweiterte Betrachtung durchgeführt, welche die CO_2-Emissionen der Prozessketten Dieselbus, Biomethanbus und DME-Bus miteinander vergleicht. Erst in dieser vergleichenden Betrachtung werden die spezifischen CO_2-Vorteile dieser beiden Prozessketten gegenüber der Dieselbus-Prozesskette sichtbar.

Im zweiten Teil, in dem ein Betriebshofkonzept entwickelt wurde, waren die Grundanforderungen zu ermitteln, welche ein Betriebshof erfüllen muss, damit auf ihnen in den Anwendungsbereichen ÖPNV und Stadtentsorgung zunächst parallel zu den vorhandenen Dieselfahrzeugen (Mischbetrieb), und später an ihrer Stelle (Vollumstellung) saubere Fahrzeuge und Fahrzeuge mit emissionsfreien bzw. klimaneutralen Antrieben betrieben werden können. Hierzu wurden zunächst ebenfalls die Fachliteratur sowie Gesetze, Verordnungen und Vorschriften ausgewertet, die sich auf die Anforderungen im ÖPNV bzw. in der Abfallentsorgung sowie auf die Errichtung, die Genehmigung und den Betrieb der entsprechenden Infrastrukturen auf den Betriebshöfen beziehen. Des Weiteren wurden Fachgespräche mit entsprechenden Akteuren in der Regiopolregion Rostock geführt, in denen diese zu den genannten Themen befragt

2 Quelle: /3/, S. 15.

3 Dies zeigt sich beispielsweise bei der LCA-Analyse von Elektrofahrzeugen, für die unter anderem in dem von der Europäischen Union geförderten Projekt eLCAr (E-Mobility Life Cycle Assessment Recommendations) eine Berechnungsmethodik vorgeschlagen wurde /4/.

wurden. Die in den Recherchen und Gesprächen gewonnenen Erkenntnisse wurden systematisch aufbereitet und anhand eines beispielhaften Betriebshofkonzepts dargestellt.

Im dritten Teil wurde ein auf die Regiopolregion Rostock bezogenes Planungs- und Umsetzungskonzept entwickelt. Dazu wurden anderenorts in Deutschland durchgeführte Projekte zur Umstellung von kommunalen Fahrzeugflotten recherchiert und analysiert. Im Ergebnis wurde einige dieser Projekte als Best-Practice-Projekte vertieft ausgewertet. Dabei wurde unter anderem Wert darauf gelegt, dass es sich um ein mit der Regiopolregion Rostock vergleichbare Projektgebiete handelt und dass dort gewonnene Erkenntnisse und Erfahrungen beschrieben wurden. Diese wurden, soweit dies möglich war, dem Inhalt nach auf die Regiopolregion Rostock bzw. auf die Regiopole sowie den Verflechtungsraum übertragen.

1. Kommunale Fahrzeugflotten und alternative Antriebe

Der ÖPNV und die Abfallentsorgung können als wichtige kommunale Leistungen der Daseinsvorsorge beschrieben werden. Beide Bereiche versorgen die Bevölkerung und die Wirtschaft mit Dienstleistungen, die für die Funktionsfähigkeit der Gesellschaft in Stadt und Land bedeutsam sind. Darüber hinaus leisten sie auch wichtige Beiträge zum Umweltschutz.

1.1 Ausgangslage im ÖPNV und in der Abfallentsorgung

Sowohl die im ÖPNV als auch in der Abfallentsorgung in der Regiopolregion Rostock tätigen Unternehmen führen ihre Verkehrs- und Entsorgungsdienstleistungen unter spezifischen Bedingungen durch, die zudem einem stetigen Wandel unterliegen. Zur Beschreibung der aktuellen Situation im ÖPNV und in der Stadtentsorgung können zunächst einige Merkmale angegeben werden, welche sowohl für den ÖPNV als auch für die Stadtentsorgung bedeutsam sind:

- Die Einwohner- und die Haushaltszahl sowie die Einwohnerdichte und die Haushaltsgrößenstruktur bestimmen sowohl den Mobilitätsbedarf als auch das Abfallaufkommen in einer Region.
- Die regionale Wirtschaft trägt ebenfalls nicht nur zum Abfallaufkommen in einer Region bei, sondern hat auch einen erheblichen Einfluss auf die dortigen Einkommens- und Kaufkraftverhältnisse. Letztere sind wiederum sowohl für die Höhe des Abfallaufkommens als auch für die Verkehrsmittel bedeutsam, welche die Bevölkerung zur Deckung ihres Mobilitätsbedarfs wählt.

Darüber hinaus kann die aktuelle Ausgangslage sowohl im Straßen-ÖPNV (Abschnitt 1.1.1/1.1.2) als auch in der Abfallentsorgung (Abschnitt 1.1.3) durch weitere spezifische Merkmale beschrieben werden.

1.1.1 ÖPNV in Deutschland und in Mecklenburg-Vorpommern

Im ÖPNV ist zwischen dem Nahverkehr auf der Schiene (Schienenpersonennahverkehr) und dem sonstigen öffentlichen Nahverkehr zu unterscheiden (Busse, Straßenbahn). Die entgeltliche oder geschäftsmäßige Personenbeförderung mit Straßenbahnen, Oberleitungsbussen und Kraftfahrzeugen ist in Deutschland im Personenbeförderungsgesetz (PBefG) geregelt[4]. Dieses Gesetz mit dem Schwerpunkt auf Genehmigungssachverhalten stammt aus dem Jahre 1990 und ist zuletzt 2021 geändert worden, um eine eigene Rechtsgrundlage für neue digitale Mobilitätsangebote/-dienste und Geschäftsmodelle zu schaffen. Das Gesetz legt fest, dass bei seiner Anwendung die Ziele des Klimaschutzes und der Nachhaltigkeit zu berücksichtigen sind (§ 1 a PBefG). Darüber hinaus definiert das Gesetz zur Regionalisierung des öffentlichen Personennahverkehrs (RegG) den öffentlichen Personennahverkehr als eine Aufgabe der Daseinsvorsorge. Dieses Gesetz strebt zur Stärkung der Wirtschaftlichkeit der Verkehrsbedienung im ÖPNV an, die Zuständigkeiten für dessen Planung, Organisation und Finanzierung zusammenzuführen und bestimmt, dass die Bundesländer das Nähere regeln. Mecklenburg-Vorpommern hat hierzu 2021 eine Landesverordnung erlassen, welche die zuständigen Behörden auf dem Gebiet des Straßenverkehrswesens bestimmt (Straßenverkehr-Zuständigkeitslandesverordnung – StVZustLVO M-V). Danach sind das Verkehrsministerium und das Landesamt für Straßenbau und Verkehr die Oberste bzw. die Obere Landesbehörde. Zudem werden die kreisfreien Städte, Landkreise und amtsfreien Gemeinden als Erlaubnisbehörden festgelegt. Die genannten Gesetze werden in Mecklenburg-Vorpommern außerdem durch das Gesetz über den öffentlichen Personennahverkehr in Mecklenburg-Vorpommern (ÖPNVG M-V) weiter konkretisiert /5/. Ein wesentliches Ziel dieses Gesetzes ist es, das ÖPNV-Bedienungsangebot in sozial- und ordnungspolitischer Verantwortung an den Mobilitätsbedürfnissen der Bevölkerung und an den raum-

[4] Das Personenbeförderungsgesetz (PBefG) unterscheidet weiterhin zwischen Linienverkehr (§ 42 PBefG, § 43 PBefG) und Gelegenheitsverkehr (§ 46 PBefG). Ziel des Gesetzes ist es, eine ausreichende Bedienung der Bevölkerung mit ÖPNV-Verkehrsleistungen sicherzustellen und den Beitrag des Bundes zur Finanzierung der Aufwendungen der Länder zu regeln. Allerdings ist mit den Beträgen insbesondere der Schienenpersonennahverkehr zu finanzieren (§ 6 RegG).

strukturellen Erfordernissen auszurichten. Daher sind bei den ÖPNV-Planungen die Grundsätze und Ziele der Raumordnung und Landesplanung sowie der kommunalen Bauleitplanung zu berücksichtigen. Außerdem sollen bei der Planung und dem Ausbau der Verkehrsinfrastruktur in größeren Zentren und in ihrem Umland (Ordnungsraum) die verkehrstechnischen Belange des ÖPNV vorrangig berücksichtigt werden. Gleichzeitig soll der ÖPNV unter Beachtung des Grundsatzes der Wirtschaftlichkeit die Erfordernisse des Umweltschutzes berücksichtigen und „im Sinne der bestmöglichen Arbeitsteilung zwischen den Verkehrsträgern" als vollwertige Alternative zum motorisierten Individualverkehr ausgebaut werden. Als Aufgabenträger bestimmt das Gesetz die Landkreise und kreisfreien Städte, welche somit in ihrem eigenen Wirkungskreis eine ausreichende Bedienung der Bevölkerung mit Verkehrsleistungen im nichtschienengebundenen ÖPNV sicherstellen müssen.

Eine weitere wichtige Grundlage für den ÖPNV bildet der 2018 von der Landesregierung verabschiedete Integrierte Landesverkehrsplan Mecklenburg-Vorpommern (ILVP M-V). Danach strebt das Land im ÖPNV ein integriertes Verkehrsangebot aller Verkehrsträger an. Die Umsetzung dieses Ziels erfolgt mit dem Schienenpersonennahverkehr (SPNV), für den das Land zuständig ist, sowie mit Straßenbahnen und Omnibussen. Der ILVP M-V benennt im Gegensatz zu der zentralen Aufgabe der Nachwendezeit, eine unzureichende Verkehrsinfrastruktur an die Bedürfnisse eines modernen Landes anzupassen (Landesverkehrskonzept 2002)[5], nunmehr drei zentrale Herausforderungen, vor denen der Verkehr im Allgemeinen und der ÖPNV im Land im Besonderen steht /6/, S. 10:

- die demografischen Entwicklungen in einem dünn besiedelten Flächenland,
- die tendenziell zurückgehenden Finanzmittel für die Verkehrsinfrastruktur
- und die Anforderungen an ein ressourcenschonendes Verkehrssystem.

Um diese Herausforderungen bewältigen zu können, verbindet der ILVP M-V „bewährte Mobilitätsmuster" mit neuen Ansätzen insbesondere für die Mobilität im ländlichen Raum. Sein integrierter Ansatz besteht in der gemeinsamen Betrachtung der verschiedenen Verkehrsträger und Verkehrsmittel, wobei bestimmte „von Tür zu Tür"-Mobilitätsketten im Vordergrund stehen. Als die drei wesentlichen Säulen werden die Infrastruktur, der Service und die Kommunikation benannt. Als Leitziel der Verkehrspolitik in Mecklenburg-Vorpommern bestimmt der ILVP M-V „eine nachhaltige Mobilität, die ökonomische, soziale und ökologische Anforderungen soweit wie möglich in Einklang bringt". Als eine verkehrspolitische Leitlinie ergibt sich daraus, dass die verschiedenen Verkehrsträger, darunter auch der ÖPNV, durch Kooperation und Integration miteinander vernetzt werden sollen /6/, S. 46.

Dieser integrierte Ansatz trägt auch dem Landesraumentwicklungsprogramm Mecklenburg-Vorpommern (LEP M-V 2016) Rechnung, dem zufolge das Gesamtverkehrssystem des Landes aus Netzen und Verkehrsträgern die Teilhabe aller Bevölkerungsgruppen am gesellschaftlichen Leben gewährleisten und die wirtschaftliche Entwicklung sicherstellen soll. Dafür soll die nachhaltige Kombination und Kooperation der verschiedenen Verkehrsträger im Personen- und Güterverkehr weiter verbessert werden /8/, S. 65.

2007 wurde in Mecklenburg-Vorpommern als Interessenvertretung der im ÖPNV des Landes aktiven Unternehmen ein Landesfachausschuss ÖPNV Mecklenburg-Vorpommern (LFA) gegründet. Der Ausschuss ist ein gemeinsamer Fachausschuss der Verkehrsverbände des Landes (Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e. V./Landesgruppe Nord - VDV Nord, Verband Mecklenburg-Vorpommerscher Omnibusunternehmen e. V. - mVo) und vertritt die Interessen der auf Schiene, Straße und Wasser aktiven Verkehrsunternehmen, -gemeinschaften und -verbünde.

[5] Gemäß dem Gesetz über den öffentlichen Personennahverkehr in Mecklenburg-Vorpommern (ÖPNVG M-V) hat das Landesverkehrsministerium einen ÖPNV-Landesplan aufzustellen und bei Bedarf zu überarbeiten oder fortzuschreiben. Der ILVP 2018 stellt die Fortschreibung des Landesverkehrskonzepts 2002 dar. Die den ÖPNV betreffenden Inhalte des ILVP übernehmen zugleich die Funktion eines fortgeschriebenen ÖPNV-Landesplans /6/, S. 58.

Gemäß dem Personenbeförderungsgesetz sind ÖPNV-Verkehrsleistungen eigenwirtschaftlich zu erbringen (§ 8 Abs. 4 PBefG)[6]. Erst wenn auf diesem Wege eine ausreichende Verkehrsbedienung nicht zu erbringen ist, kann der Aufgabenträger diese Leistungen selbst erbringen oder direkt vergeben. Sofern dabei zur Finanzierung öffentliche Mittel aufgewendet werden, muss die Leistung grundsätzlich ausgeschrieben und in einem wettbewerblichen Vergabeverfahren vergeben werden. Zur Aufnahme des Betriebs und zur Erbringung der im öffentlichen Dienstleistungsauftrag (öDA) festgelegten Dienstleistungen benötigt das beauftragte Verkehrsunternehmen eine Genehmigung (§ 2 Abs. 1 Nr. 3 PBefG), die beispielsweise für Kraftomnibusse für 10 Jahre erteilt und auf maximal 22,5 Jahre angepasst werden kann.

Die Betriebskosten des ÖPNV werden in Deutschland wie europaweit nur teilweise durch die Nutzerfinanzierung gedeckt. Der übrige Finanzierungsbedarf wird durch die öffentliche Hand ausgeglichen, wobei im ÖPNV auf der Straße in der Regel die Bundesländer und Gemeinden den Betrieb finanzieren. Allerdings ist im Vergleich zu anderen europäischen Ländern der öffentliche Anteil der Finanzierung vergleichsweise niedrig. Gemäß einer im Auftrag des Verbands Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) erarbeiteten Studie /9/ beliefen sich die Leistungskosten des Straßen-ÖPNV 2018 in den Städten auf 5,4 Mrd. EUR und in den Regionen auf 4,1 Mrd. EUR. Davon wurden 4,0 bzw. 3,6 Mrd. EUR durch die Nutzer finanziert. Der öffentliche Finanzierungsbedarf belief sich dementsprechend auf 1,4 bzw. 0,5 Mrd. EUR. Bis zum Jahr 2030 wird infolge der zur Erreichung der nationalen Klimaziele erforderlichen Leistungssteigerungen näherungsweise eine Verdopplung der Leistungskosten erwartet.

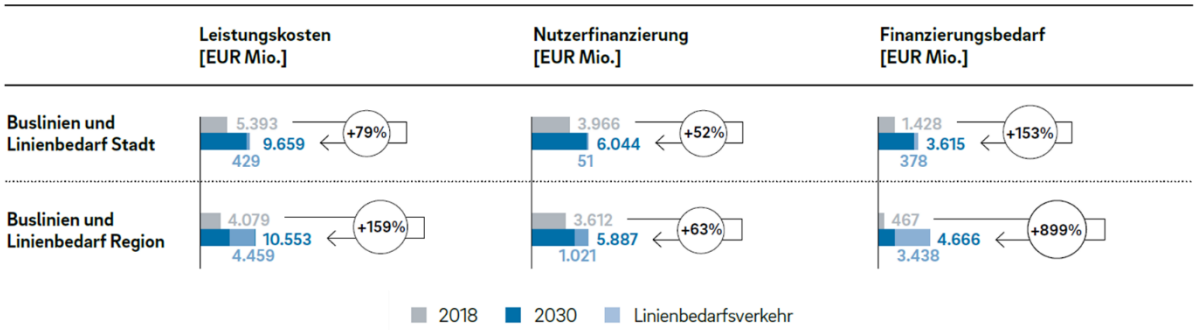

Abbildung 2: Kosten, Erlöse und Finanzierungsbedarf 2018 und 2030 in Mio. EUR[7]

Um die Finanzierungsprobleme des ÖPNV mit Omnibussen auf der Bundesebene zu lösen, hat die Bundesregierung mit den letzten Änderungen des Regionalisierungsgesetzes (RegG) die Beiträge des Bundes zur Finanzierung des ÖPNV in den Ländern für die Jahre 2020 und 2021 erhöht. Dabei handelt es sich zwar um eine temporäre Erhöhung, mit der die Einnahmenausfälle des ÖPNV infolge der COVID-19-Pandemie ausgeglichen werden sollen. Sie zeigt jedoch das Bestreben des Bundes, zur Erhaltung der Wettbewerbsfähigkeit des ÖPNV und zur Vermeidung einer Rückverlagerung vom ÖPNV auf den MIV beizutragen und damit zugleich den Umwelt- und Klimaschutz zu fördern.

Darüber hinaus gibt es weitere Aktivitäten im Bund und in den Ländern mit dem Ziel, die Finanzierung und Organisation des ÖPNV weiterzuentwickeln[8]:

- Der ÖPNV verzeichnet jährlich Einnahmeverluste in Höhe von ca. 250 Mio. EUR. Diese Verluste könnten durch Zugangssicherungssysteme reduziert werden. Allerdings erfordern diese Systeme Investitionen, welche die Verluste deutlich übersteigen. Zudem wird dieser Ansatz beispielsweise vom Deutschen Städte- und Gemeindetag abgelehnt, weil er den Zugang bestimmter Nutzergruppen zum

6 Eigenwirtschaftlich sind Verkehre, welche aus unternehmerischer Initiative heraus am Markt entstehen und ohne Vergabe eines öffentlichen Auftrages betrieben werden /7/, S. 131.

7 Quelle: /9/, S. 34.

8 Ein Beispiel für solche Aktivitäten sind Expertenanhörungen, wie sie der Ausschuss für Verkehr und digitale Infrastruktur des Deutschen Bundestages durchführt. Die beschriebenen Ansätze zur Weiterentwicklung des ÖPNV wurden dort am 13. Januar 2021 beraten. Quelle: https://www.bundestag.de/presse/hib/817094-817094.

ÖPNV erschweren würde, statt diesen zu erleichtern. Als geeigneter wird dort der Auf- und Ausbau digitaler Angebote wie die Registrierung per Mobilfunktelefon eingeschätzt.

- Zur Verbesserung der Situation im ÖPNV können auch Änderungen rechtlicher Rahmenbedingungen beitragen. Beispielsweise setzt die Errichtung von Einkaufszentren auch die Planung einer ausreichenden Anzahl von Pkw-Parkplätze voraus, wohingegen eine ÖPNV-Anbindung nicht gefordert ist. Auch finanziert der Bund die Bereitstellung von Omnibuskilometern, auf der kommunalen Ebene fehlt jedoch eine Kopplung der Finanzierung an die tatsächlich beförderten Personenzahlen und damit ein unternehmerischer Anreiz, das Angebot benutzerfreundlicher zu gestalten.
- Eine Ausweitung des ÖPNV ist nur sinnvoll, wenn dieser auch tatsächlich genutzt wird. Deshalb wird diskutiert, ob ein über die Grundversorgung als Daseinsvorsorge hinausgehendes ÖPNV-Angebot zukünftig von den Nutznießern finanziert werden könnte, also beispielsweise durch eine maßvolle ÖPNV-Erschließungs- oder Nahverkehrsabgabe für Bewohner und Gewerbe[9].
- Neue Finanzierungsquellen für den ÖPNV könnten beispielsweise durch eine City-Maut geschaffen werden, die allerdings in einen finanzverfassungsrechtlichen Rahmen eingepasst werden muss.

Um auch die MIV-Mobilisten zur stärkeren ÖPNV-Nutzung anzureizen, sollten diese zu dessen Finanzierung herangezogen werden. Eine Möglichkeit hierzu besteht gegebenenfalls in der Erhebung einer kommunalen Abgabe bei allen potentiellen Verkehrsteilnehmern. Damit könnte sich zugleich die Möglichkeit einer Senkung der Ticketpreise für die ÖPNV-Benutzer und damit zur Erhöhung der Attraktivität des ÖPNV eröffnen. Eine weitere Überlegung mit ähnlicher Stoßrichtung betrifft die Übertragung des Systems der Konzessionsvergabe durch Kommunen auf die Landes- und Bundesstraßen (bei gleichzeitiger Reformierung des Systems der Konzessionsabgaben).

Jedenfalls ist nicht nur zur Verbesserung der finanziellen Ausgangslage des ÖPNV auf der Straße, sondern auch zur Erreichung der Klimaziele im Verkehr eine Push-und-Pull-Strategie erforderlich, welche anreizorientierte Maßnahmen im ÖPNV mit restriktiven Maßnahmen im individuellen Kfz-Verkehr wie Zulassungssteuern und Straßenbenutzungsgebühren verbindet. Ein wesentlicher Baustein dieser Push-und-Pull-Strategie ist ein erheblich ausgebauter, beschleunigter und in seiner Qualität verbesserter ÖPNV. In Modellrechnungen konnte nachgewiesen werden, dass eine solche Strategie nicht nur zur Erreichung der Klimaziele notwendig, sondern auch sehr wirksam ist. Dabei ist je nach Umfang des ÖPNV-Ausbaus mit zusätzlichen jährlichen Betriebs- und Infrastrukturkosten in Höhe von ca. 2 bis 7 Mrd. EUR zu rechnen. Im Falle einer Nichterreichung der Klimaziele Deutschlands im nicht vom europäischen Emissionshandel (EU-ETS) erfassten Verkehrssektor entstehen allerdings durch den verpflichtenden Ankauf von Emissionszertifikaten entsprechend der Lastenteilungsentscheidung der EU ebenfalls enorme Kosten, die sich bis zum Jahr 2030 auf 30 bis 60 Mrd. EUR belaufen könnten */10/*.

1.1.2 Omnibus-ÖPNV in der Regiopolregion Rostock

Des Weiteren charakterisieren die Ausgangslage im ÖPNV besonders die kommunalen bzw. regionalen Verkehrsstrukturen sowie die ÖPNV-Attraktivität bzw. -Nutzung in der Regiopolregion Rostock:

Der aktuellen Mobilitätsstudie für Mecklenburg-Vorpommern */15/* zufolge sind an durchschnittlichen Tagen 85 Prozent der Einwohner des Landes zu einem kurzen Weg außer Haus. Diese Mobilitätsquote liegt auf dem Niveau des Durchschnittswerts für Deutschland. Auch zwischen den Regionen innerhalb von Mecklenburg-Vorpommern sind die Unterschiede relativ gering. Unterschiede bestehen dagegen auf der Ebene der Raumkategorien, also der Stadt-Umland-Räume, der ländlichen Gestaltungsräume sowie der ländlichen Räume. Der Modal Split im Land unterscheidet sich wiederum nur wenig von der bundesweiten Verteilung, Abbildung *3*. Danach ist der Anteil des ÖPNV im Gegensatz zum Anteil des motorisierten Individualverkehrs (MIV) sowohl bei den Wegen als auch bei den Personenkilometern relativ gering. Auch hier sind die regionalen Unterschiede innerhalb des Landes Mecklenburg-Vorpommern klein. Im Vergleich zu der vorhergehenden Mobilitätsstudie aus dem Jahr 2008 hat der MIV-Anteil an den

[9] Beispiele für entsprechende Instrumente sind Arbeitgeberbeiträge, beitragsfinanzierte Bürgertickets, Verkehrserzeugungsabgaben für Institutionen, die Kfz-Verkehr erzeugen oder eine Pkw-Maut für das gesamte Straßennetz. Solche Instrumente verschaffen den Kommunen eigene Finanzierungsquellen, mit denen das grundsätzliche Problem der fehlenden kommunalen Mittel für den ÖPNV verringert werden könnte. Weiterführende Informationen zur Nutznießerfinanzierung finden sich in */10/*.

zurückgelegten Wegen allerdings geringfügig zugenommen. Demgegenüber ist der ÖPNV-Wegeanteil unverändert geblieben. Für die Regiopolregion Rostock kann näherungsweise von dem gleichen Modal Split ausgegangen werden, wie er in Abbildung *3* für die Region Rostock dargestellt ist.

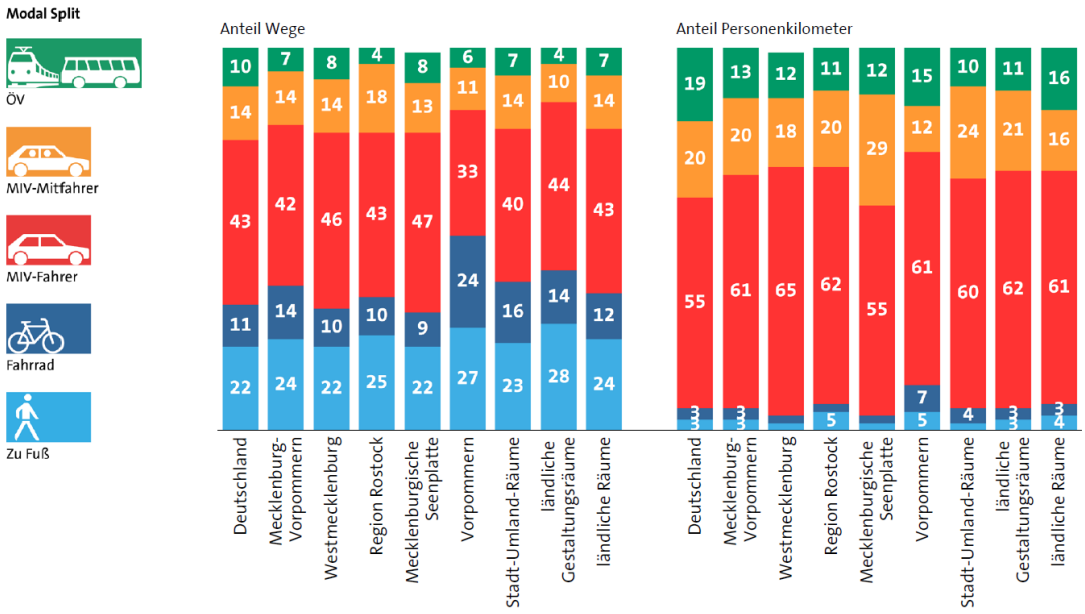

Abbildung 3: Hauptverkehrsmittel (Modal Split) im Regionalvergleich[10]

In der Regiopolregion Rostock führen die kommunalen Verkehrsgesellschaften Rostocker Straßenbahn AG (RSAG)[11] und rebus Regionalbus Rostock GmbH den Omnibus-ÖPNV im Auftrag der Regiopole Rostock bzw. des Landkreises Rostock durch /*12*/, /*13*/. Das rebus-Liniennetz bezieht dabei auch den Mittelbereich Ribnitz-Damgarten ein und bedient somit den gesamten Verflechtungsraum der Regiopolregion. Zur Erfüllung ihres öffentlichen Dienstleistungsauftrages betrieb die RSAG 2020 in der Regiopole Rostock 25 Omnibuslinien. Insgesamt wurden 2020 ca. 4,28 Fahrplankilometer mit Omnibussen realisiert. Zugleich wurden bedingt durch die COVID-19-Pandemie 27 Prozent weniger Personen befördert /*12*/. Rebus hat in der Erfüllung ihres 2015 unterzeichneten Öffentlichen Dienstleistungsauftrages (öDA) 2020 Personenbeförderungsleistungen in Höhe von 7.3 Mio. Fahrplankilometer auf 82 Linien erbracht /*13*/.

Wie Abbildung *4* beispielhaft für die RSAG zeigt, hat das Unternehmen seine Personenbeförderungskapazität im Omnibus-ÖPNV in den letzten zehn Jahren erweitert und an die steigende Einwohnerzahl in der Regiopole Rostock angepasst. In dem Zeitraum von 2010 bis 2020 stieg die Beförderungskapazität von 6 auf 7 Tsd. Beförderungsplätze. Dadurch stehen der Bevölkerung ca. 5 Beförderungsplätze je 1.000 Einwohner mehr zur Verfügung.

Allerdings hat sich diese steigende Beförderungskapazität bislang erst teilweise in der Zahl der jährlich beförderten Personen niedergeschlagen: Abbildung *5* zeigt beispielhaft für den Omnibus-ÖPNV in der Regiopole Rostock die Entwicklung der Personenbeförderung durch die RSAG. Danach hat die Anzahl der beförderten Personen in den letzten zehn Jahren tendenziell nur leicht zugenommen, bis bedingt durch die COVID-19-Pandemie 2020 ein deutlicher Rückgang zu verzeichnen war. Demgegenüber hat die durchschnittliche Anzahl der jährlich durch einen Omnibus beförderten Personenzahl abgenommen.

10 Quelle: /*15*/, S. 38.

11 Die Bürgerschaft der Regiopole Rostock hat mit ihrem Beschluss Nr. 2015/BV/0602 einen öffentlichen Dienstleistungsauftrag zur Erbringung öffentlicher Personenverkehrsdienste in Rostock ab 1. Januar 2016 direkt vergeben /*14*/.

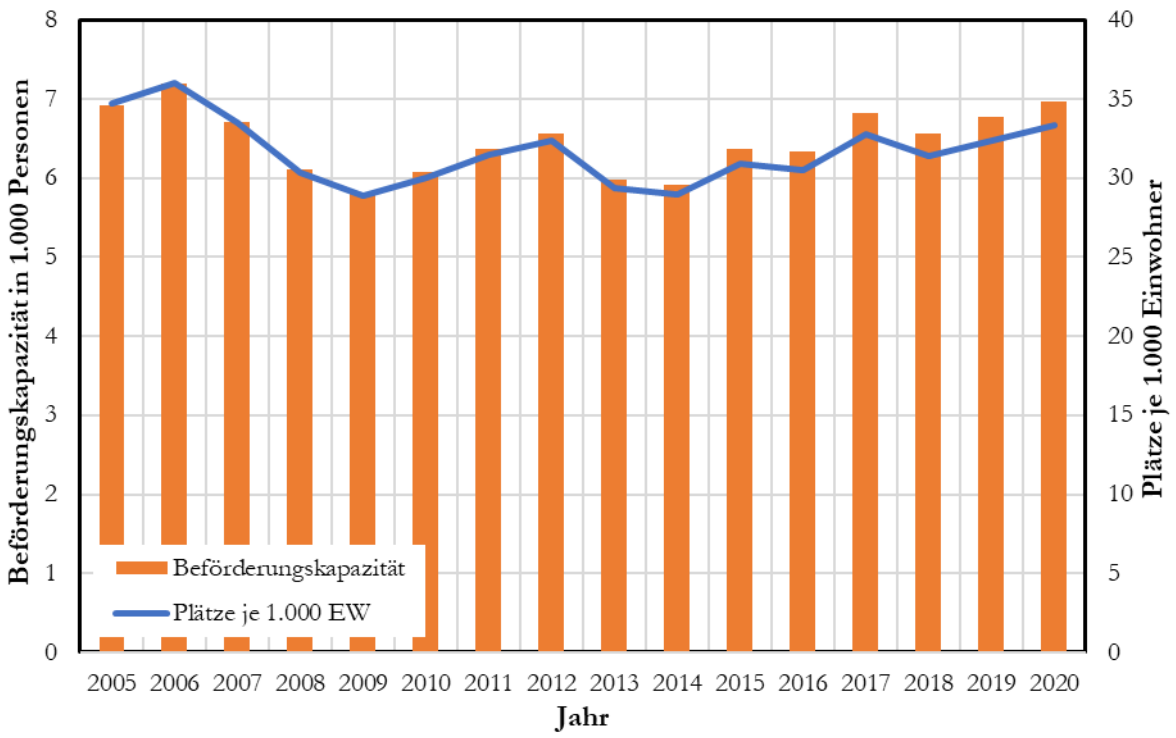

Abbildung 4: Entwicklung der Beförderungskapazität im Omnibus-ÖPNV der RSAG[12]

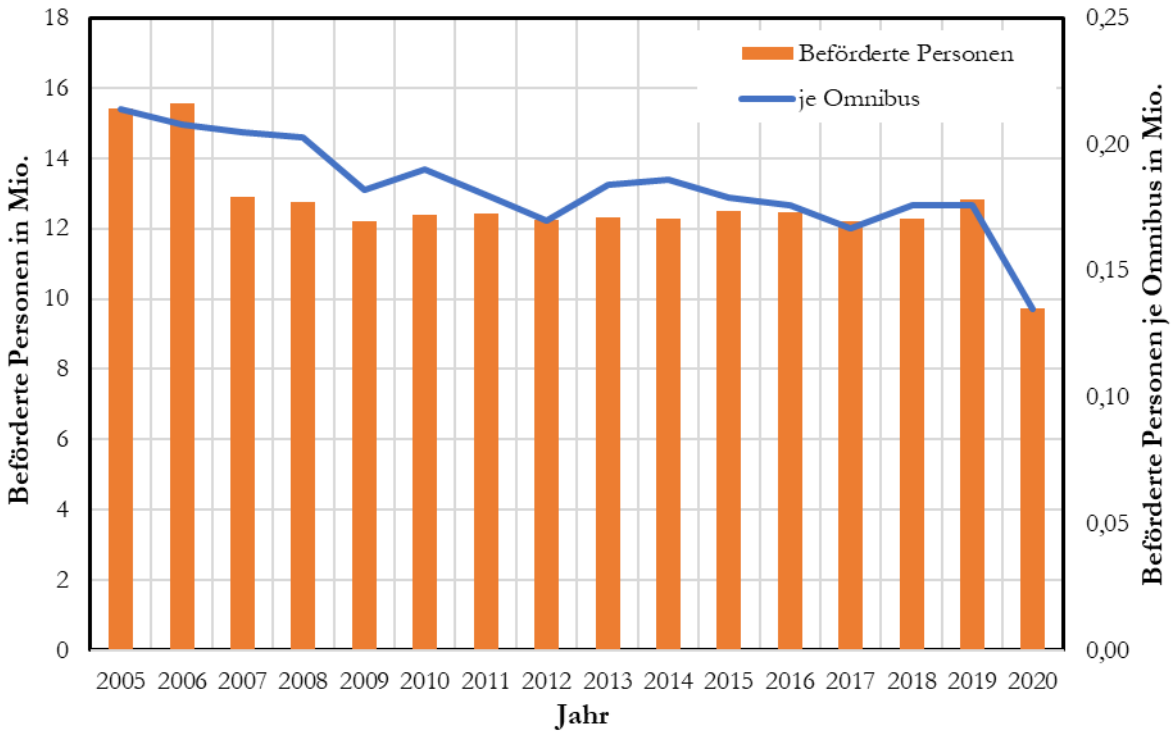

Abbildung 5: Entwicklung der Personenbeförderung im Omnibus-ÖPNV der RSAG[13]

12 Datenbasis: Statistisches Jahrbuch der Hanse- und Universitätsstadt Rostock 2021 /*16*/.
13 Datenbasis: Statistisches Jahrbuch der Hanse- und Universitätsstadt Rostock 2021 /*16*/.

Um den ÖPNV-Anteil im Modal Split zu erhöhen, haben sich die Regiopole Rostock und der Landkreis Rostock mit dem Verkehrsverbund Warnow (VVW)[14] das Ziel gesetzt, die Fahrgastzahlen bis 2030 zu verdoppeln. Dieses Ziel entspricht dem Beschluss der Verkehrsministerkonferenz, welcher gefasst wurde, um die nationalen Klimaschutzziele in Deutschland zu erreichen. Erforderlich ist hierfür unter anderem eine Verkehrsverlagerung im Modal Split weg vom MIV hin zum ÖPNV. Dies erfordert mehr und größere Omnibusse zur Erhöhung der Personenbeförderungskapazität, eine deutliche Verbesserung der ÖPNV-Angebotsqualität sowie eine Reduzierung der Treibhausgasemissionen des ÖPNV. All dies setzt wiederum voraus, dass die Rahmenbedingungen für den ÖPNV verbessert werden. Insbesondere muss ein langfristig verlässlicher finanzieller Rahmen geschaffen wird, der die zur Erreichung der genannten Ziele erforderlichen Investitionen ermöglicht, die gegenwärtig die Finanzkraft der Stadt- und Landkreise übersteigen[15].

Für die angestrebte Erhöhung der ÖPNV-Personenbeförderungsleistung ist der Straßen-ÖPNV besonders bedeutsam: Während die Planungs- und Bauzeiten bei der Schieneninfrastruktur – einschließlich der Stadtbahnen – in der Regel mehrere Jahre betragen, kann der deutlich flexiblere Omnibus sowohl im ländlichen als auch im städtischen Bereich zeitnah ausgebaut werden. Dies ist in den Großstädten besonders durch die tendenziell bereits erkennbare Vergrößerung der durchschnittlichen Omnibusgröße auf 18 m-Omnibusse möglich, sofern die innerstädtische Topographie dies zulässt (Straßen, Kurven, Brücken). Für den Linienbedarfsverkehr in einzelnen Quartieren bzw. für den ersten und letzten Kilometer erwartet der Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) dagegen einen verstärkten Bedarf an kleineren Bussen, welche beispielsweise als Bürger- und Rufbusse bestehende Liniennetze ergänzen und Zubringerfunktionen erfüllen können. Dies gilt besonders für den Stadtrand und den ländlichen Raum, um dort das Angebot insgesamt flexibler gestalten und qualitativ erhöhen zu können. Dabei können auch Fahrzeuge an Bedeutung gewinnen, die als Omnibus-Anhängerzüge fahren können /*9*/, S. 37, /*11*/.

Für den Personenverkehr stehen in der Regiopolregion Rostock neben dem Fußgänger- und dem Radverkehr besonders der motorisierte Individualverkehr (MIV) mit Krafträdern und Kraftfahrzeugen sowie der ÖPNV auf der Schiene und auf der Straße zur Verfügung. Hinzu kommen weitere, Verkehrsangebote für bestimmte Personengruppen oder solche, die – wie die Mecklenburgische Bäderbahn (Molli) oder die Personenfähren auf der Warnow – nur punktuell bzw. nur intermodal nutzbar sind.

Die Angebotsqualität bzw. -attraktivität des ÖPNV wird durch eine Vielzahl von Faktoren bestimmt, darunter insbesondere

- die räumliche und zeitliche Angebotsdichte,
- die Netzdichte (Erschließung und Erreichbarkeit),
- die Taktdichte (Tagesgänge Werktag, Wochenende),
- die Intermodalität (zum Beispiel Anschlussmöglichkeiten) und
- die Fahrpreise (Tarifniveau, Preis-Leistung-Verhältnis).

Darüber hinaus bestimmt sich die ÖPNV-Attraktivität positiv auch durch die Möglichkeit, zwischen verschiedenen kommunalen bzw. regionalen Mobilitätsangeboten vergleichen und wählen zu können (ÖPNV in digitalen Mobilitätsplattformen, Multimodalität), bzw. negativ durch die gezielte Reduzierung der Attraktivität des motorisierten Individualverkehrs. Diese könnte sowohl in der Regiopole als auch in ihrem Verflechtungsraum durch verschiedene Maßnahmen, beispielsweise durch eine Verknappung des Flächenangebots für den rollenden und ruhenden innerstädtischen Pkw-Verkehr erreicht werden.

1.1.3 Kommunale Abfallentsorgung

Ähnlich wie im ÖPNV haben die Landkreise und kreisfreien Städte als öffentlich-rechtliche Entsorgungsträger (örE) auch die Abfallentsorgung kurz- und langfristig sowie unter Einhaltung aller gesetzlichen und

[14] Der Verkehrsverbund Warnow (VVW) verbindet alle größeren Verkehrsunternehmen in der Region Rostock miteinander, darunter auch die DB REGIO NORDOST mit Sitz in Potsdam, die rebus Regionalbus Rostock GmbH mit Sitz in Güstrow, die Mecklenburgische Bäderbahn mit Sitz in Kühlungsborn, die Weiße Flotte GmbH mit Sitz in Stralsund und die Ostdeutsche Eisenbahn GmbH mit Sitz in Berlin. Quelle und weiterführende Informationen: https://www.verkehrsverbund-warnow.de/haltestellen-fahrplaene/verbund.html.

[15] Quelle: https://rathaus.rostock.de/de/rathaus/aktuelles_medien/verdopplung_der_fahrgastzahlen_im_oepnv_bis_2030/322364.

rechtlichen Rahmenbedingungen auf Bundes- und Landesebene sicherzustellen[16]. Gemäß dem Abfallwirtschaftsgesetz (§ 6AbfWG M-V) und der Kommunalverfassung Mecklenburg-Vorpommern (§§ 5, 15 KV M-V) können die Gemeinden die Angelegenheiten des eigenen Wirkungskreises durch Satzungen regeln, darunter auch Satzungen zur kommunalen Abfallentsorgung. In der Regiopolregion Rostock decken die Satzungen der Regiopole Rostock sowie der Landkreise Rostock und Vorpommern-Rügen (mit dem Mittelbereich Ribnitz-Damgarten) die Region gebietsmäßig vollständig ab. Sie sehen vor, dass sich die jeweiligen Gebietskörperschaften bei der Durchführung der Abfallentsorgung Dritter bedienen bzw. diese auf dem Wege der kommunalen Zusammenarbeit verwirklichen */17/*, */18/*, */19/*. Demgemäß führt in der Regiopole Rostock führt die Stadtentsorgung Rostock GmbH die Abfallentsorgung durch, während die Landkreise Rostock und Vorpommern-Rügen hierzu über Eigenbetriebe Abfallwirtschaft verfügen.

Ein wichtiger Parameter für die Gestaltung der kommunalen Abfallentsorgung ist das Aufkommen an überlassungspflichtigen Abfällen zur Beseitigung. Die Entwicklung dieses Aufkommens ist in Abbildung *6* beispielhaft für die Regiopole Rostock anhand des Haus- und Geschäftsmülls dargestellt. Diese Abfallart entsteht in Privathaushalten sowie in gewerblichen und industriellen Einrichtungen, wird in Restabfallbehältern gesammelt und regelmäßig von Entsorgungsfahrzeugen der Stadtentsorgung Rostock GmbH abgeholt (Holsystem). Das Aufkommen an Haus- und Geschäftsmüll in der Regiopole Rostock hat sich nach einem deutlichen Rückgang in den 1990er Jahren stabilisiert. Im Durchschnitt der letzten zehn Jahre belief es sich jährlich auf ca. 45,5 Tsd. t, im Jahr 2019 wurden 45,1 t Haus- und Geschäftsmüll erfasst. Da die Einwohnerzahl im gleichen Zeitraum um ca. 6.500 Einwohner gestiegen ist, sank das Abfallaufkommen je Einwohner leicht von 230 auf 217 kg/EWa. In den Landkreisen Rostock und Vorpommern-Rügen betrug das Aufkommen an Haus- und Geschäftsmüll 2019 27,0 Tsd. t bzw. 48,1 Tsd. t. Bezogen auf die jeweilige Einwohnerzahl waren dies in den beiden Landkreisen 125 bzw. 214 kg/EWa. Der Landesdurchschnitt des Aufkommens an Haus- und Geschäftsmüll belief sich in dem gleichen Jahr auf 178 kg/EWa */20/*, S. 17/18.

Neben dem Haus- und Geschäftsmüll werden in der Regiopolregion Rostock weitere Abfälle zur Verwertung gesondert erfasst und im Holsystem einer Verwertung zugeführt, beispielsweise Alttextilien, Bioabfälle, Papier und Pappe, Altglas, Sperrmüll und Altgeräte.

Weitere, die beauftragten Entsorgungsunternehmen und den Umfang der öffentlich-rechtlichen Abfallentsorgung ergänzende Strukturdaten zur Beschreibung der Entsorgungsstrukturen in den Teilgebieten der Regiopolregion Rostock betreffen zugelassene und aufgestellte Abfallbehälter beispielsweise den Entsorgungsrhythmus und die Bemessungsgrundlagen für die Abfallgebühren, die Art und Anzahl von Recyclinghöfen oder die Systeme und Stelldichten für Wertstoffbehälter. Solche Strukturdaten werden beispielsweise in den Abfallwirtschaftskonzepten der Regiopole Rostock und der beiden Landkreise Rostock und Vorpommern-Rügen angegeben */21/*, */22/*, */23/*. Allerdings sind diese Konzepte für den weitaus größten Teil der Regiopolregion Rostock bereits vor zehn Jahren erarbeitet worden.

Zur Finanzierung der kommunalen Abfallentsorgung haben die Regiopole Rostock ebenso wie Landkreise Rostock und Vorpommern-Rügen die Abfallsatzungen ergänzende Abfallgebührensatzungen erlassen. Diese regeln die Erhebung von Gebühren für die Inanspruchnahme der öffentlichen Einrichtungen und Anlagen zur Abfallentsorgung. Die Gebühren werden durch die Kommunen erhoben und fließen in die kommunalen Haushalte. Sie werden zur Finanzierung der Entsorgungsleistungen eingesetzt, indem die Entsorgungsunternehmen diese den jeweiligen Kommunen in Rechnung stellen. Darüber hinaus verfügen Entsorgungsunternehmen gegebenenfalls über weitere Einnahmequellen, die beispielsweise aus abfallbezogenen oder technischen Dienstleistungen oder aus der Veräußerung von außer Dienst gestellten Fahrzeugen resultieren können. Beispielsweise enthielt der Haushalt der Regiopole Rostock in den Jahren 2020 und 2021 auf der Einnahmenseite unter anderem Entgelteinnahmen für die Abfallentsorgung in Höhe von 17,2 bzw. 18,9 Mio. EUR. Auf der Ausgabenseite betrugen die eingeplanten Kostenerstattungen für

[16] Dabei handelt es sich um insbesondere um das Kreislaufwirtschaftsgesetz und um das Abfallwirtschaftsgesetz des Landes Mecklenburg-Vorpommern. Eine weitere wichtige Rechtsgrundlage ist der Abfallwirtschaftsplan Mecklenburg-Vorpommern, demzufolge die Nachhaltigkeit der Abfallwirtschaft und ihrer Ausgestaltung zu einer Stoffstrom-, Energie- und Ressourcenwirtschaft wesentliche Grundsätze der Abfallpolitik sind.

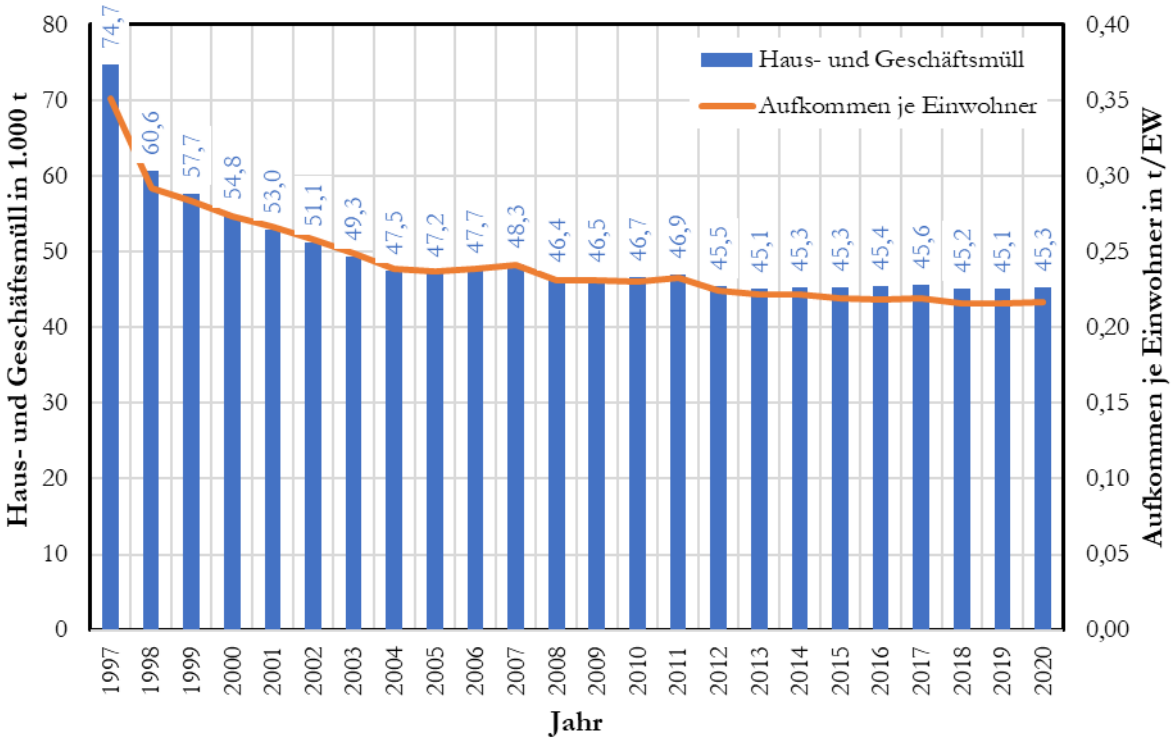

Abbildung 6: Entwicklung des Aufkommens an Haus- und Geschäftsmüll Rostock[17]

die Stadtentsorgung Rostock GmbH 11,3 bzw. 11,8 Mio. EUR /*24*/, S. 130/161. Die Umsatzerlöse des Unternehmens beliefen sich beispielsweise 2017 und 2018 auf 14,7 bzw. 15,0 Mio. EUR. Der Zuwachs resultierte überwiegend aus einer Umsatzsteigerung mit der Regiopole Rostock, während die Erhöhung der gewerblichen Umsätze deutlich kleiner war und ca. 5 Prozent umfasste. Neben sonstigen betrieblichen Erträgen, Material- und sonstigen Aufwendungen waren insbesondere Investitionen bedeutsam, beispielsweise in Abfallsammeltechnik (Behälteridentifikations- und Telematiksysteme), Ausrüstungen für die Recyclinghöfe oder Ersatzinvestitionen in Entsorgungs- und Reinigungsfahrzeuge /*25*/, S. 9 f.

Der Einfluss der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung auf die Entsorgungsbranche äußert sich in einem schwankenden Aufkommen an Gewerbe- und Industriemüll, bei dem die konjunkturelle Abhängigkeit von der Gesamtwirtschaft höher ist als beim Hausmüll. Diese Schwankungen im Aufkommen führen auch zu Preisschwankungen, beide haben in den letzten Jahren deutlich zugenommen. Gleichwohl ermöglichen die positive Entwicklung der regionalen Wirtschaft und der Einwohnerzuwachs in der Regiopole Rostock eine stabile wirtschaftliche Entwicklung der Stadtentsorgung /*24*/, S. 9.

1.2 Perspektiven im Omnibus-ÖPNV und in der kommunalen Abfallentsorgung

Die Ausgangslage im Omnibus-ÖPNV und in der kommunalen Abfallentsorgung wird sich aufgrund verschiedener Einflüsse auch in Zukunft weiterentwickeln. Im Folgenden werden einige Treiber beschrieben, welche die Zukunftsperspektiven des ÖPNV und der Stadtentsorgung gleichermaßen betreffen. Zu den wesentlichen Treibern der Umstellung von Nutzfahrzeugflotten auf alternative Antriebskonzepte zählen CO_2- und Kraftstoffpreiseentwicklungen, das Bundes-Klimaschutzgesetz 2021 sowie Vorgaben der Europäischen Union wie die CVD-Richtlinie (EU) 2019/1161 und die Verordnung (EU) 2019/1242, die von den Herstellern schwerer Nutzfahrzeuge eine CO_2-Emissionsreduktion von 15 Prozent bis 2025 und von 30 Prozent bis 2030 gegenüber 2019 fordert /*26*/[18].

[17] Datenbasis: Statistisches Jahrbuch der Hanse- und Universitätsstadt Rostock 2021 /*16*/.

[18] Lkw oder Sattelzugmaschinen ab einem Gesamtgewicht von 16 t verursachen innerhalb der Europäischen Union ca. 65 bis 70 Prozent der CO_2-Emissionen schwerer Nutzfahrzeuge ab 3,5 t Gesamtgewicht /*27*/, S. 2.

Perspektivisch werden die Kraftstoffpreise durch die schrittweise steigende CO_2-Bepreisung im nationalen Emissionshandel (nEHS) voraussichtlich noch stärker steigen als bisher: Gemäß dem Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG) wird der auch auf Kraftstoffe und Heizöl umzulegende Preis in einer ersten Phase mit jährlichen Festpreisen von 25 EUR/t CO_2 im Jahr 2021 bis 2025 auf 55 EUR/t CO_2 und bis 2026 auf 65 EUR/t CO_2 steigen. Ab 2027 wird diese Festpreisphase in eine Handelsphase überführt, wobei der Preis marktlich nach Knappheit gebildet wird. Tabelle *1* gibt die Kostensteigerung für die in Omnibussen und Nutzfahrzeugen eingesetzten Energieträger für den Zeitraum von 2021 bis 2025 an. Diese Kostensteigerungen betreffen sowohl den motorisierten Individualverkehr (MIV) als auch den ÖPNV auf der Straße, soweit letzterer mit Dieselbussen durchgeführt wird, die Dieselkraftstoff für den Antrieb und leichtes Heizöl für die Beheizung/Klimatisierung des Fahrer- und Fahrgastraums verbrauchen[19]. In dem Maße, wie der ÖPNV auf klimaneutrale Omnibusse umgestellt wird, gewinnt er somit einen relativen Attraktivitätsvorteil gegenüber dem Omnibus-ÖPNV mit Diesel- und Erdgasbussen sowie gegenüber dem motorisierten Individualverkehr (MIV) mit Diesel- und Benzinfahrzeugen.

Tabelle 1: Preiserhöhung ausgewählter Energieträger im nationalen Emissionshandel[20]

Jahr / Energieträger	Menge	2021	2022	2023	2024	2025
		Preiserhöhung ausgewählter Energieträger in Euro-Cent				
1	2	3	4	5	6	7
Dieselkraftstoff	Liter	7	8	10	12	15,0
Leichtes Heizöl	Liter	7	8	10	12	15,0
Erdgas	kWh	0,5	0,5	0,6	0,8	1,0

Die Richtlinie (EU) 2019/1161 der Europäischen Union zur Förderung sauberer und energieeffizienter Straßenfahrzeuge (Clean Vehicles Directive – CVD) */28/* ist am 1. August 2019 in Kraft getreten und wurde in Deutschland mit dem Gesetz zur Umsetzung der Richtlinie (EU) 2019/1161 vom 20. Juni 2019 */29/* in nationales Recht umgesetzt. Das Gesetz ist am 2. August 2021 in Kraft getreten. Danach müssen öffentliche Auftraggeber bei Beschaffungen (Kauf/Ratenkauf, Leasing oder Anmietung)

- von Straßenfahrzeugen der Klassen M1, M2 und M3 sowie N1, N2 und N3 und
- von Dienstleistungen, für die diese Straßenfahrzeuge eingesetzt werden,

für definierte Referenzzeiträume festgelegte Mindestziele einhalten, sofern das Vergabevolumen oberhalb der EU-Schwellenwerte liegt. Die Mindestziele bestimmen sich als Prozentsätze sauberer leichter und schwerer Nutzfahrzeuge einschließlich emissionsfreier schwerer Nutzfahrzeuge an der Gesamtzahl der beschafften Nutzfahrzeuge.

Für die Beschaffung leichter sauberer Nutzfahrzeuge, die über Grenzwerte zu CO_2- und Luftschadstoffemissionen als „saubere Fahrzeuge“ definiert werden, betragen diese Mindestziele bis zum 31. Dezember 2030 38,5 Prozent der insgesamt beschafften leichten Nutzfahrzeuge. Dabei gelten gemäß § 6 Abs. 1 des SaubFahrzeugBeschG die in Anlage 1 des Gesetzes genannten Emissionsgrenzwerte (CO_2: 50 g/km).

[19] Zur Beheizung des Fahrgastraums wird in den Omnibussen anstelle von Dieselkraftstoff das kostengünstigere leichte Heizöl eingesetzt.

[20] Datenquelle: https://www.dehst.de/DE/Nationaler-Emissionshandel/nEHS-verstehen/nehs-verstehen_node.html#doc16290000.

Für die Beschaffung sauberer schwerer Nutzfahrzeuge gelten dagegen die in § 6 Abs. 2 des Gesetzes angegebenen Mindestprozentsätze, wobei auch nachgerüstete Fahrzeuge und Plug-in-Hybridbusse berücksichtigt werden können[21]:

1. im Zeitraum vom 2. August 2021 bis zum 31. Dezember 2025:
   a) für Lkw der Fahrzeugklassen N2 und N3 10 Prozent,
   b) für Busse der Fahrzeugklasse M3 45 Prozent,
2. im Zeitraum vom 1. Januar 2026 bis zum 31. Dezember 2030:
   a) für Lkw der Fahrzeugklassen N2 und N3 15 Prozent,
   b) für Busse der Fahrzeugklasse M3 65 Prozent.

Dabei muss die Hälfte des jeweiligen Mindestziels für den Anteil sauberer Busse durch die Beschaffung emissionsfreier Busse erfüllt werden. Allerdings gelten die Richtlinie bzw. das Gesetz im Busbereich ausschließlich für Fahrzeuge der Klasse M3, Klasse I mit Stehplätzen, die einen häufigen Passagierwechsel ermöglichen nicht jedoch nicht für über Land- und Reisebusse (M3, Klassen II und III)[22].

Emissionsfreie schwere Nutzfahrzeuge sind in § 2 Nr. 6 SaubFahrzeugBeschG als „emissionsfreies schweres Nutzfahrzeug“ ohne Verbrennungsmotor sowie als solches Fahrzeug mit Verbrennungsmotor definiert, wobei dessen CO_2-Emissionen entweder < 1 g CO_2/kWh oder < 1 g CO_2/km sein müssen.

Die Anforderungen an saubere Fahrzeuge können nur schwere Nutzfahrzeuge und Busse erfüllen, welche mit alternativen Kraftstoffen wie Strom, Wasserstoff, Erdgas einschließlich Biomethan, synthetischen Kraftstoffen nach DIN EN 15940 (eFuels) oder bestimmten Biokraftstoffen betrieben werden[23]. Diese dürfen zudem nicht mit konventionellen, fossilen Kraftstoffen gemischt werden. Explizit ausgeschlossen sind nach Artikel 26 der Richtlinie (EU) 2018/2001 Biokraftstoffe, bei denen ein hohes Risiko von indirekten Landnutzungsänderungen zu beobachten ist. Plug-in-Hybridbusse, die mit Dieselkraftstoff betrieben werden, werden ebenfalls den „sauberen Fahrzeugen“ zugeordnet.

Die Anforderungen an emissionsfreie schwere Nutzfahrzeuge und Busse sind dagegen nur durch Batteriefahrzeuge oder durch Fahrzeuge zu erfüllen, welche Wasserstoff in Brennstoffzellen (BZ, BZ-REX) oder Verbrennungsmotoren einsetzen.

Dass mit Biomethan betriebene schwere Nutzfahrzeuge zwar als „sauber“, jedoch nicht als „emissionsfrei“ eingestuft werden, ist – ebenso wie die fehlende Förderung beispielsweise von Biomethan-Tankstellen auf Busbetriebshöfen – problematisch, weil Biomethanbusse damit für ÖPNV-Verkehrsunternehmen unattraktiv werden könnten. Würden diese Busse als emissionsfrei eingestuft, könnte deren Integration in die Busflotten der Unternehmen zudem einen zusätzlichen Absatz für solche Biogasanlagen generieren, die ihr Biogas nicht in Strom und Wärme umwandeln, sondern zu Biomethan aufbereiten. Dadurch könnten perspektivisch auch in der Regiopolregion Rostock die vorhandenen Biomethan-Erzeugungspotenziale besser genutzt werden bzw. solchen Biogasanlagen eine Perspektive bieten, welche sich dem Ende der 20-jährigen EEG-Förderung nähern.

Das Bundes-Klimaschutzgesetz 2021 */30/* setzt Klimaschutzziele und gibt auch im Verkehrssektor Emissionsminderungen vor. Danach müssen die THG-Emissionen des Verkehrs in Deutschland bis 2030 gegenüber jenen von 2020 nahezu halbiert werden. Bis 2045 müssen die THG-Emissionen so weit gemindert werden, dass Netto-Treibhausgasneutralität erreicht wird. Nach dem Jahr 2050 sollen negative Treibhausgasemissionen erreicht werden. Um die Erreichung dieser Ziele zu gewährleisten, muss die Bundesregierung zusätzliche Klimaschutzmaßnahmen ergreifen. Diese werden sich notwendigerweise zugunsten einer Umstellung von Nutzfahrzeugflotten auf klimaneutrale Antriebe auswirken.

Schließlich eröffnet auch die überregionale Förderung des Ersatzes von alten Nutzfahrzeugen durch neue Perspektiven. So hat beispielsweise das Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) ein nationales Flottenaustauschprogramm für Lkw aufgelegt, in dem es seit Januar 2021 die Anschaffung von fabrikneuen Lkw mit bis zu 15.000 Euro unterstützt, sofern diese die Anforderungen der aktuellen Abgasstufe Euro VI erfüllen oder elektro- bzw. wasserstoffbetrieben sind und sofern gleichzeitig ein altes,

---

21 Sofern für den Zeitraum ab dem 1. Januar 2031 keine neuen Mindestziele festgelegt werden, gelten die festgelegten Mindestziele fort.

22 Solche Fahrzeuge werden gemäß ECE-R 107 und EG Nr. 661/2009 zugelassen. Quelle und weiterführende Informationen: https://www.vdv.de/umsetzung-cvd.aspx.

23 Quelle: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/clean-vehicles-directive.html.

konventionell dieselbetriebenes Nutzfahrzeug der Abgasstufen Euro 0 bis Euro V/EEV stillgelegt wird. Das Neufahrzeug muss der Fahrzeugklassen N2 oder N3 entsprechen und mindestens eine zulässige Gesamtmasse von 7,5 t haben. Die Förderung des Flottenaustauschs wird maßgeblich davon bestimmt, inwieweit das Neufahrzeug einen bestimmten CO_2-Wert unterschreitet, dessen Festlegung sich an den seitens der Europäischen Kommission erhobenen Monitoringdaten orientiert, und über welche CO_2-senkende Zusatzausstattung das Neufahrzeug verfügt[24].

Als regionale Perspektiven bzw. Treiber der Umstellung von Fahrzeugflotten können insbesondere dort beschlossene Klimaschutzziele betrachtet werden. So hat Rostock 2020 beschlossen, dass die Regiopole spätestens 2035 klimaneutral sein soll. Mit dem Regionalen Energiekonzept der Region Rostock wird die Erweiterung dieses Klimaschutzziels auf die Region Rostock insgesamt und damit für den weitaus größten Teil der Regiopolregion Rostock vorgeschlagen. Zudem ist zu prüfen, ob das Ziel auf die Regiopolregion Rostock insgesamt und somit auch auf den Mittelbereich Ribnitz-Damgarten bezogen werden kann.

Eine weitere regionale Perspektive eröffnet die Förderrichtlinie „Modellprojekte zur Stärkung des ÖPNV“ des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Mit ihr fördert das Ministerium in Deutschland zwölf Modellprojekte zur Stärkung des ÖPNV, welche die CO_2-Emissionen im Verkehrsbereich nachhaltig reduzieren sollen[25]. Unter diesen Modellprojekten ist auch das Projekt „MIRROR“ der Verkehrsverbund Warnow GmbH, die ÖPNV-Aufgabenträger in der Regiopole Rostock und im Landkreis Rostock ist. Das Projekt sieht unter anderem die Schaffung neuer Linienverkehre, umfangreiche Taktverdichtungen und -ausweitungen sowie geänderte Buslinienführungen vor. Partner dieses Projekts sind auch die Rostocker Straßenbahn AG und die rebus Regionalbus Rostock GmbH.

Darüber hinaus fördert auch das Landesförderinstitut Mecklenburg-Vorpommern (LFI MV) Investitionen und Maßnahmen zur Erhöhung der Attraktivität des ÖPNV, sofern diese auf eine Verbesserung der Wirtschaftlichkeit, der Attraktivität, der Barrierefreiheit, der Klimabilanz oder der Infrastruktur des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) ausgerichtet sind. Insbesondere können sowohl der Neu-, Um- und Ausbau als auch die Ausrüstung von ÖPNV-Haltepunkten gefördert werden (Bushaltestellen, zentrale Omnibusbahnhöfe, ÖPNV-Verknüpfungspunkte)[26].

Für die Umstellung kommunaler Nutzfahrzeugflotten ist perspektivisch nicht nur die Förderung von batterieelektrischen Fahrzeugen oder Wasserstofffahrzeugen und zugehörigen Infrastrukturen bedeutsam. Vielmehr bedarf es auch einer Förderung weiterer Antriebskonzepte und Infrastrukturen, die auf anderen erneuerbaren Kraftstoffen bzw. Gasen basieren. Zu diesen sind beispielsweise jene zur Nutzung von verdichtetem bzw. verflüssigtem Biomethan zu zählen. Zudem sollte auch die Umrüstung von vorhandenen Diesel- und Erdgasfahrzeugen auf alternative Antriebe mit Biomethan oder DME in die Förderung einbezogen werden, zumal das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur hierfür Mindeststandards definiert hat /*31*/.

1.3 Alternative Antriebskonzepte für den ÖPNV und die Stadtentsorgung

Die Einführung klimaneutraler Antriebe in kommunale Nutzfahrzeugflotten erfolgt mit dem Ziel der Minderung ihrer THG-Emissionen. Hierfür sind die gegenwärtig genutzten fossilen Antriebsenergien Dieselkraftstoff und Erdgas durch erneuerbare Energieträger zu substituieren. Prinzipiell kann dies durch den Weiterbetrieb vorhandener Fahrzeuge mit klimaneutralen Energieträgern oder durch deren Ersatz durch Neufahrzeuge mit klimaneutralen Antrieben erfolgen:

- Weiterbetrieb vorhandener Fahrzeuge:
  - mit wasserstoffbasierten erneuerbaren Kraftstoffen (Dimethylether DME – eFuel),
  - nach Umrüstung auf Elektro- oder Wasserstoffantrieb (Brennstoffzelle; Verbrennungsmotor),
  - nach Umrüstung auf Antriebe, welche andere erneuerbare Energieträger wie Biomethan nutzen,

24 Quelle: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/StV/Strassenverkehr/bmdv-legt-nationales-flottenaustauschprogramm-fuer-lkw-auf.html.

25 Quellen: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2021/107-scheuer-modellprojekte-staerkung-oepnv.html, https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/modellprojekte-nahverkehr.html, https://www.verkehrsverbund-warnow.de/vvw/mirror.html.

26 Quelle: https://www.lfi-mv.de/foerderungen/oeffentlicher-personennahverkehr-oepnv/.

- zu beschaffende Neufahrzeuge:
  - mit (batterie-)elektrischem Antrieb,
  - mit Brennstoffzellen-Hybridantrieb,
  - mit Brennstoffzellenantrieb,
  - mit Verbrennungsmotoren, die für den Betrieb mit Wasserstoff geeignet sind[27],
  - mit Verbrennungsmotoren für andere erneuerbare Energieträger, zum Beispiel Biomethan.

Gegenwärtig beginnen sich bei einigen Fahrzeugarten bestimmte Antriebskonzepte durchzusetzen, wobei besonders der batterieelektrische Antrieb gegen den Wasserstoffantrieb abgewogen wird. Neben Unterschieden in den Anschaffungskosten sind hierfür besonders auch die Reichweitenunterschiede maßgeblich: Je größer bzw. schwerer ein Nutzfahrzeug und je größer die erforderliche Reichweite, desto vorteilhafter stellt sich der Wasserstoffantrieb dar, weil mit der Fahrzeuggröße und mit den zurückzulegenden Distanzen im Falle von batterieelektrischen Fahrzeugen die Batteriemasse deutlich ansteigt und zu Lasten der maximal möglichen Passagierzahl bzw. Nutzlast geht (Abschnitt 1.3.2). Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass die Mehrkosten von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben gegenüber Dieselfahrzeugen tendenziell sinken werden. Dies gilt auch für die Reichweitenunterschiede, da einerseits die Reichweiten von Batteriefahrzeugen beispielsweise durch wachsende Batteriekapazitäten steigen, Abbildung *7*.

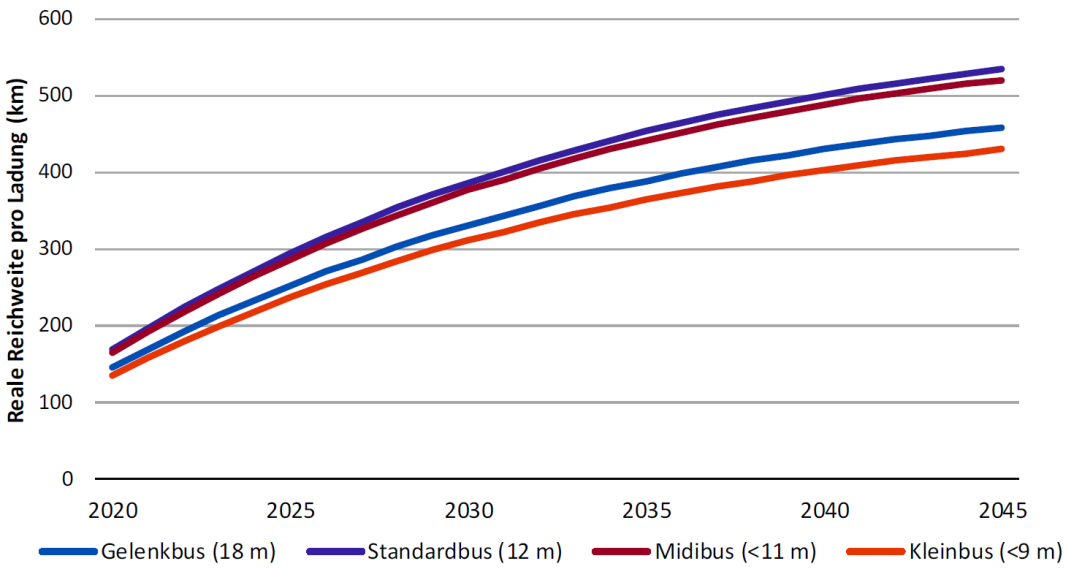

Abbildung 7: Entwicklung der realen Reichweite von Batteriebussen mit Depotladekonzept[28]

Andererseits verlieren Reichweitenunterschiede dort an Bedeutung, wo Technologien und Infrastrukturen ein Nachladen auf der Fahrtstrecke ermöglichen[29]. Schließlich ist auch zu berücksichtigen, dass der für die Umstellung von Fahrzeugflotten erforderliche erneuerbare Wasserstoff jedenfalls auf der volkswirtschaftlichen Ebene knapp bleiben wird, weshalb der breite Einsatz von Wasserstofffahrzeugen nicht uneingeschränkt empfohlen wird /*33*/. Somit müssen in eine Entscheidung für ein bestimmtes Antriebskonzept nicht nur die heutigen Fahrzeugkosten und -eigenschaften einfließen, sondern auch deren perspektivische Entwicklungen.

---

27 Der energie- und klimapolitischen Diskussion um den Ausschluss von Verbrennungsmotoren stehen intensive Entwicklungsarbeiten der Fahrzeughersteller gegenüber, welche Bussen und Lkw mit Wasserstoff-Verbrennungsmotoren erhebliche Potenziale zu schreiben. Auch das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur fördert aktuell Maßnahmen zur technologieoffenen Unterstützung erneuerbarer Kraftstoffe.

28 Quelle: /*32*/, S. 61.

29 Die Reichweite ist besonders bei batterieelektrischen Omnibussen bedeutsam, die im regionalen Verkehr eingesetzt werden sollen. Hier konnten jüngste Praxisversuche mit einem Iveco E-WAY-Omnibus zeigen, dass Elektrobusse im Linienbetrieb inzwischen auch im Winter mit einer Akkuladung Reichweiten von 300 bis 350 km erreichen. In einzelnen Probefahrten wurden zudem bereits Reichweiten von über 500 km erreicht /*34*/.

Die Einführung batterieelektrischer Omnibusse erfordert eine komplexe Abstimmung zwischen betrieblichen Restriktionen wie der gegenwärtig noch begrenzten Reichweite und der zu erbringenden Fahrgastbeförderungsleistung sowie dem Aufbau der erforderlichen Ladeinfrastruktur. Durch die im Vergleich zu konventionellen Dieselbussen erhöhten infrastrukturellen Anforderungen besteht die Notwendigkeit einer systemischen Analyse, welche sowohl die Batteriefahrzeuge als auch die zugehörige Infrastruktur abdeckt. Dabei sind die Anforderungen der Ladeinfrastruktur auch vom gewählten Ladekonzept abhängig.

Ein genereller Vorteil elektrisch angetriebener Omnibusse oder Entsorgungsfahrzeuge gegenüber Dieselfahrzeugen ist in den geringeren Schallemissionen zu sehen. Dadurch werden besonders in Städten Einsatzpotenziale für den Nachteinsatz eröffnet, aus denen etwa bei Entsorgungsfahrzeugen erhebliche Entlastungen im Betriebsablauf resultieren können.

Im Folgenden werden zunächst alternative Antriebskonzepte für Omnibusse (Abschnitt 1.3.1) und anschließend solche für schwere Nutzfahrzeuge wie Entsorgungsfahrzeuge beschrieben (Abschnitt 1.3.2). Anschließend werden die Prozessketten (Infrastrukturen) dargestellt, welche für den Betrieb von Nutzfahrzeugen mit alternativen Antrieben erforderlich sind (Abschnitt 1.3.3).

1.3.1 Alternative Antriebskonzepte für Omnibusse

Für Omnibusse existieren inzwischen vielfältige Antriebskonzepte, welche als Alternativen zu den etablierten, auf Diesel- oder Erdgasmotoren basierenden Antrieben genutzt werden können. Abbildung *8* zeigt die gegenwärtig verfügbaren Antriebskonzepte im Überblick. Im linken Teil der Abbildung sind zunächst Antriebe mit Verbrennungsmotoren dargestellt. Diese umfassen konventionelle Antriebe, denen in der weiteren Anordnung Antriebe mit Verbrennungsmotoren folgen, die mit erneuerbaren Energieträgern betrieben werden können. Im mittleren Teil der Abbildung sind die Hybridantriebe eingeordnet, also Kombinationen aus Verbrennungs- und Elektromotoren, die jedoch nicht weiter untergliedert sind[30]. Im linken Teil der Abbildung finden sich dann die auf Elektromotoren basierenden vollelektrischen Antriebskonzepte. Deren Spektrum reicht von rein batterieelektrischen Antrieben über Kombinationen aus Batterie und Brennstoffzelle bis hin zu Oberleitungsbussen (Trolley), wobei den letzteren zumindest in Deutschland kaum Zukunftsperspektiven zugeschrieben werden[31].

Die Abbildung zeigt somit im oberen Teil die Antriebsmaschinen der Fahrzeuge, die eingesetzten Energieträger und die Arten, wie diese den Fahrzeugen zugeführt werden (Infrastruktur für die primäre Energiezufuhr). Im unteren Teil der Abbildung werden diejenigen Antriebskonzepte weiter unterteilt, in denen die Batterie die primäre Energiezufuhr realisiert: Während die Batterie den Elektromotor versorgt (primär), kann die Batterie selbst über eine Vielzahl von Infrastrukturen geladen werden, beispielsweise über konduktive oder induktive Ladeeinrichtungen. Diese sekundäre Energiezufuhr kann prinzipiell über Nacht, gelegentlich bei Zwischenstopps entlang der Fahrtstrecke oder durch einen Batteriewechsel erfolgen[32].

---

30 Bei den Hybridbussen kann es sich um Diesel- oder um Brennstoffzellenhybridbusse handeln. Hinsichtlich des Antriebsstrangs lassen sich die drei Konzepte serieller, paralleler und leistungsverzweigter Hybrid unterscheiden. In jedem Fall sollen der Elektromotor und der Energiespeicher (Batterie oder Kondensatoren) die Leistungsspitzen abdecken, sodass der Dieselmotor nicht mehr auf die benötigte Spitzenleistung ausgelegt werden muss. Er kann damit deutlich kleiner ausgeführt und über einen größeren Teil der Fahrzeit nahe am Punkt seines optimalen Wirkungsgrades betrieben werden. Dieselhybridbusse sind in Deutschland etwa seit 2010 im Einsatz.

31 In der Phase seiner größten Verbreitung in den 1950er Jahren waren in Deutschland 55 Oberleitungssysteme in Betrieb. Wegen der hohen Fahrzeugkosten und des erheblichen Aufwandes zur Errichtung der Infrastruktur wurden seitdem keine neuen Systeme mehr errichtet, sondern die meisten existierenden Systeme zurückgebaut. Gegenwärtig existieren noch drei Systeme in Solingen, Esslingen und Eberswalde. Gegenwärtig werden in Oberleitungsbussen anstelle der früher eingebauten Dieselmotoren Batterien installiert, sodass die Busse auch auf Linien eingesetzt werden, die nur teilweise mit Oberleitungen ausgestattet sind („partieller Oberleitungsbus“).

32 Bei dem sogenannten „Battery-Swapping" werden die leer gefahrenen Batterien und Fahrzeug an speziellen, dafür vorgesehenen Standorten gegen frisch aufgeladene Batterien ausgetauscht. Beispielsweise hat die Siemens AG mit Sitz in München eine automatisierte Wechselstation für das sichere Wechseln der Batterien bei Elektrobussen entwickelt (Quelle: https://new.siemens.com/de/de/produkte/automatisierung/industrielle-schalttechnik/media/sicherer-batterietausch.html).

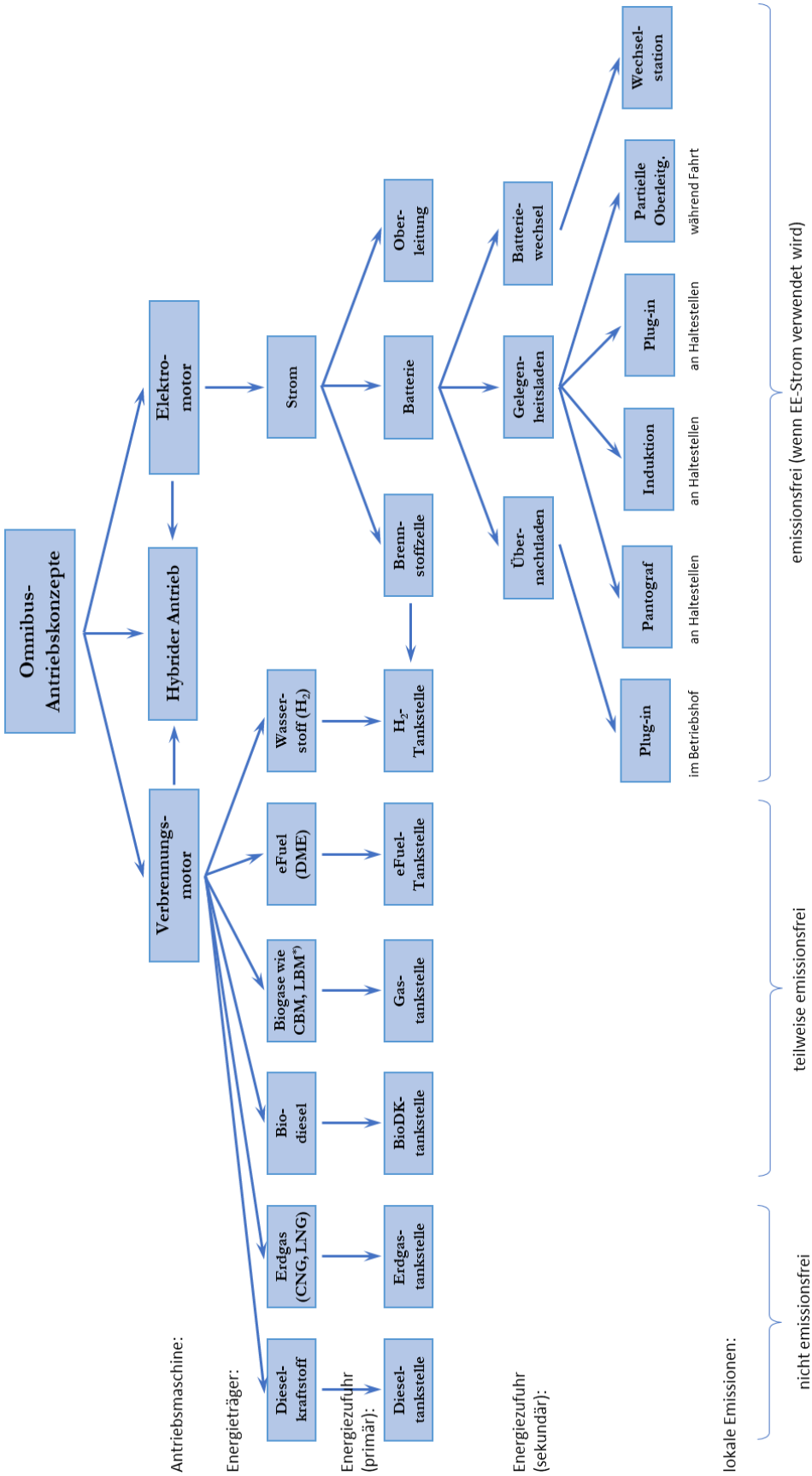

Abbildung 8: Alternative Antriebskonzepte für Omnibusse[33]

[33] Quelle: Eigene Darstellung.

Der Volkswagen AG mit Sitz in Wolfsburg zufolge ist ein branchenübergreifender Standard für Fahrzeugbatterien eine Voraussetzung dafür, dass sich Wechselstationen nicht nur wie bislang in China, sondern auch in Deutschland durchsetzen können. Dadurch entstünde für verschiedenste Fahrzeuge die Möglichkeit, in Wechselstationen Batterien unabhängig von Hersteller und Modell innerhalb weniger Minuten zu wechseln[34]. Als eine Alternative zum Batteriewechselkonzept ist der Einsatz von Batterieanhängern denkbar, die an entsprechenden Standorten gewechselt werden können. Unabhängig vom gewählten Batteriewechselkonzept führt das Vorhalten von Wechselbatterien zu deutlich höheren Investitionsaufwendungen /36/, S. 56.
Batteriebusse sind entweder durch Zentralmotoren mit Differential oder durch auf der Antriebsachse montierte Radnabenmotoren angetrieben. Den Zentralmotoren werden niedrigere Systemkosten zugeschrieben als den Radnabenmotoren, allerdings ist ihr Platzbedarf größer. Verglichen mit der Auswahl der Ladestrategie, des Batterietyps und des Klimasystems hat der Motortyp allerdings eine untergeordnete Bedeutung für das Ladeverhalten und die Reichweite des Fahrzeugs. Als Batterien kommen in heutigen Batteriebussen fast ausschließlich Lithium-Ionen-Batterien zum Einsatz, die sich allerdings in ihren Zelltypen und daher in ihren Energiedichten, Ladeleistungen und Zyklenzahlen unterscheiden können: NMC-Batterien haben eine hohe Energiedichte und ermöglichen hohe Ladeleistungen. Sie werden daher gleichermaßen für das Laden auf dem Betriebshof wie für das Gelegenheitsladen eingesetzt. LTO-Batterien haben demgegenüber eine niedrige Energiedichte, ermöglichen aber hohe Ladeleistungen und Zyklenzahlen, weshalb sie sich besonders für das Gelegenheitsladen eignen. LFP-Batterien besitzen eine etwas geringere Energiedichte als NMC-Batterien und werden fast ausschließlich für das Laden auf dem Betriebshof eingesetzt /*39*/, S. 12/13.

Bei den Wasserstoffbussen können solche mit einem wasserstofftauglichen Verbrennungsmotor (ICE) von Brennstoffzellenbussen unterschieden werden. Bei den gegenwärtig deutlich bedeutsameren Brennstoffzellenbussen dient ein Elektromotor als direkter Antrieb des Fahrzeugs. Der erforderliche Strom wird von der Brennstoffzelle aus Wasserstoff über eine bei niedrigen Temperaturen stattfindende elektrochemische Reaktion erzeugt. Alle neueren Brennstoffzellenbusse verfügen zudem über einen Zwischenspeicher (Batterie oder Kondensatoren), wohingegen reine Brennstoffzellenbusse inzwischen nicht mehr entwickelt werden. Abhängig davon, welcher fahrzeugseitige Energiespeicher die Hauptenergiequelle darstellt, werden außerdem Brennstoffzellenhybridbusse (BZ) und Brennstoffzellenbusse mit Range Extender (BZ-REX) unterschieden. Die Hauptkomponenten Brennstoffzelle, Hochvoltbatterie und Drucktanks für den Wasserstoff sind in beiden Bustypen vorhanden, jedoch unterschiedlich dimensioniert:

- Bei den Brennstoffzellenhybridbussen erzeugt die Brennstoffzelle den überwiegenden Teil der notwendigen Energie. Eine relativ kleine Batterie speichert den Strom aus der Brennstoffzelle zwischen und stellt diesen bei Bedarf zusätzlich zur Brennstoffzelle dem Antriebsstrang zur Verfügung. Weiterhin nimmt die Batterie auch die beim Bremsen durch Rekuperation gewonnene Energie auf.
- Bei Brennstoffzellenbussen mit Range Extender ist die Hauptenergiequelle eine relativ große Batterie (ähnlich der von Batteriebussen), die extern geladen wird. Eine klein dimensionierte Brennstoffzelle vergrößert als Range-Extender die Reichweite durch kontinuierliches Nachladen der Batterie.

Brennstoffzellen-Hybridbusse werden im Gegensatz zu Brennstoffzellen-Range-Extender-Bussen bereits in Serie hergestellt. Die Technologie von Wasserstoffbussen wurde in den letzten zehn Jahren erfolgreich erprobt und weiterentwickelt. Dies führte unter anderem zu einer Reduzierung des Wasserstoffverbrauchs von anfänglich 22 kg/100 km auf gegenwärtig ca. 8 kg/100 km und ermöglichte eine Erhöhung der Reichweiten auf 350 bis 400 km, was für eine typische Stadtbusanwendung je nach den bedienten Linien eine Betankung alle ein bis zwei Tage erfordert. Brennstoffzellenbusse erreichen damit dieselbe Einsatzflexibilität wie Dieselbusse.

Erdgasbusse sind in Deutschland seit 1990 im Einsatz und werden auch heute von größeren Omnibusherstellern als Serientechnologie angeboten. Treiber für ihre Einführung waren die im Vergleich zu Dieselbussen deutlich niedrigeren NO_x - und Partikelemissionen. Allerdings hat sich dieser Vorteil aufgrund der weiterentwickelten Abgasreinigungstechnik für Dieselmotoren inzwischen relativiert. Gasbusse werden heute überwiegend mit Erdgas (CNG) betrieben /*39*/, S. 6, es sind aber auch Gasbusse mit LNG-

[34] Quelle: https://www.volkswagen.de/de/elektrofahrzeuge/elektromobilitaet-erleben/e-mobilitaet/sind-batteriewechselstationen-fuer-e-autos-wirtschaftlich.html).

Betankung am Markt verfügbar[35]. Als ein Vorteil von Gasbussen kann gesehen werden, dass diese prinzipiell auch mit Biogas bzw. Biomethan sowie – unter bestimmten Voraussetzungen – auch mit Wasserstoff betrieben werden können[36]. Zwar ist die Speicherung gasförmiger Kraftstoffe in Fahrzeugen vergleichsweise aufwändig, jedoch existieren inzwischen erprobte Lösungen, sodass Gasbusse eine größere Verbreitung gefunden haben. Ebenso wie bei Erdgas können auch die erneuerbaren Gase in den Bussen in komprimierter oder in flüssiger Form mitgeführt werden. Zur Herstellung von flüssigem Biomethan (LBM) aus Biogas können gegebenenfalls auch neue Aufbereitungsverfahren zum Einsatz kommen, beispielsweise die Tieftemperatur-Aufbereitung: Durch das Ausfrieren von Kohlendioxid und die Verflüssigung von Methan besitzt das Endprodukt flüssiges Biomethan eine um den Faktor 1.000 höhere Energiedichte (Brennwert H_s = 6,44 kWh/l) als Biogas. Aus einem Kubikmeter Biogas kann so ein Liter flüssiges Biomethan gewonnen werden, womit ein flexibel einsetzbarer und gut transportierbarer erneuerbarer Energieträger zur Verfügung steht */47/*, S. 148/149. Sofern komprimiertes Gas eingesetzt wird, das typischerweise im Fahrzeug in Druckflaschen mit 200 bar mitgeführt wird, begrenzen diese aufgrund ihres Gewichts die Reichweite dieser Busse auf ca. 400 bis 500 km. Da Biomethan eine dem Erdgas vergleichbare Gasqualität aufweist, sind keine Anpassungen bei den Gasmotoren erforderlich */48/*, S. 11.

In den letzten Jahren hat die Möglichkeit des Einsatzes von Dimethylether (DME) als erneuerbare Alternative zu konventionellem Dieselkraftstoff an Bedeutung gewonnen. Zunächst wurde DME lediglich als Kraftstoffadditiv untersucht, dem ein großes Potenzial bei der Reduzierung besonders der Ruß- und der NO_x-Emissionen von Dieselmotoren zugesprochen wurde. Dabei wurden Beimischungsverhältnisse von DME zu Dieselkraftstoff zwischen 0 und 80 Prozent untersucht */49/*. Inzwischen sind allerdings auch Verbrennungsmotoren in der Entwicklung, welche ausschließlich mit DME betrieben werden können */50/*, */51/*. Darüber hinaus sind auch Mischkraftstoffe mit anderen Komponenten als Dieselkraftstoff Gegenstand verschiedener Untersuchungen. Dies gilt aufgrund der ähnlichen Eigenschaften beispielsweise für DME/LPG-Mischkraftstoffe */50/*. DME ist eine organische Verbindung und der einfachste Ether mit einer symmetrischen Struktur. Unter normalen atmosphärischen Bedingungen ist DME ein farbloses Gas, das bei - 25 °C siedet, das heißt, es liegt unter Normalbedingungen gasförmig vor. Die Handhabungsanforderungen von DME ähneln denen von Propan, das in Tanks unter Druck gelagert wird. Für den Einsatz in Dieselmotoren eignet sich DME aufgrund seiner hohen Cetanzahl, die ein Maß für die Zündfähigkeit des Kraftstoffs ist. Da DME keine Kohlenstoff-zu-Kohlenstoff-Bindungen enthält, entsteht bei der Verbannung wesentlich weniger Ruß, wodurch kostenintensive Dieselpartikelfilter entfallen können */51/*, S. 6. Allerdings ist, da der Heizwert von DME kleiner als jener von Dieselkraftstoff ist, ein größerer Kraftstofftank oder ein häufigeres Betanken erforderlich. Zudem ist zu berücksichtigen, dass DME und im Vergleich zu konventionellem Dieselkraftstoff niedrigere Viskosität- und Schmiereigenschaften hat. Auch kann DME organische Materialien wie Plastik und Elastomere auflösen. Sollen vorhandene Dieselfahrzeuge weiter genutzt und mit DME betrieben werden, sind daher zum einen der Einbau eines Drucktanks sowie bauteilspezifische Anpassungen der Dieselmotoren (Injektoren und Pumpen), Treibstoffbehälter und Dichtungen erforderlich. Zum anderen werden Additive zur Verbesserung der Schmierfähigkeit von DME benötigt */71/*, */72/*, S. 500.

Jedes Antriebskonzept besitzt somit spezifische Eigenschaften wie Art, Anzahl und Gewicht der Komponenten, Art des Energieträgers und Energieverbrauch etc., die sich in den Eigenschaften des Systems Omnibus widerspiegeln. Die technischen Merkmale von Omnibussen können beispielsweise Marktanalysen entnommen werden */56/*, */57/*. Sie vergleichen Omnibusse und ihre Antriebe besonders im Hinblick auf solche Merkmale wie Fahrzeugtyp (Kleinbus, Standardbus, Gelenkbus etc.), Antriebsart, Beförderungskapazität, Reichweite, Nennleistung, Ladekonzept, Ladesystem (Plug-In-System, Docking-System, Induktion, Oberleitung), Ladeleistung, Speicherkapazität sowie Heizung/Klimatisierung (Energieträger).

---

35 Die Bushersteller Irizar und Scania haben 2021 den ersten LNG-Bus Scania Irizar i4 vorgestellt. Das LNG wird in zwei Kryotanks bei einer Temperatur von - 162 °C mitgeführt. Das Tankvolumen umfasst insgesamt 704 l und ermöglicht eine Reichweite von 1.000 km. Der Bus ist als Stadt- und als Überlandbus einsetzbar. Quelle: https://www.irizar.com/en/irizar-manufactures-first-liquid-natural-gas-coach/. Eine Übersicht über in Deutschland marktverfügbare CNG/LNG-Busse für den Einsatz in der Stadt und auf dem Land findet sich beispielsweise unter: https://www.gibgas.de/Fahrzeuge/Busse.

36 Beispielsweise wurden in dem Projekt Clean Hydrogen in European Cities (CHIC, Laufzeit 2010-2016) neben 54 Brennstoffzellenbussen auch 4 wasserstoffbetriebene Busse mit Verbrennungsmotoren (ICE) in 9 Städten in Europa und Kanada betrieben. Die Busse wurden von fünf verschiedenen Herstellern geliefert. Einsatzort der Busse mit Verbrennungsmotoren war Berlin */46/*, S. 14/20.

Darüber hinaus schließen die beiden ausgewerteten Marktanalysen auch die Infrastrukturen ein. Dabei werden beispielsweise bei elektrisch angetriebenen Omnibussen die elektrische und chemische Energiezufuhr voneinander unterschieden, wobei erstere weiter nach dem Übertragungsweg und letztere nach der Art der Betankung (Versorgung mit Wasserstoff bzw. Kraftstoff) unterteilt werden[37].

Die Eignung eines Antriebskonzepts für einen bestimmten Einsatzfall lässt sich allerdings erst beurteilen, wenn in einer Bewertung die jeweiligen Gesamtsysteme verglichen werden. Diese umfassen neben den Omnibussen und ihren Antriebskonzepten auch die für den Betrieb jeweils erforderlichen Infrastrukturen sowie das vorgesehene Einsatzgebiet. So kann beispielsweise eine geringere Reichweite von Batteriebussen im Vergleich zu Brennstoffzellenbussen im städtischen ÖPNV durch ein entsprechendes Ladekonzept ausgeglichen werden, welches neben dem nächtlichen Vollladen auf dem Betriebshof auch ein gelegentliches Zwischenladen des Batteriebusses an bestimmten Punkten einer Buslinie vorsieht.

Alle genannten Antriebskonzepte unterscheiden sich hinsichtlich ihrer lokalen Emissionen. Während die konventionellen Antriebe insbesondere CO_2- und Luftschadstoffemissionen verursachen, sind die auf erneuerbaren Energieträgern basierenden Antriebskonzepte CO_2-neutral und insoweit zumindest teilweise emissionsfrei. Hybridbusse ermöglichen eine Reduzierung der CO_2-Emissionen gegenüber dem Dieselbus um maximal 20 Prozent. Demgegenüber kann mit batterieelektrischen Bussen und mit Wasserstoffbussen eine emissionsfreie Mobilität realisiert werden. Vollständig frei von lokalen Emissionen sind somit lediglich die auf Elektromotoren basierenden und mit erneuerbarem Strom betriebenen Antriebskonzepte. Dies gilt jedenfalls dann, wenn man ausschließlich die lokalen, also auf dem Betriebshof bzw. während der Fahrt verursachten Emissionen betrachtet. Unberücksichtigt bleiben dabei alle Emissionen, welche auf vorgelagerten Prozessketten, also bei der Herstellung der Fahrzeuge und Infrastrukturen, entstehen.

Damit der ÖPNV mit alternativen Antrieben vollständig emissionsfrei ist, muss neben dem Antrieb auch die konventionell mit Brennstoff betriebene die Beheizung bzw. Kühlung des Fahrer-/Fahrgastraums umgestellt werden. Dies bedeutet bei Batteriebussen, dass diese ebenfalls batterieelektrisch erfolgt. Damit kann allerdings je nach Jahreszeit eine deutliche Reduzierung der Reichweite verbunden sein. Dies wurde beispielsweise in Hamburg statistisch nachgewiesen, obwohl die dort eingesetzten Batteriebusse Heizöl zum Beheizen der Fahrzeuge verwenden */59/*[38]. Um dennoch die erforderlichen Reichweiten erbringen zu können, sind entweder je nach Linienbetrieb und Umlaufplanung zusätzliche Batteriebusse oder Gelegenheitsladepunkte auf den elektrifizierten Buslinien vorzusehen. Dies gilt sinngemäß auch für Wasserstoffbusse. Allerdings kann bei diesen die Abwärme der Brennstoffzelle bzw. des Verbrennungsmotors genutzt werden, sodass die Minderung der Reichweite geringer ist als bei Batteriebussen.

In der Regiopole Rostock wird der ÖPNV nicht nur mit Omnibussen, sondern auch mit Straßenbahnen durchgeführt, welche ihren Fahrstrom aus Oberleitungen beziehen. Daher könnte beim Laden batterieelektrischer Omnibusse alternativ zum Gelegenheitsladen an erst noch zu errichtenden Ladepunkten auch das abschnittsweise Laden aus Straßenbahn-Oberleitungen erfolgen, soweit die Linienführung von Batteriebus- und Straßenbahnlinien übereinstimmt. Diese Option des Ladens während der Fahrt („in-motion-charging“) ist für die Regiopole Rostock gegebenenfalls besonders interessant und aussichtsreich, da auch das Straßenbahnnetz erweitert werden soll und da beide ÖPNV-Formen von ein und demselben Verkehrsunternehmen, der Rostocker Straßenbahn AG (RSAG), durchgeführt werden.

1.3.2 Alternative Antriebskonzepte für Entsorgungsfahrzeuge

Lastkraftwagen (Lkw) werden typischerweise in verschiedene Fahrzeuggrößen sowie in Lkw im städtischen/regionalen Verkehr bzw. im Fernverkehr unterteilt: Leichte Lkw werden überwiegend im Verkehr über kürzere Distanzen eingesetzt, während im Fernverkehr der Einsatz schwerer Lkw überwiegt. Entsorgungsfahrzeuge wie Abfallsammelfahrzeuge sind als mittelschwere Lkw (zulässiges Gesamtgewicht 7,5 bis

---

37 Keine der beiden Marktanalysen gibt zu den erfassten Omnibussen und Infrastrukturen Kosten an, sondern höchstens Richtwerte für die Anschaffung von Elektrobussen und fahrzeugseitiger Ladetechnik */56/*.

38 Ein weiteres Beispiel hierfür sind die Berliner Verkehrsbetriebe (BVG). Im Februar 2021 wurde berichtet, dass eine Vielzahl von Solaris-Batteriebussen, welche bei Minusgraden statt einer Reichweite von 130 km tatsächlich nur eine solche von 90 km erreicht haben, weshalb die Busse übergangsweise bis zur Realisierung einer Lösung mit abgeschalteter Heizung fahren mussten. (Quelle: https://www.rbb24.de/wirtschaft/beitrag/2021/02/bvg-elektrobusse-solaris-batterieprobleme.html).

18 t) bzw. als schwere Lkw zu betrachten sind[39], während Straßenreinigungsfahrzeuge als leichte Lkw eingeordnet werden können (zulässiges Gesamtgewicht Leerfahrzeug + Zuladung 3,5 bis 7,5 t).

Prinzipiell können Lkw im Allgemeinen und Entsorgungsfahrzeuge im Besonderen mit den gleichen alternativen Antriebskonzepten ausgerüstet werden wie Omnibusse oder andere Nutzfahrzeuge. Allerdings setzen sich für leichte und schwere Lkw gegebenenfalls unterschiedliche alternative Antriebe durch, Abbildung *9*. Dies begründet sich im Wesentlichen dadurch, dass mit der Fahrzeuggröße und mit den zurückzulegenden Distanzen (Reichweite) im Falle von batterieelektrischen Antrieben die Batteriemasse deutlich ansteigt und zu Lasten der maximal möglichen bzw. zulässigen Fahrzeug-Gesamtmasse geht.

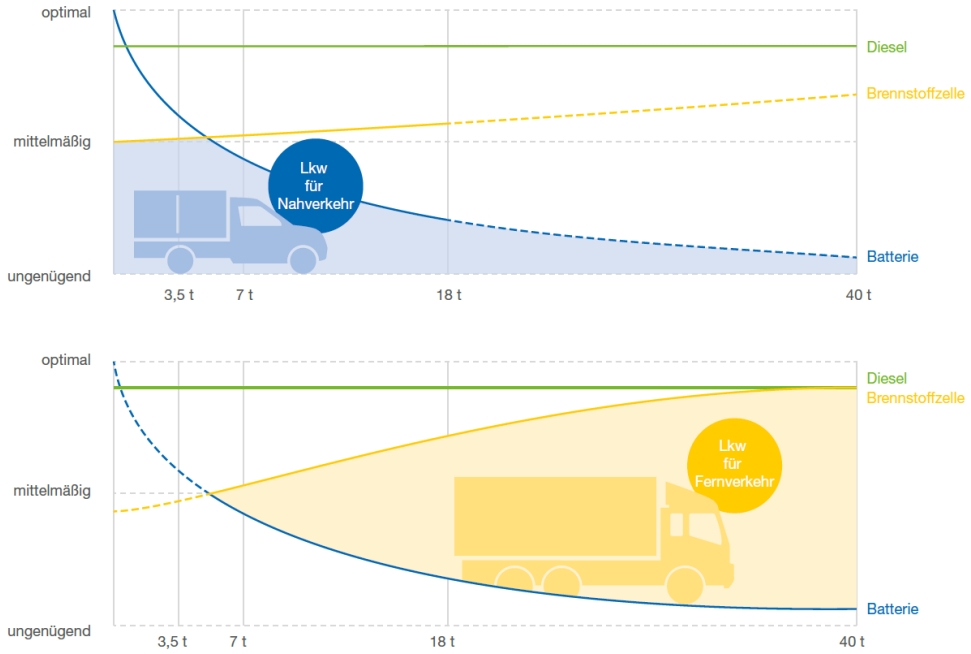

Abbildung 9: Einsatzszenarien Batterie versus Wasserstoff-Brennstoffzelle in Lkw-Antrieben[40]

Zu berücksichtigen ist, dass Entsorgungsfahrzeuge im Vergleich mit Lkw im Liefer- oder Fernverkehr vergleichsweise geringere Fahrleistungen bzw. Betriebsstunden erreichen. Bevor Abfallsammelfahrzeuge mit batterieelektrischen Antrieben ausgestattet werden, muss auch geprüft werden, ob die realisierbaren Reichweiten für das jeweils vorgesehene Einsatzgebiet hinreichend groß ist: Typische Entsorgungsfahrzeuge können auf einer Entsorgungstour je nach Fahrzeuggröße und Abfallart ca. 10 t Abfall einsammeln. Die dafür zurückzulegende Fahrtstrecke hängt von vielen Faktoren ab, beispielsweise von der Siedlungsdichte, von dem spezifischen Wert- bzw. Abfallaufkommen sowie von der Entfernung zwischen dem Sammelgebiet und der Abgabestelle, an der das Fahrzeug den eingesammelten Abfall zur Weiterbehandlung übergibt. In Anbetracht dieser Faktoren wurde zunächst eingeschätzt, dass reine batterieelektrische Abfallsammelfahrzeuge nur in Kernstädten und im unmittelbaren Umfeld von Sammelstellen einsetzbar seien, wo die Länge der Entsorgungstouren 30 km nicht übersteigt. Für längere Touren kämen daher als Alternative zu Dieselfahrzeugen nur Brennstoffzellenhybridfahrzeuge in Betracht */60/*, S. 57.

Tatsächlich bietet beispielsweise die FAUN Umwelttechnik GmbH & Co. KG mit Sitz in Osterholz-Scharmbeck inzwischen Abfallsammelfahrzeuge mit einem batterieelektrischen Antrieb und einer Brennstoffzelle als Range Extender an, nachdem zunächst mit einem Fahrzeug mit Dieselmotor und Supercaps zur Zwischenspeicherung der Bremsenergie (Fahrzeug der Marke Dualpower) sowie mit einem Fahrzeug experimentiert worden war, dessen Aufbau mit Wasserstoff betrieben wurde (Fuelcell). Seit 2018 erprobt

[39] Beispielsweise haben Abfallsammelfahrzeuge des Herstellers FAUN Umwelttechnik GmbH & Co. KG mit Sitz in Osterholz-Scharmbeck vom Typ Variopress für die Entsorgung von allen Wert- und Abfallstoffen (Hecklader) je nach Art des Aufbaus ein Gesamtgewicht von ca. 5,5 bis 16,5 t. Leerfahrzeug? (Quelle: https://www.faun.com/produkte/abfallsammelfahrzeuge/hecklader/variopress/).

[40] Quelle: /58/.

das Unternehmen die Abfallsammlung mit einem batterieelektrischen Fahrzeug, das mit einer Brennstoffzelle als Range Extender ausgestattet ist (Bluepower). Bis 2030 will Faun sein Fahrzeugangebot vollständig auf mit Wasserstoff betriebene Fahrzeuge umstellen[41]. Bei Bluepower handelt es sich um ein modulares Konzept, bei dem das batterieelektrischen Trägerfahrzeug mit einem Entsorgungsaufbau komplettiert und je nach Energiebedarf mit bis zu drei 30-kW-Brennstoffzellen und vier 4-kg-Wasserstofftanks ausgestattet wird (700 bar). Die Betankungsdauer beträgt 5 bis 15 min. Das Plug-in-Laden der NMC-Fahrzeugbatterien erfolgt über einen CCS 2.0-Ladeanschluss für das DC-Laden mit bis zu 85 kW und für das AC-Laden mit bis zu 20 kW. Hierfür verfügt das Fahrzeug auch über ein On-Board-Ladesystem */61/*.

Darüber hinaus bietet die FAUN Umwelttechnik GmbH & Co. KG zusammen mit Designwerk Products AG mit Sitz in Winterthur unter der Marke Futuricum elektrische Lkw mit einem Gewicht von 18 bis 44 t, mit einer Gesamtleistung von 680 PS (vier rekuperierende Elektromotoren) und mit einer Reichweite von bis zu 760 km an. Die Fahrzeuge können mit einer skalierbaren Batterie und mit mobilen DC-Schnellladegeräten mit einer Ladeleistung von 22 bis 88 kW ausgestattet werden. Ein Einsatzgebiet dieser batterieelektrischen Lkw bildet die Abfallsammlung, wo der elektromotorische Antrieb und der bedarfsorientierte Pressbetrieb im Stop-and-Go-Betrieb sowie der Wegfall der Fahrt zur Tankstelle eine schnellere Absolvierung der Entsorgungstouren ermöglichen soll. Verfügbar sind gegenwärtig ein Abfallsammelfahrzeug in drei Typen sowie eine Straßenkehrmaschine[42].

Schließlich kommt ebenso wie für Omnibusse auch für Entsorgungsfahrzeuge eine Umstellung bzw. Umrüstung von Dieselfahrzeugen auf den Einsatz von Dimethylether (DME) in Betracht. Hierfür gelten prinzipiell die für Omnibusse beschriebenen Zusammenhänge (Abschnitt 1.3.1).

Wie bei Omnibussen kann eine Bewertung der Eignung, also der Vor- und Nachteile eines konkreten Antriebskonzepts für einen bestimmten Einsatzfall nur anhand des jeweiligen Gesamtsystems vorgenommen werden, welches aus Fahrzeug, Antrieb und Einsatzgebiet besteht.

Bei der Beurteilung der beschriebenen alternativen Antriebkonzepte und bei der Planung der zugehörigen Infrastrukturen ist zu berücksichtigen, dass diese sich gegenwärtig schnell weiterentwickeln. Daher können perspektivisch Fahrzeuge auch für solche Einsatzgebiete in Betracht kommen, für die sie gegenwärtig beispielsweise aufgrund ihrer begrenzten Reichweite noch als ungeeignet erscheinen. Insbesondere wird das Entwicklungspotenzial von Lithium-Ionen-Batterien als hoch eingeschätzt: Bereits in den letzten Jahren wurden signifikante Verbesserungen bei Schlüsselparametern wie Energiedichte und Lebensdauer sowie Kosten erreicht. Lernkurvenanalysen auf Basis der zurückliegenden Entwicklungen zeigen zukünftige Potenziale auf. Dabei liegt der Schwerpunkt für Weiterentwicklungen und Optimierungen in den beiden nächsten Jahrzehnten eher auf einer Evolution aktueller Lithium-Metall-Legierungen. Außerdem ist auch ein Durchbruch disruptiver Batterietechnologien nicht ausgeschlossen: Sogenannte Beyond-Lithium-Ion-Technologien werden jedoch nicht vor 2030 marktreif sein */36/*, S. 51/59.

1.3.3 Prozessketten für Fahrzeuge mit alternativen Antrieben

Aus den alternativen Antriebskonzepten für Omnibusse und für Entsorgungsfahrzeuge leiten sich die für den Betrieb dieser Fahrzeuge erforderlichen Prozessketten ab. Sie sind in Abbildung *10* im Überblick für Omnibusse dargestellt. Sie gelten jedoch analog auch für Entsorgungsfahrzeuge und werden im Folgenden näher beschrieben: Die Prozesskette (0.) für das Referenzsystem, also für den konventionellen Diesel- bzw. Erdgasbus, besteht aus dem Kraftstoffhändler, welcher den Dieselkraftstoff bzw. das Erdgas in Form von CNG oder LNG auf dem Omnibus-Betriebshof angeliefert. Dort erfolgt eine Zwischenlagerung, aus der die auf dem Betriebshof angesiedelte Tankstelle versorgt wird. Aus dieser werden dann die Fahrzeuge betankt. Die Prozesskette (1.) für ein erstes alternatives Antriebskonzept ersetzt die in Diesel- bzw. Erdgasbussen eingesetzten fossilen Energieträger durch erneuerbare Kraftstoffe wie Biodiesel, Biogas oder Dimethylether (DME). Ein Vorteil dieser Prozesskette besteht darin, dass vorhandene Diesel- bzw. Erdgasbusse weiterverwendet werden können, wobei gegebenenfalls Anpassungen in der Antriebstechnik erforderlich sein können.

41 Quelle: https://www.faun.com/produkte/alternative_antriebe/bluepower/.
42 Quelle: https://www.futuricum.com/.

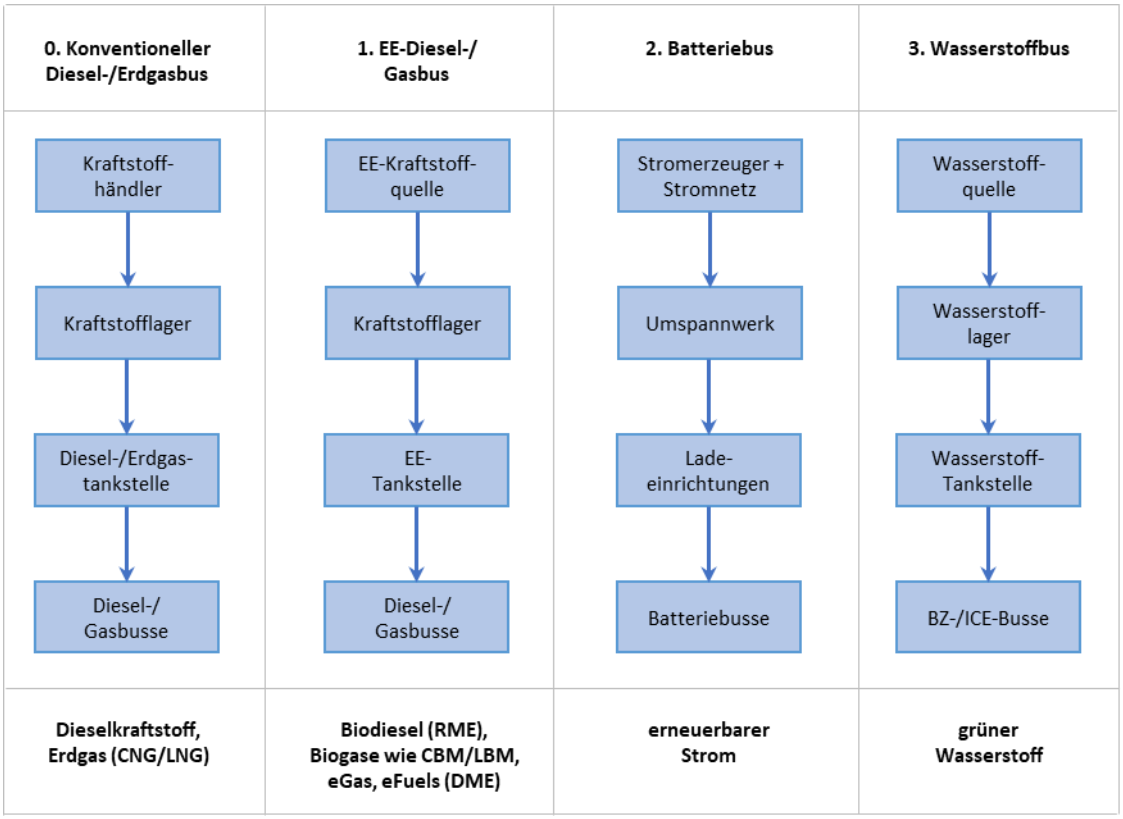

Abbildung 10: Überblick über die Prozessketten für alternative Nutzfahrzeug-Antriebskonzepte[43]

Prinzipiell kann Biomethan jedoch in allen Fahrzeugen eingesetzt werden, welche mit verdichtetem Erdgas betrieben werden können. Aufwendiger ist dagegen die Umrüstung von Bestandsfahrzeugen auf Wasserstoff. So haben zum Beispiel die Stadtwerke Münster einen Erdgasbus des Baujahres 2012 in einen Wasserstoffbus umgerüstet und ihn hierfür mit zwei 30-kW-Brennstoffzellen und einer 74-kWh-NMC-Pufferbatterie ausgerüstet /*70*/[44]. In der zweiten alternativen Prozesskette (2.) für batterieelektrische Omnibusse wird erneuerbarer Strom über ein Umspannwerk für die Ladeinfrastrukturen bereitgestellt, die sich auf dem Betriebshof bzw. an ausgewählten Punkten von Buslinien befinden können. Die dritte alternative Prozesskette (3.) betrifft den Wasserstoffbus, wobei der Wasserstoff aus einer betriebshofexternen oder -internen Wasserstoffquelle in einen auf dem Betriebshof angesiedelten Wasserstoffspeicher übernommen wird. Von diesem werden die Wasserstoffbusse betankt, die typischerweise mit Brennstoffzellen (BZ), gegebenenfalls aber auch mit Wasserstoff-Verbrennungsmotoren (ICE) ausgestattet sind.

Die in Abbildung *10* im Überblick dargestellten Prozessketten lassen sich anhand der eingesetzten Kraftstoffe bzw. Energieträger weiter aufgliedern. Abbildung *11* zeigt dies zunächst für die Prozessketten von batterieelektrischen Omnibussen, welche auch hier wieder stellvertretend für alle Arten von Nutzfahr-

43 Quelle: Eigene Darstellung.

44 Sollen vorhandene Fahrzeuge weiter genutzt werden, sind Anpassungen unumgänglich, unter anderem weil die CVD den Einsatz von Mischkraftstoffen in sauberen bzw. emissionsfreien Fahrzeugen ausschließt (Abschnitt 1.2). Dementsprechend sind bei der Umrüstung Mindeststandards /31/ zu erfüllen, damit die umgerüsteten Fahrzeuge als saubere bzw. emissionsfrei Nutzfahrzeuge klassifiziert werden können und die Umrüstung förderfähig ist. Solche Anpassungen können aufwendig und kostenintensiv sein: Neben auf den Antrieb bezogenen Arbeiten ist gegebenenfalls auch die Fahrzeugkarosserie zu verstärken, weil Gasflaschen oder Drucktanks auf dem Fahrzeugdach untergebracht werden müssen. Beispielsweise werden die Kosten für die Umrüstung eines Dieselbusses auf einen Hybridantrieb aus Flüssig-Biomethan-Verbrennungsmotor (LBG) und plug-in-Elektroantrieb mit Rekuperation (CMF drive) gegenwärtig mit 0,3 Mio. EUR angegeben /*69*/, S. 365. Eventuell können die Anpassungskosten dadurch reduziert werden, dass mehrere Omnibusse gleichzeitig umgebaut werden. Eine Umrüstung vorhandener Dieselbusse lohnt sich auch im Hinblick auf die Umwelteffekte nur, wenn diese Busse noch nicht die Euro-6-Norm erfüllen und somit die Umrüstung zu einer signifikanten Senkung der Schadstoffemissionen führen kann.

zeugen stehen. Die in der Abbildung gestrichelt dargestellten Bestandteile der Prozessketten sind optional bzw. können an verschiedenen Standorten angesiedelt sein.

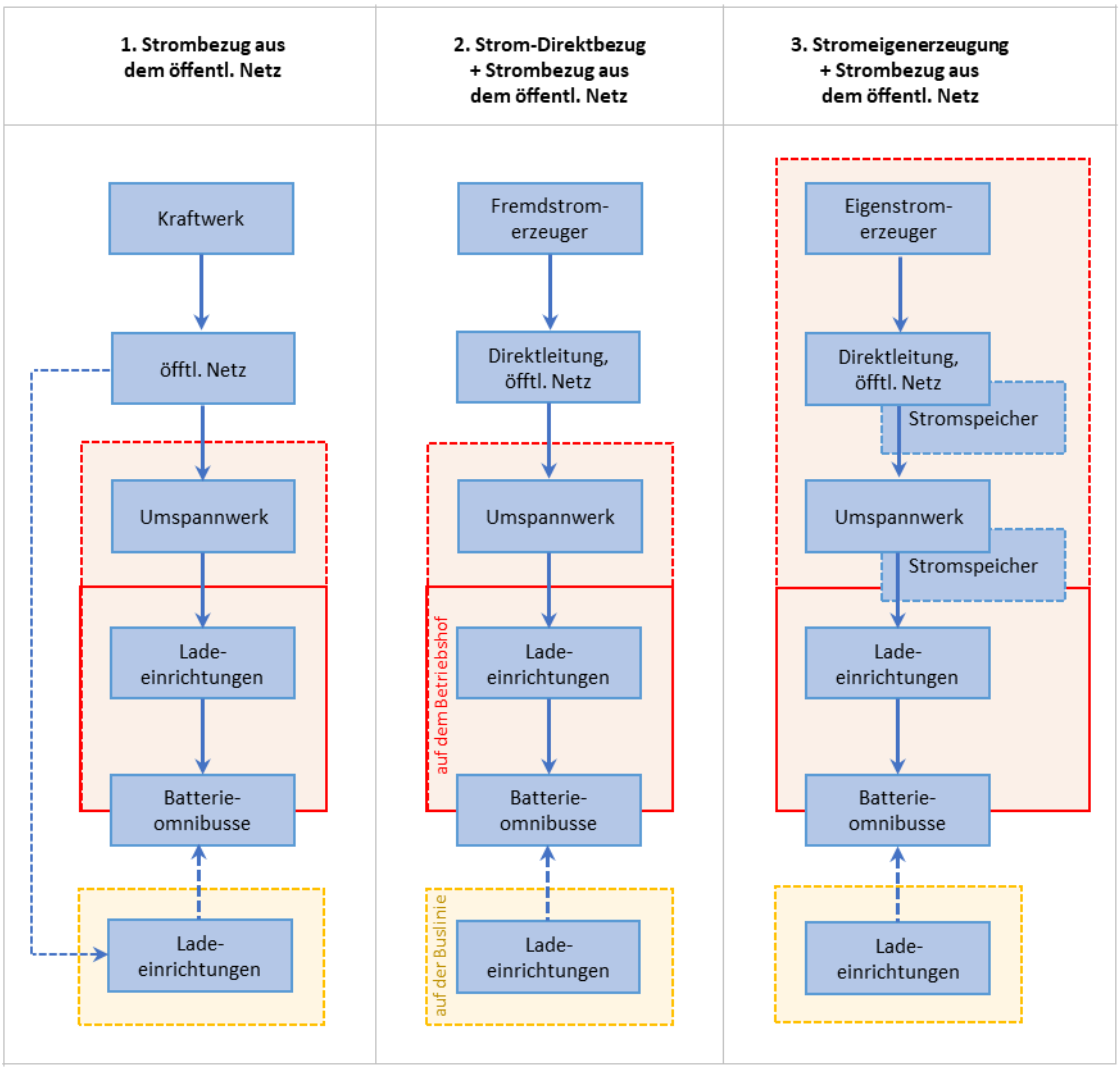

Abbildung 11: Prozessketten für batterieelektrische Nutzfahrzeuge[45]

Die Prozessketten beinhalten jeweils die Strombereitstellung, die Ladeeinrichtungen sowie die Omnibusse und unterscheiden sich besonders in der Quelle, aus welcher der erneuerbare Strom für das Laden der Fahrzeugbatterien bezogen wird. Dabei kommen neben dem Bezug aus dem öffentlichen Stromnetz besonders der Bezug über eine Direktleitung von einem fremden Betreiber einer erneuerbaren Stromerzeugungsanlage oder der Bezug von einer eigenen erneuerbaren Stromerzeugungsanlage in Betracht. Bei den Stromerzeugungsanlagen kann es sich um Freiflächen-Photovoltaikanlagen, um Biogasanlagen oder um Windparks handeln. Da die Stromerzeugung solcher Anlagen volatil ist und gegebenenfalls nur einen Teil der erforderlichen Ladeleistung abdeckt, ist parallel dazu aus Gründen der Versorgungssicherheit auch ein Anschluss an das öffentliche Stromnetz erforderlich. Dieser muss entsprechend dimensioniert sein, weshalb der Anschluss bei größeren Anzahlen von Batteriebussen auch über ein eigenständiges Umspannwerk an das Mittelspannungsnetz des Verteilnetzbetreibers erfolgen kann. Dieses Umspannwerk kann je nach den lokalen Platzverhältnissen und nach Maßgabe des zuständigen Verteilnetzbetreibers auf dem Betriebshof oder außerhalb angesiedelt sein. Schließlich können in den Prozessketten ergänzend Stromspeicher angeordnet werden, um Schwankungen in der erneuerbaren Stromerzeugung ganz oder teilweise ausgleichen oder um für das Vollladen über Nacht Strom in ausreichender Menge bereitstellen zu können.

45 Quelle: Eigene Darstellung.

Gegebenenfalls kann dann, sofern auf dem betreffenden Betriebshof nur wenige batterieelektrischen Omnibusse stationiert sind, eine Verstärkung des Netzanschlusses durch ein gesondertes Umspannwerk entfallen. Die Übertragung des bereitgestellten erneuerbaren Stroms auf die Fahrzeugbatterien erfolgt durch Ladeeinrichtungen, welche aus den Ladesteuerungen und aus den Ladepunkten bestehen. Hinzu kommen optional weitere Ladeeinrichtungen, die an ausgewählten Punkten der mit den Batteriebussen bedienten Buslinien angeordnet werden können, beispielsweise an Haltestellen oder Wendeschleifen.

Auch die im Überblick in Abbildung *10* als eine Prozesskette dargestellten Diesel- und Gasbusse für erneuerbare Energieträger lassen sich weiter unterteilen. Abbildung *12* zeigt die Prozessketten (1.) für die Nutzung von komprimiertem oder verflüssigtem Biomethan anstelle von Erdgas bzw. (2.) für die Nutzung von erneuerbarem Dimethylether (DME) anstelle von konventionellem Dieselkraftstoff.

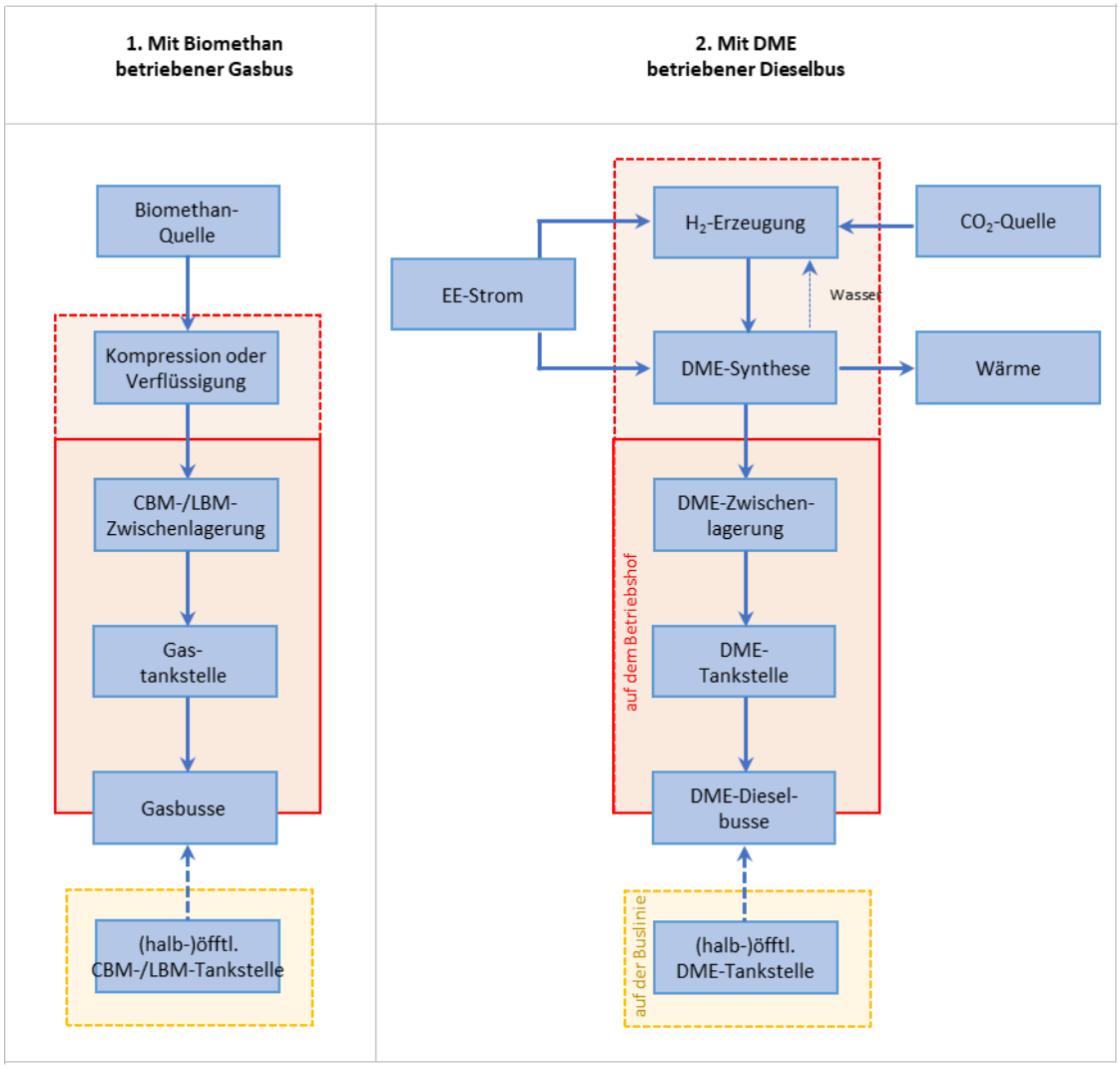

Abbildung 12: Prozessketten für Biomethan- und DME-Nutzfahrzeuge[46]

Die Prozesskette (1.) beginnt an der Biomethan-Quelle, also an einer Biogasanlage, welche das von ihr erzeugte Biogas zu Biomethan aufbereitet. Das Biomethan wird anschließend komprimiert oder verflüssigt. Dieser Prozessschritt kann optional auch auf dem Betriebshof stattfinden, sofern Biogas aus einer nahegelegenen Biogasanlage bezogen werden kann. Das komprimierte bzw. verflüssigte Biomethan (CBM bzw. LBM) wird auf dem Betriebshof zwischengelagert und über eine an die jeweilige Form angepasste Gastankstelle in die Gasbusse getankt. Die Prozesskette (2.) für DME ist demgegenüber komplexer und

[46] Quelle: Eigene Darstellung.

beginnt mit der Bereitstellung von CO_2 und Wasserstoff. Aus diesen beiden Ausgangsstoffen wird unter Einsatz von erneuerbarem Strom DME synthetisiert, wobei CO_2 verbraucht wird und als Nebenprodukte Wärme und Wasser entstehen. Der erzeugte DME wird auf dem Betriebshof zwischengelagert und an die dortige Tankstelle abgegeben, um die DME-Busse zu betanken. Sowohl im Falle der Biomethan-Busse als auch der bei den DME-Bussen besteht zusätzlich die Möglichkeit der Betankung an öffentlichen Tankstellen bzw. an halböffentlichen Tankstellen auf anderen Betriebshöfen, sofern solche Tankstellen entlang der bedienten Buslinien angefahren werden können und sofern dort die jeweiligen Kraftstoffe angeboten werden. Prinzipiell ist es so auch möglich, in Ausnahmefällen Erdgas bzw. konventionellen Diesel zu tanken.

Sowohl bei den Biomethan- und DME-Prozessketten als auch bei den im Folgenden dargestellten Wasserstoff-Prozessketten können die Infrastrukturen für einzelne Prozessschritte auf dem Betriebshof angeordnet werden, sofern das Verkehrs- oder Entsorgungsunternehmen diese in seine Geschäftsabläufe integrieren möchte. Wenn dies nicht in Betracht kommt, können diese Infrastrukturen auch anderenorts errichtet und von Dritten betrieben werden, die dann das Verkehrs- oder Entsorgungsunternehmen beliefern.

De in der Überblicks-Abbildung *10* dargestellte Prozesskette für Wasserstoff-Nutzfahrzeuge ist in Abbildung *13* in drei mögliche Prozessketten aufgegliedert.

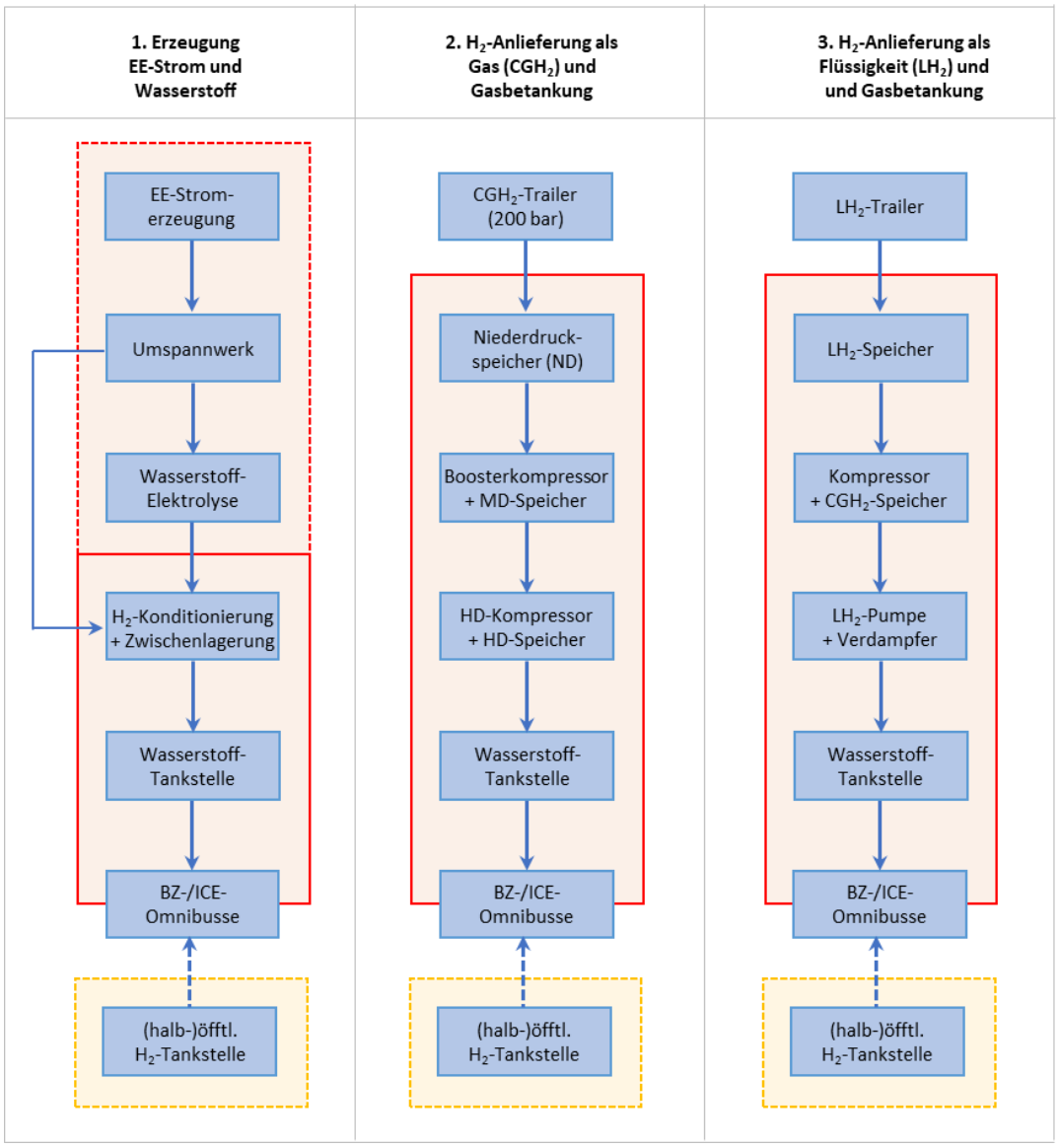

Abbildung 13: Prozessketten für Wasserstoff-Nutzfahrzeuge[47]

[47] Quelle: Eigene Darstellung.

Die erste Prozesskette (1.) umfasst die Erzeugung von erneuerbarem Strom, welcher über das Stromnetz und ein Umspannwerk einer Wasserstoffelektrolyse von zugeführt wird. Der erzeugte Wasserstoff wird abhängig von der Art der Wasserstoff-Nutzfahrzeuge (Gas- bzw. Flüssigtank) konditioniert, also entweder komprimiert oder verflüssigt und anschließend zwischengelagert. Die Entnahme und Zuführung des Wasserstoffs zur Tankstelle erfolgen je nach Bedarf, um die Wasserstoff-Nutzfahrzeuge zu betanken.

Die zweite und dritte Prozesskette (2., 3.) sehen anstelle einer Eigenerzeugung des Wasserstoffs dessen Anlieferung mit Lkw-Trailern in gasförmig-komprimierter oder in flüssiger Form vor (CGH_2 bzw. LH_2). Die Lkw-Trailer zur CGH_2-Anlieferung transportieren typischerweise ca. 400 bis 800 kg Wasserstoff bei einem Druck von 200 bis 500 bar. Diese Form der Anlieferung kommt besonders bei kleinen Transportdistanzen und wegen der begrenzten Transportkapazität für Betriebshöfe mit relativ kleinen Fahrzeugflotten in Betracht, wo eine Anlieferung alle zwei bis drei Tage ausreicht. Bei größeren Transportentfernungen bzw. Abnahmemengen ist eine LH_2-Anlieferung vorzuziehen. LH_2-Trailer beziehen den Wasserstoff von einer zentralen Verflüssigungsanlage und transportieren diesen bei einer Temperatur von - 253 °C. In dieser flüssigen Form kann ein Trailer deutlich mehr Wasserstoff transportieren als ein CGH_2-Trailer.In der zweiten Prozesskette (2.) befüllt der CGH_2-Trailer einen Niederdrucktank auf dem Betriebshof. Die Bereitstellung des Wasserstoffs an der Wasserstoff-Tankstelle erfordert eine oder mehrere Kompressionsstufen zur Druckerhöhung des Wasserstoffs. Dabei wird aus dem Niederdruckspeicher entweder mit einem Hochdruckkompressor ein Hochdruckspeicher befüllt, aus dem dann über die Tankstelle die Betankung der Wasserstoff-Nutzfahrzeuge erfolgt. Alternativ hierzu kann aus dem Niederdruckspeicher über einen Booster-Kompressor auch ein Mitteldruckspeicher befüllt werden. Dan erfolgt die Betankung der Nutzfahrzeuge zuerst aus dem Mitteldruckspeicher. Nach Erreichen des Druckausgleichs zwischen Mitteldruckspeicher und Fahrzeugtank wird die Betankung direkt durch den Booster-Kompressor aus dem Mitteldruckspeicher fortgesetzt (Kaskadenspeicherung).

In der dritten Prozesskette (3.) mit Flüssiganlieferung des Wasserstoffs wird dieser aus dem LH_2-Trailer in einen entsprechend isolierten Flüssigwasserstoffspeicher auf dem Betriebshof gepumpt und dort zwischengelagert. Zur Betankung der Wasserstoff-Nutzfahrzeuge mit gasförmigem Wasserstoff wird der Flüssigwasserstoff über eine Flüssigwasserstoffpumpe aus dem Zwischenspeicher durch einen Verdampfer gepumpt und anschließend über die Wasserstofftankstelle dem Nutzfahrzeug zugeführt. Abbildung *14* zeigt die wichtigsten Komponenten einer LH_2/CGH_2-Tankstelle der Linde AG.

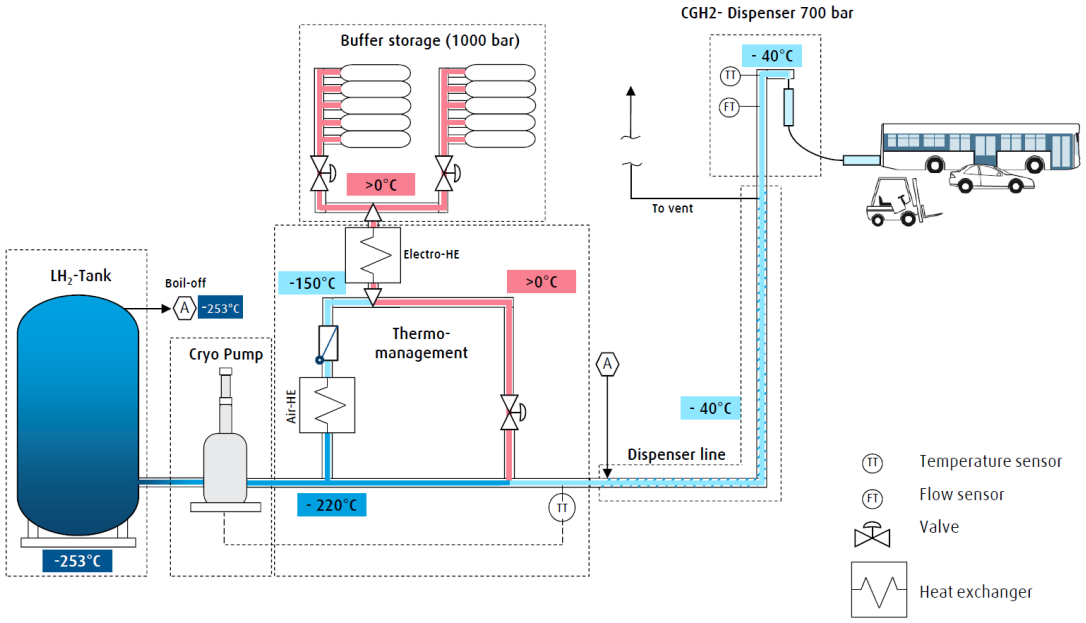

Abbildung 14: Grundstruktur einer LH_2/CGH_2-Tankstelle der Linde AG[48]

48 Quelle: /*75*/.

Bei der Lagerung von Flüssigwasserstoff tritt unvermeidlich ein Boil-off[49] auf. Dieser verdampfte Teil des Wasserstoffs muss aus dem Flüssigwasserstoffspeicher abgeführt werden, um einen Druckanstieg bis zur Überlastung zu vermeiden. Der Boil-off kann aufgefangen werden und über zusätzliche Aggregate genutzt werden: Über eine geeignete Pumpe oder über einen Zusatzkompressor und einen Gasspeicher kann der aufgefangene Wasserstoff in die Betankung einbezogen werden. Alternativ kann der aufgefangene Wasserstoff in einem Wasserstoff-BHKW auf dem Betriebshof in Strom und Wärme umgewandelt werden.

In allen drei Prozessketten können die Wasserstoff-Nutzfahrzeuge bei Bedarf auch an öffentlichen Tankstellen bzw. an halböffentlichen Tankstellen auf anderen Betriebshöfen betankt werden, sofern solche Tankstellen mit Wasserstoffangebot entlang der bedienten Buslinien existieren und angefahren werden können.

1.4 Ausgewählte Infrastrukturen für alternative Antriebskonzepte

Zu den im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen Prozessketten werden im Folgenden ausgewählte Infrastrukturen für Omnibusse näher beschrieben. Die dargestellten Zusammenhänge gelten jedoch sinngemäß auch für andere Nutzfahrzeuge, beispielsweise Entsorgungsfahrzeuge.

1.4.1 Ladekonzepte und Ladeeinrichtungen für batterieelektrische Omnibusse

Bei batterieelektrischen Bussen können gemäß VDV-Schrift 260 */80/* je nach Ladeverfahren und abhängig von der Ladeleistung besonders zwei Ladekonzepte unterschieden werden:

- Übernachtladen (Langsamladen, Vollladen): Der Ladevorgang dauert mehrere Stunden und muss daher vorrangig nachts erfolgen, weshalb er ausschließlich auf dem Betriebshof in Betriebspausen stattfindet. Dabei werden die Batterien konduktiv über eine Steckverbindung und einer Leistung von bis zu 100 kW geladen. Die für diese Ladestrategie vorgesehenen Batteriebusse haben im Allgemeinen eine große Batteriekapazität (> 300 kWh), wobei Hochenergiebatterien mit hohen Energie- und niedrigen Leistungsdichten eingesetzt werden. Typischerweise werden tagsüber im Fahrzeugeinsatz hohe Batterieentladungstiefen auf bis zu 10 Prozent erreicht, sodass anschließend auf dem Betriebshof eine Vollladung erforderlich ist.
- Gelegenheitsladen (Schnellladen, statisches Gelegenheitsladen): Hierbei wird die Fahrzeugbatterie während des Betriebs entlang einer Linie mehrmals für einige Minuten an dafür vorgesehenen (End-) Haltestellengeladen. Das Laden erfolgt konduktiv mit Ladeschnittstellen wie Pantografen oder elektromagnetisch-induktiv. Hierdurch wird grundsätzlich die Reichweitenbeschränkung von Batteriebussen aufgehoben und ein ganztägiger Betriebseinsatz der Batteriebusse ermöglicht. Allerdings sind dazu Ladepunkte auf den betreffenden Linien, also außerhalb des Betriebshofs zu errichten, wodurch Batteriebusse zugleich auch an die jeweiligen Linien gebunden werden. Jedoch können die Busse mit deutlich kleineren Batterien ausgestattet werden, wodurch sich Kosten- und Gewichtsvorteile ergeben. Aufgrund der hohen Ladeleistungen von deutlich über 100 kW kommen in Batteriebussen mit Gelegenheitsladung Hochleistungsbatterien mit hohen Leistungs- und niedrigen Energiedichten zum Einsatz. Neben den Schnellladepunkten entlang der Linie sind zusätzliche Ladeeinrichtungen auf dem Betriebshof zur Batteriekonditionierung (Temperierung und Balancing) vorzuhalten. Die Anzahl an Gelegenheitslademöglichkeiten entlang einer Linie unterliegt vielfältigen Einflüssen und Randbedingungen und kann mit erheblichen finanziellen Investitionen in die Ladeinfrastruktur verbunden sein.
- Gelegenheitsladen (Schnellladen, dynamisches Gelegenheitsladen): Im Gegensatz zum statischen Gelegenheitsladen erfolgt das Laden beim dynamischen Gelegenheitsladen während der Fahrt mittels eines Stromabnehmers an einer Oberleitung.

Je nach Konzept ergeben sich somit spezifische Betriebsabläufe und Fahrzeugeigenschaften der eingesetzten Batteriebusse.

[49] Diesen Boil off gibt beispielsweise die Linde AG für LH_2-Speicher mit einer Kapazität von 71 m³/4.600 kg LH_2 mit < 44 kg/d (< 0,90 %/d) an. Mit einem speziellen Design für LH_2-Speicher mit einer Kapazität von 6.000 l/400 kg LH_2 kann dieser Boil off auf < 2 kg/d (< 0,50 %/d) reduziert werden. Quelle: */75/*.

Für das Laden von Batteriebussen steht eine Vielzahl von Ladeschnittstellen und Ladetechnologien zur Verfügung, die einen Leistungsbereich bis 900 kW abdecken. Wie eine aktuelle Zusammenstellung von Projekten zum Aufbau der Elektromobilität im ÖPNV mit Omnibussen /82/ zeigt, wird von den Verkehrsbetrieben in Deutschland eindeutig das Übernachtladen auf den Betriebshöfen bevorzugt. Die Ladeleistungen der in diesen Projekten zu installierenden Ladeinfrastrukturen liegen in einem Bereich von 50 bis 150 kW mit einem Schwerpunkt auf den höheren Ladeleistungen. Als Ladeschnittstelle hat sich besonders der Ladestandard Combined Charging System (CCS) mit dem Typ-2-Stecker durchgesetzt. Für diese Schnittstelle sind am Markt inzwischen verschiedene Ladeeinrichtungen verfügbar. Abbildung *15* zeigt drei Beispiele für Ladeeinrichtungen, welche für das Laden von Batteriebussen mit einer Ladeleistung von 150 kW geeignet sind. Sie haben eine Grundfläche von ca. 1 m² und eine Höhe von 2 bis 3 m. Die links dargestellte Ladeeinrichtung (1.) der Siemens-Produktfamilie SICHARGE UC stellt einen speziell für die Anforderungen im Nutzfahrzeugbereich zugeschnittenen Baukasten dar, dessen Kernsystem der Ladeumrichter ist und Charging Center genannt wird. Die Ladeeinrichtungen decken einen Leistungsbereich von 100 bis 800 kW ab. Als Ladeschnittstelle unterstützen SICHARGE UC-Ladegeräte Steckerladung nach den Standards CCS und GB-T sowie Pantographenladung. Bei den Ladegeräten für die Steckerladung sind verschiedene Optionen verfügbar, beispielsweise die Wand- und Bodenaufstellung oder Deckenmontage. SICHARGE UC-Ladegeräte können je Charging Center jeweils bis zu fünf Ladeschnittstellen bedienen, die automatisch gesteuert das gleichzeitige Laden mehrerer Batteriebusse ermöglichen. Damit besteht die Möglichkeit, jeden Stellplatz für das Laden auszurüsten, aber nur so viele Ladegeräte zu installieren, wie tatsächlich notwendig sind /*54*/.

1. Sicharge UC 200
L x B x H ≈ 0,75 x 0,90 x 1,80
Siemens AG München

2. Power eBus Eagle 150 kW
L x B x H ≈ 0,89 x 0,79 x 2,00
Entratek GmbH Norderstedt

3. DC-Doppelsäule 2 x 150 kW
L x B x H ≈ 0,70 x 0,93 x 2,70
elexon GmbH Aachen

Abbildung 15: Ladeeinrichtungen 150 kW zum Laden von Batteriebussen[50]

Für das Übernachtladen von Batteriebussen auf Omnibus-Betriebshöfen wird je nach Anzahl der Batteriebusse eine größere Anzahl von Ladepunkten benötigt. Dabei können die Ladeeinrichtungen und die Ladepunkte räumlich voneinander getrennt angeordnet sowie mehrere Ladepunkte von einer Ladeeinrichtung versorgt und gesteuert werden, Abbildung *16*. Aus Gründen einer einfachen Handhabbarkeit bietet sich für das Laden auf den Omnibus-Betriebshöfen eine manuelle Herstellung des Kontakts zwischen Fahrzeug und Ladepunkt an. Auch hier existieren verschiedene Möglichkeiten der Gestaltung kabelgebundener Schnittstellen, wie Abbildung *17* zeigt.

50 Quellen: https://new.siemens.com/produkte/energie/mittelspannung/loesungen/emobility/sicharge-uc.html, https://www.entratek.de/Ladestationen/E_BusLader/, https://www.electrive.net/wp-content/uploads/2021/08/elexon-ladestation-charging-station-2021-03-min.png.

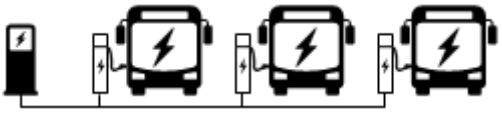

Abbildung 16: Schematische Darstellung einer Ladestation mit drei Ladepunkten[51]

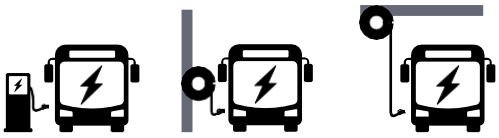

Abbildung 17: Zuführungsmöglichkeiten der manuellen Kontaktierung[52]

Für die in Batteriebussen üblicherweise eingesetzten Lithium-Ionen-Batterien existiert eine Vielzahl verschiedener Ladeverfahren /*62*/. Eine weitverbreitete Methode ist das CC/CV-Ladeverfahren, bei dem Ladestrom und -spannung so gesteuert werden, dass eine frühzeitige Alterung der Fahrzeugbatterie durch Tiefentladung bzw. Überladung vermieden werden /*81*/, S. 66, /*37*/, S. 52.

Die Auslegung, die optimale Auslastung des Betriebshof-Netzschlusses sowie die Nutzung bestimmter Stromtarife für das Laden erfordern die Koordination, Überwachung und Steuerung der Ladevorgänge. Hierfür einsetzbare Lade- und Lastmanagementsysteme nutzen die Ladeflexibilität einer Fahrzeugflotte, um die Ladevorgänge und damit den zeitlichen Verlauf des Leistungsbezugs aus dem Stromnetz zu optimieren. Diese Optimierung kann neben einer Minimierung der Kosten eine Vielzahl von weiteren Zielen verfolgen, Abbildung *18*. Zur Entwicklung, Analyse und Bewertung von Ladestrategien für Batteriebusse in Betriebshöfen gibt es inzwischen eine Vielzahl von Untersuchungen, die neben einer Minimierung der Spitzenlast beispielsweise auch die Energiebeschaffung sowie die Bereitstellung von Systemdienstleistungen (Frequenzregelung, Spannungsregelung, Vermeidung von Verteilnetzproblemen) einbeziehen /*63*/, /*64*/, /*65*/, /*66*/.

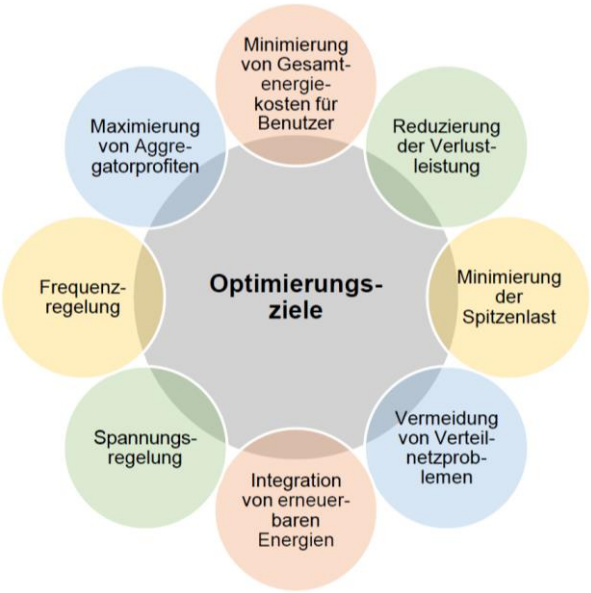

Abbildung 18: Optimierungsziele für das Lade- und Lastmanagement[53]

[51] Quellen: https://new.siemens.com/produkte/energie/mittelspannung/loesungen/emobility/sicharge-uc.html, https://www.entratek.de/Ladestationen/E_BusLader/, https://www.electrive.net/wp-content/uploads/2021/08/elexon-ladestation-charging-station-2021-03-min.png.

[52] Quelle: /*81*/, S. 16.

[53] Quelle: /*81*/, S. 14.

Zudem werden solche Lademanagementsysteme zunehmend in übergeordnete Betriebshof-Managementsysteme integriert (RBL/ITCS). Ein Beispiel hierfür ist das Depot- und Lademanagement-System PSIebus der PSI Transcom GmbH mit Sitz in Berlin. Das System ermöglicht unter anderem die Kombination der Fahrzeugdisposition mit dem Lademanagement und unterstützt den Parallelbetrieb von Diesel-, Batterie- und Wasserstoffbussen. Für den Datenaustausch zwischen dem Depotmanagement und dem Lademanagement hat PSI gemeinsam mit der Hamburger Hochbahn AG eine Schnittstelle entwickelt, welche auch in die VDV-Schrift 463 einfließt[54]. Weitere Beispiele für solche Managementsysteme sind ChargePilot von The Mobility House mit Sitz in Zürich, MOBILEcharge der CarMedialab GmbH mit Sitz in Bruchsal oder COSware pro der COS GmbH mit Sitz in Oberkirch.

1.4.2 Infrastruktur für Wasserstoffbusse

Wasserstofftankstellen und Flächenbedarf

Bei Wasserstofftankstellen ist zum einen zwischen öffentlichen und (halb-)öffentlichen Tankstellen zu unterscheiden. Zum anderen unterscheiden sich die Tankstellen dadurch, ob sie über die Möglichkeit einer 700-bar-Schnellbetankung nach SAE J2601 verfügen. Betriebshof-Tankstellen zur 350-bar-Betankung von Brennstoffzellenbussen benötigen diese Möglichkeit in der Regel nicht, da in Brennstoffzellenbussen der Wasserstoff typischerweise gasförmig in Drucktanks mitgeführt wird.

Die Norm SAE J2601 definiert unter anderem Druckrampen und ein Temperaturfenster für die Betankung mit Wasserstoff (- 40 °C bis 33 °C). Diese sind von der Tankstelle im Rahmen der Betankung einzuhalten, um eine sichere und schnelle Betankung zu ermöglichen. Durch ein konsequentes Befolgen dieser Spezifikationen ist sichergestellt, dass die Fahrzeugtanks auch in Extremfällen nicht überhitzen und eine Schädigung des Tanksystems (Tanktemperatur > 85 °C) oder sicherheitskritische Zustände sicher vermieden werden (> 100 °C Tanktemperatur). Außerdem enthält der Standard SAE J2719 Vorgaben zur Wasserstoffqualität für Brennstoffzellen-Fahrzeuge und eine Liste von Verunreinigungen mit Angabe der erlaubten Konzentrationsanteile. Verunreinigungen können zum einen bei der Wasserstoff-Herstellung auftreten. Der Wasserstoff kann jedoch auch durch die Tankstelle verunreinigt werden, zum Beispiel durch Abrieb der Dichtungen von Kompressoren, durch Schmierstoffe von Kompressoren, oder durch Fremdgase wie Stickstoff.

Da der Wasserstoff an der Betriebshof-Tankstelle in der Regel gasförmig vorliegt, wird er nicht wie Dieselkraftstoff bei der Betankung von Dieselbussen in den Tank gepumpt. Vielmehr strömt er aufgrund des Druckunterschieds zwischen dem Speichertank der Tankstelle und dem Fahrzeugtank in diesen über. Der Druckunterschied bestimmt dementsprechend auch die Dauer des Tankvorgangs.

Wasserstofftankstellen bestehen zunächst aus der Wasserstoffquelle, also der Wasserstofferzeugung, die off-site (Anlieferung) oder on-site erfolgen kann. Weitere wesentliche Komponenten von Wasserstofftankstellen sind die Kompressoren und Pumpen, der Wasserstoffspeicher sowie der Dispenser. Letzterer wiederum besteht typischerweise aus Füllkupplung, Füllschlauch, Display und Regeltechnik Hinzu kommen gegebenenfalls Verdampfer bzw. Kälteaggregate. Verfahrenstechnische Kleinkomponenten wie Ventile, Sensorik und schließlich die Steuerungstechnik komplettieren die Tankstelle. Wasserstofftankstellen können je nach den standörtlichen Gegebenheiten und der verfügbaren Fläche auf dem Betriebshof in verschiedenen Bauformen errichtet werden, da die Einzelkomponenten der Tankstelle aus technischer Sicht sehr flexibel angeordnet werden können. Viele Komponenten werden zudem in Containern aufgestellt, um eine modulare Erweiterung zu ermöglichen. Abbildung *19* zeigt beispielhaft eine von der Linde AG in Containerbauweise errichtete Wasserstofftankstelle für Omnibusflotten mit bis zu 50 Bussen. Sie besteht aus einer Abfüllanlage für Tube-Trailer, mehreren Druckspeichern, einem ionischen Kompressor und der Zapfsäule. Je nach Resttankkapazität dauert ein Betankungsvorgang 10 bis 15 min.

Beim Betankungsvorgang mit Wasserstoff ist ein Potenzialausgleich (Erdung) zwischen Fahrzeug und Tankstelle erforderlich. Dieser ist beispielsweise durch einen elektrisch leitfähigen Fahrbahnbelag an der Tankstelle herstellbar, welche einen möglichen Funkenschlag verhindert */48/*, S. 36.

[54] Quelle und weiterführende Informationen: https://www.psitrans.de/de/loesungen/psiebus/?gclid=EAIaIQobChMI9v7e4JiH9gIVz41oCR1_ugJ7EAAYASACEgLhIfD_BwE.

Abbildung 19: Wasserstofftankstelle - Beispiel ESWE Wiesbaden[55]

In einer Omnibusflotte von 5 bis 50 Brennstoffzellenbussen beträgt der Flächenbedarf für die Wasserstofftankstelle 400 bis 1.100 m². Der Platzbedarf ergibt sich aus den oben genannten Einzelkomponenten (ohne Anfahrtswege und Tankspuren für die Busse):

- Tankstellenkomponenten, besonders Verdichter, Speicher, Dispenser,
- Sicherheitsabstände je nach Komponenten von 3 bis 5 m (durch geeignete Maßnahmen wie Schutzwände oder Poller realisierbar (siehe auch */68/*),
- bei Anlieferung des Wasserstoffs: Stellplätze für Trailer (bei CGH_2-Anlieferung typischerweise zwei Trailer-Stellplätze mit ca. 250 m²).

Im Falle einer Anlieferung des Wasserstoffs muss ein Befahren des Betriebshofs durch Wasserstoff-Trailer möglich sein, was jedoch bei Betriebshöfen mit Dieseltankstellen möglich sein sollte, da deren Belieferung mit Dieselkraftstoff durch Fahrzeuge ähnlicher Größe erfolgt.

Kleinere, beispielsweise in der Einführungsphase befindliche Flotten mit 5 bis 10 Brennstoffzellenbussen benötigen bei CGH_2-Anlieferung 380 bis 480 m² Fläche. Für Busflotten mit 50 Brennstoffzellenbussen ist mit einem Flächenbedarf von 520 bis 650 m² zu rechnen, Abbildung *20*.

Eine beispielhafte Anordnung der Komponenten einer Wasserstofftankstelle mit einer Tageskapazität von 600 kg zeigt Abbildung *21*. Die Tankstelle verfügt über zwei Trailer-Stellplätze 1. zur Anlieferung des Wasserstoffs. Die Trailer werden über das Kontrollpanel 2. an die Tankstelle angeschlossen und der gasförmige Wasserstoff über die Verdichter 4. in die Speicher 3. befördert. Speicher und Verdichter sind jeweils in 20- bzw. 40-Fuß-Containern untergebracht.

[55] Quelle: Die ESWE Verkehrsgesellschaft mbH betreibt eine Fahrzeugflotte aus 10 Solo-Brennstoffzellenbussen des Typs Caetano H2.City Gold. Bildquelle: https://www.eswe-verkehr.de/de/brennstoffzellen-bus/faq/c/58/327.html.

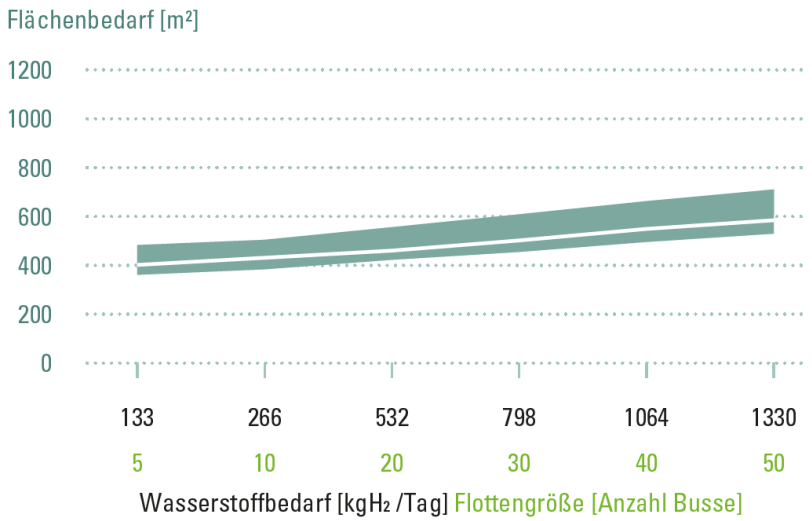

Abbildung 20: Flächenbedarf von Wasserstofftankstellen für Omnibusse[56]

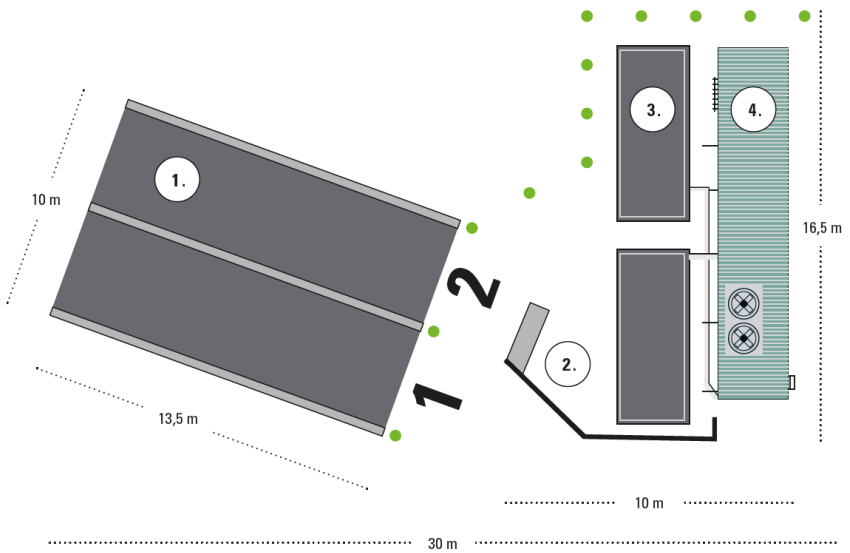

Abbildung 21: Beispiel einer Wasserstofftankstelle 600 kg/d bei CGH_2-Anlieferung[57]

<u>Wasserstoff-Bereitstellungskonzepte bei Anlieferung durch Dritte</u>

Verkehrsunternehmen werden sich im Zuge des Aufbaus eines wasserstoffbasierten Omnibusverkehrs gegebenenfalls dafür entscheiden, zumindest vorläufig keine eigene Wasserstofferzeugung zu errichten. Vielmehr werden sie sich zunächst auf die Realisierung der vergleichsweise einfach zu handhabenden und zugleich kostengünstigen Tankstelleninfrastruktur[58] konzentrieren. Daraus ergibt sich das folgende Konzept für den Aufbau einer Infrastruktur auf den Omnibus-Betriebshöfen: Die Anlieferung des Wasserstoffs

56 Ohne Anfahrtswege und Tankspuren für die Omnibusse. Quelle: */84/*, S. 18. Bei einer gasförmigen Lagerung des Wasserstoffs in der Tankstelle ist der Platzbedarf größer als bei einer Lagerung von flüssigem Wasserstoff.

57 Quelle: */84/*, S. 20.

58 Komplexere Infrastrukturen können neben der Wasserstofferzeugung vor Ort oder der Anlieferung von Flüssigwasserstoff beispielsweise das Betanken aus kaskadierten speichern unterschiedliche Druckstufen oder über einen Mitteldruck-Speicher mit Booster-Kompressor sowie perspektivisch auch die effizientere Speicherung des Wasserstoffs mittels LOHC-Technologie beinhalten. Darüber hinaus kann im Falle einer Vergrößerung der mit Wasserstoff betriebenen Fahrzeugflotte auch eine Anlieferung aus einer nahegelegenen Wasserstoffquelle über eine Hochdruck- oder Niederdruck-Pipeline in Betracht kommen.

kann in gasförmiger oder flüssiger Form (CGH_2 bzw. LH_2) erfolgen. Typischerweise wird der Wasserstoff bei kleineren Wasserstofftankstellen[59] mit einem GH_2-Trailer angeliefert, also mit einem mobilen technischen Speicher mit 400 bis 800 kg Speicherkapazität auf einem Sattelauflieger. Diese Trailer haben ein Druckniveau von 200 bis 350 bar. Bei der Anlieferung übergibt der Trailer den Wasserstoff durch Überströmen in einen Niederdruckspeicher mit ca. 30 bar. Aus diesem wird der gasförmige Wasserstoff mit einem Kompressor in einen Konstantdruck-Speicher gefördert, aus dem er während des Betankungsvorgangs über einen Vorkühler[60] und über die Zapfeinrichtung in den Druckbehälter des Busses überströmt. Je nach Ausführung des Niederdruckspeichers kann die erste Phase der Betankung auch aus dem Niederdruckspeicher erfolgen, wodurch sich der Stromverbrauch des Kompressors reduziert.

Im Falle einer CGH_2-Anlieferung ist die Transportkapazität des Trailers auf 800 kg begrenzt, während bei LH_2 mit jedem Trailer 3,5 t Wasserstoff angeliefert werden können. Bei einer vorgegebenen Anzahl von täglichen Lieferungen muss das Tankstellenkonzept insoweit auf die Größe und auf den Verbrauch der zu betankenden Fahrzeugflotte abgestimmt werden: Für kleine Flotten und Tankstellen ist eine CGH_2-Anlieferung angebracht. Mit steigender Anlagengröße und Tagesverbrauch wird aus logistischen Gründen eine LH_2-Anlieferung empfehlenswert bzw. sogar notwendig. Als untere Akzeptanzgrenze wird allgemein eine Anlieferfrequenz von einem Trailer pro Tag und Tankstelle angesehen. Als eine optimale Losgröße wird die zweitägliche Anlieferung von einem Trailer je Tankstelle eingeschätzt.

Im Zuge einer zunehmenden Auslastung eine kleinen Tankstelle infolge einer wachsenden Fahrzeugflotte kann diese graduell vergrößert werden, indem die vorhandenen Tankstellenkomponenten durch größere ersetzt werden: Sobald mit steigendem Fahrzeugbestand die Auslastung der Wasserstofftankstelle deren Speicherkapazität übersteigt, kann entweder die Speicherkapazität erweitert oder die Anlieferung mit einer Wasserstofferzeugung vor Ort kombiniert werden. Gegebenenfalls muss die Kompressorleistung der Tankstelle angepasst werden. Im Falle der Installation eines zweiten größeren Kompressors erhöht sich zudem auch die für Omnibusbetriebe besonders wichtige Versorgungssicherheit. Die Vor-Ort-Erzeugung stellt eine Alternative zur gasförmigen oder flüssigen Anlieferung dar und eröffnet bei Verwendung von erneuerbarem Strom auch die Möglichkeit, CO_2-neutralen, grünen Wasserstoff über den eigenen Bedarf hinaus zu erzeugen und an Dritte zu verkaufen. Allerdings entsteht dadurch auch zusätzlicher Platzbedarf für die Elektrolyse, für einen leistungsfähigeren Stromnetzanschluss zur Versorgung des Elektrolyseurs sowie für einen Wasseranschluss.

Im Hinblick auf das Verkehrsunternehmen rebus Regionalbus Rostock GmbH ist beispielsweise der Betriebshof in Bad Doberan wegen seiner innerstädtischen Lage zunächst eher für eine CGH_2-Anlieferung geeignet, die später gegebenenfalls auf eine LH_2-Anlieferung umgestellt werden kann. Demgegenüber könnte der Betriebshof in Güstrow wegen seiner randstädtischen Lage auch für eine Vor-Ort-Erzeugung geeignet sein, insbesondere wenn dafür im Bedarfsfall vielleicht auch benachbarte Flächen erworben und in Anspruch genommen werden können. Gegebenenfalls können stattdessen auch die Stadtwerke Güstrow GmbH eine entsprechende Anlage errichten und betreiben. Für die Verbindung zwischen Elektrolyseanlage und rebus-Betriebshof kann dann eine kleine Pipeline in Betracht kommen.

Netzanschluss

Eine Wasserstofftankstelle muss nach dem zu erwartenden Verbrauch der zu betankenden Nutzfahrzeugflotte ausgelegt werden. Mit der Größe der Wasserstofftankstelle wächst auch ihr elektrischer Leistungsbedarf, wobei innerhalb der Tankstelle gegebenenfalls besonders der Kompressor eine hohe elektrische Anschlussleistung aufweist. Im Falle einer kleinen Omnibusflotte mit ca. 10 Brennstoffzellenbussen beläuft sich die Anschlussleistung der Wasserstofftankstelle auf 100 bis 200 kW /*84*/, S. 23.

---

59 Eine Klassifikation von Wasserstofftankstellen kann gemäß der H2Mobility-Initiative erfolgen. Danach hat eine Tankstelle Typ S eine Zapfstelle, welche 30 bis 40 Betankungen pro Tag und einen Maximalumsatz von 212 kg/d ermöglicht. Demgegenüber erlaubt eine Tankstelle Typ M mit zwei Zapfstellen 60 bis 75 Betankungen pro Tag und einen Maximalumsatz von 420 kg/d.

60 Bei der Betankung von Brennstoffzellenfahrzeugen erwärmt sich der Druckwasserstoffspeicher im Fahrzeug durch die mit dem Wasserstoff einströmende Enthalpie. Um die Betankungszeit kurz halten zu können, ohne dass die Temperatur des Fahrzeugtanks die maximal zugelassenen 85 °C übersteigt, wird der Wasserstoff gemäß der Vorschrift SAE J2601 auf -33 bis -40 °C gekühlt /*67*/, S. 54.

Im Falle einer Vor-Ort-Erzeugung des Wasserstoffs kommt die elektrische Anschlussleistung der Wasserstoffelektrolyse hinzu[61]. Da Elektrolyseure eine hohe Verfügbarkeit von > 98 Prozent haben, kann mit ihnen eine konstante Wasserstoffproduktion (24/7) realisiert werden. Die Anschlussleistung des Elektrolyseurs kann dann mit 2,6 kW je kg H_2-Produktionskapazität abgeschätzt werden /*84*/, S. 21. Ein Elektrolyseur mit einer H_2-Tagesleistung von 130 kg/d erfordert somit eine Anschlussleistung von 400 bis 500 kW.

1.4.3 Infrastruktur für Biomethanbusse

Gastankstellen können über das örtliche oder regionale Gasnetz mit bilanziellem Biomethan versorgt werden. In der Tankstelle wird das Gas zunächst aufbereitet und getrocknet. Anschließend wird es über einen Verdichter komprimiert und mit einem Druck von ca. 300 bar vorgehalten. Infolge der Druckdifferenz zwischen Gasspeicher und Fahrzeugtank kann ein Fahrzeug ohne zusätzlichen Kompressionsaufwand betankt werden. Beim Tankvorgang wird das verdichtete Gas zunächst über die Hochdruck-Rohrleitungen der Zapfsäule zugeführt und von dort über eine gasdichte Schlauch- und Tankkupplungsverbindung in den Fahrzeugtank gefüllt. Da das komprimierte Gas direkt aus den Druckbehältern in die Zapfsäule geleitet wird, dauert der Tankvorgang nur wenige Minuten und ist vergleichbar zu den Tankzeiten von konventionellen Dieselfahrzeugen /*3*/, S. 9.

Eine Biomethan-Tankstelle umfasst somit ebenso wie Erdgastankstellen typischerweise die Hauptkomponenten Verdichter, Gastrocknermodul, Zwischenspeicher und Abgabeeinrichtung (Zapfsäule) sowie die Steuerungsanlage. Abbildung *22* zeigt beispielhaft eine Biomethantankstelle mit integriertem Speichersystem der Baureihe CS 23 – CS 52 des Unternehmens BAUER COMP Holding GmbH mit Sitz in München. Die Tankstelle ist für eine tägliche Betankung von mindestens 20 Lastkraftwagen ausgelegt und in einer platzsparenden Containerlösung ausgeführt. Der Verdichter hat in der größten Ausführung eine elektrische Leistung von 200 kW. Für die Betankung einer größeren Anzahl von Biomethanfahrzeugen kann die Anlage um einen zweiten Verdichter und – bei Ansteigen der Betankungsspitzen – um ein zweites Speichermodul erweitert werden. Sofern bereits ein Betriebsgebäude vorhanden ist, kann die Tankstelle auch in einer In-door-Variante ohne eine Einhausung geliefert werden.

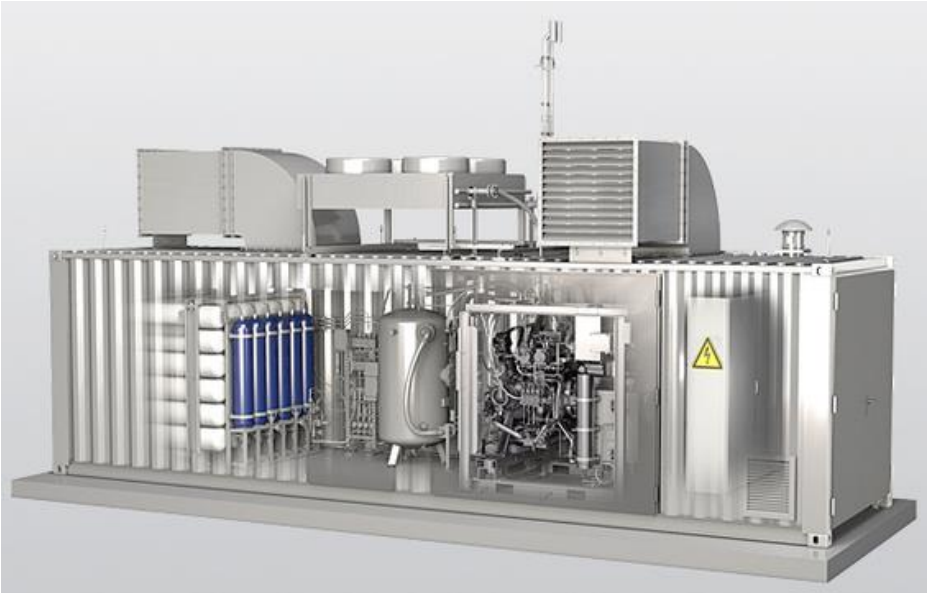

Abbildung 22: Beispiel einer Biomethantankstelle mit Speichersystem[62]

[61] Während die alkalische Elektrolyse technisch ausgereift und seit Jahrzehnten eingesetzt wird, ist die PEM-Technologie zwar am Markt erhältlich, aber bisher nur in kleinen Leistungen kommerziell einsetzbar /*89*/, S. 26.

[62] Quelle: https://www.bauer-kompressoren.de/de/produkte/fuel-gas-systems-fgs/biomethan/biomethan-tankstellen/bei-mehr-als-200-pkwtag-oder-mehr-als-20-lkwtag-grosser-bedarf-mit-der-baureihe-cs-23-cs-52/.

2. Betreiber kommunaler Flotten in der Regiopolregion Rostock

Im Folgenden werden die Betreiber der drei größten in der Regiopolregion Rostock vorhandenen kommunalen Nutzfahrzeugflotten vorgestellt. Sie führen in der Regiopole und in ihrem Verflechtungsraum den ÖPNV mit Omnibussen bzw. die städtische Abfallentsorgung durch. Dabei handelt es sich um die Rostocker Straßenbahn AG (RSAG - Abschnitt 2.1) bzw. um die rebus Regionalbus Rostock GmbH (Abschnitt 2.2) sowie um die Stadtentsorgung Rostock GmbH mit ihren beiden Tochterunternehmen (Abschnitt 2.3).

2.1 Rostocker Straßenbahn AG

2.1.1 Unternehmen

Die Rostocker Straßenbahn AG (RSAG) ist ein kommunales Unternehmen der Hanse- und Universitätsstadt Rostock[63]. Die RSAG führt den ÖPNV auf dem Straßennetz der Regiopole durch und betreibt hierfür neben der elektrischen Straßenbahn ein ausgedehntes Busnetz mit 25 Buslinien, die eine Gesamtlänge von ca. 300 km haben und knapp 430 Haltestellen umfassen.

Das Unternehmen ist in den Verkehrsverbund Warnow (VVW) eingebunden, welcher alle größeren Verkehrsunternehmen in der Region Rostock miteinander verbindet, darunter auch die DB REGIO NORDOST mit Sitz in Potsdam, die rebus Regionalbus Rostock GmbH mit Sitz in Güstrow, die Mecklenburgische Bäderbahn mit Sitz in Kühlungsborn, die Weiße Flotte GmbH mit Sitz in Stralsund und die Ostdeutsche Eisenbahn GmbH mit Sitz in Berlin[64]. Da die RSAG in der Regiopole Rostock auch den ÖPNV mit der elektrischen Straßenbahn durchführt, verfügt das Unternehmen im Gegensatz zu anderen Verkehrsunternehmen bereits über langjährige Erfahrungen mit leistungsfähigen elektrischen Energieanlagen.

2.1.2 Fahrzeugbestand und Fahrzeugeinsatz

Der Omnibusbestand der RSAG beläuft sich gegenwärtig auf 73 Omnibusse, Abbildung *23*. Dieser Bestand hat eine Beförderungskapazität von ca. 7.000 Plätzen und setzt sich aus 48 18-m-Gelenkbussen, 20 12-m-Standardbussen (darunter zwei batterieelektrische Omnibusse) und 5 20-m-CapaCity-Gelenkbussen (Stadtbusse) zusammen[65]. Das Durchschnittsalter der Omnibusse beträgt 6,9 Jahre, Abbildung *24*.

Der Einsatz der Standard-, Gelenk- und CapaCity-Busse auf den einzelnen Buslinien erfolgt entsprechend dem Fahrgastaufkommen bzw. nach ausgewählten Umläufen, es gibt also keine feste Zuordnung von Bussen zu bestimmten Linien. Allerdings erfordern zwei Linien aufgrund der örtlichen Gegebenheiten den Einsatz von Standardbussen (Linien 26 und 37). Die fünf 20-m-CapaCity-Gelenkbusse sind werktags auf den Linien 31 und X41 und am Wochenende von Mai bis Oktober auf der Linie 36 im Einsatz.

Die Anzahl der bedienten Buslinien schwankt saisonal. Werktags werden außerhalb der Schulferien 57 und in den Ferien 52 Buslinien bedient. Samstags werden von Oktober bis Mai 36 Linien und in den Monaten Mai, Juni und September 37 Linien befahren, in den beiden Monaten Juli und August sind es 38 Linien. Sonntags werden von Oktober bis Mai 31 Linien, im Mai, Juni und September 32 Linien sowie im Juli und August 33 Linien bedient.

---

63 Die Geschäftsanteile der RSAG werden zu 2 Prozent von der Hanse- und Universitätsstadt Rostock und zu 98 Prozent von der RVV Rostocker Versorgungs- und Verkehrs-Holding GmbH gehalten, welche ihrerseits ein 100-prozentiges Unternehmen der Stadt Rostock ist (Quelle: https://rathaus.rostock.de/de/rathaus/stadtverwaltung/beteiligungen/250809).

64 Quelle und weiterführende Informationen: https://www.verkehrsverbund-warnow.de/haltestellen-fahrplaene/verbund.html.

65 Quellen: https://www.rsag-online.de/unternehmen/unternehmensportraet/zahlen-fakten, Schriftliche Mitteilung der RSAG vom 10. Februar 2022.

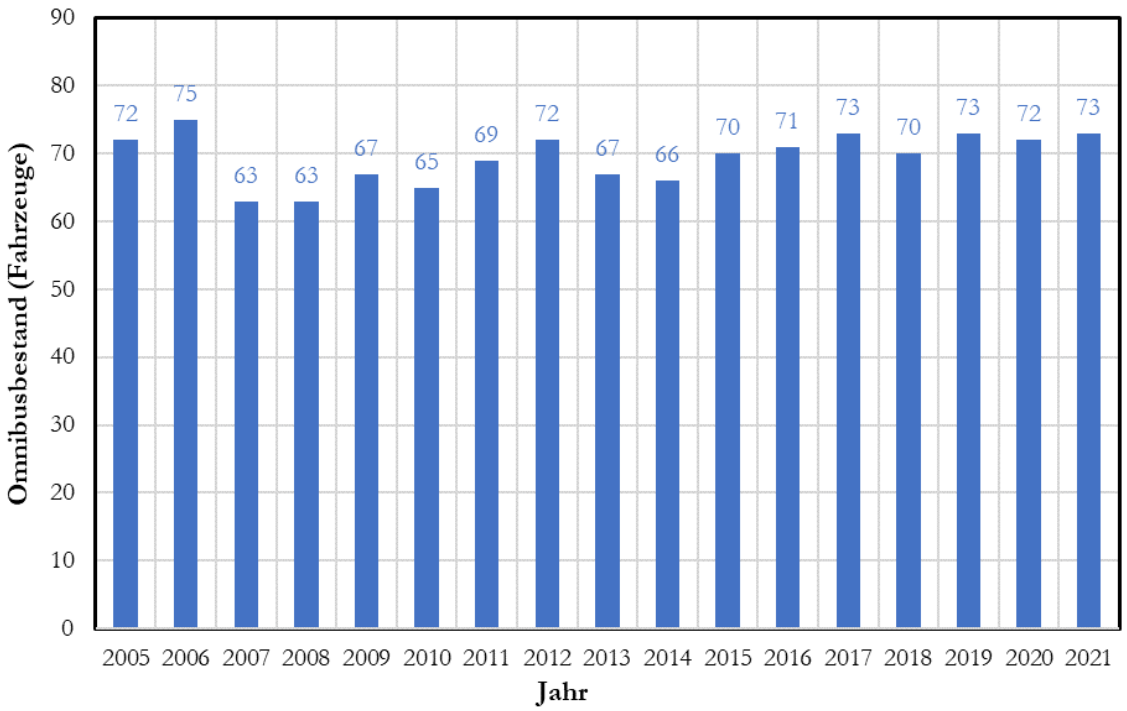

Abbildung 23: Entwicklung des Omnibus-Bestands der RSAG[66]

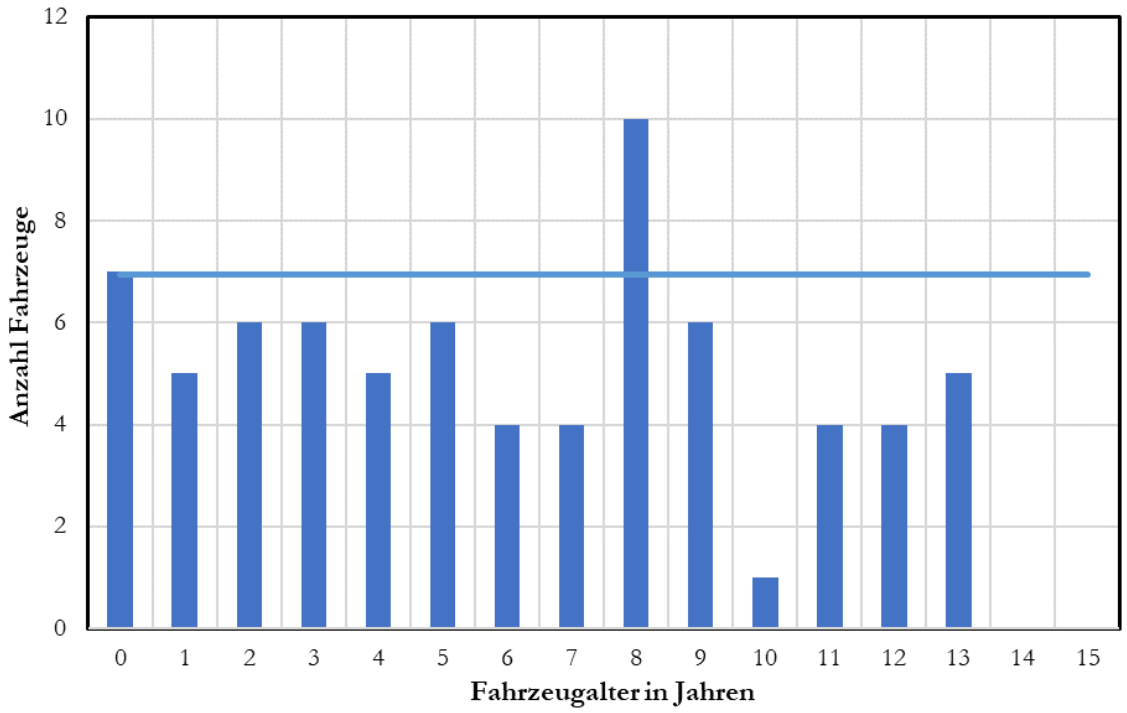

Abbildung 24: Altersstruktur des Omnibus-Bestands der RSAG[67]

Der gesamte Omnibusbestand der RSAG ist auf dem Betriebshof Industriestraße in Rostock-Schmarl stationiert. Alle Busse kehren nach ihrem täglichen Einsatz auf den Betriebshof zurück. Die Dieselbusse

66 Datenbasis: Statistisches Jahrbuch der Hanse- und Universitätsstadt Rostock 2021 /*16*/.
67 Datenbasis: Statistisches Jahrbuch der Hanse- und Universitätsstadt Rostock 2021 /*16*/.

werden einmalig am Ende des Betriebstages betankt. Die Betankung erfolgt auf dem Betriebshof an der betriebseigenen Tankstelle. Für die Betankung und für eine parallel durchzuführende Kontrolldurchsicht sind 11 Minuten vorgesehen[68].

Der Straßenbahn-Betriebshof in der Hamburger Straße wird dagegen durch Omnibusse nur bei Ersatzverkehren für die Straßenbahn und bei Arbeiten an ITCS-Komponenten der Omnibusse befahren (zum Beispiel Bordrechner, Funk, Fahrgastinformation).

Der typische Tagesablauf eines Dieselbusses gestaltet sich wie folgt:

- morgens: Das Fahrzeug rückt fahrfertig aus dem Betriebshof aus und fährt zum Anfangspunkt (Haltestelle) der zu bedienenden Buslinie,
- tagsüber: Das Fahrzeug befährt die zu bedienende(n) Buslinie(n) gemäß dem im Fahrplan vorgegebenen Takt.
- abends/nachts: Nach der Rückkehr des Fahrzeugs auf den Betriebshof wird es durch Fahrer im Stauraum abgestellt. Das Werkstattpersonal führt notwendige Arbeiten am Bus aus, darunter das tanken und eine Kontrolldurchsicht, das Waschen, die Wartung und Instandhaltung sowie gegebenenfalls Reparaturen. Die Innen-Reinigung erfolgt durch einen externen Dienstleister. Zuletzt wird das Fahrzeug auf einem Abstellplatz in der Fahrzeughalle abgestellt und an eine externe Luftbefüllung angeschlossen.

Die Disposition der Fahrzeuge für den Folgetag erfolgt durch Leitstelle der RSAG.

Der Omnibus-Bestand der RSAG bestand bislang ausschließlich aus Dieselbussen. 2019 hat das Unternehmen dann mit finanzieller Unterstützung des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) in Höhe von 635 Tsd. Euro zwei Elektrobusse beschafft. Die Fördermittel wurden im Rahmen eines gemeinsam mit der Verkehrsgesellschaft Ludwigslust-Parchim mbH beantragten Projektes „Klimaschutz, Luftschadstoff- und Lärmreduktion im Stadt- und Regionalverkehr in Mecklenburg-Vorpommern“ (KLL-MV, Laufzeit 1. Januar 2020 - 31. Dezember 2022) zur Verfügung gestellt. Die beiden vollelektrischen IVECO E-WAY 12-m-Standardbusse, welche von der Iveco Magirus AG mit Sitz in Ulm hergestellt wurden, sind seit September 2021 auf der Buslinie 37 im Einsatz. Diese Buslinie verbindet den Ortskern von Warnemünde mit Diedrichshagen und der Rostocker Stadtbahn (S-Bahn) und wurde unter anderem in der Abstimmung zwischen der Umlauflänge der Linie und der Reichweite der Batteriebusse gewählt. Diese verfügen jeweils über 6 Lithium-Ionen-Batterien mit einer Kapazität von 360 kWh, von denen 4 auf dem Dach und 2 im Heckbereich der Fahrzeuge angeordnet sind. Sie ermöglichen mit einer Batterieladung ohne Zwischenladung eine Reichweite von ca. 210 km. Das Laden der Elektrobusse erfolgt über Nacht per Kabel auf dem RSAG-Busbetriebshof in Rostock-Schmarl, wo zu diesem Zweck zwei ABB-Ladesäulen mit einer Ladeleistung von jeweils 150 kW errichtet wurden.

Bis 2034 sollen schrittweise alle Busverkehre der RSAG auf Elektrobusse und andere klimafreundliche Antriebsarten umgestellt werden. Dazu sollen ab dem Jahr 2023 nur noch mit Biomethanbusse bzw. Batteriebusse beschafft werden. Im Rahmen dieser Neubeschaffung erfolgt dann auch die Aussonderung der derzeit genutzten Dieselbusse[69].

Die durchschnittliche Nutzungsdauer eines Omnibusses beträgt bei der RSAG 12 bis 14 Jahre.

2.1.3 Omnibus-Betriebshof

Die RSAG betreibt in der Regiopole Rostock zwei Betriebshöfe, welche in der Hamburger Straße (Rostock-Reutershagen) und in der Industriestraße (Rostock-Schmarl) angesiedelt sind. Von diesen Betriebshöfen dient der Betriebshof in Rostock-Schmarl als Omnibus-Betriebshof, Abbildung *25*.

68 Quelle: Schriftliche Mitteilung der RSAG vom 15. Februar 2022.
69 Quelle: Schriftliche Mitteilung der RSAG vom 10. Februar 2022.

Der Omnibus-Betriebshof Industriestraße hat eine Gesamtfläche von ca. 31 ha, von denen ca. 5 ha mit Omnibus-Abstellhallen bebaut sind und weitere ca. 7 ha als Grünflächen genutzt werden. Die übrigen Teilflächen sind mit Betriebsdienst-, Werkstatt-und Sozialgebäuden bebaut. Tabelle *2* gibt einen Überblick über die Gesamtfläche und über die Teilflächen, welche auf die einzelnen Nutzungsarten entfallen.

Abbildung 25: Omnibus-Betriebshof der RSAG in Rostock-Schmarl[70]

Tabelle 2: Flächennutzung auf den Betriebshöfen von RSAG, rebus und SR[71]

Unternehmen	RSAG	rebus					SR
Betriebshof Flächennutzung	Industrie-straße	Güstrow	Bad Doberan	Rostock	Teterow	Gnoien	Petri-damm
1	2	3	4	5	6	7	8
Grundstücksfläche m²	30.705	19.000	15.700	11.600	9.200	3.200	25.600
Freifläche befestigt m²	14.785	12.535	8.740	9.840	3.780	1.750	17.570
Betriebsgebäude m²	3.483	730	860	320	115	70	1.100
Fahrzeughallen m²	5.104	3.100	2.200	300	445	70	6.030
Freilufthallen m²	0	1.910	1.380	0	990	590	0
Tankstelle m²	320	330	320	170	110	0	180
Grünfläche m²	7.013	395	2.200	970	3.760	720	900

70 Bildquelle: Google Earth Pro (Bildaufnahmedatum: 2018).
71 Datenquellen: Schriftliche Mitteilung der RSAG vom 10. Februar 2022, Gaia MV Professional.

2.1.4 Energieanlagen und Energieverbrauch

Für die Energieversorgung verfügt die RSAG auf ihrem Betriebshof in der Industriestraße über eine eigene Umspannstation mit einer Leistung von 630 kVA. Die gegenwärtige Bedarfsleistung beläuft sich auf 150 kW und kann gemäß der bei dem Netzbetreiber Netzgesellschaft Rostock GmbH angemeldeten Bedarfsleistung auf bis zu 350 kW erhöht werden. Eine Erweiterung um zwei weitere Umspannstationen ist geplant, diese könnten eine Leistung von 2 x 1.250 kVA oder 2 x 1.500 kVA haben. Damit sollen bis zum Jahr 2030 vorerst 24 geplante Ladepunkte versorgt werden. Bis 2034 könnte deren Gesamtzahl auf 37 Ladepunkte steigen. Um die Netzbelastung während der Ladevorgänge zu minimieren, sind verschiedene Maßnahmen wie Paralleles Laden und ein entsprechendes Lademanagement zur Ladungsoptimierung (ab 2025) geplant. Zur Verringerung der Strombezugskosten können außerdem auf den umfangreichen Dachflächen der vorhandenen Omnibus-Abstellhallen Photovoltaikanlagen installiert werden.

Die durchschnittlichen Kraftstoffverbräuche der vorhandenen Dieselbusse belaufen sich entsprechend den Fahrzeuggrößen auf 48,5 l/100 km bei den CapaCity-Bussen, auf 43,8 l/100 km bei den Gelenkbussen und auf 34,7 l/100 km bei den Standardbussen[72].

Das Laden der beiden bereits vorhandenen Batteriebusse erfolgt auf dem Betriebshof und über Nacht an einer Ladeeinrichtung mit zwei Ladepunkten und einer Ladeleistung von 150 kW je Ladepunkt.

Die Gebäude auf dem Betriebshof in der Industriestraße werden von der Stadtwerke Rostock AG mit Fernwärme versorgt.

2.2 rebus Regionalbus Rostock GmbH

2.2.1 Unternehmen

Die rebus Regionalbus Rostock GmbH mit Sitz in Güstrow ist eine kommunale Verkehrsgesellschaft des Landkreises Rostock, welche den gesamten Verflechtungsraum der Regiopolregion Rostock erschließt und diesen mit der Regiopole verbindet. Dabei erbringt rebus Personenbeförderungsleistungen im Regional-, Stadtlinien- und Schülerverkehr, wobei insgesamt 82 Linien bedient werden. Rebus hält gegenwärtig die entsprechenden Linienkonzessionen bis zum 31. Dezember 2025 /*76*/.

Des Weiteren werden durch rebus Anmiet- und Gelegenheitsverkehre, sowie Schienenersatzverkehre durchgeführt. Außerdem werden in der Werkstatt des Betriebshofs Bad Doberan bei Bedarf Instandsetzungen an Kraftfahrzeugen und Bahnwaggons Dritter vorgenommen, beispielsweise für die Mecklenburgische Bäderbahn Molli GmbH mit Sitz in Kühlungsborn. Darüber hinaus realisiert rebus eine Vielzahl von begleitenden Aktivitäten im Umfeld des Omnibus-ÖPNV. Insbesondere ist rebus ebenso wie die RSAG in den Verkehrsverbund Warnow (VVW) eingebunden und wirkt an dessen Verkehrserhebungen ebenso wie an der Fortschreibung von Nahverkehrsplänen mit.

Für den ländlichen Raum hat rebus ein Rufbusangebot „rubi KOMMT WIE GERUFEN“ entwickelt, welches mittels App (und Telefon) kundenspezifisch und kurzfristig ÖPNV auch dort sicherstellt, wo derzeit kein Linien-ÖPNV mehr vorhanden ist. Im Stadtgebiet von Bad Doberan wurde zudem kürzlich ein für die Benutzer kostenloses ÖPNV-Angebot etabliert (Buslinie 124).

2.2.2 Fahrzeugbestand und Kraftstoffverbrauch

Die rebus Regionalbus Rostock GmbH verfügt derzeit über 160 Omnibusse unterschiedlicher Hersteller und Typen. Das Durchschnittsalter der Fahrzeuge belief sich am Jahresende 2021 auf 7,3 Jahre. Wie die Altersstruktur des Fahrzeugbestandes in Abbildung *26* zeigt, wurde dieser besonders in den letzten Jahren erneuert.

[72] Quelle: Schriftliche Mitteilung der RSAG vom 10. Februar 2022.

Der Fahrzeugbestand von rebus besteht aus 12-m-, 15-m- und 18-m-Regiobussen, aus 12-m-Stadtbussen sowie aus 8-m-Kleinbussen (Sprinter). Des Weiteren sind unter den 160 Omnibussen auch drei Gelenkbusse, während es sich bei allen anderen Bussen um Solobusse handelt. Tabelle *3* gibt einen Überblick über die Größenstruktur des Omnibus-Bestands von rebus. Alle Busse sind mit Dieselmotoren angetrieben.

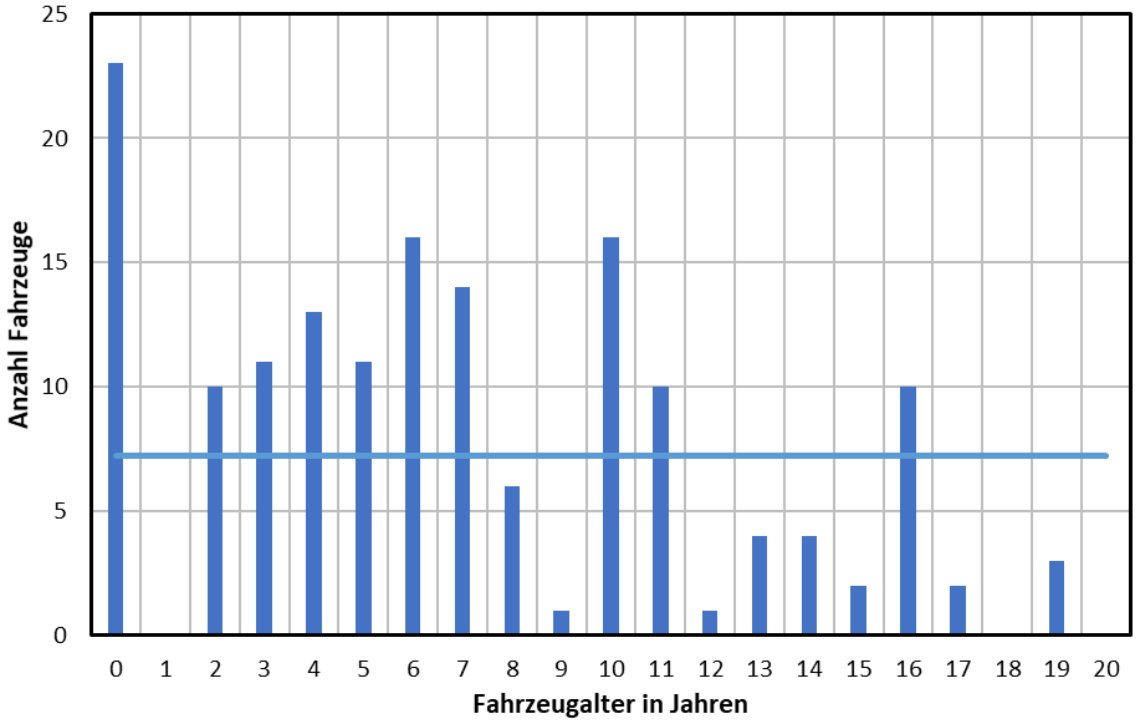

Abbildung 26: Altersstruktur des Omnibus-Bestands von rebus[73]

Tabelle 3: Größenstruktur des Omnibus-Bestands von rebus[74]

Hersteller/Händler	12 m Regiobus	15 m Regiobus	18 m Regiobus	12 m Stadtbus	8 m Kleinbus	gesamt
1	2	3	4	5	6	7
Iveco	19	12	0	0	0	31
MAN	30	6	10	2	0	48
Mercedes-Benz	16	6	1	10	6	39
Neoplan	6	1	0	0	0	7
ProBus	0	0	0	0	1	1
Setra	14	9	1	0	0	24
Solaris	7	0		0	0	7
Gesamt	92	34	12	12	7	157
Anteil in %	58,6	21,7	7,6	7,6	4,5	100,0

73 Datenquelle: rebus Regionalbus Rostock GmbH.
74 Datenquelle: rebus Regionalbus Rostock GmbH.

Der durchschnittliche Kraftstoffverbrauch des Omnibus-Bestands von rebus im Jahr 2020 ist in Abbildung *27* für die einzelnen Fahrzeugkategorien über dem Fahrzeugalter dargestellt. In der Fahrzeugkategorie Regiobus steigt der Kraftstoffverbrauch erwartungsgemäß mit der Fahrzeuggröße an. Der Anstieg des Kraftstoffverbrauchs mit dem Fahrzeugalter ist demgegenüber relativ gering. Nur in der Fahrzeugkategorie Kleinbus, welche in der Abbildung zusätzlich eingetragen ist, sinkt der Kraftstoffverbrauch mit steigendem Fahrzeugalter. Zu berücksichtigen ist, dass die Fahrzeuggröße und das Fahrzeugalter nicht die einzigen Einflussgrößen auf den durchschnittlichen Kraftstoffverbrauch sind. In Tabelle *4* sind die über die einzelnen Fahrzeugkategorien gemittelten Werte für den Kraftstoffverbrauch und für das Fahrzeugalter noch einmal zusammengestellt.

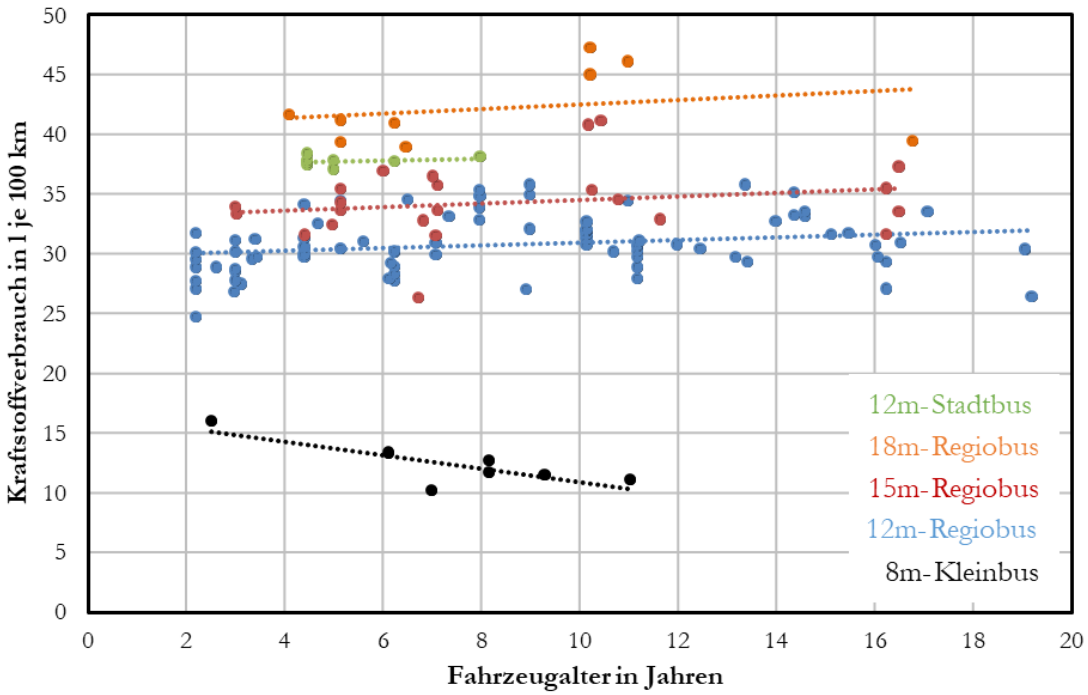

Abbildung 27: Kraftstoffverbrauch des Omnibus-Bestands von rebus[75]

Tabelle 4: Durchschnittsalter und Kraftstoffverbrauch des Busbestands von rebus 2020[76]

Fahrzeug-kategorie	Durchschnittsalter Jahre	Kraftstoffverbrauch Liter je 100 km
1	2	3
12-m-Regiobus	8,7	30,8
15-m-Regiobus	8,6	34,4
18-m-Regiobus	8,4	42,2
12-m-Stadtbus	5,3	37,8
8-m-Kleinbus	7,5	12,3

75 Datenquelle: rebus Regionalbus Rostock GmbH.
76 Datenquelle: rebus Regionalbus Rostock GmbH.

Im Übrigen hat rebus über den eigenen Fahrzeugbestand hinaus in seine Leistungserbringung weitere, im Verflechtungsraum der Regiopolregion Rostock angesiedelt Unternehmen integriert, welche jeweils über eigene Fahrzeugbestände verfügen.

2.2.3 Betriebshöfe

Die rebus Regionalbus Rostock GmbH betreibt in der Regiopolregion Rostock fünf Betriebshöfe an den Standorten Güstrow, Rostock, Bad Doberan, Teterow und Gnoien. Die Gesamtflächen und ihre Aufteilung auf verschiedene Nutzungsarten sind oben in Tabelle *2* aufgeführt (Abschnitt 2.1.3). Die einzelnen Betriebshöfe von rebus unterscheiden sich in ihrer Gesamtfläche entsprechend dem dort jeweils stationierten Busbestand erheblich: Während der größte Betriebshof in Güstrow eine Gesamtfläche von ca. 19 ha aufweist, nimmt der kleinste Betriebshof in Gnoien nur eine Gesamtfläche von ca. 3,5 ha ein. Dementsprechend unterscheidet sich auch die Ausstattung der Betriebshöfe mit Gebäuden, Werkstätten und Tankstellen. So haben die Betriebshöfe in Güstrow und Bad Doberan sowohl Werkstätten als auch Buswaschanlagen, während die Betriebshöfe in Rostock und Teterow nur über Waschanlagen verfügen. Der Betriebshof in Gnoien ist ebenso wie die anderen Betriebshöfe mit einer Freilufthalle für die Omnibusse sowie mit einem Aufenthaltsgebäude für die Busfahrer ausgestattet, . verfügt aber weder über eine eigene Werkstatt noch über eine Tankstelle. Abbildung *28* gibt einen Überblick über die Ausstattung und die Größenverhältnisse der fünf rebus-Betriebshöfe, die in der Abbildung annähernd maßstabsgleich dargestellt sind.

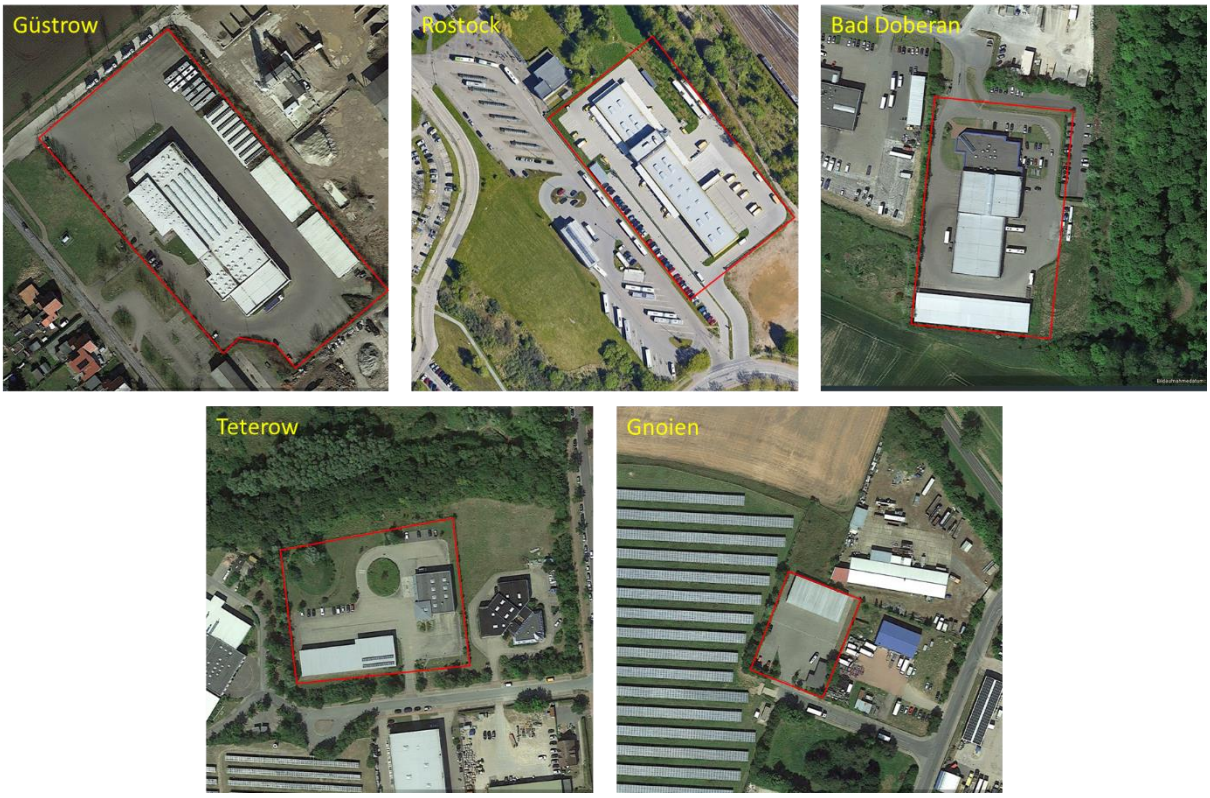

Abbildung 28: Betriebshöfe von rebus[77]

[77] Bildquelle: Google Earth Pro (Bildaufnahmedatum: 2018).

2.2.4 Energieanlagen und Energieverbrauch

Alle Betriebshöfe der rebus Regionalbus Rostock GmbH mit Ausnahme des Betriebshofs in Gnoien[78] sind mit Betriebshoftankstellen ausgestattet. Diese Tankstellen können für die Betankung der Omnibusse jeweils Dieselkraftstoff, leichtes Heizöl (HEL)[79] und Kraftstoffadditive AdBlue® bereitstellen.

Insgesamt belief sich der Verbrauch an Dieselkraftstoff 2020 auf 2,03 Mio. l. Mit dem verbrauchten Dieselkraftstoff wurden 2020 6,42 Mio. Omnibus-Gesamtkilometer[80] zurückgelegt. Daraus errechnet sich ein durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch von 31,7 l/100 km.

Darüber hinaus wurden die Betriebshöfe in Güstrow, Bad Doberan, Rostock und Teterow mit Photovoltaik-Anlagen ausgestattet, die eine Gesamtleistung von ca. 80 kW_p haben. Davon sind jeweils 30 kW_p in Güstrow und in Bad Doberan installiert. Diese Anlagen wurden im Dezember 2016 bzw. im April 2017 in Betrieb genommen.

Der Stromverbrauch auf den Betriebshöfen belief sich im Durchschnitt der Jahre von 2018 bis 2020 auf jährlich ca. 230 MWh/a. Davon wurden im Durchschnitt der drei Jahre ca. 50 MWh/a, das heißt ca. 22 Prozent mit Strom aus der Stromerzeugung der eigenen Photovoltaik-Anlagen gedeckt (Eigenverbrauch). Abbildung *29* zeigt die Verteilung des Gesamtstromverbrauchs und der Photovoltaik-Stromerzeugung auf die fünf Betriebshöfe von rebus.

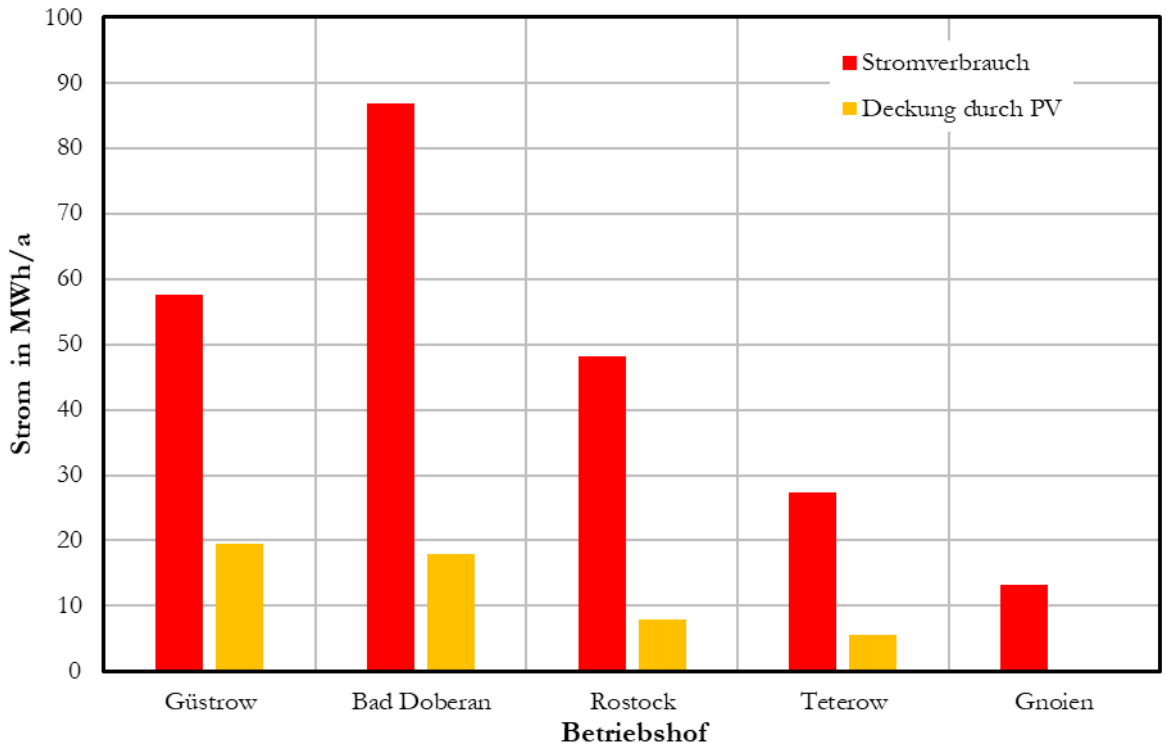

Abbildung 29: Stromverbrauch und -erzeugung von rebus[81]

78 Auf dem rebus-Betriebshof in Gnoien sind 9 Omnibusse stationiert. Für diese Anzahl ist eine eigene Betriebshoftankstelle nicht wirtschaftlich zu betreiben, weshalb die Omnibusse auf dem benachbarten Betriebshof in Teterow betankt werden (die rebus-Buslinien, die von den in Gnoien stationierten Omnibusse bedient werden, schließen auch die Stadt Teterow ein). Im Ausnahmefall erfolgt auch eine Betankung an Straßentankstellen.

79 Zur Beheizung des Fahrgastraums wird in den Omnibussen anstelle von Dieselkraftstoff das kostengünstigere leichte Heizöl eingesetzt.

80 Die Gesamtkilometer errechnen sich als Summe aus den Betriebs-, Last- und Leerkilometern aller Omnibusse.

81 Datenquelle: rebus Regionalbus Rostock GmbH.

Insgesamt belief sich die Stromerzeugung der Photovoltaik-Anlagen im Durchschnitt der drei Jahre auf ca. 70 MWh/a. Daraus errechnet sich eine Photovoltaik-Eigenverbrauchsquote von ca. 72 Prozent.

Zur Verbesserung der Energieeffizienz und zur Senkung des Stromverbrauchs hat rebus in den vergangenen Jahren die Beleuchtung seiner Betriebshöfe auf LED umgerüstet. Für den Betriebshof Güstrow beispielsweise zeigte sich, dass der Stromverbrauch durch die Installation der LED-Beleuchtung deutlich gesenkt werden konnte (in den Wintermonaten konnte der Stromverbrauch dadurch halbiert werden). Für den Betriebshof in Bad Doberan ergab sich eine Senkung des Stromverbrauchs um ca. 30 Prozent.

Darüber hinaus verbrauchen die Betriebshöfe in Güstrow, Bad Doberan und Teterow zur Beheizung der Gebäude jährlich ca. 1 GWh/a Erdgas (das Betriebsgebäude auf dem Betriebshof in Gnoien wird durch Nachtspeicher beheizt). Perspektivisch wird für die Beheizung der Gebäude eine klimaneutrale Wärmeversorgung benötigt.

2.3 Stadtentsorgung Rostock GmbH

2.3.1 Unternehmen

Die Stadtentsorgung Rostock GmbH (SR) ist zu 100 Prozent ein kommunales Unternehmen: Einziger Gesellschafter ist die RVV Rostocker Versorgungs- und Verkehrsholding GmbH, die wiederum mit der Hanse- und Universitätsstadt Rostock nur einen Gesellschafter hat. Die Stadtentsorgung Rostock GmbH ist ihrerseits an weiteren Tochterunternehmen beteiligt: Ein Gesellschafteranteil von 30 Prozent besteht an der im Jahr 2000 gegründeten SR Service GmbH (SRS), 70 Prozent der Anteile hält die ALBA Group plc & Co. KG Berlin. Des Weiteren ist die Stadtentsorgung Rostock GmbH einziger Gesellschafter des 2013 gegründeten Unternehmens SR Technik GmbH (SRT). Diese drei Unternehmen bilden die SR-Gruppe.

Die Geschäftsfelder von SR bestehen unter anderem in der Sammlung und Entsorgung von kommunalen Abfällen wie Hausmüll und Bioabfälle sowie in der Straßenreinigung und dem Winterdienst. Darüber hinaus betreibt SR in den Stadtteilen Lütten Klein, Dierkow, Südstadt und Reutershagen vier Recyclinghöfe, auf denen die Einwohner der Stadt bestimmte Abfälle selbst anliefern können. Hauptstandort des Unternehmens ist der Betriebshof Petridamm 2 in Rostock-Dierkow. Dort befindet sich unter anderem eine Kfz-Werkstatt, welche auch Arbeiten an Kraftfahrzeugen für Dritte ausführt. Wesentliche Geschäftsfelder von SRS sind die gewerbliche Bioabfallentsorgung sowie die Entsorgung von Papier, Pappe, Kartonagen (PPK/Blau), Leichtverpackungen (LVP/Gelb) und von Abfällen zur Verwertung (AzV). SRT führt seit 2014 die Dienstleistungsbereiche Werkstatt, Winterdienst und Straßenreinigung für Gewerbekunden durch. Zu den Leistungen gehören das Management von bei der Reparatur und Instandhaltung anfallenden Abfällen sowie der Umgang mit Gefahrstoffen, welche unter anderem aus der Reparatur der Fahrzeuge, aus dem Tanken und aus durchgeführten Ölwechseln stammen.

Für die Verwaltung setzt SR ein Softwaresystem ein, in dem unter anderem sämtliche Sammelbehälter sowie die zugehörigen Leerungszeitpunkte (Rhythmus) abgelegt sind. Darüber hinaus sind sämtliche Abschnitte des Rostocker Straßennetzes digitalisiert, wodurch die Sammelbehälter räumlich verortet werden können. Jedem Entsorgungsfahrzeug ist ein Sammelgebiet zugeordnet, welches sich aus bestimmten Straßenabschnitten zusammensetzt. Die Nutzlast der Sammelfahrzeuge, die zwischen 10,8 und 12,0 t liegt, und die in einem Sammelgebiet zu entleerenden Behälterzahlen bzw. -volumen sind so aufeinander abgestimmt, dass die Nutzlast der Sammelfahrzeuge nach ihren Tagestouren mit hoher Wahrscheinlichkeit ausgelastet ist, die Fahrzeuge also voll beladen sind. Auf ihren Entsorgungstouren in den Sammelgebieten können die Fahrer der Entsorgungsfahrzeuge über die konkrete Fahrtroute entscheiden und damit sehr flexibel auf die aktuelle Situation reagieren. Diese wird beispielsweise von der Art und Anzahl der aktuell, also einem Entsorgungstag zu leerenden Sammelbehälter sowie von der Verkehrssituation im Sammelgebiet bestimmt. Dennoch sind die Differenzen zwischen den von den Sammelfahrzeugen je Entsorgungstour zurückgelegten Fahrtkilometern sehr gering. Am Ende ihrer Entsorgungstouren liefern die Sammelfahrzeuge die erfassten Abfälle zur Behandlung und Entsorgung ab:

- Der Hausmüll wird an die Mechanisch-Biologische Abfallbehandlungsanlage (MBA) von Veolia im Überseehafen (Ost-West-Straße 22) abgegeben[82].
- Der Bioabfall wird zum Kompostwerk Parkentin (Deponiestraße 1)[83] transportiert.
- Der Sperrmüll wird von der Gewerbeabfallsortieranlage von Veolia in Hinrichsdorf (Up de Schnur 2) behandelt.

Nach der Ablieferung des erfassten Abfalls kehren die Sammelfahrzeuge zum Betriebshof Petridamm zurück, werden dort betankt, gewartet und gegebenenfalls repariert sowie geparkt.

2.3.2 Fahrzeugbestand

Die Unternehmen der SR-Gruppe verfügen zusammen über 55 Entsorgungsfahrzeuge und über 86 Nutzfahrzeuge unterschiedlicher Größe und Zweckbestimmung, welche unter anderem in der Straßen- und Gehwegreinigung, im Winter- und im Containerdienst eingesetzt werden. Um eine hohe jährliche Auslastung der Fahrzeuge zu ermöglichen, kann ein Teil der Nutzfahrzeuge für verschiedene Aufgaben umgerüstet werden. Außerdem umfasst der Fahrzeugbestand der SR-Gruppe 19 Pkw, von denen 5 Pkw elektrisch angetrieben sind[84].

Von diesem Gesamtbestand entfallen mit 117 Fahrzeugen die meisten auf die Stadtentsorgung Rostock GmbH (SR), weitere 34 Fahrzeuge auf die SR Service GmbH (SRS) und 9 Fahrzeuge auf die SR Technik GmbH (SRT). In Tabelle *5* sind die Fahrzeugbestände der drei Unternehmen der SR-Gruppe nach den Hauptabfallarten bzw. Nutzungszwecken aufgegliedert. Die Verteilung der Fahrzeuge spiegelt näherungsweise auch die Aufgabenteilung zwischen den Unternehmen. Außerdem gibt die Tabelle für diese Fahrzeuge das jeweilige Durchschnittsalter an. Über alle Entsorgungsfahrzeuge berechnet beträgt das Durchschnittsalter 7,2 Jahre. Das Durchschnittsalter der Nutzfahrzeuge beträgt 7,4 Jahre. Zusätzlich ist die Altersstruktur aller Fahrzeuge der SR-Gruppe in Abbildung *30* getrennt nach Entsorgungs- und Nutzfahrzeugen dargestellt. Gegenwärtig sind 10 Prozent aller Entsorgungsfahrzeuge und 30 Prozent aller Nutzfahrzeuge älter als zehn Jahre. Nimmt man eine durchschnittliche Nutzungsdauer von 8 bis 10 Jahren für Entsorgungs- und Nutzfahrzeuge an, wird deutlich, dass in den nächsten Jahren für die Beschaffung von Neufahrzeugen voraussichtlich ein nennenswerter Investitionsbedarf entsteht, sofern die Gesamtzahl der Entsorgungs- und der Nutzfahrzeuge auf dem heutigen Niveau gehalten werden soll.

SR hat im Jahr 2000 auf Vorschlag eines Fahrzeugherstellers in einer 6-monatigen Testphase vier Nutzfahrzeuge mit GtL-Kraftstoff nach DIN EN 15940 anstelle von konventionellem Dieselkraftstoff betankt. Hierzu wurde an der Tankstelle auf dem Betriebshof Petridamm vorübergehend ein GTL-Tank mit einer Kapazität von 20 Tsd. l aufgestellt. Der Verbrauch während der Testphase belief sich auf knapp 19 Tsd. l. Neben einer Verbrauchsüberwachung und Abgasuntersuchungen durch SRT wurde die Testphase auch durch die Universität Rostock wissenschaftlich begleitet. Die dabei erzielten Ergebnisse zeigen, dass im Betriebsverhalten der Fahrzeuge im Vergleich zum konventionellen Dieselkraftstoff keine Unterschiede bestehen. Darüber hinaus wurde festgestellt, dass der Verbrauch von GtL aufgrund des

---

82 Die MBA Rostock der Veolia Umweltservice Nord in Rostock gewährleistet seit 2005, damals unter der EVG Entsorgungs- und Verwertungsgesellschaft mbH, die Entsorgungssicherheit für die Hansestadt Rostock, den Landkreis Rostock und einen Teil des Landkreises Vorpommern-Rügen. Durch die mechanisch-biologische Aufbereitung von Hausmüll produziert Veolia Ersatzbrennstoffe zur thermischen Verwertung im benachbarten EBS-Heizkraftwerk von Vattenfall. In der angeschlossenen Teilstromvergärungsanlage werden der biogene Anteil des Hausmülls sowie Speisereste energetisch genutzt. Das in den Fermentern erzeugte Biogas wird in einem Blockheizkraftwerk in Strom und Wärme umgewandelt oder eingespeist (E.ON Hanse Wärme übernimmt das das unbehandelte Rohbiogas). Quelle: https://www.veolia.de/mechanisch-biologische-abfallbehandlungsanlage-rostock, https://www.veolia.de/teilstromvergaerungsanlage-rostock.

83 Das Parkentin Kompostwerk wird von SR betrieben und erzeugt Fertig- und Frischkompost. Quelle: https://www.kompost.de/service/hersteller-/-produkte.

84 Datenquelle: Stadtentsorgung Rostock GmbH.

Tabelle 5: Fahrzeuge - Bestand und Durchschnittsalter der SR-Gruppe 2021[85]

Unternehmen	Entsorgungs- und Nutzfahrzeuge					Pkw	gesamt
	Restmüll	Bioabfälle	PPK/Blau	LVP/Gelb	Sonstige		
1	2	3	4	5	6	7	8
Anzahl Fahrzeuge							
SR	24	8	0	0	71	14	**117**
SRS	0	0	8	6	16	4	**34**
SRT	0	0	0	0	8	1	**9**
SR-Gruppe	**24**	**8**	**8**	**6**	**95**	**19**	**160**
Durchschnittsalter Fahrzeuge							
SR	6,0	5,6	-	-	8,7	3,4	**7,28**
SRS	-	-	6,9	4,5	7,0	5,5	**6,35**
SRT	-	-	-	-	15,1	2,0	**13,67**
SR-Gruppe	**6,0**	**5,6**	**6,9**	**4,5**	**8,9**	**3,7**	**7,44**

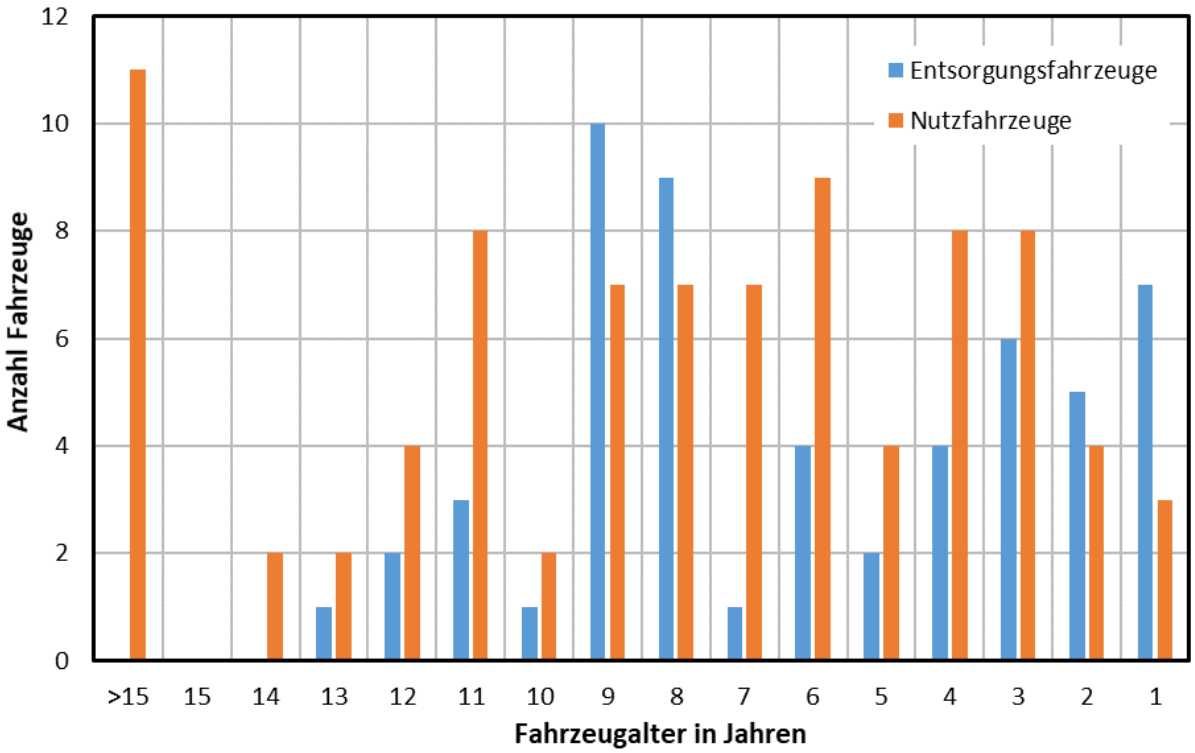

Abbildung 30: Altersstruktur des Fahrzeugbestands der Stadtentsorgung Rostock[86]

85 Datenquelle: Stadtentsorgung Rostock GmbH.
86 Quelle: Eigene Darstellung, Datenquelle: Stadtentsorgung Rostock GmbH.

Dichteunterschieds zum konventionellen Dieselkraftstoff volumetrisch etwas höher ist, wodurch sich die mit einer Tankfüllung realisierbare Reichweite geringfügig reduziert. Aufgrund seiner chemischen Struktur kann mit GtL eine Reduzierung der CO_2-Emissionen erreicht werden, die allerdings mit nur 5 Prozent relativ gering ist. Vorteile im Hinblick auf die Emissionen von Luftschadstoffen konnten dagegen mit der Abgasmesstechnik, welche für die Emissionsmessungen zur Verfügung stand, nicht sicher nachgewiesen werden /77/, S. 22.

Außerdem konnte SR im Frühjahr 2021 über einen Zeitraum von 10 Tagen ein Faun Rotopress 521-Entsorgungsfahrzeug im praktischen Einsatz erproben, das mit einem konventionellen Dieselantrieb sowie Messtechnik ausgestattet war (Bluepower - Abschnitt 1.3.2). Während der Erprobung wurden in der Regiopole Rostock verschiedene Abfallsammlungen durchgeführt. Dabei wurden insgesamt ca. 100 t Restmüll gesammelt, 624 km zurückgelegt und knapp 500 l Dieselkraftstoff verbraucht. Dies entspricht einem durchschnittlichen Verbrauch von 75,5 l/100 km. Abbildung *31* zeigt beispielhaft eine typische SR-Abfallsammeltour, wie sie während der Erprobung auch mit dem Messfahrzeug durchgeführt wurde.

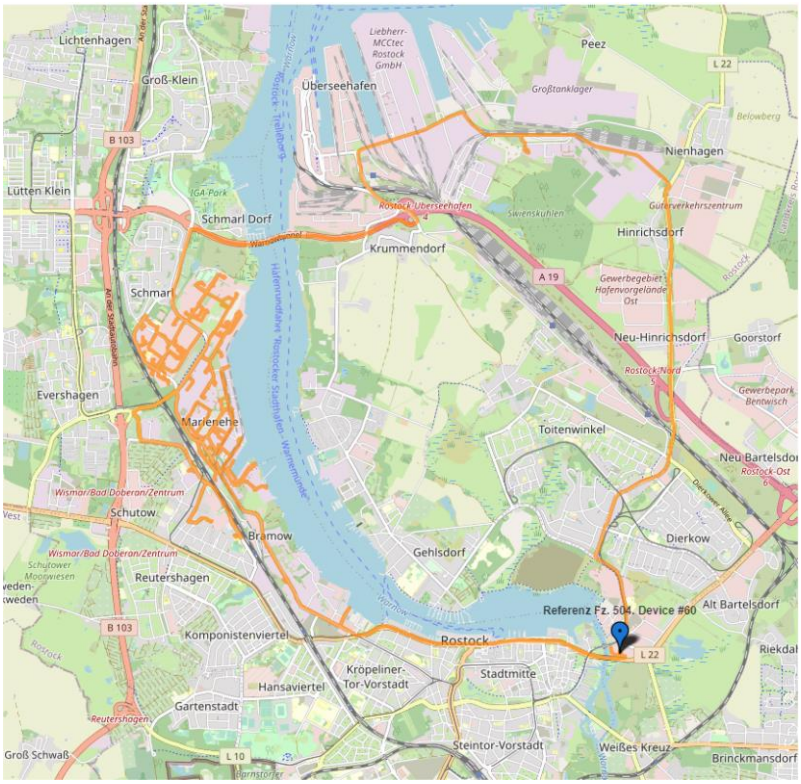

Abbildung 31: Abfallsammeltour der Stadtentsorgung Rostock (Beispiel)[87]

Im Verlauf der Entsorgungstouren wurden mit dem Datensammler des Fahrzeugs umfangreiche Datenmengen zum Energieverbrauch für das Fahren, für das Verdichten/Schütten der gesammelten Abfälle sowie zur Energierückgewinnung (Rekuperation) erfasst. Auf der Grundlage dieser Daten konnte Faun Simulationen zum Fahrzeugeinsatz durchführen und eine Empfehlung darüber abgeben, wie ein auf die Gegebenheiten in Rostock optimiertes, mit Wasserstoff angetriebenes Abfallsammelfahrzeug ausgestattet sein sollte: Eine 30-kW-Brennstoffzelle sollte aus 6 Wasserstofftanks für jeweils 12,3 kg Wasserstoff (700 bar) versorgt werden und den Strom für einen 250-kW-Fahrmotor liefern. Außerdem sollte das Fahrzeug über eine Fahrzeugbatterie mit einer Kapazität von 85 kWh und über eine Lademöglichkeit für ein nächtliches Nachladen der Batterie verfügen. Hierzu sollte das Fahrzeug mit einer plug-in-Lademöglichkeit und gegebenenfalls mit OBC-Technik ausgestattet sein.

87 Bildquelle: Stadtentsorgung Rostock GmbH.

2.3.3 Betriebshöfe

Die Gesamtfläche des Betriebshofs am Petridamm und die Struktur der Flächennutzung sind oben in Tabelle *2* aufgeführt (Abschnitt 2.1.3). Mit einer Gesamtfläche von 25.600 m² ist der Betriebshof etwas kleiner als der RSAG-Betriebshof, jedoch größer als alle rebus-Betriebshöfe. Der Betriebshof bildet die operative Basis für sämtliche Fahrzeuge der Unternehmen der SR-Gruppe mit Ausnahme von fünf Nutzfahrzeugen und zwei Pkw, die dem Kompostwerk Parkentin zugeordnet sind und von dort aus eingesetzt werden.

Abbildung 32: Betriebshof Petridamm 26 der Stadtentsorgung Rostock[88]

2.3.4 Energieanlagen und Energieverbrauch

Der SR-Betriebshof Petridamm 26 ist über eine MS/NS-Transformatorenstation an das Stromnetz angeschlossen. Außerdem sind auf dem Betriebsgelände mehrere 230-V-Verteilungen vorhanden. Für die Notstromversorgung existiert ein Notstromaggregat mit einer Nennleistung von 160 kW und mit einem eigenen Vorrat von 600 l Dieselkraftstoff. Darüber hinaus verfügt der Betriebshof über einen Fernwärme- und über einen Gasnetzanschluss. Für die Betankung der Fahrzeuge steht eine Betriebshoftankstelle mit drei Zapfstellen zur Verfügung (davon ist eine für Pkw vorgesehen). Sie ist mit einem 20.000-l-Vorratstank für Dieselkraftstoff und mit einem 3000-l-Tank für AdBlue® ausgestattet.

Der Energieverbrauch der SR-Unternehmen belief sich im Durchschnitt der drei Jahre von 2018 bis 2020 auf 11,4 GWh/a. Davon entfielen mit 9 GWh/a knapp 80 Prozent auf den Verbrauch von Dieselkraftstoff. Weitere 1,1 GWh/a des Gesamtenergieverbrauchs entfielen jeweils auf Strom bzw. auf

88 Bildquelle: Google Earth Pro (Bildaufnahmedatum: 2018).

Fernwärme. Darüber hinaus werden geringe Mengen an Heizöl und Erdgas verbraucht. Letzteres wird im Kompostwerk Parkentin zu Heizzwecken eingesetzt.

Von den insgesamt im Durchschnitt der drei Jahre verbrauchten 9 GWh/a Dieselkraftstoff entfielen 64 Prozent auf SR, 33 Prozent auf SRS und 3 Prozent auf SRT. Der Verbrauch der anderen Energieträger entfällt weitgehend auf SR bzw. lässt sich nur bedingt auf SR, SRS und SRT aufteilen (der Verbrauch von Heizöl entfällt zu 95 Prozent auf das Kompostwerk Parkentin und zu 5 Prozent auf den Recyclinghof in Dierkow). Abbildung *33* zeigt die Struktur des durchschnittlichen Jahresenergieverbrauchs der Stadtentsorgung Rostock, wobei der Verbrauch an Dieselkraftstoff für SR, SRS und SRT aufgegliedert ist.

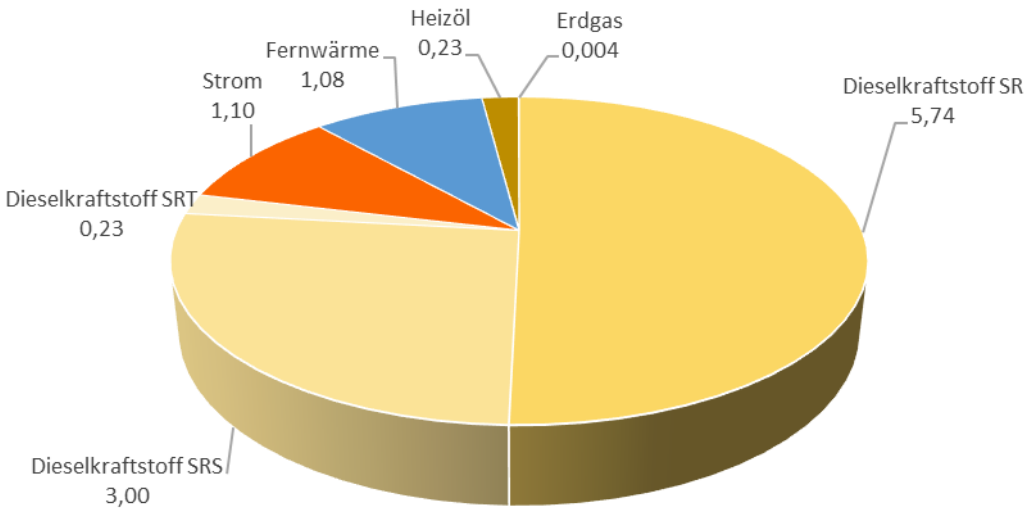

Abbildung 33: Jahresenergieverbrauch der Stadtentsorgung Rostock in GWh[89]

Der Kraftstoffverbrauch von SR belief sich sowohl 2019 als auch 2020 auf ca. 0,54 Mio. l/a. Davon entfiel mit ca. 60 Prozent der weitaus größte Teil auf die Entsorgung. Demgegenüber trugen die Bereiche Straßenreinigung, Winterdienst und Containerdienst nur mit ca. 25 Prozent, 9 Prozent bzw. 7 Prozent zum gesamten Kraftstoffverbrauch von SR bei. Insgesamt waren in den beiden Jahren in den genannten Bereichen jeweils knapp 100 Fahrzeuge im Einsatz. Diese legten im Einsatz eine jährliche Fahrtstrecke von insgesamt ca. 1 Mio. Fahrzeugkilometer zurück. Daraus berechnet sich ein durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch von 53 l/100 km /*77*/, S. 15.

Wie die in Tabelle *6* zusammengestellten Verbrauchswerte für das Jahr 2021 zeigen, verbrauchte jedes Entsorgungs- bzw. Nutzfahrzeug der SR-Gruppe im Durchschnitt jährlich ca. 6.000 l/a Dieselkraftstoff. Allerdings lag der durchschnittliche Jahresverbrauch der Entsorgungsfahrzeuge in einem Bereich von 8.000 bis 10.500 l/a Dieselkraftstoff je Fahrzeug und damit deutlich über dem durchschnittlichen Verbrauch der Nutzfahrzeuge. Rechnet man diesen Verbrauch anhand der Energieinhalte der Kraftstoffe von Dieselkraftstoff auf Wasserstoff bzw. DME um, würde dies einen jährlichen Verbrauch je Entsorgungsfahrzeug von 2.400 bis 3.200 kg/a H_2 bzw. von 15.000 bis 20.000 l/a DME ergeben.

[89] Durchschnittsverbrauch der drei Jahre von 2018 bis 2020. Datenquelle: /77/.

Tabelle 6: Fahrzeugbezogener Verbrauch an Dieselkraftstoff der SR-Gruppe 2021[90]

Unternehmen	Entsorgungs- und Nutzfahrzeuge					Pkw	alle
	Restmüll	Bioabfälle	PPK/Blau	LVP/Gelb	Sonstige		
1	2	3	4	5	6	7	8
Durchschnittsverbrauch je Fahrzeug in Liter Dieselkraftstoff je Jahr							
SR	7.900	8.200	-	-	4.700	1.100	**5.300**
SRS	-	-	10.600	10.400	11.300	500	**9.700**
SRT	-	-	-	-	1.700	-	**-**
SR-Gruppe	**7.900**	**8.200**	**10.600**	**10.400**	**5.500**	**1.600**	**6.100**
umgerechnet in Kilogramm Wasserstoff je Fahrzeug und Jahr							
SR	2.400	2.500	-	-	1.400	300	**1.600**
SRS	-	-	3.200	3.200	3.400	200	**2.900**
SRT	-	-	-	-	500	-	**600**
SR-Gruppe	**2.400**	**2.500**	**3.200**	**3.200**	**1.700**	**500**	**1.800**
umgerechnet in Liter DME je Fahrzeug und Jahr							
SR	15.100	15.500	-	-	8.900	2.000	**10.100**
SRS	-	-	20.200	19.900	21.500	1.000	**18.400**
SRT	-	-	-	-	3.200	-	**3.600**
SR-Gruppe	**15.100**	**15.500**	**20.200**	**19.900**	**10.500**	**3.000**	**11.600**

Von dem oben genannten Stromverbrauch entfällt ein erheblicher Teil auf den Betriebshof Petridamm. 2021 wurden dort 425 MWh/a an Strom verbraucht. Abbildung *34* zeigt die unterjährige prozentuale Verteilung dieses Stromverbrauchs. Den niedrigsten Stromverbrauch wiesen die Monate von Juni bis August auf, während der Stromverbrauch im Dezember am höchsten war. Den zeitlichen Verlauf des monatlichen Stromverbrauchs, also den Lastgang zeigt Abbildung *35* beispielhaft für den Juni 2021. Die Abbildung zeigt die in der Registrierenden Leistungsmessung (RLM) gemessenen Viertelstundenwerte der Verbrauchslast, bezogen auf die höchste Verbrauchslast des Monats. Der Monat Juni wurde ausgewählt, weil er im Vergleich zu anderen Monaten des Jahres 2021 besonders deutlich den zyklischen Verlauf der Verbrauchslast und die Unterschiede zwischen den Werktagen und den Wochenenden zeigt. Schließlich zeigt Abbildung *36* die geordnete Jahresdauerlinie der Verbrauchslast, also den Jahresgang des Stromverbrauchs des Betriebshofs Petridamm im Jahr 2021. Sie zeigt, angedeutet durch die rote Linie in der Abbildung, dass von den insgesamt 35.040 Viertelstundenwerten des Jahres lediglich 470 Werte[91] auf den Bereich oberhalb von 60 Prozent der maximalen viertelstündlichen Stromverbrauchslast des Jahres entfielen. Der Zeitbereich dieser hohen Stromverbrauchslasten umfasste somit weniger als 1,5 Prozent des gesamten Jahres 2021. Daraus ergeben sich nennenswerte Potenziale für eine Lastmanagement und damit für eine Senkung der Stromkosten.

90 Alle Werte gerundet. Datenquelle: Stadtentsorgung Rostock GmbH.
91 Umgerechnet auf die Zeitachse von Abbildung *36* entspricht dies ca. 120 Werten.

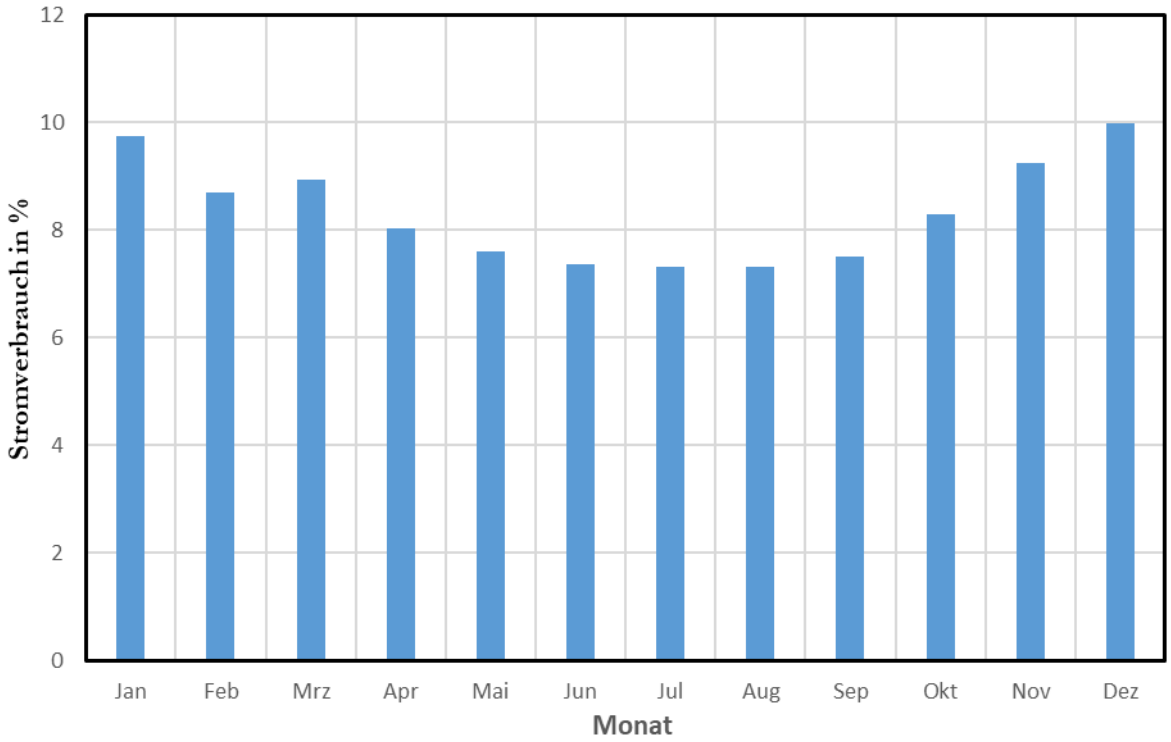

Abbildung 34: Stromverbrauch des Betriebshofs Petridamm 2021[92]

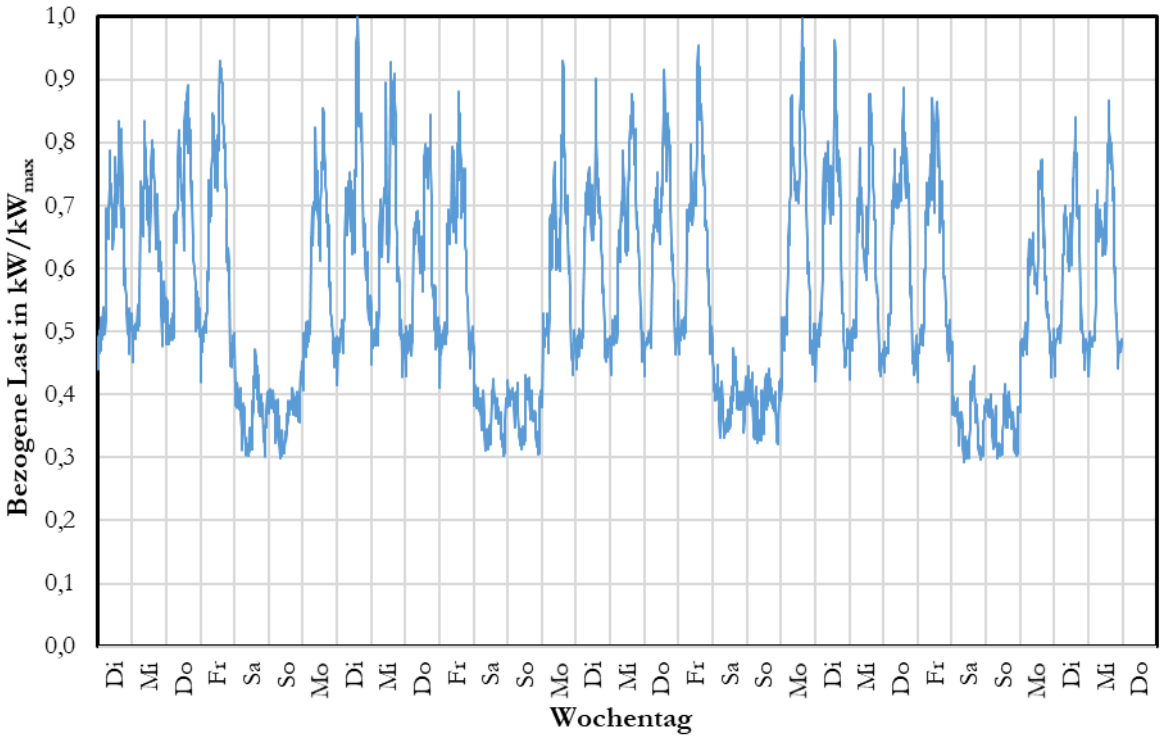

Abbildung 35: Lastgang Strom auf dem Betriebshof Petridamm im Juni 2021[93]

92 Datenquelle: Stadtentsorgung Rostock GmbH.
93 Datenquelle: Stadtentsorgung Rostock GmbH.

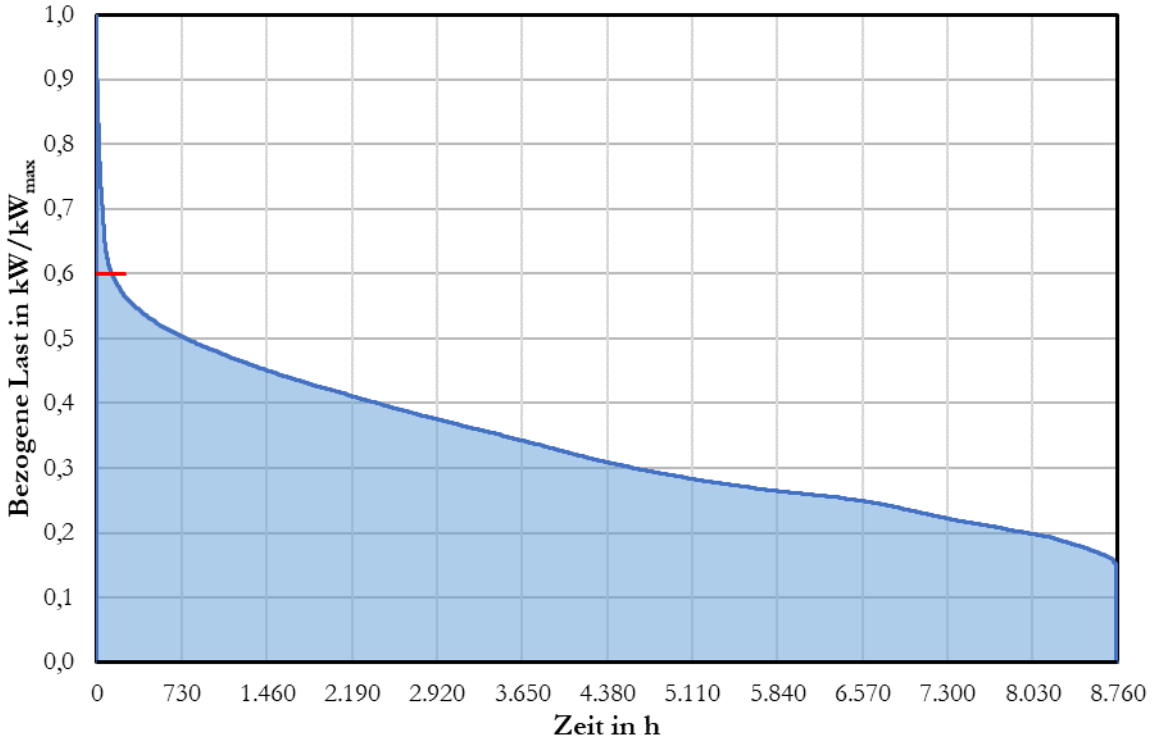

Abbildung 36: Jahresgang des Stromverbrauchs des Betriebshofs Petridamm 2021[94]

Diese hier nur angedeuteten Analysen zum Stromverbrauch können in weiterführenden Untersuchungen zum einen mit dem Ziel vertieft werden, den Stromverbrauch zu optimieren. Zum anderen können darin Vorschläge für den Aufbau einer eigenen erneuerbaren Stromerzeugung beispielsweise durch Photovoltaik-Anlagen oder durch ein BHKW abgeleitet werden. Diese Anlagen können gegebenenfalls so dimensioniert werden, dass der erzeugte Strom die Eigenerzeugung von Wasserstoff oder von erneuerbarem Dieselkraftstoff (DME – eFuel) ermöglicht, mit dem dann die auf einen alternativen Antrieb umgestellte Nutzfahrzeugflotte der SR-Gruppe teilweise oder vollständig versorgt werden kann.

[94] Datenquelle: Stadtentsorgung Rostock GmbH.

3. Technische Machbarkeit alternativer Antriebskonzepte

In diesem Abschnitt erfolgt zum einen eine Bewertung der energetischen Realisierbarkeit einer Umstellung kommunaler Nutzfahrzeugflotten von Dieselfahrzeugen auf alternative Antriebskonzepte in der Regiopolregion Rostock. Zum anderen werden anhand der Emissionen von Treibhausgasen und Luftschadstoffen die Effekte für den Klima- und Umweltschutz abgeschätzt, welche sich mit der Umstellung der kommunalen Nutzfahrzeugflotten erzielen lassen. Dabei werden jeweils die Fahrzeugflotten der drei Unternehmen RSAG, rebus und SR betrachtet. Für diese werden der Energieverbrauch und die Emissionen ihrer Dieselfahrzeuge als Referenz zugrunde gelegt. Dieser Referenz werden vergleichend der Energieverbrauch und die Emissionen eines Batteriebusses, eines Biomethanbusses, eines mit Brennstoffzellen angetriebenen Wasserstoffbusses sowie eines DME-Busses gegenübergestellt. Diese Gegenüberstellung erfolgt zunächst für eine einzelne Omnibuslinie, für die beispielhaft die Buslinie 31 der RSAG ausgewählt wurde. In der gleichen Weise werden auch in der Stadtentsorgung eingesetzte Entsorgungs- und Nutzfahrzeuge vergleichend betrachtet. Abschließend werden der Energiebedarf und die Emissionen von den Einzelfahrzeugen auf die gesamten Fahrzeugflotten der drei Unternehmen, also auf deren jährliche Kilometerleistungen hochgerechnet und die CO_2-Emissionen einer erweiterten Bilanzierung unterzogen.

3.1 Energieverbrauch

Es existiert inzwischen eine Vielzahl von Untersuchungen zum Energieverbrauch von alternativ angetriebenen Nutzfahrzeugen, beispielsweise zu alternativ angetriebenen Omnibussen generell */35/*, */36/*, zu Stadtbussen */37/*, */38/*, */39/* sowie zu Omnibussen mit bestimmten Antrieben wie Batteriebusse */40/*, */41/*, */42/* oder Gasbusse */44/*, */3/*. Darüber hinaus finden sich Daten zum Energieverbrauch beispielsweise in Leitfäden, welche bei der Konzeption und Planung der Umstellung von Nutzfahrzeugflotten unterstützen sollen */48/*, */78/*. Demgegenüber geben die Hersteller entsprechender Fahrzeuge zwar eine Vielzahl von technischen Daten an, jedoch kaum solche zum Energieverbrauch[95]. In bestimmten Fällen liegen bislang selbst in der Forschung und Entwicklung noch kaum Energieverbrauchsdaten vor. Dies gilt beispielsweise für mit Dimethylether (DME) betriebenen Dieselbusse.

Bei der Auswertung solcher Untersuchungen im Hinblick auf die angegebenen Energieverbrauchswerte zeigt sich, dass diese aufgrund der Vielzahl von Omnibusarten und Gefäßgrößen, Antriebskonzepten, Ausstattungsmöglichkeiten, Hybridisierung, Rückgewinnung von Bremsenergie (Rekuperation) und Systemgrenzen (Antrieb sowie Heizung, Lüftung und Klimatisierung - HVAC)[96] kaum miteinander vergleichbar sind. Insoweit die in Tabelle *7* beispielhaft zusammengestellten Daten zum typischen Energieverbrauch von 12-m-Standardbussen weniger den konkreten Energieverbrauch angeben als vielmehr die Relationen zwischen den Energieverbräuchen verschiedener alternativer Antriebskonzepte aufzeigen[97]. Dabei handelt es sich jeweils um den Energieverbrauch für den Betrieb der Fahrzeuge „tank-to-wheel". Der Energieverbrauch eines mit Dimethylether (DME) betriebenen Dieselbusses ist im Vergleich zum Dieselbus mit konventionellem Dieselkraftstoff wegen des Fehlens von Verbrauchsdaten näherungsweise anhand der Heizwerte der beiden Kraftstoffe abgeschätzt. Des Weiteren ist der jeweilige Energieverbrauch für Traktion und Heizung gesondert angegeben, da letzterer überwiegend im Winterbetrieb auftritt. Über den für Dieselbusse angegebenen Verbrauch von Dieselkraftstoff (DK) und Heizöl (HEL) hinaus verbrauchen diese auch AdBlue®. Dabei handelt es sich um eine wässrige Harnstofflösung, welche der Reduzierung der Stickoxid-Emissionen (NO_x) dient. Dieser Verbrauch beläuft sich auf ca. 2 Prozent des Verbrauchs an Dieselkraftstoff */3/*, S. 14.

---

95 Ein Beispiel hierfür sind Fahrzeugdaten auf der Homepage der EvoBus GmbH mit Sitz in Leinfelden-Echterdingen (Mercedes-Benz): https://www.mercedes-benz-bus.com/de_DE/models/citaro/facts/technical-data.html.

96 Darüber hinaus wird besonders in systemvergleichenden Untersuchungen auch der indirekte Energieverbrauch für die Errichtung, den Betrieb und den Rückbau der Infrastruktur sowie für die Herstellung und Entsorgung der Fahrzeuge betrachtet (Vorketten: Well-to-Tank) */35/*.

97 Beispielsweise wird der Energieverbrauch für 12-m-Batteriebusse in der Literatur mit Werten zwischen 0,8 und 1,5 kWh/km als Fahrverbrauch nach SORT 2 bzw. SORT 1 angegeben. Der im „E-Bus Berlin"-Projekt eingesetzte Batteriebus verbrauchte während eines Jahres mit elektrischer Heizung zwischen 1,33 und 2,42 kWh/km, wobei sich der höhere Wert bei - 5°C Außentemperatur einstellte. Der gemessene Maximalwert betrug dagegen 3,33 kWh/km /41/, S. 61, http://www.e-bus.berlin/.

Der Energieverbrauch von Gelenkbussen ist ca. 25 bis 30 Prozent höher als der von Standardbussen (Solobusse). Dies ist zum einen im Hinblick auf den Verbrauch von Traktionsenergie durch die größere Fahrzeugmasse und durch die größere Anzahl von Rädern bedingt (Rollwiderstand). Zum anderen bedingt das größere Busvolumen (Gefäßgröße 12-m-Standardbus/18-m-Gelenkbus: 90/135 m³) auch einen höheren Energieverbrauch für die Heizung/Klimatisierung und für weitere Nebenverbraucher wie Beleuchtung, Fahrzeugtürsysteme, Infotainment/ITCS.

Einen erheblichen Einfluss auf den Energieverbrauch hat auch das Einsatzgebiet eines Omnibusses, beispielsweise dort vorhandene Höhenunterschiede, die Witterung und die Haltestellenabstände sowie daraus resultierende Häufigkeiten von Wechseln zwischen den einzelnen Fahrzuständen wie Beschleunigen, Konstantfahrt (Beharrungsfahrt mit Traktionskraft, mit Bremskraft, ohne zusätzliche Krafteinleitung), Bremsen oder Halten etc. Im Hinblick auf konkrete Linien kommen zudem die Verkehrsverhältnisse und das Ausmaß der Behinderung durch andere Verkehrsteilnehmer hinzu. Die genannten Faktoren beeinflussen direkt die Durchschnittsgeschwindigkeit, welche bei der Bedienung einer Buslinie erreicht wird. Insoweit stellt sich die Durchschnittsgeschwindigkeit als der Schlüsselparameter für die Bestimmung des Energieverbrauchs dar. Darüber hinaus ist auch die Rekuperation und ihr Einfluss auf den Gesamtenergiebedarf zu berücksichtigen /36/, S. 82.

Tabelle 7: Energieverbrauchswerte von Omnibussen mit alternativen Antriebskonzepten[98]

Antrieb	Energieverbrauch für ...			
	Traktion		HLKT	
1	2	3	4	5
Dieselbus	35,0	l/100 km (DK)	0,04	l/km (Heizöl)
Batteriebus	122,7	kWh/100 km	0,49	kWh/km
Biomethanbus	429,5	kWh/100 km	0,49	kWh/km
Wasserstoffbus (BZ)	7,1	kg H_2/100 km	2,87	kg H_2/100 km
Dieselbus mit DME	52,6	l/100 km	0,06	l/km

3.1.1 Abschätzung des Energieverbrauchs anhand einer Beispiel-Omnibuslinie

Im Folgenden wird der Energieverbrauch eines Omnibusses beispielhaft in einem konkreten betrieblichen Kontext eines der drei kommunalen Flottenbetreiber in der Regiopolregion Rostock abgeschätzt. Dazu wird die von der Rostocker Straßenbahn AG (RSAG) betriebene Buslinie 31 herangezogen. Diese Buslinie verbindet den S-Bahnhof Lichtenhagen mit der Saßnitzer Straße im Stadtteil Lütten Klein. Sie hat eine Gesamtlänge von 8,19 km und umfasst zusammen mit den beiden Endpunkten 15 Haltestellen. In Abbildung *37* ist diese Linie grafisch dargestellt.

Für die Abschätzung des Energieverbrauchs wird der Betrieb der Linie mit einem standardmäßigen Batteriebus (Solobus) zugrunde gelegt, bei dem neben dem Antrieb auch die HLKT-Systeme elektrisch betrieben werden. Da sich die Fahrt auf der Linie auf verschiedene Betriebszustände verteilt, werden für diese unterschiedliche Energie- und Leistungsbedarfe zugrunde gelegt, Tabelle *8*. Des Weiteren wurden verschiedene Annahmen zum Weg-Zeit-Verlauf getroffen, der von dem Batteriebus auf der Linie absolviert wird. Beispielsweise wurden die durchschnittliche Haltedauer an den Haltestellen auf 40 Sekunden sowie die Parameter für die Beschleunigungs- und Bremsphasen festgelegt.

[98] Datenquellen: */35/*, */36/*, */40/*, */41/*, */42/*, */44/*, */3/*, */48/*, */78/*.

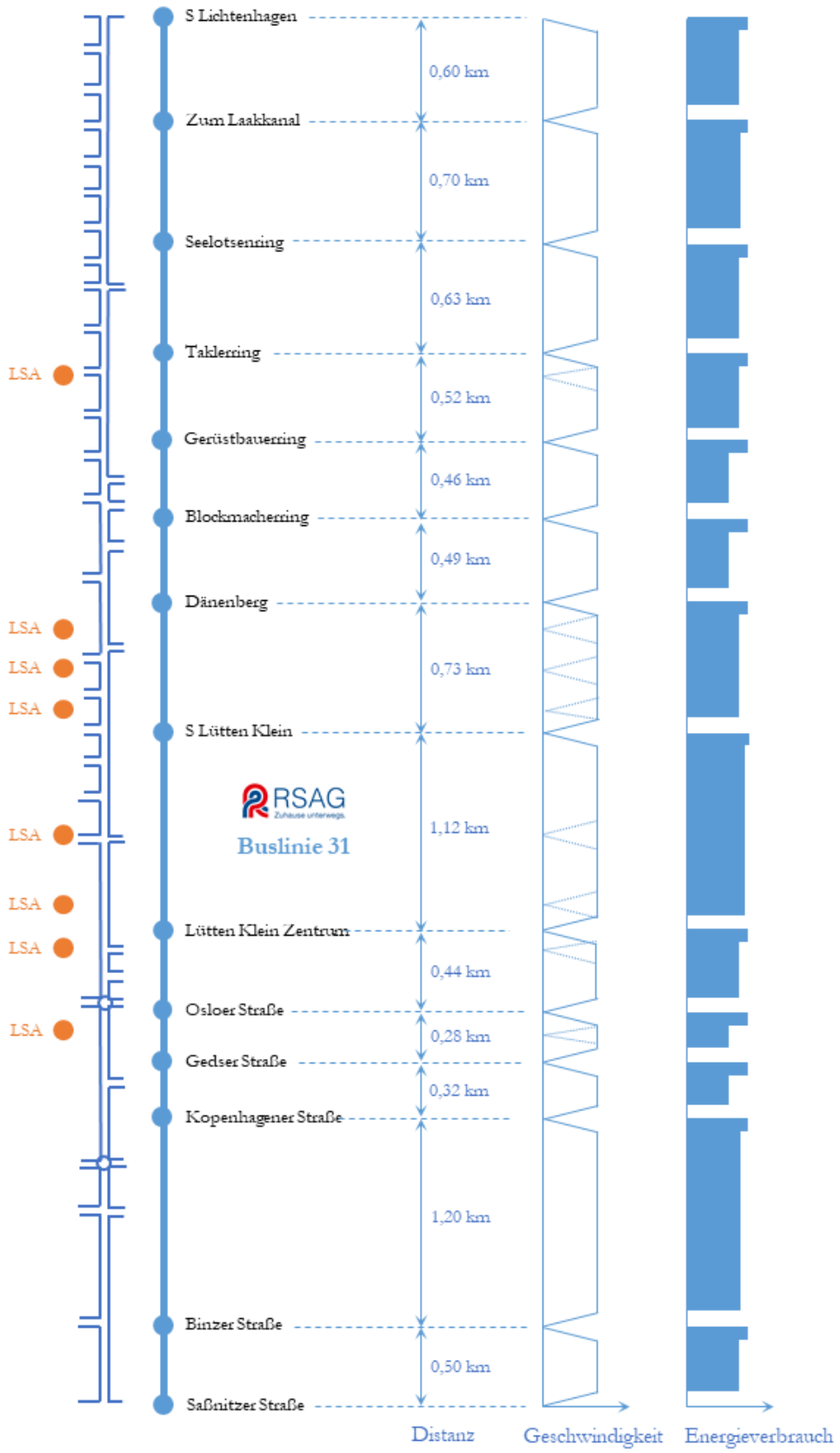

Abbildung 37: Linien-/Fahrprofil eines Stadtbusses auf der Buslinie 31 der RSAG in Rostock[99]

[99] Quelle: Eigene Darstellung anhand von RSAG-Fahrplandaten (verfügbar unter: https://www.rsag-online.de/fahrplan/fahrplaene/7/B/1/1629433858?cHash=414365768c150557706758133aab0793).

Der Energieverbrauch für die Klimatisierung bzw. Beheizung eines Omnibusses ist in starkem Maße von der Außentemperatur abhängig: So liegt der Leistungsbedarf für das elektrische Heizen von Batteriebussen in einem Bereich von 20 kW (-15 °C) bis 5 kW (15 °C) */38/*, S. 82/83. Der in der Tabelle für den Winter angegebene HLKT-Leistungsbedarf in Höhe von 13 kW bezieht sich auf eine Außentemperatur von - 5 °C. Umgekehrt ist im Sommer ab einer bestimmten Außentemperatur eine elektrische Klimatisierung des Fahrerarbeitsplatzes erforderlich. Der im Temperaturbereich von 25 bis 35 °C erforderliche elektrische Leistungsbedarf liegt in einem Bereich von 2 bis 4 kW. Der in der Tabelle für den Sommer angegebene HLKT-Leistungsbedarf von 2 kW bezieht sich auf eine Außentemperatur von 25 °C.

Tabelle 8: Typischer Energie- und Leistungsbedarf von Batteriebussen[100]

Energieverbrauch für ...	Traktion	HLKT		Neben-verbraucher
		Sommer	Winter	
	kWh/km	kW	kW	kW
1	2	3	4	5
Haltestelle	0,00	2,20	13,00	2,00
Beschleunigen	2,50	2,20	13,00	1,00
Konstantfahrt	1,25	2,20	13,00	1,00
Bremsen	-2,20	2,20	13,00	1,00

Der mit diesen Daten abgeschätzte Energieverbrauch eines Batteriebusses auf der Linie 31 der RSAG ist in Abbildung *38* dargestellt. Die Abbildung zeigt zunächst im linken Teil den Geschwindigkeitsverlauf des Batteriebusses. Dieser besteht aus einer Abfolge der Betriebszustände Beschleunigen, Konstantfahrt, Bremsen sowie Halten, welche sich entsprechend der Anzahl der Haltestellen mehrfach wiederholt.

Der Energieverbrauch des Batteriebusses für diese Abfolge der genannten Betriebszustände ist im mittleren Teil der Abbildung dargestellt. Da bei den Bremsvorgängen ein Teil der eingesetzten Energie zurückgewonnen wird, sind diese in der Abbildung mit negativem Vorzeichen, also unterhalb der Nulllinie dargestellt. Schließlich zeigt der rechte Teil der Abbildung den über den Linienverlauf kumulierten Energieverbrauch, wobei nun auch der HLKT-Energieverbrauch sowie der Energieverbrauch der Nebenverbraucher berücksichtigt ist. Da sich besonders der HLKT-Energieverbrauch im Sommer- und im Winterbetrieb deutlich unterscheiden, enthält der rechte Teil der Abbildung zwei Kurvenverläufe. Ersichtlich ist, dass sich der Gesamtenergieverbrauch des Batteriebusses auf der Buslinie 31 in einem Umlauf im Sommer auf ca. 10 kWh und im Winterbetrieb auf ca. 14 kWh beläuft. Auf die Länge der Linie umgerechnet ergibt sich damit ein durchschnittlicher Energieverbrauch von 1,23 kWh/km im Sommerbetrieb bzw. von 1,72 kWh/km im Winterbetrieb.

[100] Die angegebenen Daten beziehen sich auf einen 12-m-Standardbus. Quellen: */35/*, */36/*, */40/*, */41/*, */42/*, */44/*, */3/*, */48/*, */78/*.

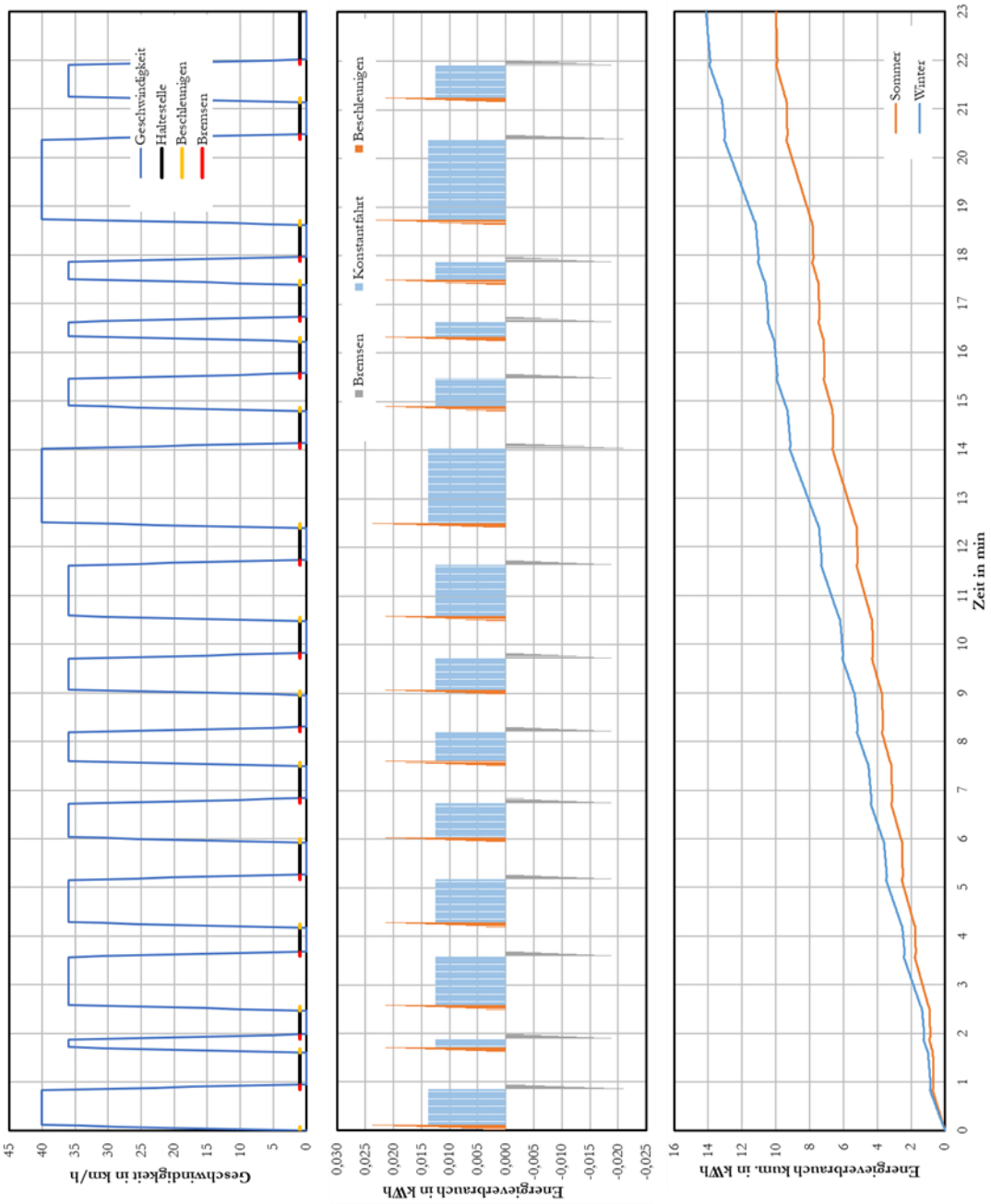

Abbildung 38: Energieverbrauch eines Batteriebusses auf der Buslinie 31 der RSAG[101]

Ergänzend hierzu kann mit den vorn in Tabelle *7* angegebenen typischen Energieverbrauchswerten von alternativ angetriebenen Omnibussen der jeweilige Energieverbrauch abgeschätzt werden, welcher bei der Bedienung der Buslinie 31 mit den Omnibussen entstehen würde. Die Ergebnisse dieser Abschätzung sind in Tabelle *9* vergleichend dargestellt. Die Tabelle gibt in den Spalten 2 und 4 den jeweiligen Energieverbrauch in energieträgerspezifischen Einheiten für den Sommer- und für den Winterbetrieb an. Diese sind in den Spalten 3 und 5 auf Kilowattstunden umgerechnet und somit direkt miteinander vergleichbar. Die für den Batteriebus angegebenen Energieverbrauchswerte entsprechen den oben schon genannten Werten. Sie sind niedriger als die Energieverbrauchswerte der anderen Antriebsarten, da der Elektromotor gegenüber den anderen Antriebstechnologien die geringsten Umwandlungsverluste aufweist (im Gegensatz zu Verbrennungsmotoren entstehen kaum Wärmeverluste). Außerdem weist auch der Wasserstoffbus mit Brennstoffzelle einen vergleichsweise niedrigen Energieverbrauch auf. Der höchste Energieverbrauch

101 Quelle: Eigene Darstellung.

wird gemäß den vorn in Tabelle *7* angegebenen spezifischen Verbrauchswerten für den Biomethanbus berechnet. Dies ist insofern bemerkenswert, als der Gasmotor eine dem Dieselmotor (mindestens) vergleichbare Verbrennungsqualität ermöglicht.

Tabelle 9: Vergleich des Energieverbrauchs von Omnibussen auf der RSAG-Buslinie 31

Antriebsart	Sommerbetrieb		Winterbetrieb	
1	2	3	4	5
RSAG-Buslinie 31 (8,19 km)				
Dieselbus	2,9 l DK	28,9 kWh	3,2 l DK/HEL	32,1 kWh
Batteriebus	10,0 kWh	10,0 kWh	14,1 kWh	14,1 kWh
Biomethanbus	3,2 m³	35,2 kWh	3,6 m³	39,2 kWh
Wasserstoffbus (BZ)	0,6 kg	19,5 kWh	0,8 kWh	27,3 kWh
DME-Bus	4,3 l DME	22,8 kWh	4,8 l DME	25,4 kWh

3.1.2 Jahresenergieverbrauch der kommunalen Flotten in der Regiopolregion Rostock

Anhand der vorn in Tabelle *7* angegebenen spezifischen Energieverbrauchswerte der einzelnen Antriebstechnologien kann auch der Energieverbrauch hochgerechnet werden, welcher sich jeweils ergeben würde, wenn in der Regiopolregion Rostock die drei kommunalen Unternehmen RSAG, rebus und SR ihre Fahrzeugflotten von der Referenz Dieselfahrzeug vollständig auf diese Antriebstechnologien umstellen würden. Dazu wurden die von den Nutzfahrzeugflotten der drei Unternehmen jährlich zurückgelegten Kilometerzahlen herangezogen. Diese belaufen sich gegenwärtig bei der RSAG auf ca. 4,3 Mio. km/a, bei rebus auf ca. 7,3 Mio. km/a und bei SR auf ca. 1,0 Mio. km/a. Für die Hochrechnung wurde bei den Omnibussen vereinfachend angenommen, dass der HLKT-Energieverbrauch nur über einen Zeitraum von 6 Monaten auftritt (4 Monate - Heizen, 2 Monate - Klimatisieren). Die anhand der jährlich zurückgelegten Kilometerzahlen für die verschiedenen Antriebstechnologien hochgerechneten Jahresenergieverbräuche sind in Tabelle *10* zusammengestellt. Darin ist für jede Antriebstechnologie der Energieverbrauch für Traktion und HLKT zunächst gesondert ausgewiesen und dann zusammengefasst (auch bei den Dieselfahrzeugen kann der Verbrauch an Dieselkraftstoff und an Heizöl näherungsweise aufsummiert werden, da sich die Heizwerte der beiden Energieträger kaum unterscheiden). Für den Energieverbrauch der Nutzfahrzeuge der SR-Gruppe enthält die Tabelle jeweils nur einen Energieverbrauchswert, da der Nebenverbrauch ganzjährig auftritt. Für die Berechnung des Verbrauchs an Dieselkraftstoff wurde dort ein durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch von 52,7 l/100 km zugrunde gelegt. Dieser berücksichtigt wie bei den Omnibussen sowohl den Energieverbrauch für die Traktion als auch den Energieverbrauch der Nebenaggregate beispielsweise zur Verdichtung des gesammelten Abfalls.

Der in der Tabelle genannte Dieselverbrauch (Referenz) entspricht energetisch ca. 2 Prozent des gegenwärtigen Dieselkraftstoff-Jahresverbrauchs im gesamten Verkehrssektor der Regiopolregion Rostock. Im Vergleich zu dieser Referenz könnten perspektivisch im Falle einer jeweils vollständigen Umstellung der Nutzfahrzeugflotten der drei kommunalen Unternehmen die benötigten Kraftstoffe bzw. Energiemengen in der Regiopolregion Rostock selbst aus Erneuerbaren Energien hergestellt werden:

- Zur vollständigen Umstellung auf Batteriefahrzeuge wäre jährlich eine Strommenge von knapp 20 GWh/a erforderlich (der Gesamtstromverbrauch in der Regiopolregion Rostock beläuft sich gegenwärtig auf ca. 1.800 GWh/a). Um diese Strommenge Jahr für Jahr innerhalb der Regiopolregion Rostock beispielsweise durch Windenergie an Land zu erzeugen, wäre bei einer gegenwärtigen durchschnittlichen Volllaststundenzahl von ca. 1.900 h/a eine Anlagenleistung von 10,5 MW erforderlich. Das entspricht etwas mehr als einem Prozent der derzeit in der Regiopolregion Rostock in Windenergieanlagen an Land installierten Leistung, die sich gegenwärtig auf knapp 850 MW beläuft.

Tabelle 10: Jahresenergieverbrauch alternativ angetriebener kommunaler Fahrzeugflotten[102]

Unternehmen		RSAG	rebus	SR	zusammen	
Antriebsart		4,3	7,3	1,0	12,6	Mio. km/a
1	2	3	5	7	9	10
Diesel-fahrzeug	Traktion	1.799	2.324	537	4.660	10^3 l DK
	HLKT	86	147		233	10^3 l HEL
	gesamt	1.885	2.471	537	4.893	10^3 l DK/HEL
Batterie-fahrzeug	Traktion	5.256	9.004	1.882	16.142	MWh
	HLKT	1.060	1.816		2.876	MWh
	gesamt	6.316	10.820	1.882	19.018	MWh
Biomethan-fahrzeug	Traktion	1.673	2.866	599	5.138	10^3 m³
	HLKT	96	165		261	10^3 m³
	gesamt	1.769	3.031	599	5.399	10^3 m³
Wasserstoff-fahrzeug	Traktion	305	523	109	937	t
	HLKT	62	106		168	t
	gesamt	367	629	109	1.105	t
DME-Fahrzeug	Traktion	2.252	3.858	806	6.916	10^3 l DME
	HLKT	129	221		350	10^3 l DME
	gesamt	2.381	4.079	806	7.266	10^3 l DME

- Die vollständige Umstellung der drei kommunalen Flotten auf Biomethanfahrzeuge würde eine jährliche Bereitstellung von ca. 5,4 Mio. m³ Biomethan erfordern. Diese Menge entspricht ca. 12 Prozent der jährlichen Gaserzeugung des Bioenergieparks Güstrow[103]. Darüber hinaus betreibt beispielsweise auch die HanseWerk Natur GmbH mit Sitz in Hamburg in der Regiopole Rostock eine Anlage, welche Biogas erzeugt und dieses zu Biomethan aufbereitet[104].
- Für eine vollständige Umstellung der drei kommunalen Nutzfahrzeugflotten auf Brennstoffzellenfahrzeuge wäre jährlich Wasserstoff in einem Umfang von ca. 1.100 t/a erforderlich. Die zur Produktion dieser Menge erforderlichen Elektrolyseanlagen würden jährlich ca. 66 GWh/a Strom verbrauchen. Wiederum auf die Windstromerzeugung an Land bezogen beläuft sich die erforderliche Anlagenleistung auf knapp 37 MW. Das sind knapp 4,5 Prozent der gegenwärtig in der Regiopolregion Rostock an Land installierten Windenergieleistung.
- Eine vollständige Umstellung der drei kommunalen Nutzfahrzeugflotten auf DME würde die Erzeugung von jährlich ca. 7,3 Mio. l/a DME erfordern. Wiederum auf die Windstromerzeugung an Land

102 Der HLKT-Energieverbrauch bei den Omnibussen ist vereinfacht für einen Zeitraum von 6 Monaten, also für 50 Prozent der jeweiligen Jahreskilometer berechnet (4 Monate - Heizen, 2 Monate - Klimatisieren).

103 Der Bioenergiepark Güstrow, der bislang zur Nawaro AG mit Sitz in Leipzig gehörte, hat in den vergangenen Jahren ca. 45 Mio. m³/a Biogas erzeugt und über eine Druckwasserwäsche (DWW) auf Erdgasqualität aufbereitet, um es anschließend mit ca. 5.000 Nm³/h in das Erdgasnetz einzuspeisen. Im Mai 2021 hatte die EnviTec Biogas AG mit Sitz in Lohne die Anlage mit dem Ziel übernommen, sie auf die Erzeugung von jährlich ca. 9.000 t/a Bio-LNG für den Verkehr umzustellen. Die umgestellte Anlage soll im Herbst 2022 ihren Betrieb aufnehmen. Quelle: https://www.envitec-biogas.de/infocenter/pressemeldungen/fortschrittliche-biokraftstoffe-aus-deutschlands-erster-intergrierter-bio-lng-anlage.

104 Das von der Anlage aus biogenen Abfällen erzeugte Biomethan wird mit 200 bis 350 Nm³/h in das Erdgasnetz einspeist. Quelle: https://www.veolia.de/teilstromvergaerungsanlage-rostock.

bezogen beläuft sich die dafür erforderliche elektrische Anlagenleistung auf knapp 60 MW bzw. auf 7 Prozent der gegenwärtig in der Regiopolregion Rostock an Land installierten Windenergieleistung.

Wie die angeführten Beispiele zeigen, ist eine klimaneutrale Erzeugung der für die Flottenumstellung erforderlichen erneuerbaren Kraftstoffe bzw. Energiemengen in der Regiopolregion Rostock möglich. Dies gilt umso mehr, als die tatsächliche Umstellung der drei kommunalen Flotten voraussichtlich auf verschiedene alternative Antriebe erfolgt. Zudem sind einige der in der Region vorhandenen Erneuerbare-Energien-Potenziale bislang erst teilweise ausgeschöpft. Allerdings ist bei der Beurteilung der energetischen Realisierbarkeit der Flottenumstellung zu berücksichtigen, dass perspektivisch die Erreichung der Klimaneutralität in der Regiopolregion Rostock neben dem Verkehr auch in anderen Sektoren eine Umstellung auf Erneuerbare Energien erfordert, deren Bereitstellung voraussichtlich ebenfalls die regionalen Erneuerbare-Energien-Potenziale nutzen muss.

3.2 Klima- und Umwelteffekte

Auf der Grundlage des im vorhergehenden Abschnitt abgeschätzten Energieverbrauchs können auch die Klima- und Umwelteffekte abgeschätzt werden, welche durch die Umstellung der drei kommunalen Nutzfahrzeugflotten erzielbar sind. Dies gilt besonders für die Emissionen der drei wichtigsten Treibhausgase sowie für die direkten Emissionen von Luftschadstoffen, soweit diese aus dem Betrieb der Nutzfahrzeuge resultieren (Tank-to-Wheel-Emissionen). Bei den Treibhausgasen sind die CO_2-, die CH_4- sowie die N_2O-Emissionen bedeutsam, bei den Luftschadstoffen sind es die Stickoxide (NO_x).

Die Emissionen werden ebenso wie der Energieverbrauch zunächst wieder für einzelne Omnibusse mit alternativen Antrieben auf der beispielhaft betrachteten Buslinie 31 der RSAG quantifiziert, die in Abbildung *37* grafisch dargestellt ist (Abschnitt 3.1.1). Anschließend erfolgt eine Hochrechnung auf die gesamten Nutzfahrzeugflotten der drei kommunalen Unternehmen RSAG, rebus und SR.

3.2.1 Abschätzung der Klima- und Umwelteffekte anhand einer Beispiel-Omnibuslinie

Bei Diesel- und Erdgasbussen entstehen zum einen CO_2-Emissionen. Das im Vergleich zum Dieselkraftstoff günstigere H/C-Verhältnis von Erdgas führt dabei zu einer um ca. 20 Prozent niedrigeren CO_2-Emission bei der Verbrennung. Hinzu kommen bei Erdgasbussen auch CH_4-Emissionen, wobei als Emissionsfaktor der Emissionsgrenzwert für den europäischen instationären Zyklus (ETC) aus der Verordnung der Europäischen Union (EG) 595/2009 zugrunde gelegt werden kann. Die CH_4-Emissionen sind zwar mengenmäßig deutlich kleiner als die CO_2-Emissionen, jedoch weisen sie ein um den Faktor 25 größeres Treibhausgaspotenzial auf. Zu den N_2O-Emissionen von Diesel- und Erdgasbussen liegen dagegen keine Emissionsdaten oder -grenzwerte vor.

Zum anderen verursachen insbesondere Diesel- und Erdgasbusse auch Emissionen von Luftschadstoffen. Für diese können als Emissionsfaktoren wiederum die Schadstoffgrenzwerte der EU-Verordnung herangezogen werden.

Batteriebusse und mit Brennstoffzellen angetriebene Wasserstoffbusse sind dagegen in ihrem Betrieb frei von Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen, sofern die Batteriebusse mit erneuerbarem Strom geladen und die Wasserstoffbusse mit erneuerbar hergestelltem Wasserstoff betankt werden.

Auch Biomethanbusse und DME-Busse verursachen im Betrieb Emissionen von Treibhausgasen und Luftschadstoffen.

Die für alternativ angetriebener Omnibusse genannten Zusammenhänge gelten sinngemäß auch für alternativ angetriebene Nutzfahrzeuge in der Stadtentsorgung.

Angaben zu den spezifischen Emissionen sind im Straßenverkehr typischerweise auf die Laufleistung bezogen (g/km). Die in Tabelle *11* zusammengestellten Emissionsfaktoren sind dagegen bereits auf den Energieverbrauch (g/kWh) umgerechnet.

Tabelle 11: Emissionsfaktoren für die direkten Emissionen von schweren Nutzfahrzeugen[105]

Kraftstoff/ Energieträger	rel. THG-potenzial	Diesel-kraftstoff/ Heizöl	Erdgas (CNG)	Biomethan (CBM)	EE-H_2 (BZ)	EE-Strom (Batterie)	DME
Einheit	-	g/kWh					
1	2	3	4	5	6	7	8
Treibhausgase Tank-to-Wheel							
CO_2	1	266,4	200,9	200,9	-	-	323,20
CH_4	25	0	0,5	0,5	-	-	-
N_2O	298	k. A.	k. A.	k. A.	-	-	-
CO_2-Äq.	-	266,4	213,4	213,4	-	-	323,20
Luftschadstoffe							
SO_2	-	k. A.	0	0	-	-	0
NO_x	-	0,40	0,40	0,40	-	-	0,40
Staub	-	0,01	0,01	0,01	-	-	0
CO	-	4,00	4,00	4,00	-	-	0
NMVOC	-	0,16	0,16	0,16	-	-	0

Die mit diesen Emissionsfaktoren für die beispielhaft untersuchte Buslinie 31 der RSAG berechneten Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen sind in Tabelle *12* zusammengestellt. Die Tabelle gibt in ihrem oberen Teil die Emissionen während einer Busfahrt im Sommerbetrieb an, wohingegen im unteren Teil die Emissionen einer Busfahrt im Winterbetrieb zusammengestellt sind. Die Treibhausgasemissionen bestehen im Wesentlichen aus den CO_2-Emissionen der mit Verbrennungsmotoren angetriebenen Omnibusse. Bei dem Biomethanbus kommen CH_4-Emissionen hinzu, die allerdings mengenmäßig deutlich kleiner sind. Die Emissionen von Luftschadstoffen der mit Verbrennungsmotoren angetriebenen Omnibusse bestehen im Wesentlichen aus den CO- und NO_x-Emissionen. Vollständig frei von Treibhausgasemissionen und von lokalen Luftschadstoffemissionen sind demgegenüber nur der Batteriebus und der mit einer Brennstoffzelle angetriebene Wasserstoffbus. Dabei ist vorausgesetzt, dass ausschließlich erneuerbarer Strom zum Laden der Fahrzeugbatterien bzw. zur Erzeugung des Wasserstoffs eingesetzt wurde. Für den DME-Bus sind außer den NO_x-Emissionen keine weiteren Emissionen von Luftschadstoffen angegeben, da DME wesentlich sauberer verbrennt als konventioneller Dieselkraftstoff.

[105] Quellen: /*35*/, S. 107.

Tabelle 12: Vergleich der Tank-to-Wheel-Emissionen von Omnibussen auf der RSAG-Buslinie 31

Antriebsart	CO_2	CH_4	$CO_{2,äq.}$	NO_x	Staub	CO	NMVOC
1	2	3	4	6	7	8	9
RSAG-Buslinie 31 (8,19 km) - Sommerbetrieb in Gramm (g)							
Dieselbus	7.690	0	7.690	11,5	0,3	115,5	4,6
Batteriebus	0	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0
Biomethanbus	7.067	18	7.507	14,1	0,4	140,7	5,6
Wasserstoffbus (BZ)	0	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0
DME-Bus	7.354	0	7.354	9,1	0,0	0,0	0,0
RSAG-Buslinie 31 (8,19 km) - Winterbetrieb in Gramm (g)							
Dieselbus	8.561	0	8.561	12,9	0,3	128,6	5,1
Batteriebus	0	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0
Biomethanbus	7.881	20	8.371	15,7	0,4	156,9	6,3
Wasserstoffbus (BZ)	0	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0
DME-Bus	8.197	0	8.197	10,1	0,0	0,0	0,0

3.2.2 Jährliche Klima- und Umwelteffekte in der Regiopolregion Rostock

Ebenso wie der Jahresenergieverbrauch der drei kommunalen Flotten mit alternativen Antrieben (Abschnitt 3.1.2) können auch deren Jahresemissionen abgeschätzt werden. Dazu werden neben den in Tabelle *11* zusammengestellten Emissionsfaktoren ebenso wie bei der Abschätzung des Energieverbrauchs die Jahresfahrleistungen von RSAG, rebus und SR-Gruppe herangezogen. In Tabelle *13* sind die jährlichen Tank-to-Wheel-Emissionen von Treibhausgasen und Luftschadstoffen zusammengestellt, welche in den kommunalen Fahrzeugflotten der drei Unternehmen entstehen würden, wenn diese ihre Dieselnutzfahrzeuge durch alternativ angetriebene Nutzfahrzeuge ersetzen. In der Tabelle sind die jährlichen Emissionen der drei kommunalen Fahrzeugflotten zusammengefasst. Die in den drei Unternehmen jeweils entstehenden Jahresemissionen sind im Anhang 1 getrennt voneinander dargestellt. Gegenüber der aus Dieselfahrzeugen bestehenden Referenz können durch die Umstellung der Nutzfahrzeugflotten jährlich insbesondere CO_2-Emissionen vermieden werden.

Tabelle 13: Jährliche Emissionen alternativ angetriebener kommunaler Fahrzeugflotten

THG bzw. Schadstoff	CO_2	CH_4	NO_x	Staub	CO	NMVOC
Antriebsart	Emissionen Tank-to-Wheel in t/a					
1	2	3	4	5	6	7
Dieselfahrzeuge	13.120	0	20	0	197	8
Batteriefahrzeuge	-	-	-	-	-	-
Biomethanfahrzeuge	11.932	30	24	1	238	10
Wasserstofffahrzeuge (BZ)	-	-	-	-	-	-
DME-Fahrzeuge	12.414	0	15	0	0	0

3.2.3 Erweiterte Betrachtung der CO_2-Emissionen

Zu der vorstehenden Abschätzung der Tank-to-Wheel-Emissionen wird hier eine erweiterte Betrachtung durchgeführt, welche die CO_2-Emissionen der Prozessketten Dieselfahrzeug, Biomethanfahrzeug und DME-Fahrzeug miteinander vergleicht. Erst in dieser vergleichenden Betrachtung können die spezifischen CO_2-Vorteile der Biomethan- und der DME-Prozesskette gegenüber der Diesel-Prozesskette adäquat erfasst werden.

Die Erweiterung betrifft die Einführung eines (fiktiven) Kraftwerks, welches einen fossilen Energieträger nutzt und daher jährlich eine bestimmte CO_2-Menge emittiert. Ist dieses Kraftwerk in der Regiopolregion Rostock angesiedelt, müssen seine CO_2-Emissionen gemäß dem regionalen Klimaschutzziel bis 2035 neutralisiert werden.

Die DME-Prozesskette beginnt mit dem CO_2 liefernden Kraftwerk. Sofern aus dem Kraftwerksabgas CO_2 unter Einsatz von erneuerbarem Strom abgeschieden wird (CCU), kann dieses CO_2 in Syntheseprozessen unter Nutzung von erneuerbarem Wasserstoff in erneuerbare Kraftstoffe wie Dimethylether (DME - eFuel) umgewandelt werden[106]. Ein mit diesem Kraftstoff betriebenes DME-Nutzfahrzeug emittiert dann je Liter verbrauchten Kraftstoffs genau die CO_2-Menge, welche zuvor für die DME-Herstellung eingesetzt und hierfür aus dem Kraftwerksabgas abgeschieden wurde. Abbildung *39* zeigt in ihrem unteren Teil diese DME-Prozesskette, soweit darin CO_2 auftritt.

In der Abbildung mittig dargestellt ist die Biomethan-Prozesskette. Das in der DME-Prozesskette eingeführte Kraftwerk verursacht auch hier CO_2-Emissionen, die jedoch nicht genutzt werden. Vielmehr entnimmt das für die Biogaserzeugung erforderliche Pflanzenmaterial das zum Pflanzenwachstum benötigte CO_2 aus der Atmosphäre. Wie in der DME-Prozesskette emittiert auch hier das Biomethanfahrzeug je Liter verbrauchten Biomethans genau die CO_2-Menge, welche zuvor zur Erzeugung des Biomethans aus der Atmosphäre entnommen wurde.

[106] Zur Herstellung von 1 kg TME werden 2,55 kg CO_2 benötigt /*71*/, S. 81.

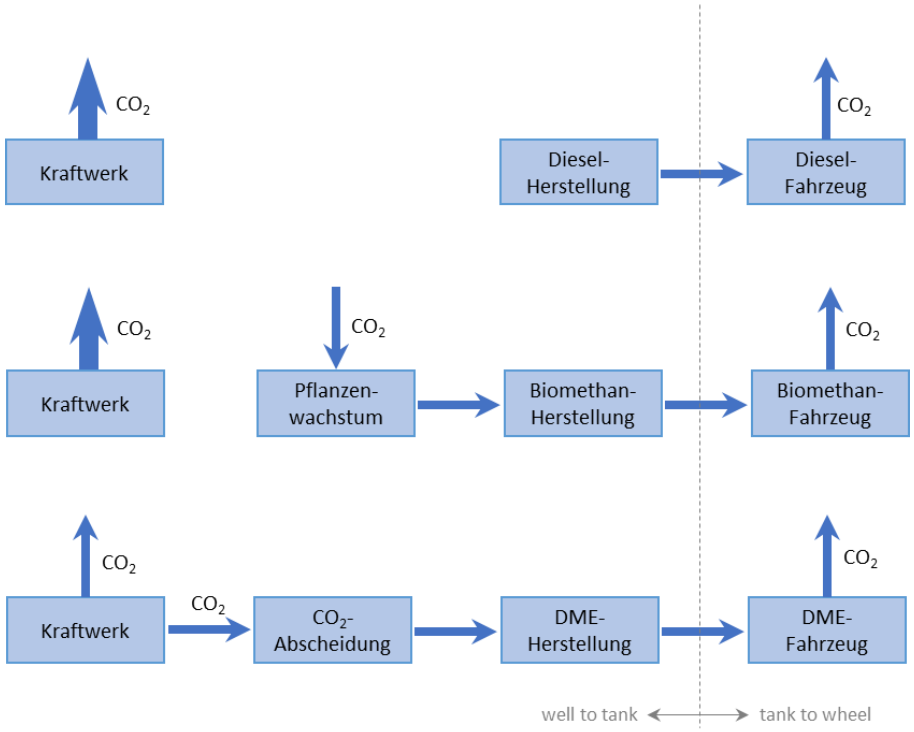

Abbildung 39: CO_2-Emissionen in den Prozessketten alternativer Antriebe[107]

Die kürzeste Prozesskette ist die in der Abbildung oben dargestellte Dieselkette, bei der ein fossiler Rohstoff (Rohöl) zu Dieselkraftstoff verarbeitet und dieser in Dieselfahrzeugen genutzt wird. Das Kraftwerk ist auch hier vorhanden, jedoch werden seine CO_2-Emissionen auch in dieser Prozesskette nicht genutzt.

Abbildung *40* zeigt die CO_2-Bilanzen der drei betrachteten Prozessketten, wobei die Jahresemission des Kraftwerks jeweils mit 20 kt/a CO_2 angenommen wurde. In der Prozesskette mit dem Dieselfahrzeug treten die ungeminderten Kraftwerksemissionen sowie die CO_2-Emissionen aus dem Dieselkraftstoff auf, den das Dieselfahrzeug verbraucht hat. Auf die Regiopolregion Rostock bezogen belaufen sich diese CO_2-Emissionen gegenwärtig auf ca. 13,1 kt/a (Abschnitt 3.2.2). In der wiederum mittig dargestellten Biomethan-Prozesskette bleiben die CO_2-Emission des Kraftwerks unverändert. Allerdings entsprechen die CO_2-Emissionen des Biomethanfahrzeugs der zuvor aus der Atmosphäre entnommenen CO_2-Menge, welche deshalb in der Abbildung mit negativem Vorzeichen dargestellt ist. Würden die Fahrzeugflotten der drei kommunalen Unternehmen in der Regiopolregion Rostock vollständig auf Biomethanfahrzeuge umgestellt, beliefen sich diese CO_2-Emissionen auf 11,9 kt/a (Abschnitt 3.2.2). In der Prozesskette mit dem DME-Fahrzeug wird aus dem Kraftwerk die CO_2-Menge abgeschieden, welche in dem DME-Herstellungsprozess benötigt wird. Diese abgeschiedene CO_2-Menge geht ebenfalls mit negativem Vorzeichen in die Bilanz ein. Von dem DME-Fahrzeug wird dann wiederum genau die CO_2-Menge emittiert, welche zuvor in dem Syntheseprozess in den erneuerbaren Kraftstoff DME eingebaut und hierfür aus dem Abgas des Kraftwerks abgeschieden wurde. Würden die Fahrzeugflotten der drei kommunalen Unternehmen vollständig auf DME-Fahrzeuge umgestellt, beliefen sich diese CO_2-Emissionen auf 12,4 kt/a (Abschnitt 3.2.2).

Der erweiterte Vergleich der CO_2-Bilanzen der drei Prozessketten zeigt, dass die Biomethankette um die CO_2-Menge günstiger ist als die Dieselkraftstoff-Prozesskette. Die eingesparte CO_2-Menge entspricht näherungsweise der vermiedenen CO_2-Emission des mehr nicht benötigten Dieselkraftstoff. Allerdings ist die DME-Prozesskette noch einmal um annähernd die gleiche CO_2-Menge günstiger als die Biomethankette, da sie nicht nur die CO_2-Emissionen aus dem Einsatz des Dieselkraftstoffs vermeidet, sondern zusätzlich CO_2-Emissionen einer fossilen CO_2-Quelle (Kraftwerk) nutzt und damit reduziert.

107 Quelle: Eigene Darstellung.

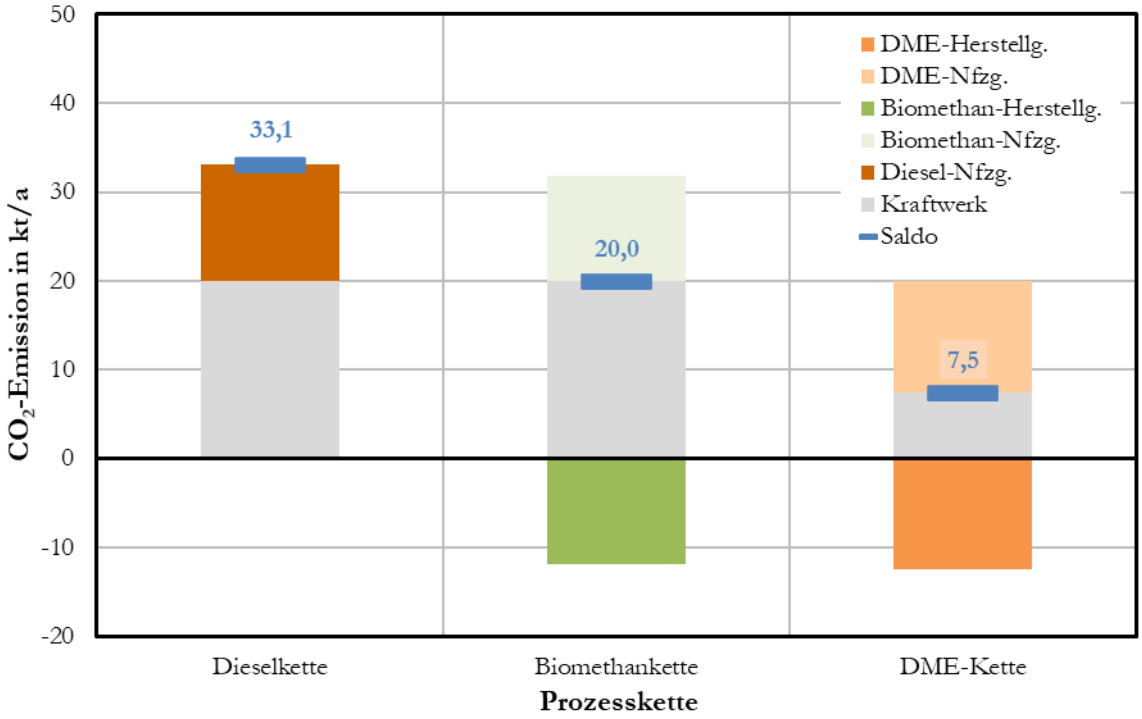

Abbildung 40: Erweiterte CO_2-Bilanzen von Prozessketten mit alternativen Antrieben[108]

Konkret werden bei der Umstellung der Nutzfahrzeugflotten der drei kommunalen Unternehmen von Dieselkraftstoff auf Biomethan regional - 13,1 kt/a CO_2 weniger emittiert. Bei der Umstellung von Dieselkraftstoff auf DME beläuft sich der Rückgang der CO_2-Emissionen sogar auf - 25,6 kt/a CO_2, sofern das zur DME-Herstellung erforderliche CO_2 aus einem regionalen Kraftwerk abgeschieden wird (CCU) und sofern hierfür erneuerbarer Strom verwendet wird. Dementsprechend sind für die DME-Herstellung innerhalb der Regiopolregion Rostock Kooperationen zwischen den Betreibern der kommunalen Nutzfahrzeugflotten, der Erneuerbare-Energien-Anlagen sowie der mit fossilen Brennstoffen betriebenen Energieanlagen erforderlich (Kraftwerk).

3.3 Zwischenfazit

Der Umstellung der drei großen kommunalen Nutzfahrzeugflotten, die in der Regiopolregion Rostock vorhandenen sind, von Dieselantrieb auf alternative Antriebe stehen aus energetischer Sicht keine unüberwindlichen Hindernisse entgegen. Selbst wenn alle drei Nutzfahrzeugflotten auf den gleichen alternativen Antrieb umgestellt würden, könnten die dafür erforderlichen erneuerbaren Energie- bzw. Kraftstoffmengen innerhalb der in der Region vorhandenen Erneuerbare-Energien-Potenziale bereitgestellt werden. Im Einzelnen wären dies gemessen an den heutigen Nutzfahrzeugbeständen

- ca. 20 GWh/a Strom für batterieelektrische Nutzfahrzeuge (ca. ein Prozent des gegenwärtigen Jahresstromverbrauchs in der Region),
- ca. 5,4 Mio. m³/a Biomethan für Nutzfahrzeuge mit Gasmotoren (ca. 12 Prozent der jährlichen Gaserzeugung des Bioenergieparks Güstrow),
- ca. 1.100 t/a Wasserstoff für Nutzfahrzeuge mit Brennstoffzellen,
- ca. 7.300 l/a DME.

Allerdings ist bei der Beurteilung der energetischen Realisierbarkeit der Flottenumstellung zu berücksichtigen, dass die Erreichung des regionalen Ziels der Klimaneutralität bis zum Jahr 2035 eine Stabilisierung bzw. Reduzierung des Motorisierten Individualverkehrs (MIV) und im Gegenzug eine Ausweitung des

108 Quelle: Eigene Darstellung.

ÖPNV mit Omnibussen erfordert. Hierfür wird voraussichtlich auch ein Ausbau des Fahrzeugbestands erforderlich sein. Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass perspektivisch die Erreichung der Klimaneutralität in der Regiopolregion Rostock auch im Verkehrssektor insgesamt sowie in anderen Sektoren eine Umstellung auf Erneuerbare Energien erfordert, deren Bereitstellung voraussichtlich ebenfalls die regionalen Erneuerbare-Energien-Potenziale nutzen muss.

Werden nur die Tank-to-Wheel-Emissionen betrachtet, würde eine Umstellung der drei kommunalen Nutzfahrzeugflotten von Dieselfahrzeugen auf batterieelektrische Antriebe oder auf Wasserstofffahrzeuge mit Brennstoffzellen den größten Beitrag zur Erreichung der Klimaneutralität leisten. Die Tank-to-Wheel-Treibhausgasemissionen im Falle einer Umstellung auf Biomethan- oder DME-Nutzfahrzeuge sind annähernd gleich groß wie die Emissionen der Dieselfahrzeug-Nutzfahrzeugflotten.

In einer erweiterten CO_2-Bilanzierung zeigt sich aber, dass die Treibhausgasemissionen in der Region auch durch eine Umstellung auf Biomethanfahrzeuge oder auf DME-Fahrzeuge deutlich reduziert würden. Eine Umstellung auf Biomethanfahrzeuge würde die mit dem Betrieb von Dieselfahrzeugen verbundenen CO_2-Emissionen vollständig vermeiden. Im Falle einer Umstellung auf DME-Fahrzeuge wären die Effekte für die regionale CO_2-Bilanz sogar annähernd doppelt so groß. Die Voraussetzungen hierfür bestehen im Wesentlichen in einer regionalen und erneuerbaren sowie kooperativen Erzeugung der für den Betrieb der Nutzfahrzeuge erforderlichen Rohstoffe (Biogas, Wasserstoff, CCU-CO_2) und Energiemengen.

4. Betriebshofkonzept für alternative Antriebskonzepte

Im Folgenden wird ein Betriebshofkonzept für den Betrieb von Nutzfahrzeugen mit alternativen Antrieben für den Omnibus-ÖPNV entworfen. Das Konzept gilt insoweit auch für einen Betriebshof der Stadtentsorgung, als dieser prinzipiell ähnlich aufgebaut ist, ähnliche Anforderungen erfüllen und über die gleichen Infrastrukturen verfügen muss wie ein Omnibus-Betriebshof. Allerdings verfügt er gegebenenfalls zusätzlich über entsorgungsspezifische Infrastrukturen mit eigenem Energieverbrauch (Winterdienst, Werkstätten zur Umrüstung von Mehrzweck-Nutzfahrzeugen etc.).

Bei der Beschreibung der zu erfüllenden Anforderungen und des entwickelten Betriebshofkonzepts wird soweit möglich auf die unterschiedlichen Antriebskonzepte eingegangen. Diese Vorgehensweise begründet sich dadurch, dass die drei betrachteten kommunalen Unternehmen teilweise verschiedene alternative Antriebskonzepte präferieren. Zudem werden auch innerhalb dieser Unternehmen nicht nur jeweils eines, sondern mehrere alternative Antriebskonzepte in die Umstellung der Fahrzeugflotten einbezogen, zum Beispiel bei der RSAG (Batterie- und Biomethanbusse). Somit besteht das Betriebshofkonzept aus einem allgemeinen Teil und aus mehreren speziellen, die einzelnen Antriebskonzepte betreffenden Teilen.

Betriebshöfe für den Verkehr mit Nutzfahrzeugen weisen eine Vielzahl von typischen Merkmalen auf, welche zur Erfüllung der betrieblichen und technischen Anforderungen gegeben sein müssen. Die betrieblichen Anforderungen ergeben sich aus dem Personal- und Fahrzeugeinsatz. Das gesicherte Abstellen der Fahrzeuge, die Durchführung von Vorbereitungs- und Abschlussarbeiten sowie die Personal- und Fahrzeugverwaltung erfordern Gebäude und Flächen, welche abgegrenzt, gekennzeichnet und befestigt sein müssen. Die technischen Anforderungen ergeben sich aus den durchzuführenden Fahrzeugservices. Hierzu gehören neben den Verkehrsflächen (Ein- und Ausfahrt, Stauräume, Fahrstraßen, Abstellanlagen etc.) und Räumen bzw. Einrichtungen für das Personal besonders auch Räume und Einrichtungen für die Instandhaltung, Betankung/Versorgung und Reinigung der Fahrzeuge. Die entsprechenden Anforderungen sind für Omnibus-Betriebshöfe in der VDV-Schrift 822 /*79*/ beschrieben.

Über diese Anforderungen hinaus ergeben sich aus der Umstellung der im Omnibus-ÖPNV eingesetzten Nutzfahrzeuge auf alternative Antriebskonzepte weitere Anforderungen, welche durch das jeweilige Antriebskonzept bestimmt werden. Diese erfordern spezifische Anpassungen von Prozessen, Infrastrukturen sowie Betriebs- und Instandhaltungskonzepten, für deren Durchführung die VDV-Schrift 825 eine Hilfestellung gibt/*48*/. Diese Anforderungen müssen parallel zu den bereits bestehenden Prozessen und Infrastrukturen erfüllt werden, da die Umstellung der Fahrzeugflotte in Schritten erfolgt und somit Nutzfahrzeuge mit verschiedenen Antriebskonzepten parallel betrieben werden müssen (Mischbetrieb). Darüber hinaus gibt es eine Vielzahl von weiteren Empfehlungsschriften des VDV, beispielsweise die VDV-Schrift 260, welche Infrastrukturen und Ladeeinrichtungen für batterieelektrischen Omnibusse beschreibt /*80*/.

Bei der Gestaltung von Omnibus-Betriebshöfen bzw. bei der Umgestaltung vorhandener Betriebshöfe für Fahrzeuge mit alternativen Antriebskonzepten müssen somit verschiedene betriebliche, technische, wirtschaftliche und rechtliche Anforderungen berücksichtigt werden. Im Folgenden werden die wichtigsten Anforderungen benannt, wobei davon ausgegangen wird, dass die Versorgung der Nutzfahrzeuge mit Antriebsenergie vorwiegend nicht mit externen Infrastrukturen (Tankstellen bzw. Ladeeinrichtungen), sondern durch solche auf den Betriebshöfen erfolgt.

4.1 Bestimmung wesentlicher Rahmendaten für das Betriebshofkonzept

<u>Flottengröße</u>

Der Fahrzeugbestand der RSAG beläuft sich gegenwärtig auf ca. 70 Omnibusse (Abschnitt 2.2.2). In der ÖPNV-Umstellung von Diesel- auf Batteriebusse sind aus Gründen der geringeren Reichweite und Verfügbarkeit von Batteriebussen mehr Fahrzeuge erforderlich, um ein bestehendes ÖPNV-Angebot aufrechtzuerhalten (Liniennetz, Taktzahlen etc.). Im Falle einer Ausweitung des ÖPNV-Angebots sind umso mehr zusätzliche Batteriebusse erforderlich. Die RSAG plant in der Umstellung ihrer Fahrzeugflotte die Ablösung der vorhandenen Dieselfahrzeuge durch Biomethanbusse und batterieelektrische Busse. Da neben den Fahrzeugen auch zusätzliche Infrastrukturen zu errichten sind, benötigt die RSAG perspektivisch für den Betrieb ihrer Omnibusse voraussichtlich einen zweiten Betriebshof. Sofern dieser nicht an einem bereits mit Infrastrukturen ausgestatteten Standort, sondern an einem neuen Standort errichtet wird,

könnte er speziell für den Betrieb der Biomethan- bzw. der Batteriebusse ausgerichtet werden. Da gemäß der CVD bzw. dem Gesetz über die Beschaffung sauberer Straßenfahrzeuge bis 2025 45 Prozent und bis 2030 65 Prozent aller beschafften Fahrzeuge alternativ angetrieben sein müssen und da hierfür jeweils 50 Prozent als saubere bzw. als emissionsfreie Fahrzeuge gelten müssen, könnte sich der Bestand an Omnibussen der RSAG im Jahr 2035 unter der Annahme einer Ausweitung des Omnibus-ÖPNV gegenüber dem heutigen Stand aus ca. 40 Biomethan-Bussen und ca. 60 batterieelektrischen Omnibussen zusammensetzen.

Demgegenüber betreibt rebus ca. 160 Omnibusse, von denen ca. 60 Fahrzeuge auf dem Betriebshof in Güstrow stationiert sind (Abschnitt 2.2.2). Des Weiteren präferiert rebus im Regionalverkehr gegenwärtig besonders aus Gründen der erforderlichen Reichweiten Wasserstoffbusse gegenüber batterieelektrischen Omnibussen. Geht man davon aus, dass jeweils ein Wasserstoffbus genau einen Dieselbus ersetzen kann, könnten perspektivisch auf dem Betriebshof in Güstrow ca. 60 Wasserstoffbusse stationiert sein, sofern das Angebot des Omnibus-ÖPNV im Verflechtungsraum der Regiopolregion Rostock mindestens auf dem heutigen Niveau zu halten ist.

Für das im Folgenden beschriebene Konzept eines Omnibus-Betriebshofs wird daher ein Bestand von ca. 60 alternativ angetriebenen Omnibussen zugrunde gelegt. Die auf dem Betriebshof Petridamm stationierte Nutzfahrzeugflotte der SR-Gruppe ist etwa dreimal so groß (Abschnitt 2.3.2), weshalb die Betriebshofdaten entsprechend zu skalieren sind. Weitere wesentliche Parameter werden im Folgenden für die einzelnen Antriebskonzepte benannt bzw. festgelegt.

Alternative Antriebskonzepte

Für die Umstellung kommunaler Nutzfahrzeugflotten in der Regiopolregion Rostock kommen verschiedene alternative Antriebskonzepte in Betracht (Abschnitt 1.3). Unter diesen alternativen Antriebskonzepten ist die Nutzung des synthetischen Kraftstoffs Dimethylether (DME – eFuel) von besonderer Bedeutung, da hierbei die vorhandenen Dieselfahrzeuge weiter betrieben werden können. Wie in dem Regionalen Energiekonzept der Region Rostock begründet wird, stellt die Erzeugung synthetischer, also erneuerbarer strombasierter Kraftstoffe zudem eine aussichtsreiche Möglichkeit dar, um zum einen bis 2035 eine Dekarbonisierung des Verkehrssektors in der Region zu erreichen. Zum anderen können mit dem hierzu erforderlichen Ausbau der teilweise in der Region bereits vorhandenen Industrie erhebliche zusätzliche Wertschöpfungspotenziale erschlossen werden. Für die Betreiber kommunaler Nutzfahrzeugflotten in der Regiopolregion Rostock verbindet sich damit die Möglichkeit, die vorhandenen Dieselfahrzeuge CVD-konform weiter betreiben und auf die Anschaffung neuer Fahrzeuge verzichten zu können, die zumindest gegenwärtig wesentlich teurer sind als Dieselfahrzeuge. Zudem ergeben sich gemäß der VDV-Schrift 825 für die Flottenbetreiber durch die Nutzung synthetischer Kraftstoffe keine wesentlichen Einschränkungen, da die Nutzungseigenschaften und die Infrastruktur im Vergleich zu konventionellem Dieselkraftstoff weitgehend unverändert bleiben. Auch ist im Umgang mit synthetischen Kraftstoffen keine größere, sondern eher eine geringere Gefährdung als mit Dieselkraftstoff zu erwarten. Der VDV empfiehlt lediglich, eine Freigabe des Fahrzeugherstellers für den Einsatz von synthetischem Dieselkraftstoff zu erwirken und weist darauf hin, dass erste Hersteller (OEM) bereits eine Freigabe für den Einsatz in EURO-VI-Motoren gemäß DIN EN 15940[109] erteilt haben /48/, S. 10.

Allerdings betrachtet der VDV als synthetische Dieselkraftstoffe solche, die aus Erdgas (GtL), Kohle (CtL) oder Biomasse (BtL) beispielsweise im Fischer-Tropsch-Verfahren hergestellt werden. GtL und CtL sind heute in größeren Mengen verfügbar */48/*, S. 10. Diese Kraftstoffe haben eine hohe Cetanzahl und stellen eine „saubere“ Alternative zu konventionellem Dieselkraftstoff dar, da sie aromaten- und schwefelfrei sind und geringere Schadstoffemissionen verursachen. Jedoch sind GtL- und CtL-Dieselkraftstoff keine erneuerbaren bzw. klimaneutralen Kraftstoffe[110]. Demgegenüber ist der hier zugrunde gelegte synthetische Dieselkraftstoff Dimethylether (DME – eFuel) als vollständig erneuerbar zu betrachten, sofern die zu seiner Herstellung benötigten Ausgangsstoffe Wasserstoff und CO_2 mit erneuerbarem Strom erzeugt bzw. abgeschieden werden (Abschnitt 3.2.3). Der Wasserstoff wird zusammen mit CO_2 in einem

[109] DIN EN 15940:2019-10: Kraftstoffe - Paraffinischer Dieselkraftstoff aus Synthese oder Hydrierungsverfahren - Anforderungen und Prüfverfahren.

[110] Zudem ist die GtL-Herstellung auf der Basis von Erdgas schon aus Klimaschutzgründen, des Weiteren aber auch aus Gründen der Erdgas-Versorgungssicherheit Deutschlands nicht zukunftsfähig.

Syntheseprozess zu DME umgewandelt, wobei das benötigte CO_2 vorzugsweise aus dem Abgasstrom von mit fossilen Energieträgern betriebenen Energieanlagen abgeschieden werden sollte /71/. DME kann zudem in dezentralen und lastflexiblen Power-to-X-Anlagen hergestellt werden, die eine vielversprechende Option zur Umwandlung von erneuerbarem Strom in Dieselkraftstoff darstellen. Dabei wird die direkte Synthese von DME unter den fluktuierenden Bedingungen der erneuerbaren Stromerzeugung als praktikabler angesehen als die konventionelle indirekte Synthese über Methanol als Zwischenprodukt /73/, /74/. Nach einer aktuellen Einschätzung des Karlsruher Institut für Technologie (KIT), welches eine Forschungsanlage zur Herstellung von eFuels betreibt, wird DME 2026 in technischer Hinsicht marktreif sein und die Herstellung einen Gesamtwirkungsgrad von 50 Prozent erreicht haben. Das KIT entwickelt hierzu skalierbare mikrostrukturierte Anlagen, welche volumetrisch eine um den Faktor 100 höhere Produktivität aufweisen als die Fischer-Tropsch-Synthese. Diese Anlagen können mit höherer Selektivität und dynamischer betrieben werden als konventionelle Reaktoren, wodurch sich große Vorteile vor allem für die dezentrale Produktion ergeben. Ebenso wie die Fischer-Tropsch-Kraftstoffe ist auch synthetisches DME frei von Aromaten und Schwefel und erfüllt die Norm für paraffinische Dieselkraftstoffe. Für ihren alleinigen Einsatz in Dieselmotoren sind ebenso wie bei Fischer-Tropsch-Kraftstoffen entsprechende Freigaben der Motorenhersteller erforderlich[111] (Abschnitt 1.3.3). Ansonsten ähneln die Handhabungsanforderungen von DME jenen von Propan, das in Tanks unter Druck gelagert wird /51/, S. 6. Im Gegensatz zu Dieselfahrzeugen müssen DME-Fahrzeuge öfter betankt werden, da der volumetrische Kraftstoffverbrauch aufgrund des Heizwertunterschieds größer ist und eine Vergrößerung der Kraftstofftanks von Nutzfahrzeugen insbesondere in größeren Fahrzeugflotten kaum in Betracht kommt.
In Mecklenburg-Vorpommern wird gegenwärtig in der benachbarten Region Westmecklenburg bereits eine solche Anlage zur Erzeugung von erneuerbaren Kraftstoffen errichtet (PtX Lübesse). Die Anlage umfasst die Elektrolyse mit einer Anschlussleistung von 2 x 2 MW_{el} und einer Produktionsleistung von bis zu 800 Nm^3/h H_2, die anschließende Methanisierung, ein Gaslager und ein BHKW. Sie soll in dem Gewerbegebiet der Gemeinden Plate und Lübesse entstehen und wurde im Dezember 2021 vom zuständigen Staatlichen Amt für Landwirtschaft und Umwelt Westmecklenburg genehmigt. Die Genehmigung beinhaltet zunächst die Erzeugung und Verflüssigung von synthetischem Erdgas (SNG)[112].
Sofern Betreiber von Nutzfahrzeugflotten nicht planen, in Erweiterung ihrer eigenen Geschäftstätigkeit erneuerbare Kraftstoffe wie DME selbst herstellen, ergeben sich aus der Umstellung einer Nutzfahrzeugflotte von konventionellem Dieselkraftstoff auf Dimethylether (DME) auch keine Anforderungen an ein Betriebshofkonzept, welche über den bereits realisierten Betrieb von Dieselfahrzeugen hinausgehen. Diese Umstellung ist daher weitgehend mit den vorhandenen Betriebshöfen möglich.

Somit werden in der Umstellung von Dieselfahrzeugen die folgenden alternativen Antriebskonzepte berücksichtigt:

- batterieelektrisch angetriebene Nutzfahrzeuge,
- mit gasförmigem Wasserstoff und Brennstoffzellen angetriebene Nutzfahrzeuge sowie
- mit (komprimiertem) Biomethan angetriebene Nutzfahrzeuge.

Des Weiteren wird bei den batterieelektrisch angetriebenen Nutzfahrzeugen angenommen, dass diese ausschließlich außerhalb ihrer Einsatzzeiten über Nacht auf dem Betriebshof geladen werden. Dies bedeutet, dass die Batteriefahrzeuge ihren gesamten Energiebedarf über die Betriebshofladung decken müssen. Dies begründet sich dadurch, dass perspektivisch die Reichweiten von Elektrobussen steigen, sodass in der Anfangsphase auf den Linien installierte Ladeeinrichtungen zum Gelegenheitsladen später wieder obsolet werden könnten. Darüber hinaus können Elektrobusse im Falle einer räumlichen Nähe zwischen den Linien und dem Betriebshof gegebenenfalls auch eine Zwischenladung während des Einsatztages durchführen oder gegen ein anderes Fahrzeug ausgetauscht werden. Dadurch können einerseits die Reichweiten optimiert und andererseits die Netzlast während des Übernachtladens reduziert bzw. optimiert werden /48/, S. 13. Außerdem müssten andernfalls die Ladeeinrichtungen wegen der Kürze der Ein- und Ausstiegszeiten an den Haltestellen erheblich größere Ladeleistungen realisieren können als beim Laden auf dem Betriebshof, zum Beispiel 400 kW anstelle von 150 kW. Zudem ist besonders in den großen Städten wie der Regiopole Rostock der Straßenraum sehr begrenzt und wird durch die Standortanforderungen der Ladeeinrichtungen weiter eingeschränkt (Nähe zu einem geeigneten Stromnetz-Anschlusspunkt). Hinzu

[111] Quelle: https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/interview-e-fuels-pilotanlage/.
[112] Quelle: https://www.stalu-mv.de/wm/Service/Presse_Bekanntmachungen/?id=176249&processor=processor.sa.pressemitteilung.

kommt schließlich, dass Omnibuslinien in ihrem Verlauf gegebenenfalls auch an veränderte Anforderungen oder an die aktuelle Verkehrssituation wie Straßensperrungen bzw. Umleitungen etwa infolge von Baustellen angepasst werden müssen. Die Möglichkeit solcher Anpassungen wird jedoch eingeschränkt, wenn bestimmte Linienführungen durch dort vorhandene Ladepunkte vorgegeben sind.

Betriebshoffläche

Für einen Betriebshof mit einem Bestand von 60 Omnibussen empfiehlt der VDV abhängig von dem Verhältnis zwischen Solo- und Gelenkbussen eine Gesamtfläche von 21.000 m² (Gelenkbus-Anteil ca. 70 Prozent - RSAG) bzw. von 35.000 m² (Gelenkbus-Anteil ca. 10 Prozent - rebus). Diese Fläche kann allerdings bei dichter Bebauung auch unterschritten werden /*79*/, S. 17. Zudem hängt der tatsächliche Flächenbedarf davon ab, in welcher Ordnung die Omnibusse auf dem Betriebshof abgestellt werden, zum Beispiel Block- oder Schrägaufstellung.

Zu dieser Fläche sind aufgrund des anfänglich erforderlichen Mischbetriebs von Diesel- und alternativ angetriebenen Bussen weitere Flächen hinzuzurechnen, welche für die Energieversorgung von Batterie-, Biomethan- bzw. Brennstoffzellenbussen erforderlich sind, also für die Ladeinfrastruktur bzw. für die Biomethan oder Wasserstofftankstellen. Diese Flächen werden in den folgenden Abschnitten quantifiziert.

Zudem sollte ein Betriebshof grundsätzlich über eine bestimmte Anzahl von Ladeeinrichtungen bzw. Ladepunkten verfügen, die für das Laden von batterieelektrischen Pkw genutzt werden können. Diese Notwendigkeit ergibt sich daraus, dass die Betreiber größerer Nutzfahrzeugflotten im Allgemeinen auch über eine bestimmte Anzahl von Pkw verfügen, wobei es sich zunehmend um Elektrofahrzeuge handeln kann. Dies trifft beispielsweise für die Unternehmen der SR-Gruppe zu, wie Abbildung *41*zeigt.

Abbildung 41: Ladeinfrastruktur für betriebseigene Elektro-Pkw bei SR[113]

[113] Foto: Eigene Aufnahme während der Betriebshof-Besichtigung am 23. März 2022.

4.2 Betriebshöfe für batterieelektrische Nutzfahrzeuge

Die bei der Umstellung von Dieselfahrzeugen auf batterieelektrische Nutzfahrzeuge zu erfüllenden Anforderungen werden zunächst von der Anzahl der Fahrzeuge bestimmt, die regelmäßig zu laden sind. Die hierfür auf dem Betriebshof aufzubauende Ladeinfrastruktur orientiert sich an der maximalen Anzahl der gleichzeitig abgestellten bzw. zu ladenden Batteriefahrzeuge. Weitere wichtige Bestimmungsgrößen sind die Art der Ladeeinrichtungen, die Ladeleistung der zugehörigen Ladepunkte und das Lademanagement.

Energiebedarf und Ladeleistung

Bei der Wahl der Ladeleistung sind Zusammenhänge besonders zwischen dem vorgesehenen Einsatzgebiet der batterieelektrischen Omnibusse (Reichweite, Energiebedarf je Fahrtkilometer), ihrer Batteriegröße und der Ladedauer bedeutsam. Abbildung *42* fasst die zentralen Einflussgrößen bei der Parameterwahl eines batterieelektrischen Antriebssystems von Omnibussen zusammen. Die in der Abbildung rot gestrichelten Linien verdeutlichen beispielhaft, wie sich unterschiedliche Ladeleistungen bei verschiedenen Ladedauern und Energiebedarfen je Kilometer des Omnibusses auf dessen tägliche Reichweite auswirken.

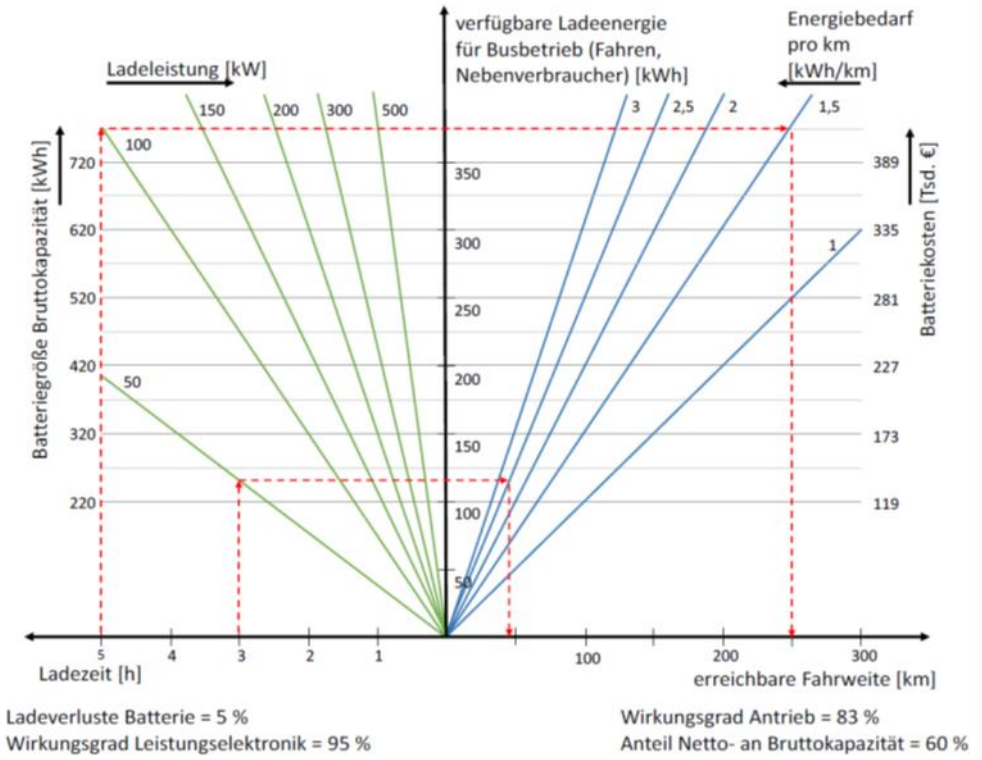

Abbildung 42: Betriebliche Auslegungsproblematik bei batterieelektrischen Omnibussen[114]

Während in der Anfangsphase der Umstellung von Fahrzeugflotten erst wenige batterieelektrische Nutzfahrzeuge zu laden sind und insoweit die auf einem Betriebshof bereits vorhandene Infrastruktur zur Stromversorgung ausreichen kann, entsteht bzw. wächst mit der Zahl der Fahrzeuge zunehmend auch die Notwendigkeit, sowohl die vorhandene Infrastruktur als auch das Lademanagement anzupassen.

Gemäß VDV-Schrift 825 sollte bei der Auswahl und Konfiguration der Ladetechnik die gesamte Wirkungsgradkette zwischen Einspeisung Mittelspannungsanlage, Transformatoren, Gleichspannungsumrichter, Kabelverlegung und Anschlussstelle zum Bus betrachtet werden. Dabei sind auch Wirkungsgradverluste bei Nachladung in Teilbereichen der maximalen Ladeleistung zu berücksichtigen. In die Wirkungsgradkette sind auch Hilfsanlagen wie Lüftung, Klimatisierung und Überwachungssysteme einzubeziehen.

114 Quelle: /37/, S. 27.

Der Eigenenergiebedarf eines Ladepunktes während des Ladebetriebs sollte 5 Prozent der Nennladeleistung nicht überschreiten /*48*/, S. 28.

Der Gesamtleistungsbedarf für das nächtliche Vollladen einer batterieelektrischen Omnibusflotte auf einem Betriebshof kann durch den Einsatz eines Lademanagements deutlich gesenkt werden. Dessen wesentliche Aufgabe besteht zum einen in der Vermeidung von Lastspitzen im Leistungsbezug für die Ladeeinrichtungen, welche beim gleichzeitigen Laden vieler Fahrzeuge auftreten können (Abschnitt 1.4.1). Zum anderen sorgt das Lademanagement dafür, dass die Fahrzeugbatterien möglichst schonend, also innerhalb eines definierten Zeitraums so langsam wie möglich geladen werden. Dazu berücksichtigt das Lademanagement unter anderem den Ladezustand des Batteriebusses (SOC) bei seiner Rückkehr auf den Betriebshof, den Zielladezustand bei Abfahrt[115], die voraussichtliche Standzeit des Busses an dem Ladepunkt, die aktuelle Auslastung der Netzanschlussleistung (optimale Aufteilung der verfügbaren Leistung auf alle angeschlossenen Batteriebusse) und den aktuellen Strompreis bzw. zukünftig verfügbare zeit- und lastvariable Stromtarife. Ein Beispiel für ein solches System ist das Lade- und Energiemanagementsystem ChargePilot von The Mobility House, welches bereits von verschiedenen Verkehrsunternehmen in Deutschland eingesetzt wird /*90*/. Das System kann schon bei drei Batteriebussen und einer Ladeleistung von jeweils 150 kW die Spitzenlast von 450 auf 300 kW senken. Damit das Lademanagement die angestrebten Optimierungsziele erreichen kann, müssen möglichst viele Batteriebusse gleichzeitig an ihre Ladepunkte angeschlossen sein. Ohnehin sollte für jeden Batteriebus ein Ladepunkt vorhanden sein, um zu vermeiden, dass das Betriebspersonal im Verlauf der Nacht Batteriebusse umstellen muss.

Für das Laden eines Bestands von 60 Batteriebussen ist näherungsweise eine Anschlussleistung von 2 bis 3 MVA erforderlich /*78*/, S. 12.

Flächenbedarf

Auch der Flächenbedarf wird wesentlich von der Art der Ladeinfrastruktur mitbestimmt. Hierzu werden folgende weitere Basisannahmen festgelegt:

- Zum Laden auf den Betriebshöfen kommt die standardisierte Steckerlösung (Combo2/CCS-Stecker, 150 kW) zum Einsatz[116].
- Für jeden Batteriebus wird ein Ladepunkt mit einer Ladeleistung von 150 kW vorgesehen. Gegebenenfalls kann die Zahl der Ladepunkte gegenüber der Zahl der Batteriebusse geringfügig reduziert werden, beispielsweise um 5 Prozent - bei 60 Batteriebussen sind dann 57 Ladepunkte zu installieren. Die Anzahl der Ladeeinrichtungen ist entsprechend geringer, da mehrere Ladepunkte von einer Ladeeinrichtung gesteuert werden können. Die Ladepunkte können gemäß Abbildung *17* (Abschnitt 1.4.1) beispielsweise unter den Dächern bzw. an den Wänden der Abstellhallen bzw. Carports untergebracht werden, sodass die Ladekabel von den Decken direkt zu den Ladeplätzen geführt werden. Dadurch können sie kurz gehalten und sicher geführt werden und es entsteht hierfür auch kein zusätzlicher Flächenbedarf. Somit hängt der Flächenbedarf für die Ladeinfrastruktur nur noch von der Anzahl der erforderlichen Ladeeinrichtungen und von dem Flächenbedarf der einzelnen Ladeeinrichtung ab. Bei geeigneter Konstruktion der Abstellhallen bzw. Carports können allerdings auch diese und somit die gesamte Ladetechnik in Technikzentralen auf deren Dächern untergebracht werden.
- Der Betrieb der Ladeinfrastruktur erfordert gegebenenfalls eine Verstärkung des Stromnetzanschlusses. Hierfür kann bei einer Leistung von 5 MW grob eine Fläche von 10 m x 10 m = 100 m² zugrunde gelegt werden (eine aus Übergabestation und Transformator bestehende Mittelspannungsanlage hat einen Flächenbedarf von 14 bis 86 m², worin eine als Kompaktstation ausgeführte Transformatorstation eine Fläche von ca. 5 bis 8 m² zuzüglich der Zuwegung in Anspruch nimmt /*92*/, S. 57).

Aufgrund der notwendigen langen Ladezeit von Batteriebussen auf dem Betriebshof kann es gegebenenfalls erforderlich sein, zum Laden auch die Stauzeit zwischen dem Fahrfertigmachen und dem Ausrücken der Busse zu nutzen. Voraussetzung hierfür ist allerdings, dass der Staubereich des Betriebshofs ebenfalls mit Ladeinfrastruktur ausgestattet wird /*48*/, S. 31.

---

115 Im Normalfall wird der Batteriebus bis zum maximal möglichen Ladezustand geladen

116 Bei der 2-Stecker-DC-high-Ladung beträgt die maximale Ladespannung 850 V, der maximale Ladestrom 200 A und die Maximalladeleistung 170 kW (IEC 62196-3).

Für den Betrieb von Batteriebussen empfiehlt der VDV die Einrichtung einer Havariefläche, auf der beispielsweise ein Fahrzeug mit einer mechanischen Beschädigung im Batteriebereich für einen gewissen Zeitraum („Quarantäne") abgestellt werden kann. Diese Fläche sollte ausreichend große Abstände zu anderen Fahrzeugen und Gebäuden aufweisen (50 m) und entsprechend gekennzeichnet sein /*48*/, S. 34/35.

Des Weiteren ist ein Lagerbereich für die Lagerung von Fahrzeugbatterien erforderlich. Dieser sollte räumlich und baulich getrennt und feuerbeständig sein. Entsprechend den Herstellerhinweisen kann es erforderlich sein, auch diese Batterien gelegentlich nachzuladen. Ergänzend hierzu ist eine Lagermöglichkeit auf dem Betriebshof für defekte bzw. beschädigte Batterien vorzusehen. Dafür kann beispielsweise ein Freiluft-Stellplatz auf dem Betriebshof eingerichtet werden, welcher brand- und arbeitsschutzrechtliche Anforderungen erfüllt. Dies kann auch die zuvor beschriebene Havariefläche sein /*48*/, S. 35.

Elektrotechnische Infrastruktur für das Laden/Netzanschluss

In dem Maße, wie sich der Bestand an Batteriebussen auf dem Betriebshof der oben festgelegten Flottengröße von 60 Bussen nähert, steigt auch der elektrische Leistungsbedarf für das nächtliche Vollladen der Fahrzeugbatterien. Dabei wird der Ladeleistungsbedarf schon bei relativ wenigen Batteriebussen den sonstigen Leistungsbedarf der auf dem Betriebshof vorhandenen Verbraucher erreichen bzw. ihn übersteigen. Demzufolge muss der Netzanschluss des Betriebshofs an den zu erwartenden Leistungsbedarf angepasst werden. Dabei kann zusammen mit dem Verteilnetzbetreiber geprüft werden, ob diese Anpassung in einem Schritt oder in mehreren Leistungsstufen erfolgen kann bzw. sollte.

In einer einfachen Abschätzung würde sich bei einem Bestand von 60 Batteriebussen und einer Ladeleistung von 150 kW ein (Wirk-)Leistungsbedarf von 9,0 MW ergeben. Ein so bemessener Netzanschluss wäre allerdings deutlich größer als gegebenenfalls erforderlich, sofern ein Teil der Batteriebusse zeitversetzt geladen werden kann und diese zudem je nach Ladeverfahren nicht über die gesamte Ladedauer mit der gleichen Ladeleistung geladen werden.

Daher ist eine genauere Bestimmung des zu erwartenden Leistungsbedarf erforderlich: Dieser hängt von einer Vielzahl von Parametern ab und kann insoweit nur auf der Grundlage von Szenariobetrachtungen genauer abgeschätzt werden. Für diese Betrachtungen sind zunächst die Umlauflängen der Batteriebusse bereitzustellen und Annahmen zu ihren Batteriekapazitäten zu treffen. Weitere wichtige Parameter sind die zu erwartenden spezifischen Energieverbräuche der Fahrzeuge auf den Buslinien. Aus diesen Parametern kann der Energiebedarf der einzelnen Batteriebusse bestimmt und schließlich zu dem Gesamtenergiebedarf aller Batteriebusse aufsummiert werden, die über Nacht auf dem Betriebshof vollzuladen sind. Diese Berechnungen sind gegebenenfalls für mehrere Typtage durchzuführen, um sicherzustellen, dass der ermittelte Leistungsbedarf sowohl den höheren Energieverbrauch der einzelnen Fahrzeuge im Winter als auch den höheren Gesamtenergieverbrauch im Sommer aufgrund einer höheren Fahrplandichte berücksichtigt. Aus dem so ermittelten Gesamtenergieverbrauch und aus den Aufenthaltsdauern der Batteriebusse auf dem Betriebshof, welche sich aus den Ein- und Ausrückzeiten abzüglich von Servicezeiten ableiten lassen, ergeben sich die Energiemengen, welche in bestimmten Zeitabschnitten auf die Batteriebusse zu übertragen sind (verfügbare Ladezeitfenster). Sie bestimmen die erforderlichen Ladeleistungen.

Bei der leistungsmäßigen Dimensionierung des Netzanschlusses eines Betriebshofs mit Batteriebussen ist zusätzlich zur maximalen Ladeleistung während des nächtlichen Vollladens der Busse mit einem Sicherheitszuschlag von 15 bis 20 Prozent noch der sonstige Leistungsbedarf zu berücksichtigen, welcher aus dem Betrieb von Werkstätten, Waschanlage, Beleuchtung etc. resultiert.

Den möglichen Aufbau der elektrotechnischen Infrastruktur für einen großen Betriebshof für Batteriebusse zeigt Abbildung *43*. Sie ist allerdings nur teilweise auf dem Betriebshof selbst installiert (rote Grenzlinie). Der Betriebshof ist über zwei redundante Transformatoren mit dem Netz verbunden. Das Mittelspannungsnetz innerhalb des Betriebshofs umfasst vier 20 kV-Ringe. Ein Ring ist für die Notstromversorgung (10-kV-Netz) und den Eigenverbrauch (Verwaltungsgebäude und Werkstatt) vorgesehen. Die übrigen drei Ringe sind mit den Abstellhallen bzw. Carports verbunden. Diese verfügen über vier Module mit jeweils einem Mittelspannungstransformator und 10 Schnelllade-DC-Ladestationen. Dies entspricht einer Gesamtkapazität von 40 Batteriebussen je Carport und 240 Bussen auf dem Betriebshof. Für eine Kapazität von 60 Batteriebussen wäre demnach näherungsweise Wirkleistungsbedarf von 4 bis 5 MW zugrunde zu legen.

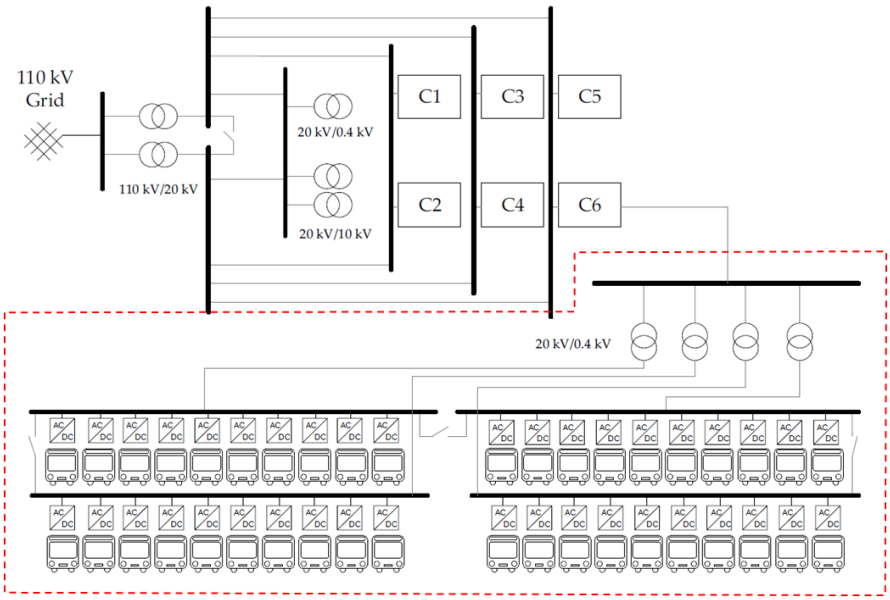

Abbildung 43: Elektrotechnische Infrastruktur für einen großen Betriebshof für Batteriebusse[117]

Die Leistungsbedarfe für das Laden von Batteriebussen im Bereich von 0,1 bis 2 MVA können im Allgemeinen aus dem 10-kV- oder aus dem 20-kV-Mittelspannungsnetz gedeckt werden. Ist der Leistungsbedarf größer, muss der Anschluss gegebenenfalls an das Hochspannungsnetz erfolgen /*55*/, S. 25. In der Regiopolregion Rostock werden die Mittelspannungsnetze mit einer Spannung von 20 kV und in einigen Bereichen mit einer Spannung von 30 kV betrieben (WEMAG Netz GmbH). Die Netzbetreiber veröffentlichen auf ihren Webseiten „Technische Anschlussbedingungen" für den Anschluss an die Nieder-, Mittel- bzw. Hochspannungsnetze. Letztlich kann jedoch nur der örtliche Verteilnetzbetreiber auf der Grundlage von Netzberechnungen prüfen und bewerten, wie eine Verbrauchsanlage mit einer größeren Leistung in seinem Netz angeschlossen werden kann.

4.3 Betriebshöfe für Wasserstoff-Nutzfahrzeuge

Die Anforderungen an den Betriebshof, welche aus der Umstellung auf Wasserstofffahrzeuge erwachsen, hängen zunächst von der Fahrzeugart ab: Plug-in-Brennstoffzellenbusse erfordern neben der Möglichkeit der Betankung mit Wasserstoff auch eine entsprechende Ladeinfrastruktur. Sie muss neben dem Laden auch eine Vorkonditionierung der fahrzeugeigenen Systeme ermöglichen, zu denen beispielsweise das Thermomanagement von Fahrzeug und Batterie gehört. Des Weiteren hängen die Anforderungen von der Betankungsart ab, also davon, ob die Fahrzeuge mit komprimiertem Wasserstoffgas (CGH_2) oder mit Flüssigwasserstoff (LH_2) zu betanken sind. Ein dritter Einflussfaktor besteht in der Entscheidung, ob der Wasserstoff angeliefert oder in einer eigenen Elektrolyseanlage auf dem Betriebshof erzeugt werden soll.

Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass Wasserstoff-Nutzfahrzeuge in der Regiopolregion Rostock mit komprimiertem Wasserstoff betrieben werden, welcher von einem externen Wasserstofferzeuger mit einem CGH_2-Trailer angeliefert wird.

Auf dem rebus-Betriebshof in Güstrow beispielsweise kommen als Lieferant und gegebenenfalls als Betreiber einer Wasserstofftankstelle neben der Apex Teterow GmbH, welche in der nahegelegenen Stadt Laage grünen Wasserstoff erzeugt, perspektivisch auch die in der Region angesiedelten Stadtwerke sowie andere, in der regionalen Wasserstoffwirtschaft aktive Energieunternehmen in Betracht.

[117] Quelle: /*91*/, modifiziert. Die Abbildung zeigt die Infrastruktur des Bus-Depots Alsterdorf der Hamburger Hochbahn AG. Die Gesamtkapazität der dargestellten Infrastruktur ist auf 240 Batteriebusse mit einem Spitzenleistungsbedarf von 17 MW ausgelegt. Aufgrund dieses hohen Strombedarfs ist der Betriebshof an das 110-kV-Hochspannungsnetz angeschlossen.

Wasserstoffbedarf und Wasserstofftankstelle

Reine 12-m-Brennstoffzellenbusse verfügen typischerweise über eine Lithium-Ionen-Batterie mit einer Kapazität von ca. 30 kWh sowie über einen Wasserstofftank mit einer Kapazität von ca. 40 kg Wasserstoff. Die Reichweiten betragen 350 bis 400 km. Im Durchschnitt werden 8,5 bis 10,5 kg/100 km Wasserstoff verbraucht. Je nach Einsatzgebiet (SORT 1 bis SORT 3) kann der tatsächliche Energieverbrauch um 20 bis 30 Prozent abweichen, wobei er innerstädtisch am höchsten ist (SORT 1). Im Energieverbrauch unterscheiden sich des Weiteren die Sommer- (Kühlen[118]) und Wintermonate (Heizen) um bis zu 20 Prozent von den Übergangsmonaten eines Jahres. Da Gelenkbusse größer sind als Standardbusse, sind auch der Energieverbrauch und dementsprechend die Batterie und der Tank etwas größer /*84*/, S. 11. Legt man einen durchschnittlichen Wasserstoffverbrauch von 9,5 kg/100 km für Standardbusse und von 13,2 kg/100 km für Gelenkbusse sowie eine maximale Umlauflänge von 200 km/d zugrunde, ergibt sich für einen Bestand von 60 Brennstoffzellenbussen mit einer Sicherheitsreserve von 25 Prozent ein Tagesverbrauch von ca. 1.500 kg/d Wasserstoff, wenn dieser wie gegenwärtig bei rebus überwiegend aus Solobussen und nur aus wenigen Gelenkbussen zusammengesetzt ist. Dieser Tagesverbrauch stimmt gut mit dem in Abbildung *20* (Abschnitt 1.4.2) dargestellten Bedarf überein.

Während eine Wasserstofftankstelle für Omnibusse auf ein Druckniveau bei der Betankung von 350 bar auszulegen ist, erfordert die Betankung von Entsorgungsfahrzeugen, wie sie beispielsweise Faun gemäß seinem BluePower-Konzept anbietet, ein Druckniveau von 700 bar (Abschnitt 1.3.2).

Wie erwähnt, hatte Faun auf der Grundlage eines 2021 in Rostock durchgeführten Fahrzeugtests empfohlen, Abfallsammelfahrzeuge für die Regiopole Rostock gemäß seinem BluePower-Konzept mit Wasserstoff anzutreiben (Abschnitt 2.3.2). Außerdem sollten die Fahrzeuge mit einer 85-kWh-Fahrzeugbatterie ausgestattet sein, die bei Bedarf über Nacht nachgeladen werden sollte. Dementsprechend müsste ein Betriebshof für Wasserstoff-Nutzfahrzeuge in der Stadtentsorgung neben der Wasserstoff-Infrastruktur ebenfalls mit einer entsprechenden Ladeinfrastruktur ausgestattet sein. Diese muss Ladeeinrichtungen mit einer ausreichenden Anzahl von Ladepunkten umfassen. Eventuell können die Fahrzeuge auch mit OBC-Technik ausgestattet werden.

Flächenbedarf

Der Flächenbedarf für den Betrieb von Wasserstofffahrzeugen setzt sich aus dem Flächenbedarf für die Wasserstoff-Bevorratung sowie aus dem Flächenbedarf für die Wasserstoff-Tankstelle zusammen. Er wird in beiden Fällen von der Anzahl der Wasserstofffahrzeuge auf dem Betriebshof bestimmt, welche oben mit 60 Fahrzeugen festgelegt wurde.

Zu diesem Flächenbedarf für die Wasserstoffinfrastruktur kommt der Flächenbedarf für die Ladeinfrastruktur zum Laden von plug-in-Wasserstofffahrzeugen und für einen gegebenenfalls zu verstärkenden Netzanschluss des Betriebshofs. Diese Flächenbedarfe sind im vorhergehenden Abschnitt quantifiziert und können auf Betriebshöfe für Wasserstoff-Nutzfahrzeuge übertragen werden.

Für den oben abgeschätzten Wasserstoffverbrauch von 1.500 kg/d ergibt sich gemäß Abbildung *20* und unter Berücksichtigung von Abbildung *21* (Abschnitt 1.4.2) ein Flächenbedarf für die Wasserstofftankstelle von ca. 800 bis 1.000 m², wobei eine gasförmige Lagerung des Wasserstoffs zugrunde gelegt ist.

Abbildung *44* zeigt beispielhaft zwei mögliche Anordnungen einer Wasserstofftankstelle auf dem Betriebshof Güstrow der rebus Regionalbus Rostock GmbH. Zum einen könnten der Wasserstoffspeicher und die Tankstelle im hinteren Bereich des Betriebshofs angeordnet werden (in der Abbildung rechts dargestelltes rotes Viereck - dessen Fläche beträgt ca. 500 m²). Zum anderen könnte gegebenenfalls eine geteilte Anordnung gewählt werden (im linken Teil der Abbildung), wobei die Tankstelle vor der bereits bestehenden Dieseltankstelle platziert werden könnte. Für den zugehörigen Wasserstoffspeicher könnten dann die beiden Standorte (1) bzw. (2) in Betracht kommen. Bei der Standortwahl ist zu berücksichtigen, dass ausreichende Sicherheitsabstände zu Wohnbebauung und anderen schützenswerten Einrichtungen einzuhalten sind. Dies kann die Anzahl der möglichen Standorte auf einem Betriebshof stark einschränken /*48*/, S. 36.

[118] Der Kühlbedarf umfasst die Kühlung der Traktionsbatterie sowie die Klimatisierung des Fahrgastraums.

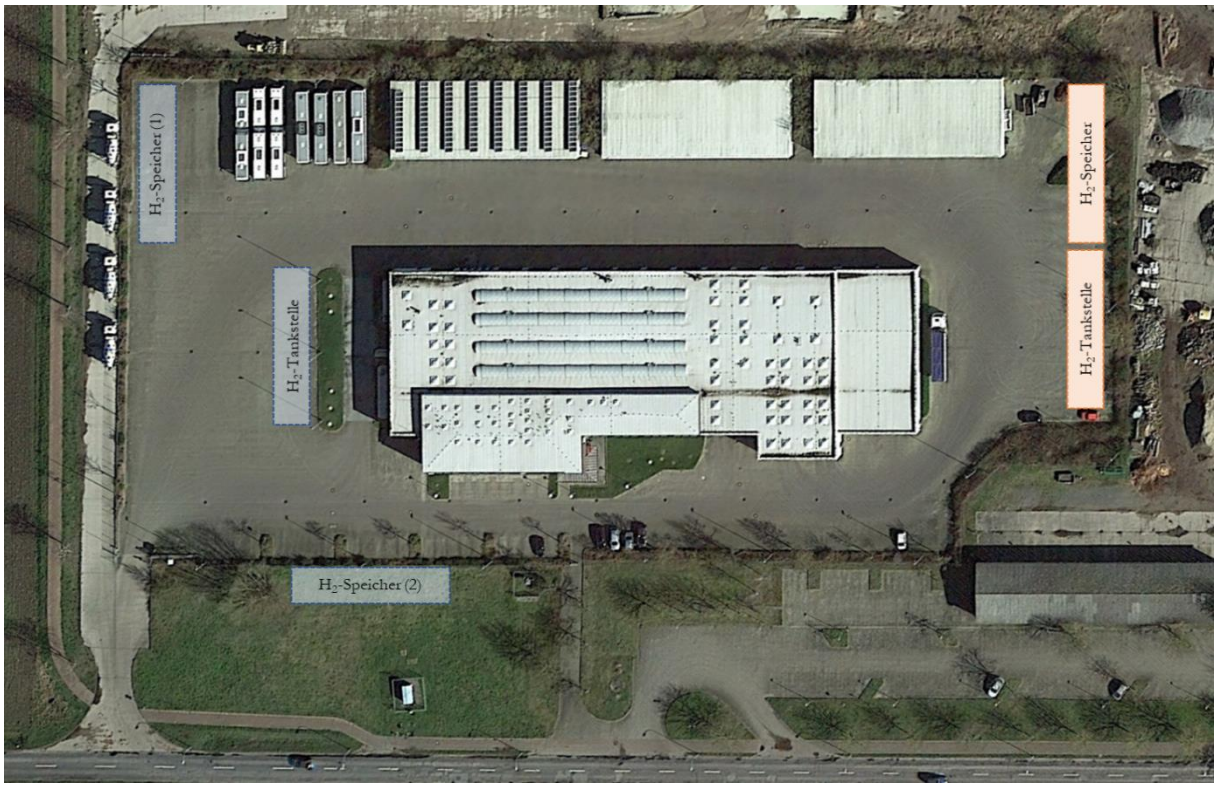

Abbildung 44: Mögliche Anordnungen der Wasserstofftankstelle rebus-Betriebshof Güstrow[119]

4.4 Betriebshöfe für Biomethan-Nutzfahrzeuge

In dem Betriebshofkonzept für Biomethan-Nutzfahrzeuge wird davon ausgegangen, dass die mit Gasmotoren ausgestatteten Omnibusse mit Biomethan in Gasform (CBM) betankt werden. Dieses wird von der Biomethan-Tankstelle auf einen Druck von 200 bis 250 bar gebracht und den Fahrzeugen zugeführt. Sofern sich die Biomethan-Erzeugungsanlage nicht in unmittelbarer Nachbarschaft zum Betriebshof befindet und mit diesem über eine Gasleitung verbunden ist, muss für die Betankung bilanzielles Biomethan eingesetzt werden. Dieses wird von der Erzeugungsanlage an ihrem Standort in das Erdgasnetz eingespeist. Von der Tankstelle auf dem Betriebshof wird dann das Gas aus dem Erdgasnetz entnommen.

Mit dem Betrieb von Biomethan-Nutzfahrzeugen verbinden sich aufgrund der Brand- und Explosionsgefahr besondere Anforderungen. Diese entsprechen im Wesentlichen den Anforderungen, die auch beim Betrieb von Omnibussen mit Erdgasantrieb zu erfüllen sind.

Da Biomethan ein hinsichtlich der relevanten Eigenschaften dem Erdgas vergleichbarer Energieträger ist, handelt es sich bei den auf dem Betriebshof zu errichtenden Anlagen ebenfalls um überwachungsbedürftige Anlagen. Dies bedeutet, dass neben der Druckbehälterverordnung (DruckbehV) die Technischen Regeln Druckbehälter (TRB), Druckgase (TRG) und Rohrleitungen (TRR) zu beachten sind, welche die Druckbehälterverordnung konkretisieren.

Auch für die Abstellhallen, in denen Biomethan-Busse abgestellt werden sollen, gelten die gleichen Anforderungen wie für Abstellhallen zur Unterbringung von Erdgasbussen. Allerdings enthält die hier einschlägige Landes-Garagenverordnung Mecklenburg-Vorpommern[120] keine auf einen bestimmten Kraftstoff oder energieträgerbezogenen Vorgaben, sondern lediglich solche, welche von der Größe einer Garage abhängen.

119 Bildquelle: Google Earth Pro (Bildaufnahmedatum: 2020).

120 Verordnung über den Bau und Betrieb von Garagen und Stellplätzen (Garagenverordnung – GarVO M-V) vom 8. März 2013.

Für das Bewegen von Fahrzeugen mit defekten Gasanlagen ist das Vorhalten eines geeigneten Schleppfahrzeuges notwendig.

Falls an der Betriebshoftankstelle nicht nur Omnibusse oder Lkw, sondern auch Pkw mit Biomethan betankt werden sollen, müssen hierfür kombinierte Zapfsäulen installiert werden, da sich die für Kupplungen von Nutzfahrzeugen und Pkw unterscheiden.

4.5 Wartung und Instandhaltung

Bei der Anpassung der Werkstattkapazitäten ist zu berücksichtigen, dass in der Übergangsphase nicht nur Dieselfahrzeuge und Nutzfahrzeuge mit einer alternativen Antriebsart, sondern solche mit diversen Antriebsarten zeitgleich zu bearbeiten sind, wie beispielsweise bei der RSAG Diesel-, Batterie- und Biomethanbusse.

Über die Art der alternativen Antriebe hinaus hängt die Gestaltung und die Ausrüstung der Werkstätten, also besonders ihre Kapazität, die Art bzw. der Umfang der ausführbaren Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten und die dafür erforderlichen Ausrüstungen wesentlich von der Instandhaltungstiefe ab, welche der Betreiber der betreffenden Nutzfahrzeuge durchzuführen beabsichtigt.

Um die Sicherheit des Werkstattpersonals bei der Wartung, Instandhaltung und Reparatur von Nutzfahrzeugen mit alternativen Antrieben jederzeit zu gewährleisten, muss zum einen das Personal, welches mit den Fahrzeugen und den Infrastrukturen befasst ist, über die besonderen Gefahren im Umgang unterwiesen und gegebenenfalls geschult werden. Zum anderen müssen die Werkstätten je nach Art der alternativen Antriebe mit zusätzlichen Sicherheitseinrichtungen ausgestattet werden.

Für die Auslegung bzw. Anpassung der Werkstattkapazitäten müssen generell die Angaben der Fahrzeughersteller wie Abmessungen oder Masse der Fahrzeuge berücksichtigt werden, da beispielsweise Batteriebusse sowohl höher als auch schwerer sind als konventionelle Busse. Sie erfordern gegebenenfalls zusätzliche Arbeitsmöglichkeiten sowie je nach Antriebsarten und in Abhängigkeit von der geplanten Instandhaltungstiefe weitere Werkstattausrüstungen sowie Prüf- und Diagnosegeräte. Des Weiteren müssen die Anforderungen der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung beispielsweise hinsichtlich des Arbeitens unter Spannung erfüllt werden.

Die Technischen Regeln für Betriebssicherheit (TRBS) und die Technische Regeln für Gefahrstoffe (TRGS) der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) mit Sitz in Dortmund enthalten eine Vielzahl von Regeln und Erkenntnissen, welche dem Stand der Technik, der Arbeitsmedizin und der Arbeitshygiene entsprechen[121].

<u>Batterieelektrische Nutzfahrzeuge</u>

Im Vergleich zur Wartung und Instandhaltung von Bussen mit Verbrennungsmotoren kann sich der Wartungsaufwand durch die Einführung von Batteriebussen insoweit verringern, als an die Stelle von Verbrennungsmotor und Getriebe ein Elektromotor tritt und der elektrische Antriebsstrang im Vergleich zum Dieselantrieb als weniger komplex eingeschätzt wird. Er ist insgesamt weniger wartungsaufwendig, da Elektromotoren und Batterien als solche nahezu wartungsfrei sind. Allerdings sind die Fahrzeugbatterien bei vielen Batteriebussen auf dem Fahrzeugdach verbaut. Daher müssen die Werkstätten für die Wartung und Instandhaltung von Batteriebussen gegebenenfalls mit neuen Ausrüstungen, beispielsweise mit Dacharbeitsbühnen und Dachkränen ausgestattet werden.

Des Weiteren ist grundsätzlich zu beachten, dass die Werkstätten über die Möglichkeiten verfügen müssen, Arbeiten an Hochvoltsystemen auszuführen. Gegenüber der herkömmlichen Bordnetz-Spannung von 24 V bei Omnibussen mit Dieselantrieb beträgt die Speisespannung der Antriebsmotoren bis zu 600 V DC. Dies erfordert beispielsweise HV-Spezialwerkzeuge sowie entsprechend ausgelegte Prüf- und Messgeräte. Zur Instandsetzung von Hochvolt-Komponenten sollte gegebenenfalls ein separater Werkstattbereich vorgesehen werden.

[121] Die Technischen Regeln sind verfügbar unter: https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Rechtstexte-und-Technische-Regeln_node.html.

Wasserstofffahrzeuge und Wasserstofftankstellen

Für die Wartung und Instandhaltung von Wasserstoffbussen müssen die Werkstätten neue Anforderungen erfüllen und bestimmte Wartungsarbeiten auch häufiger durchführen. Zudem stellt auch die Wartung und Instandhaltung der Tankstellentechnik höhere Anforderungen als jene von Dieseltankstellen.

Dabei resultieren die höheren Anforderungen und der höhere Aufwand weniger aus den gegenüber Dieselbussen veränderten Komponenten des Antriebssystems von Brennstoffzellenbussen[122]: Sowohl die Brennstoffzellen als auch Batterien und Elektromotoren sind inzwischen nahezu wartungsfrei bzw. werden bei Bedarf komplett ausgetauscht. Die höheren Anforderungen und Aufwendungen resultieren vielmehr aus den besonderen Gefährdungen, die im Umgang mit dem Wasserstoff entstehen können. Darüber hinaus sind konstruktionsbedingt kürzere Wartungsintervalle einzuhalten. Diese können beispielsweise darin bestehen, regelmäßige Druck- bzw. Dichtheitsprüfung mit geeigneten Lecksuchgeräten der wasserstoffführenden Leitungen durchzuführen oder die auf dem Dach eines Brennstoffzellenbusses installierten Komponenten wie Wasserstoffspeicher und Traktionsbatterie anzuheben. Wasserstofffahrzeuge erfordern zudem eine turnusmäßige Erneuerung der Druckbehälter, wobei die Erneuerungsabstände von dem Werkstoff des Druckbehälters abhängig sind.

Für Arbeiten an Wasserstofffahrzeugen wie Wartung und Instandhaltung sind Gefährdungsbeurteilungen zu erstellen, aus denen angemessene Schutzmaßnahmen abzuleiten sind. Explosionsgefährdete Bereiche sind nach Häufigkeit und Dauer des Auftretens von gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre in Zonen zu unterteilen. Für Wasserstofffahrzeuge sind folgende Zonen bedeutsam:

- Zone 0: Eine gefährliche explosionsfähige Atmosphäre als Gemisch aus Luft und brennbaren Gasen, Dämpfen oder Nebeln ist ständig, über lange Zeiträume oder häufig vorhanden. Die Zone 0 ist praktisch nur in den Wasserstoffkomponenten der Fahrzeuge sowie unmittelbar an deren Austrittsöffnungen vorhanden.
- Zone 1: Bei Normalbetrieb kann sich gelegentlich eine gefährliche explosionsfähige Atmosphäre als Gemisch aus Luft und brennbaren Gasen, Dämpfen oder Nebeln bilden. Die Zone 1 ist beispielsweise bei den betriebsmäßig undichten LH_2-Fahrzeugen und -Anlagen ohne Boil-off-System oberhalb der Öffnungen der Abblaseleitungen vorhanden, da hier im Normalbetrieb Wasserstoff austritt.
- Zone 2: Bei Normalbetrieb tritt eine gefährliche explosionsfähige Atmosphäre als Gemisch aus Luft und brennbaren Gasen, Dämpfen oder Nebeln normalerweise nicht oder nur kurzzeitig auf. Zone 2 umfasst beispielsweise die Wasserstoffwerkstatt.

Anlagen und Räume, in denen Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten an Wasserstofffahrzeugen durchgeführt werden, müssen über geeignete Lüftungs- und Absauganlagen verfügen[123]. Gasbehälter müssen vor der Durchführung von Schweiß- oder Trennarbeiten vollständig entleert werden.

Sofern Wasserstofffahrzeuge den Zulassungsvorschriften entsprechen und nach TRBS 3151 „technisch dicht“ sind und in der Gasanlage keine aktuellen Fehler angezeigt werden, können die Fahrzeuge problemlos in geschlossenen Hallen abgestellt werden */48/*, S. 23.

Biomethanfahrzeuge

Auch für die Wartung und Instandhaltung von Gasbussen vorgesehene Werkstätten müssen über die allgemeingültigen Anforderungen in Bezug auf Sicherheit und Gesundheitsschutz hinaus zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen ergreifen. Bereits bei den standardmäßigen Arbeiten an Fahrzeugen wie der Wartung der Bremsanlage oder der Räder und Reifen ist sicherzustellen, dass kein Gas austreten kann. Bei Arbeiten an den Gasanlagen sind weitere Sicherheitsvorkehrungen zu treffen.

Im Hinblick auf den Explosionsschutz ist sicherzustellen, dass sich austretendes Gas nicht unter der Werkstattdecke ansammeln und dort ein zündfähiges Gemisch bilden kann. Hierzu müssen die

---

122 Wasserstofffahrzeuge mit Verbrennungsmotoren (ICE) werden, sollten sie marktreif werden, wegen der ungünstigeren Schmierstoffeigenschaften des Wasserstoffs und wegen der höheren Verbrennungstemperaturen komplexere Schmier- und Kühlsysteme als Dieselmotoren erfordern. Diese werden voraussichtlich auch einen höheren Wartungs- und Instandhaltungsaufwand begründen.

123 Weitere Informationen enthält beispielsweise das VdTÜV-Merkblatt 514 „Anforderungen an Wasserstofftankstellen“.

Lüftungsmaßnahmen geeignet sein, das Luftvolumen in der Werkstatt stündlich mindestens dreimal auszutauschen. Dazu kann eine räumliche und lufttechnische Trennung des Gas-Arbeitsbereichs vom sonstigen Werkstattbereich erforderlich sein. Des Weiteren muss der Gas-Arbeitsbereich mit einem Gasdetektor bzw. mit einer Gaswarnanlage ausgestattet sein, um eventuelle Gasfreisetzungen frühzeitig erkennen zu können.

Außerdem muss der betreffende Werkstattbereich beispielsweise mit explosionsgeschützten Arbeitsgeräten ausgestattet sein, sodass Zündquellen wie elektrische Funken, elektrostatische Entladungen, offenes Feuer oder heiße Oberflächen sicher vermieden werden.

Weitere Maßnahmen zum Explosionsschutz enthalten beispielsweise die TRBS 2152 „Technische Regeln für Betriebssicherheit“, die TRGS 720 „Technische Regeln für Gefahrstoffe“ und die TRGS 722 „Vermeidung oder Einschränkung gefährlicher explosionsfähiger Gemische“.

Darüber hinaus können auf bestimmte alternative Antriebe bezogene Leitfäden für Kfz-Werkstätten Hinweise für den Arbeitsschutz und für die Ausstattung von Werkstätten geben, beispielsweise für LNG-Fahrzeuge */83/*.

4.6 Bauliche und genehmigungsrechtliche Anforderungen

Die auf den Betriebshöfen für den Betrieb von Nutzfahrzeugen mit alternativen Antriebskonzepten erforderlichen Infrastrukturen bedürfen gegebenenfalls der Genehmigung.

Da bei der Umstellung von Nutzfahrzeugflotten auf alternative Antriebskonzepte neue spezifische Gefährdungen auftreten, ist bei der Suche nach geeigneten Schutzkonzepten eine einzelfallbezogene Gefahrenanalyse erforderlich */48/*, S. 37.

Erfolgt die Umstellung eines bestehenden Betriebshofs auf den Betrieb mit alternativ angetriebenen Nutzfahrzeugen, ist gemäß §§ 29 ff. Baugesetzbuch (BauGB) zu prüfen, ob eine Nutzungsänderung oder eine bautechnische Veränderung einer baulichen Anlage vorliegt */48/*, S. 37.

<u>Batterieelektrische Nutzfahrzeuge</u>

In Deutschland ist es allein im Jahr 2021 zu drei größeren Bränden auf Omnibus-Betriebshöfen mit erheblichem Sachschaden gekommen, bei denen Batteriebusse betroffen bzw. beteiligt waren. Diese ereigneten sich bei

- der Rheinbahn AG in Düsseldorf im April 2021,
- der ÜSTRA Hannoversche Verkehrsbetriebe Aktiengesellschaft in Hannover im Juni 2021,
- der Stuttgarter Straßenbahnen AG (SSB) im September 2021.

Zwar konnte bei keinem der genannten Brände ein Batteriebus als Ursache nachgewiesen werden, jedoch kommen zumindest Ladevorgänge und Überhitzungen von Fahrzeugbatterien als Ursache in Betracht.

Bei der Gestaltung der Abstellhallen bzw. Carports und Werkstätten für batterieelektrische Nutzfahrzeuge sind daher besonders solche Gefährdungen zu berücksichtigen, die bei Bränden entstehen können. Hierfür sollte auch das Brandschutzkonzept des Betriebshofs weiterentwickelt und mit der Feuerwehr, dem Sachversicherer und dem Bauamt abgestimmt werden/*48/*, S. 33.

<u>Genehmigung von Wasserstofftankstellen</u>

Für die Genehmigung und den Betrieb einer Wasserstofftankstelle ist besonders die Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) bedeutsam, welche den Anlagenbetreiber zur Gewährleistung eines gefahrlosen Betriebs verpflichtet und hierfür Mindestvorschriften für die Sicherheit und den Schutz der Gesundheit enthält. Diese Anforderungen werden für Wasserstofftankstellen in der Technische Regel für Betriebssicherheit 3151 „Vermeidung von Brand-, Explosions- und Druckgefährdungen an Tankstellen und Gasfüllanlagen zur Befüllung von Landfahrzeugen“ (TRBS 3151) konkretisiert. Für Wasserstofftankstellen sind dort besonders die Bau- und Lagerungsbedingungen, der Explosions- und Brandschutz, der Blitzschutz, der Anfahrschutz sowie Abschalteinrichtungen und regelmäßige Prüffristen spezifiziert.

Für Wasserstofftankstellen ist eine Gefährdungsbeurteilung nach der BetrSichV Teil des Genehmigungsverfahrens.

Der Betreiber der Wasserstofftankstelle ist nach BetrSichV zur Erstinbetriebnahme, zum Betrieb und zu wiederkehrenden Prüfungen verpflichtet. Die entsprechende Kontrolle dieser Schritte wird durch eine zugelassene Überwachungsstelle (ZÜS) durchgeführt.

Sofern der auf einem Betriebshof vorzuhaltende Wasserstoff eine Menge von 5 t überschreitet, sind gemäß der 12. BImSch-Verordnung Mindest- bzw. Achtungsabstände zu schutzbedürftigen Einrichtungen wie Schulen und Wohnhäuser nachzuweisen /*48*/, S. 36.

Genehmigung von Biomethan-Tankstellen

Eine Voraussetzung für die Genehmigung und für den Betrieb von Biomethan-Tankstellen besteht in der Gewährleistung der Einhaltung der Druckbehälterverordnung (DruckbehV) sowie der zugehörigen Technischen Regeln /*79*/, S. 65:

- TRG380 - Besondere Anforderungen an Druckgasbehälter, Treibgastanks,
- TRG 406 - Füllanlagen - Anlagen zum Füllen von Druckgasanlagen in Straßenfahrzeugen mit verdichteten Druckgasen, die als Treibstoff oder Brennstoff zu deren Antrieb bzw. Betrieb dienen, Gastankstellen,
- TRB 610 - Druckbehälter - Aufstellung von Druckbehältern zum Lagern von Gasen,
- TRR 100 - Bauvorschriften - Rohrleitungen aus metallischen Werkstoffen.

Insoweit Biomethan-Tankstellen den gleichen Vorschriften unterliegen wie Erdgastankstellen, dürfen diese nur nach einer Prüfung durch einen Sachverständigen in Betrieb genommen werden. Sofern es sich um eine halböffentliche Tankstelle handelt, muss vor der Inbetriebnahme zusätzlich eine Erlaubnis der örtlich zuständigen Arbeitsschutzbehörde eingeholt werden.

Sofern Teile der Gastankstelle nicht im Freien, sondern in Räumen installiert werden, ist für eine ausreichende Belüftung zu sorgen, die unterbrechungsfrei betrieben werden muss, falls keine Gaswarnanlage installiert wird. Es muss zuverlässig vermieden werden, dass sich Gaskonzentrationen von mehr als 20 Prozent der unteren Explosionsgrenze aufbauen können /*79*/, S. 66.

Die ausschließliche Benutzung der Tankstelle durch Befugte ist ebenso sicherzustellen wie die rechtzeitige Prüfung von Behältern durch Sachverständige (Einhaltung von Prüffristen).

Im Falle von Betriebshof-Tankstellen muss sichergestellt sein, dass auch die betriebshofeigenen Werkstätten ausreichend belüftet werden, sofern diese Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten an den Gasanlagen der Tankstelle durchführen (mindestens dreifacher Luftwechsel pro Stunde).

4.7 Versorgungssicherheit

Im ÖPNV aktive Verkehrsunternehmen müssen ein besonderes Augenmerk darauf legen, dass bei der Umstellung ihrer Fahrzeugflotten von Diesel- auf Wasserstoff-, Biomethan- oder DME-Busse die Versorgungssicherheit mindestens jener der Versorgung mit Dieselkraftstoff entspricht.

Eine eigene Wasserstoff- oder DME-Erzeugung vor Ort bietet wegen der Unabhängigkeit von Lieferanten und aktueller Verkehrswegesituationen eine höhere Versorgungssicherheit als bei der Anlieferung.

Zur Gewährleistung einer hohen Versorgungssicherheit sollten gegebenenfalls Reservekapazitäten für die Lagerung von Wasserstoff oder DME in einer geeigneten Größenordnung vorgehalten werden, zum Beispiel zwei durchschnittliche Tankstellen-Tagesverbräuche /*48*/, S. 36.

Darüber hinaus sollten sich bietende Möglichkeiten genutzt werden, um beispielsweise die Zuverlässigkeit der Wasserstofftankstelle durch die Redundanz besonders relevanter technischer Systeme zu erhöhen. Ein Beispiel hierfür ist der Kompressor. Die Notwendigkeit redundanter Komponenten steigt mit der Flottengröße an Wasserstoffbussen an.

Im Hinblick auf die Versorgungssicherheit von Omnibus-Flotten mit Biomethan-Bussen gelten für die Versorgung mit Biomethan ähnliche Anforderungen, wie sie im Zusammenhang mit der Wasserstoffversorgung für Wasserstoffbusse beschrieben wurden.

4.8 Zwischenfazit

Abgeleitet aus den Anforderungen an Betriebshöfe für alternativ angetriebene Nutzfahrzeuge kann das Betriebshofkonzept für kommunale Nutzfahrzeugflotten mit alternativen Antrieben mit seinen drei Varianten wie folgt zusammengefasst werden:

Betriebshofkonzept Dieselkraftstoff/DME (Bestand) – Potentielle Anwender: RSAG, rebus, SR, weitere:

Die bestehenden Betriebshöfe bilden die betriebliche Basis für Dieselfahrzeugflotten. Sie können im Falle einer Umstellung der Nutzfahrzeuge auf erneuerbaren Dieselkraftstoff (DME) ebenso wie die Fahrzeuge weitgehend unverändert weiter betrieben werden.

Betriebshofkonzept Variante 1 Batterie – Potentieller Anwender: RSAG, weitere:

Bestehende Betriebshöfe müssen für die Integration von Batteriebussen mit Ladeinfrastruktur, mit Havarie- und Batterielagerflächen sowie mit Hochvolt- und weiteren Werkstattkapazitäten ausgestattet werden. Bestehende Dieseltankstellen werden solange weiter betrieben, wie noch Dieselbusse vorhanden sind bzw. diese einen wirtschaftlichen Tankstellenbetrieb ermöglichen. In der letzten Phase der Umstellung können die restlichen Dieselbusse gegebenenfalls in öffentlichen Tankstellen betankt werden.

Betriebshofkonzept Variante 2 Wasserstoff – Potentielle Anwender: rebus, SR, weitere:

Bestehende Betriebshöfe müssen für die Integration von Wasserstofffahrzeugen mit der erforderlichen Infrastruktur, insbesondere mit Wasserstofftankstellen und mit Werkstattkapazitäten für Wasserstofffahrzeuge, ausgestattet werden.

Betriebshofkonzept Variante 3 Biomethan – Potentieller Anwender: RSAG, weitere:

Bestehende Betriebshöfe müssen für die Integration von Biomethanbussen mit Gastankstellen sowie Werkstoffkapazitäten ausgestattet werden.

5. Planungs- und Umsetzungskonzept

Im folgenden Abschnitt wird eine Strategie für den „Rollout“ des Betriebshofkonzeptes für alternative Antriebskonzepte in kommunalen Nutzfahrzeugflotten (Abschnitt 4) in der Regiopolregion Rostock beschrieben.

Die Planung der Umstellung kommunaler Nutzfahrzeugflotten auf alternative Antriebe muss die Fahrzeugbeschaffung, den Infrastrukturaufbau sowie den perspektivischen Fahrzeugeinsatz umfassen. Im Rahmen des Infrastrukturaufbaus sind zum einen die auf dem Betriebshof zu errichtenden Infrastrukturen bedeutsam, also Tankstellen, Werkstätten und gegebenenfalls Erneuerbare-Energien-Anlagen sowie Kraftstofferzeugungsanlagen. Zum anderen erfordert die Versorgung der Betriebshöfe bzw. der dort stationierten Nutzfahrzeugflotten ausreichend leistungsfähige Anschlüsse an das Stromnetz sowie gegebenenfalls an das Gasnetz und perspektivisch eventuell auch an ein Wasserstoffnetz. Bei diesen Planungen sind verschiedene Zeithorizonte der Umsetzbarkeit auf den Betriebshöfen der kommunalen Nutzfahrzeugflotten zu berücksichtigen:

- kurzfristig: Werkstätten, kleine Erneuerbare-Energien-Anlagen, Stromnetzanschlüsse in unteren Spannungsebenen,
- mittelfristig: Tankstellen, größere Erneuerbare-Energien-Anlagen, Netzanschlüsse in mittleren Spannungsebenen,
- längerfristig: Eigenerzeugungsanlagen für erneuerbare Kraftstoffe,
- langfristig: Flottenumstellung (Fahrzeugbeschaffung).

Diese Planungen müssen so angelegt sein, dass die für die Flottenumstellung erforderlichen Fahrzeuge und Infrastrukturen zu jedem Zeitpunkt bedarfsgerecht zur Verfügung stehen, um Unter- bzw. Überkapazitäten zu vermeiden, finanzielle Mittel effektiv einzusetzen und die erforderliche Versorgungssicherheit zu gewährleisten.

5.1 Best-Practice-Beispiele

Damit in das Planungs- und Umsetzungskonzept für die Regiopolregion Rostock solche Erfahrungen und Erkenntnisse einfließen können, die in Deutschland bei der Umstellung von kommunalen Nutzfahrzeugflotten bereits gewonnen wurden, wurden diesbezügliche Projekte recherchiert und ausgewertet. Dabei wurden einige dieser Projekte als Best-Practice-Beispiele identifiziert und vertieft analysiert.

Im Ergebnis der durchgeführten Recherche ist zunächst festzustellen, dass es in Deutschland im Bereich des ÖPNV mit Omnibussen bereits eine Vielzahl von Projekten zur Umstellung der Fahrzeugflotten gibt. Das BMVI und das BMU fördern derzeit (2021) 99 Projekte zur Entwicklung, zur Beschaffung und zum Betrieb von knapp 2.000 Linienbussen bei 80 Verkehrsunternehmen[124]. Dabei handelt es sich überwiegend um Batteriebusse, es werden jedoch auch Brennstoffzellenbusse sowie Batterie-Oberleitungsbusse gefördert. Neben der Fahrzeugbeschaffung wird in vielen Projekten außerdem auch der Aufbau der zugehörigen Lade- (LIS)- bzw. H_2-Tankinfrastruktur (H_2-TIS) gefördert /82/. Zu den geförderten Projekten gehört auch das bereits erwähnte Verbundprojekt KLL-MV der Verkehrsgesellschaft Ludwigslust-Parchim mbH und der Rostocker Straßenbahn AG (Abschnitt 2.2.2). Außerdem fördert das BMVI das ebenfalls bereits erwähnte Modellprojekt MIRROR des Verkehrsverbundes Warnow, an dem unter anderem die Regiopole Rostock sowie der Landkreis Rostock beteiligt sind (Abschnitt 1.2).

In den von der Bundesregierung geförderten Projekten mit Batteriebussen überwiegt das Ladekonzept der Nachtladung auf dem Betriebshof deutlich. Dies begründet sich durch die einfachere Realisierbarkeit gegenüber der Gelegenheitsladung, da die benötigte Ladeinfrastruktur ausschließlich auf dem eigenen Betriebshof zu errichten ist. Zudem steht auch in diesen Projekten die Gewinnung von Erfahrungen hinsichtlich der Betriebsplanung und -durchführung im Vordergrund, wobei Batteriebusse zunächst auf kürzeren Umläufen zum Einsatz kommen können, ohne einen Fahrzeugmehrbedarf zu begründen.

[124] Darüber hinaus werden auch von der Europäischen Union Demonstrationsprojekte zur Einführung von Omnibussen mit alternativen Antriebskonzepten gefördert, beispielsweise die JIVE- und JIVE 2-Verbundprojekte, an denen auch Verkehrsunternehmen in deutschen Städten beteiligt sind (https://www.fuelcellbuses.eu/).

Zu den Best-Practice-Beispielen für die Umstellung kommunaler Nutzfahrzeugflotten von Dieselfahrzeugen auf Fahrzeuge mit alternativen Antriebskonzepten können besonders die im Folgenden näher beschriebenen Projekte gezählt werden, die teilweise bereits über mehrjährige und aufgrund der Größe der betreffenden Fahrzeugflotten auch über umfangreiche Betriebserfahrungen verfügen. Weitere Pilotprojekte sind die Leuchtturmprojekte H2Rivers/H2Rhein-Neckar in der Metropolregion Rhein-Neckar und der Einsatz von Wasserstoffbussen bei den Verkehrsbetrieben Hamburg-Holstein (VHH).

Projekt Gemeinsame Beschaffung durch BOGESTRA und HCR – Batteriebusse von BYD Auto

Die Bochum-Gelsenkirchener Straßenbahnen AG (BOGESTRA) und die Straßenbahn Herne-Castrop-Rauxel GmbH (HCR) mit Sitz in Bochum bzw. Herne setzen seit 2020 Batteriebusse auf städtischen Buslinien ein[125]. Als wesentliche Merkmale des Projekts und gewonnene Erfahrungen sind zu nennen /*85*/, /82/, S. 40/41:

- Während BOGESTRA Ladeinfrastrukturen sowohl zur Depotladung auf ihren Betriebshöfen als auch zur Gelegenheitsladung mit 100 bzw. 450 kW installiert hat, lädt HCR ausschließlich im Depot.
- Die ersten ausgelieferten Busse wurde besonders zur Schulung des Fahrdienstpersonals genutzt, indem Mitarbeiter zu Multiplikatoren ausgebildet wurden. So konnte die Einweisung weiterer Mitarbeiter personell auf eine breite Basis gestellt werden, nachdem weitere Batteriebusse ausgeliefert wurden (die Ausbildung von speziellen, nur in Elektrobussen eingesetzten Busfahrern war nicht vorgesehen).
- Die Ausbildung des Werkstattpersonals für die Instandhaltung und Betreuung der Batteriebusse und der Ladeinfrastrukturen erfolgte unter anderem durch Herstellereinweisungen sowie durch eine Ausweitung von Hochvoltqualifizierungen. Darüber hinaus erfolgten Schulungen mit Rettungskräften.
- Die Batteriebusse und die Ladeinfrastrukturen erfüllten im praktischen Einsatz die an sie gesetzten Erwartungen. Im Februar 2021 wurden auch über mehrere Tage anhaltende Minustemperaturen, teilweise unter - 10 °C, bewältigt.
- Zur Gewinnung von weiteren Erfahrungen werden die Batteriebusse inzwischen auch auf anderen Linien mit unterschiedlichen Einsatzzeiten, wechselnden Rahmenbedingungen wie Verkehrslage, Topographie und Fahrgastströme eingesetzt. Eine Evaluierung der Batteriebusse soll innerhalb der ersten drei Betriebsjahre erfolgen.

Projekt Null Emission der Regionalverkehr Köln GmbH (RVK) – Brennstoffzellenbusse

Das 2009 begonnene Projekt der Regionalverkehr Köln GmbH (RVK) ist technologieoffen angelegt, jedoch liegt der Schwerpunkt auf der Einführung von Brennstoffzellenbussen. Gegenwärtig betreibt der RVK mit 52 Brennstoffzellenbussen die größte derartige Flotte in Deutschland und verfügt insoweit über umfangreiche Erfahrungen /*86*/:

- Bei dem Einsatz von Brennstoffzellenbussen bedurfte es nur geringfügiger Änderungen in den Betriebsabläufen und es entstand aufgrund der mit Brennstoffzellenbussen erreichbaren Reichweiten kein Mehrbedarf an Fahrzeugen.
- Zunächst wurden zur Gewinnung von Erfahrungen nur zwei Brennstoffzellenbusse eingesetzt, welche sich jedoch im täglichen Betrieb bewährt und als praxistauglich erwiesen haben: Die Busse haben mit 350 km (Sommer wie Winter, ohne fossile Zusatzheizung) eine ähnliche Reichweite sowie mit durchschnittlich 10 Minuten eine ähnliche Betankungszeit wie konventionelle Dieselbusse.

[125] BOGESTRA hat 2017 mit der Beschaffung von Batteriebussen begonnen und die Straßenbahn Herne - Castrop-Rauxel GmbH (HCR) hat 2018 beschlossen, sich an der Beschaffung zu beteiligen. In dem Projekt hat BOGESTRA 20 vollelektrische 12-m-Omnibusse beschafft, um damit in Bochum (Linienlänge 33 km) und Gelsenkirchen (Linienlänge 24 km) jeweils eine Buslinie zu betreiben und so die dortige Immissionssituation zu entlasten. Die beiden von HCR beschafften Batteriebusse sind auf verschiedenen Linien in Herne und Castrop-Rauxel im Einsatz. Die Batteriekapazität der Busse beträgt 348 kWh, die garantierten Reichweiten wurden mit 210 km (1. Betriebsjahr) bis 190 km (5. Betriebsjahr) angegeben. Die Klimatisierung erfolgt mit einer CO_2-Wärmepumpe Valeo (Fahrgastraum) bzw. durch eine elektrische Songz-Kühlung und PTC- Heizregister (Fahrerarbeitsplatz).

- Aufgrund der positiven Erfahrungen wurden 2019/2020 weitere 50 Brennstoffzellenbusse (35 12-m-Serienfahrzeuge des Herstellers Van Hool und 15 12-m-Fahrzeuge des Herstellers Solaris) beschafft und an den verschiedenen RVK-Standorten in den Betriebsablauf des Unternehmens integriert.
- Zur Betankung der Brennstoffzellenbusse wurden zunächst halböffentliche Tankstellen anderer Unternehmen genutzt. Darüber hinaus wurden 2020 auf zwei RVK-Betriebshöfen eigene Wasserstofftankstellen errichtet, an denen täglich jeweils 20 Brennstoffzellenbusse betankt werden können.
- Für die Zukunft zieht man allerdings verstärkt die Möglichkeit in Betracht, die Tankstelleninfrastruktur von einem Generalunternehmen errichten und betreiben zu lassen, da sich beim Bau der Tankstellen in Eigenregie sowohl der zeitliche, inhaltliche als auch genehmigungsrechtliche Aufwand als beträchtlich erwiesen hat.
- Gegenüber den Infrastrukturen für andere alternative Antriebskonzepte werden Wasserstofftankstellen als die kostengünstigere Variante bewertet. Dies gilt besonders für größere Flotten (> 50 Busse), für die Wasserstofftankstellen aufgrund der erreichbaren hohen Auslastung oft günstiger sind als beispielsweise der Aufbau einer Ladeinfrastruktur einschließlich einer gegebenenfalls erforderlichen Ertüchtigung der Stromnetze, Umspannung etc.
- Als problematisch wurde die überschaubare Anzahl an Anbietern von Brennstoffzellenbussen wahrgenommen. Diese Situation verbessert sich jedoch zunehmend.

Weitere Projekte – Biomethanbusse

Der Einsatz von Biomethanbussen ist in Deutschland seit über 10 Jahren etabliert. Auch in Mecklenburg-Vorpommern sind um das Jahr 2010 erste Projekte zur Einführung von Biomethanbussen beispielsweise auf der Insel Rügen durchgeführt worden */87/*.

In Deutschland werden derzeit in verschiedenen Städten Biomethanbusse eingesetzt. Beispielsweise werden gegenwärtig in Augsburg von den Stadtwerke Augsburg GmbH 88 Busse mit Biomethan betrieben. Das Unternehmen hatte zunächst bis 2010 seine gesamte Busflotte auf Erdgasbusse umgestellt und umfangreiche Erfahrungen mit diesen gesammelt. Die Stadtwerke Augsburg sind der einzige städtische Verkehrsbetrieb Deutschlands, welcher seine Omnibusflotte zu 100 Prozent mit Biomethan betreibt. Neben den Biomethanbussen der Stadtwerke Augsburg werden auch Entsorgungsfahrzeuge des städtischen Abfallwirtschafts- und Stadtreinigungsbetriebs Augsburg (AWS) mit Biomethan betrieben. Der von dem Unternehmen gesammelte Bioabfall wird in einer Biogasanlage der AVA Abfallverwertung Augsburg Kommunalunternehmen in Biogas umgewandelt, zu Biomethan aufbereitet und in das Erdgasnetz eingespeist. Ergänzend hierzu beziehen die Stadtwerke Augsburg weiteres bilanzielles Biomethan, welches von der VERBIO Vereinigte BioEnergie AG mit Sitz in Zörbig (Brandenburg)[126] erzeugt und dort in das Erdgasnetz eingespeist wird (verbiogas)[127]. Zuletzt (2021) wurden dort 12 ältere Busse durch neue Biomethanbusse (MAN) ersetzt, welche bis zu 20 Prozent weniger Gas verbrauchen und mit Hybridtechnik ausgestattet sind (Rückgewinnung von Bremsenergie). Mit den Biomethanbussen der Stadtwerke Augsburg konnten Laufleistungen von 700 bis 800 Tsd. km je Fahrzeug erreicht werden. Die Fahrzeug-Wartungsintervalle erfordern im Vergleich mit jenen von Dieselbussen einen zusätzlichen jährlichen Motorölwechsel bei 30 Tsd. km, einen jährlichen Wechsel der Zündkerzen und -kabel, einen dreijährlichen Tausch der Hochdruckschläuche bei Gelenkbussen sowie eine jährliche Gasanlagenprüfung (GAP) */88/*.

Zu projektbezogenen Erkenntnissen oder Erfahrungen im Betrieb von Biomethanbussen sind keine Berichte verfügbar. Jedoch ist aufgrund der Vergleichbarkeit von Biomethan und Erdgas davon auszugehen, dass sich der Betrieb von Biomethanbussen ähnlich gestaltet wie jener von Erdgasbussen, zu dem in einer ganzen Reihe von Unternehmen Erfahrungen vorliegen.

[126] Das Unternehmen beliefert über die Stadt Augsburg hinaus weitere Betreiber von Biomethanbussen in den Städten Wenigerode, Gießen, Greifswald, Oldenburg. Quelle: https://www.verbiogas.de/fuer-stadtwerke/.

[127] Quellen: https://www.sw-augsburg.de/magazin/detail/mit-oekostrom-und-biogas-gruen-ans-ziel/, https://www.ava-augsburg.de/energie/biogas.

Zwischenfazit zu Best-Practice-Beispielen

Auch wenn sogar zu den Best-Practice-Beispielen der Umstellung von kommunalen Nutzfahrzeugflotten von konventionellen auf alternative Antriebskonzepte bislang kaum tiefergehende Evaluierungen vorliegen, lassen sich aus den analysierten Projekten folgende Schlussfolgerungen ableiten:

- Im Einsatz von alternativen Antriebskonzepten wurden in den zurückliegenden 10 Jahren bedeutsame technologische Fortschritte erzielt. Batterie- oder Brennstoffzellenfahrzeuge von mehreren Herstellern sind ebenso marktverfügbar wie Lade- oder Tankinfrastrukturen. Die Unterschiede in den Reichweiten werden kleiner bzw. können durch eine Reihe von Optionen ausgeglichen werden. Marktreif sind längst auch Biomethanbusse und mit geringen Einschränkungen konventionelle Busse, welche mit erneuerbarem Dieselkraftstoff (DME) betrieben werden können.
- In Deutschland konnten mit jedem der für die Regiopolregion Rostock in Betracht kommenden alternativen Antriebskonzepte bereits positive Erfahrungen gewonnen werden. Dies gilt für Batterie- und Biomethan-Stadtbusse oder Wasserstoff-Regionalbusse ebenso wie für entsprechende Entsorgungsfahrzeuge.

Zudem zeigen Bestrebungen in der Regiopolregion Rostock und in ihren Nachbarregionen zur Errichtung von Anlagen zur Erzeugung von Biomethan oder von mit erneuerbarem Strom hergestelltem Wasserstoff und erneuerbaren Kraftstoffen (eFuel – DME), dass die betreffenden Anlagen technologisch-betrieblich beherrscht und mindestens teilweise bereits am Markt verfügbar sind und dass sie zudem in ihren Kapazitäten auf verschiedenste Bedarfe ausgerichtet werden können. Insoweit müssen sich die flottenbetreibenden Unternehmen nicht mehr auf die Durchführung der unmittelbar den Fahrzeugeinsatz betreffenden Prozessketten beschränken. Vielmehr könnten sie bereits in den nächsten Jahren auch die Energie- bzw. Kraftstofferzeugung als ein zusätzliches Standbein ihrer Geschäftsaktivitäten aufbauen und – wie bereits heute – als Tankstellenbetreiber für Dritte auftreten. Mit der Installation von Solaranlagen auf eigenen Betriebshöfen hat beispielsweise die rebus Regionalbus Rostock GmbH bereits einen ersten Schritt in diese Richtung realisiert.

5.2 Ausgangspunkte des Planungs- und Umsetzungskonzepts

Das Ziel des Planungs- und Umsetzungskonzepts besteht in einer Beschreibung des Prozesses der Umstellung der Nutzfahrzeugflotten in der Regiopolregion Rostock. Diese Beschreibung, die eine Orientierung über die zeitlichen und inhaltlichen Handlungserfordernisse bei der Flottenumstellung bieten soll, bezieht sich zum einen auf die Nutzfahrzeuge und zum anderen auf die Betriebshöfe, welche die Basis für den Betrieb der Nutzfahrzeuge bilden. Während sich im Nutzfahrzeugbestand ein Wandel der Antriebsarten vollziehen muss, ist parallel dazu eine Umgestaltung der vorhandenen Betriebshöfe erforderlich, die ihrerseits mit dem vorn entwickelten Betriebshofkonzept (Abschnitt 4) beschrieben wurde. Schließlich ist es unerlässlich, dass in der Regiopolregion Rostock insgesamt die Voraussetzungen dafür geschaffen werden, dass die für den Betrieb der alternativ angetriebenen Nutzfahrzeugflotten erforderlichen Erneuerbaren Energien bzw. Kraftstoffe, also Strom, Wasserstoff, Biomethan und gegebenenfalls Dimethylether (DME), rechtzeitig und in ausreichender Menge zur Verfügung gestellt werden können. Dies setzt sowohl eine Fortsetzung des Ausbaus der Erneuerbaren Energien als auch die Weiterentwicklung der dafür erforderlichen Infrastrukturen, das heißt der Energienetze und -speicher, voraus.

Der räumliche Bezug des Planungs- und Umsetzungskonzepts wird durch die Regiopolregion Rostock gebildet. Im Mittelpunkt stehen dort die Nutzfahrzeugflotten der drei kommunalen Unternehmen Rostocker Straßenbahn AG (RSAG), rebus Regionalbus Rostock GmbH und Stadtentsorgung Rostock GmbH.

Der Startzeitpunkt des Planungs- und Umsetzungskonzepts wird durch den Beginn der planerischen Auseinandersetzung der drei Unternehmen mit der Umstellung ihrer Nutzfahrzeugflotten gesetzt (dieser Startzeitpunkt liegt in allen drei Unternehmen bereits 2 bis 3 Jahre zurück). Der Endzeitpunkt des Planungs- und Umsetzungskonzepts ist erreicht, wenn die in der Regiopolregion Rostock vorhandenen kommunalen Nutzfahrzeugflotten vollständig umgestellt sind und wenn deren Betriebshöfe alle Voraussetzungen erfüllen, welche dann für den Betrieb der Nutzfahrzeugflotten erforderlich sind.

Bei der Umstellung der Nutzfahrzeugflotten, die aus betriebswirtschaftlichen Gründen graduell erfolgen muss, lassen sich innerhalb des Start- und des Endzeitpunkts drei Zeiträume schematisch voneinander abgrenzen, Abbildung *45*:

- Der status quo bzw. die erste Phase ist durch den Dieselbetrieb gekennzeichnet: In dieser Phase bestehen die Nutzfahrzeugflotten ausschließlich aus mit konventionellem (fossilem) Dieselkraftstoff betrieben Nutzfahrzeugen. In dieser Phase finden erste Planungen für die Anschaffung und für den Betrieb von Nutzfahrzeugen mit alternativen Antrieben statt (die RSAG hat zudem bereits zwei Elektrobusse beschafft, die SR-Gruppe verfügt über fünf batterieelektrische Pkw).
- Die zweite Phase wird durch den Mischbetrieb gebildet, in dem sowohl Nutzfahrzeuge mit Dieselmotoren als auch solche mit alternativen Antriebskonzepten zeitgleich betrieben werden. Dieser Mischbetrieb beginnt mit der Integration des ersten Fahrzeugs mit einem alternativen Antrieb in den Fahrzeugbestand eines Flottenbetreibers. Mit der Integration eines jeden weiteren alternativ angetriebenen Fahrzeugs bewegt sich der Mischbetrieb in Richtung auf eine Vollumstellung.
- Das Ende des Mischbetriebs bzw. die Vollumstellung sind erreicht, nachdem das letzte Nutzfahrzeug mit einem konventionellen Dieselantrieb durch ein alternativ angetriebenes Fahrzeug ersetzt ist. Dieser Zeitpunkt ist in Deutschland durch die in nationales Recht überführte CVD-Richtlinie der Europäischen Union sowie durch das Klimaschutzgesetz 2021 des Bundes determiniert, demzufolge die Klimaneutralität in Deutschland bis spätestens 2045 zu erreichen ist. In der Region Rostock ist dieser Zeitpunkt durch den Beschluss zur Erreichung der Klimaneutralität bis 2035 vorverlegt.

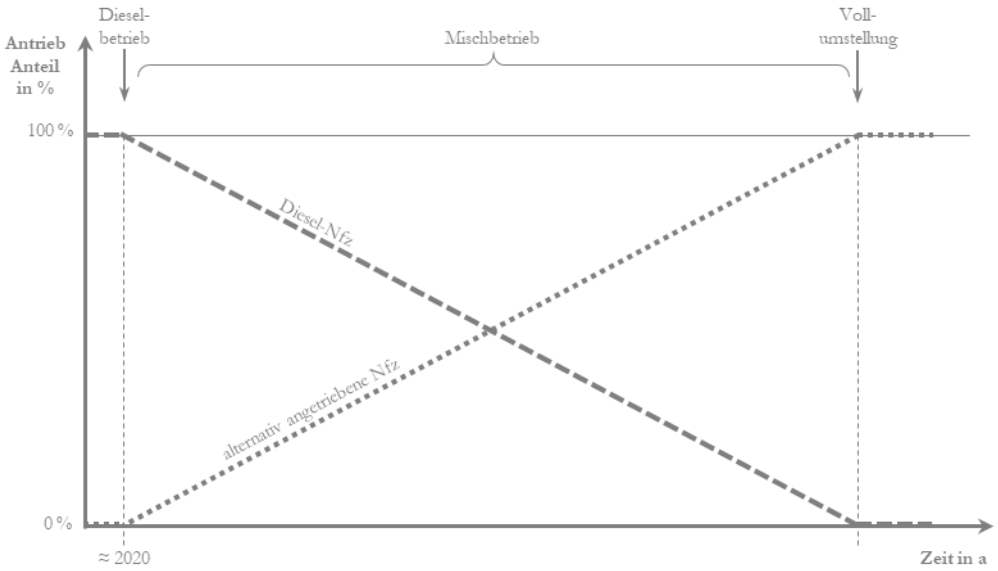

Abbildung 45: Phasen der Umstellung von Nutzfahrzeugflotten (schematisch)[128]

Parallel zur graduellen Umstellung der kommunalen Nutzfahrzeugflotten auf alternative Antriebe müssen auch die jeweiligen Betriebshöfe umgestaltet werden, welche die betriebliche Basis für den Einsatz der Fahrzeuge bilden. Daher bildet das vorn entwickelte Betriebshofkonzept für kommunale Nutzfahrzeugflotten mit alternativen Antrieben (Abschnitt 4) eine wesentliche Grundlage des Planungs- und Umsetzungskonzepts. Dieses Betriebshofkonzept könnte pilothaft an einem einzelnen, gegebenenfalls sogar neuen Standort idealtypisch zur Gewinnung von Erfahrungen realisiert werden. Anschließend könnten diese Erfahrungen bei der Umgestaltung anderer Betriebshöfe herangezogen werden. Allerdings lässt sich eine solche Vorgehensweise kaum mehr realisieren: Erstens haben die Betreiber kommunaler und anderer Nutzfahrzeugflotten in der Regiopolregion Rostock mehr oder weniger zeitgleich mit der Umstellung ihrer Fahrzeuge auf alternative Antriebe begonnen[129]. Dies war auch notwendig, da bis zum Zielzeitpunkt

[128] Quelle: Eigene Darstellung.

[129] Die in der Regiopolregion Rostock angesiedelten Verkehrsunternehmen RSAG und rebus haben diese Umstellung insoweit bereits begonnen, als sie eine anfängliche Erprobungsphase von Batterie- und Wasserstoffbussen absolviert haben. Zudem hat die RSAG bereits zwei Batteriebusse beschafft und in Betrieb genommen. Bei SR laufen seit mindestens zwei Jahren Planungsprozesse zur Integration von alternativ angetriebenen Entsorgungsfahrzeugen in die vorhandene Fahrzeugflotte (Abschnitt 2).

der Klimaneutralität 2035 nur noch weniger als 15 Jahre zur Verfügung stehen. Zweitens setzt jedes der drei betrachteten kommunalen Unternehmen bei der Umstellung ihrer Fahrzeugflotten zumindest teilweise auf unterschiedliche alternative Antriebskonzepte. Hinzu kommt drittens, dass gegebenenfalls auch innerhalb der Unternehmen mehrere alternative Antriebskonzepte in die Flottenumstellung einbezogen werden, wie es bei der RSAG mit Batterie- und Biomethanbussen der Fall ist. Daher wurde das Betriebshofkonzept soweit möglich für diese alternativen Antriebskonzepte spezifiziert (Abschnitt 4) und die Betriebshöfe der drei kommunalen Flottenbetreiber (bei rebus jene in Güstrow und Bad Doberan) können für die jeweiligen alternativen Antriebskonzepte als Pilot-Betriebshöfe betrachtet werden. Soweit dies möglich ist, sollten die dort gewonnenen Erkenntnisse und Erfahrungen bei der Umstellung der Fahrzeugflotten anderer Flottenbetreiber in der Regiopolregion Rostock genutzt werden.

Das Planungs- und Umsetzungskonzept für die Regiopolregion Rostock geht schließlich davon aus, dass die drei kommunalen Unternehmen RSAG, rebus und SR jeweils bestimmte alternative Antriebe bei der Umstellung ihrer Nutzfahrzeugflotten und in der zukünftigen Beschaffung ihrer Fahrzeuge präferieren (Abschnitt 4.8).

5.3 Planungs- und Umsetzungskonzept

Im Folgenden wird für die Regiopolregion Rostock das Planungs- und Umsetzungskonzept für die Umstellung der kommunalen Nutzfahrzeugflotten auf alternative Antriebskonzepte vorgestellt, welches wesentlich auf dem Betriebshofkonzept mit seinen drei Varianten (Abschnitt 4) basiert:

- Betriebshofkonzept konventioneller Dieselkraftstoff/DME (Bestand),
- Betriebshofkonzept Batterie (Variante 1), prinzipiell marktverfügbar,
- Betriebshofkonzept Wasserstoff (Variante 2).
- Betriebshofkonzept Biomethan (Variante 3),

Wie erwähnt, muss besonders die Umstellung der Nutzfahrzeugflotten, aber gegebenenfalls auch die Umgestaltung der Betriebshöfe graduell erfolgen. Da beispielsweise bei Wasserstoffbussen eine stärkere Abhängigkeit der Fahrzeuge von der zugehörigen Infrastruktur besteht als bei Dieselbussen und zudem sowohl die Anschaffungs- als auch die Betriebskosten von Wasserstoffinfrastrukturen höher sind, kommt einer bedarfsgerechten Anpassung dieser Infrastrukturen an die Bedarfe der Fahrzeugflotten und umgekehrt im Verlauf der Flottenumstellung eine besondere Bedeutung zu.

Dementsprechend lässt sich der zeitliche Ablauf der Umstellung der Nutzfahrzeugflotten, der in Abbildung *45* noch schematisch dargestellt ist, in dem Planungs- und Umsetzungskonzept präzisieren, indem dieses besonders in vier Planungs- und Umsetzungsphasen unterteilt wird: Startphase, Einführungsphase, Konsolidierungs- und Abschlussphase. Abbildung *46* zeigt diese vier Phasen für die Regiopolregion Rostock in ihrer zeitlichen Einordnung entsprechend der Zielsetzung, dass die Region bis 2035 die CO_2-Neutralität erreicht. Zugleich deutet die Abbildung an, in welcher zeitlichen Reihenfolge die vier hier als wesentlich betrachteten Energieträger innerhalb der Nutzfahrzeugflotten in der Region an Bedeutung gewinnen könnten: Zwar sind die betreffenden Fahrzeuge bereits am Markt verfügbar, jedoch können beispielsweise größere Mengen an Wasserstoff bislang noch kaum zur Verfügung gestellt werden und auch der Aufbau der betreffenden Infrastrukturen erfordert voraussichtlich einen mehrjährigen Zeitraum. Im Folgenden werden die vier Phasen und ihre wesentlichen Merkmale beschrieben.

<u>1. Phase: Startphase – ca. 2018 bis 2020</u>

Die Unternehmen in der Regiopolregion Rostock, welche die drei größten kommunalen Nutzfahrzeugflotten betreiben, haben mit der Erprobung alternativ angetriebener Nutzfahrzeuge sowie mit der für eine Umstellung ihrer Fahrzeugflotten erforderlichen Planung begonnen und - im Fall der RSAG - erste Nutzfahrzeuge beschafft. Damit hat für die RSAG der Mischbetrieb bereits begonnen.

Darüber hinaus gibt es neben der SR-Gruppe weitere gewerbliche Betreiber kleinerer Nutzfahrzeugflotten, beispielsweise die Netzbetreiber, die Stadtwerke oder die Deutsche Post, welche bereits Erdgas- oder Elektro-Pkw sowie kleinere batterieelektrische Nutzfahrzeuge eingeführt haben und in ihrem täglichen Betrieb einsetzen.

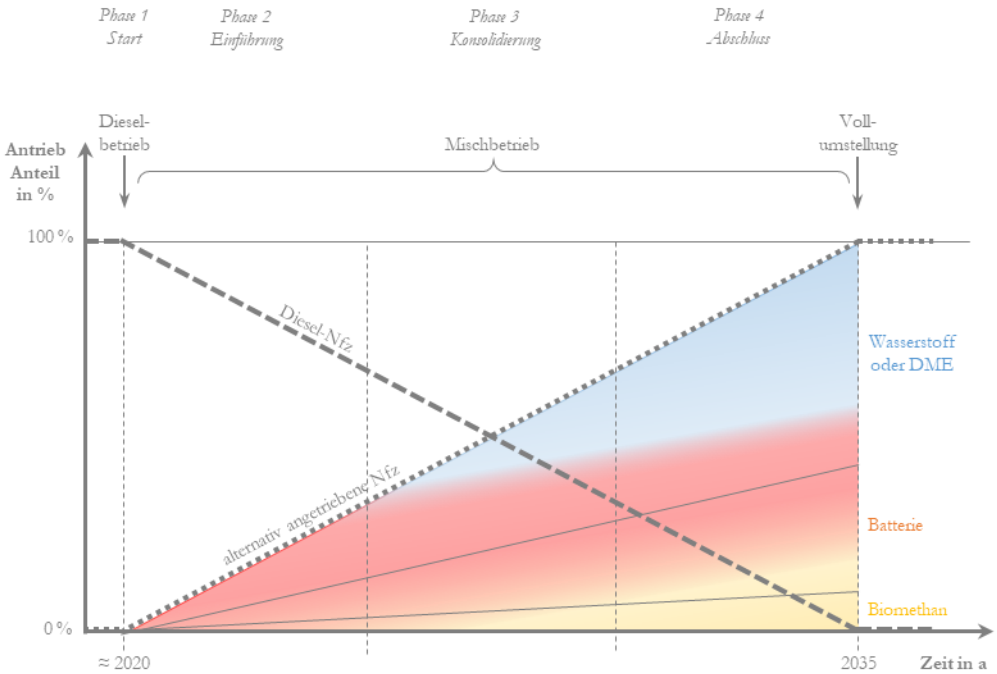

Abbildung 46: Phasen der Umstellung von Nutzfahrzeugflotten[130]

Parallel hierzu hat bei den drei kommunalen Unternehmen in Form von Photovoltaikanlagen und Ladeeinrichtungen der Aufbau der Infrastrukturen begonnen, die für den Betrieb alternativ angetriebener Nutzfahrzeuge erforderlich sind.

Ebenfalls bereits im Aufbau begriffen sind öffentliche Infrastrukturen für die Elektromobilität. So schreitet sowohl in den Städten als auch im ländlichen Raum der Regiopolregion Rostock der Ausbau der Ladeinfrastruktur nicht nur im privaten, sondern auch im öffentlichen Raum voran. Zudem existiert in der Regiopole Rostock bereits seit einigen Jahren eine öffentliche Wasserstofftankstelle.

Schließlich setzen sich in der Regiopolregion Rostock der Erneuerbare-Energien-Ausbau und der Energienetze fort, wobei besonders die steigende erneuerbare Stromerzeugung eine wesentliche Voraussetzung für die Umstellung von Nutzfahrzeugen auf alternative Antriebe schafft.

Diese einzelnen Entwicklungen stehen untereinander in wechselseitigen Abhängigkeiten, beispielsweise ist der rechtzeitige Ausbau der Ladeinfrastrukturen eine unabdingbare Voraussetzung für den Markthochlauf der Elektromobilität. Fortschritte sind zudem erheblich vom Zufluss öffentlicher Fördermittel abhängig. Dies gilt sowohl für die Beschaffung von alternativ angetriebenen Nutzfahrzeugen als auch für den Aufbau der zugehörigen Infrastrukturen.

2. Phase: Einführungsphase – ca. 2020 bis 2025

Die drei kommunalen Unternehmen integrieren erste (rebus, SR) bzw. weitere (RSAG) alternativ angetriebener Nutzfahrzeuge in ihre Fahrzeugflotten. Parallel dazu erzielen gegebenenfalls auch andere gewerbliche Flottenbetreiber Fortschritte bei der Fahrzeugbeschaffung und beim Aufbau der zugehörigen (Lade-) Infrastrukturen. Im Mischbetrieb von konventionell angetriebenen Fahrzeugen und Batteriefahrzeugen ist deren gegebenenfalls noch begrenzte Reichweite insoweit unproblematisch, wie Batteriefahrzeuge auf Linien innerhalb ihrer Reichweite und konventionellen Fahrzeuge auf längere Linien disponiert werden können. Diese Möglichkeit schwindet mit der Zahl der konventionellen Fahrzeuge, jedoch ist im Gegenzug auch eine weitere Erhöhung der Reichweite von Batteriefahrzeugen durch technische Fortschritte zu erwarten.

130 Quelle: Eigene Darstellung.

In dieser Phase stützt sich die Versorgung der ersten alternativ angetriebenen Nutzfahrzeuge mit Wasserstoff, Biomethan oder erneuerbarem Strom und Dieselkraftstoff (eFuel – DME) gegebenenfalls noch auf öffentliche Tankstellen bzw. auf Anbieter entsprechender Kraftstoffe, welche wie beispielsweise Apex Teterow erste Mengen an Wasserstoff für die Betankung von Nutzfahrzeugen erzeugen und liefern können.

Im weiteren Verlauf dieser Phase werden die drei kommunalen Unternehmen zunehmend mehr alternativ angetriebene Nutzfahrzeuge in ihre Fahrzeugbestände integrieren: Dabei werden die eventuell aufgrund von Lernkurven allmählich sinkenden Anschaffungspreise dieser Nutzfahrzeuge den Unternehmen entgegenkommen. Die Umstellung wird zudem umso zügiger möglich sein, wie dafür auch weitere öffentliche Fördermittel zur Verfügung gestellt werden. Zwar muss diese Umstellung mindestens gemäß den Beschaffungsquoten des Gesetzes zur Umsetzung der CVD-Richtlinie (EU) 2019/1161 (CVD-Quoten) bzw. gemäß dem Klimaschutzgesetz 2021 des Bundes bis 2045 erfolgen. Jedoch müssen die drei Unternehmen ihre Fahrzeugflotten zur Erreichung des regionalen Klimaschutzziels bereits bis 2035, also schneller umstellen und planen auch schon entsprechend. Dabei wird es gegebenenfalls auch erforderlich sein, die vorhandenen Dieselfahrzeuge vorzeitig, also nicht erst am Ende ihrer jeweiligen Nutzungsdauer durch alternativ angetriebene Nutzfahrzeuge abzulösen[131].

Parallel dazu muss in dieser Phase auch eine sichere und von der jeweils aktuellen Verkehrssituation unabhängige Versorgung der Nutzfahrzeuge durch entsprechende Infrastrukturen aufgebaut werden. Bei diesen kann es sich um eigene Infrastrukturen handeln, die von den drei Unternehmen auf ihren Betriebshöfen errichtet werden. Jedoch können diese Infrastrukturen auch bei bzw. mit Dritten an anderen Standorten errichtet und von diesen betrieben werden, um von dort die Betriebshöfe zu beliefern.

Parallel dazu setzt sich der Erneuerbare-Energien-Ausbau in der Regiopolregion Rostock insgesamt fort und führt zu einer steigenden Erzeugung von erneuerbarem Strom, Biomethan/eGas, Wasserstoff und gegebenenfalls erneuerbarem Dieselkraftstoff (eFuel - DME).

3. Phase: Konsolidierungsphase – ca. 2025 bis 2030

Bei den drei kommunalen Unternehmen, aber auch bei anderen gewerblichen Flottenbetreibern erreichen die Anteile der alternativ angetriebenen Nutzfahrzeuge in den Flotten 50 Prozent und mehr.

Parallel dazu beginnt auch im Gütertransport mit größeren Lastkraftwagen (Lkw) der Einsatz von alternativ angetriebenen Fahrzeugen. Die Speditionen können bereits die Erfahrungen der drei Pilotunternehmen bei der Umgestaltung ihrer Betriebshöfe nutzen.

Daher müssen die Infrastrukturen gezielt weiter auf- bzw. ausgebaut werden, mit welchen die Unternehmen und Flottenbetreiber ihre Nutzfahrzeuge sicher mit der jeweils benötigten Energie versorgen können. Da hierbei beispielsweise der elektrische Leistungsbedarf der Ladeinfrastrukturen ansteigt, bedingt dies unter anderem auch eine – gegebenenfalls stufenweise durchführbare – Erweiterung der Kapazität der Netzanschlüsse der jeweiligen Betriebshöfe.

Die örtlichen Verteilnetzbetreiber müssen frühzeitig in die diesbezüglichen Planungen einbezogen werden, da die Umsetzung einen längeren Zeitraum in Anspruch nehmen kann und damit die Verteilnetzbetreiber diese in ihre eigene Ausbauplanung integrieren können. Ist beispielsweise ein neuer bzw. leistungsstärkerer Netzanschluss erforderlich, muss gegebenenfalls eine Planungszeit von ca. 1 Jahr in den 10-/20-kV-Netzen und von 3 bis 5 Jahren in den 110-kV-Netzen berücksichtigt werden.

Sofern sich Unternehmen entscheiden, eigene Erzeugungsanlagen zu errichten, könnte beispielsweise rebus eine solche Anlage auf seinem Betriebshof in Güstrow realisieren und von dort aus die anderen Betriebshöfe mit versorgen. Dadurch könnte eine höhere Auslastung der Erzeugungsanlage erreicht werden,

[131] Je näher das bundeseinheitliche Zieljahr 2045 für die Klimaneutralität drückt, desto mehr werden auch die anderen Verkehrsunternehmen in Deutschland versuchen, ihre mit fossilen Kraftstoffen angetriebenen Nutzfahrzeuge abzustoßen. Dadurch werden voraussichtlich die Absatzmöglichkeiten für diese Fahrzeuge deutlich abnehmen. Für den Wiederverkauf von Dieselfahrzeugen durch die drei Unternehmen in der Regiopolregion Rostock könnte es sich daher als sehr vorteilhaft erweisen, dass dieser gegenüber dem zu erwartenden Bundestrend um ca. zehn Jahre vorgezogen ist.

welche einen wirtschaftlichen Betrieb erst ermöglicht. Alternativ können Erzeugungsanlagen auch bei Dritten, also bei entsprechenden Dienstleistern bzw. Lieferanten, errichtet werden.

Wie erwähnt, müssen die Batterien von Nutzfahrzeugen wie Batteriebussen nach ca. sechs Jahren, also etwa nach Ablauf der Hälfte der Nutzungsdauer solcher Busse, ausgetauscht werden. Dieser Zeitpunkt wird innerhalb der Konsolidierungsphase von einer zunehmenden Anzahl von Batteriebussen erreicht. Daher kann in dieser Phase auch mit dem Aufbau von Batteriespeichern begonnen werden, in denen die aus dem Batterieaustausch in den Elektrobussen resultierenden Gebrauchtbatterien weiter genutzt werden können. Insbesondere können sie bei einem netzdienlichen Speicherbetrieb zusätzliche Einnahmen aus der Erbringung von Systemdienstleistungen für die Verteilnetzbetreiber generieren.

4. Phase: Abschlussphase – ca. 2030 bis 2035

In dieser letzten Phase nähern sich bei den drei Unternehmen sowie bei anderen Flottenbetreibern die Anteile der alternativ angetriebenen Nutzfahrzeuge an ihren jeweiligen Fahrzeugflotten der 100-Prozent-Marke bzw. erreichen diese.

Die Umgestaltung der Betriebshöfe der Unternehmen ist zumindest insoweit abgeschlossen, als der dann vorhandene Bestand alternativ angetriebener Nutzfahrzeuge effizient und sicher betrieben und mit den jeweiligen Kraftstoffen versorgt werden können.

5.4 Monitoring und Erfolgskontrolle

Sobald in der Regiopolregion Rostock die 4. Phase abgeschlossen und in den kommunalen Nutzfahrzeugflotten der drei Unternehmen keine Nutzfahrzeuge mehr vorhanden sind, welche mit fossilen Kraftstoffen betrieben werden, ist das Ziel des Planungs- und Umsetzungskonzepts erreicht und das Konzept kann als umgesetzt betrachtet werden.

Auf dem Weg dorthin, also während der Konzeptumsetzung, solltne ein kontinuierliches Monitoring und eine periodische Erfolgskontrolle durchgeführt werden, indem besonders die folgenden Parameter (Istwerte) regelmäßig erfasst werden:

- Nutzfahrzeugbestände der drei kommunalen Unternehmen insgesamt und nach Antriebsarten,
- Bestand an Infrastrukturen auf den Betriebshöfen zur Sicherstellung der Energieversorgung der alternativ angetriebenen Nutzfahrzeuge (Ladeinfrastrukturen, Tankstellen etc.),
- Stand der regionalen Erzeugung der zur Energieversorgung der Nutzfahrzeugflotten erforderlichen erneuerbaren Kraftstoffe und Energien,
- Bestand an überregionalen Kooperations- bzw. Lieferbeziehungen zur Energieversorgung der Nutzfahrzeugflotten, falls diese nicht durch die regionale Erzeugung abgedeckt wird.

Prinzipiell können diese Parameter als Zielwerte über den zeitlichen Verlauf der beschriebenen vier Phasen vorausberechnet werden. Die regelmäßig erfassten Istwerte können dann mit diesen Zielwerten verglichen und der Umsetzungsstand des Konzepts bewertet werden.

Eine solche Vorausrechnung könnte beispielsweise entlang der in Abbildung *46* angedeuteten Fahrzeug- bzw. Antriebsstrukturen durchgeführt werden. Allerdings wäre eine solche Vorausrechnung gegenwärtig mit erheblichen Unsicherheiten behaftet: Zunächst wären Annahmen über die zukünftige Entwicklung der Nutzfahrzeugbestände der drei kommunalen Unternehmen zu treffen. Des Weiteren ist die Einführung von alternativ angetriebenen Omnibussen bei der RSAG und bei rebus von der jeweils geplanten Erneuerung des Fahrzeugbestandes abhängig, die ihrerseits wiederum von der Altersstruktur der vorhandenen Fahrzeuge beeinflusst wird[132]. Zudem wird die Beschaffung neuer, alternativ angetriebener Omnibusse auch von der Verfügbarkeit von Fördermitteln des Bundes beeinflusst. Schließlich ist bei der SR-Gruppe

[132] Das Gesetz zur Umsetzung der Richtlinie (EU) 2019/1161 (CVD-Richtlinie) kann für die Beschaffung von alternativ angetriebenen Nutzfahrzeugen in der Regiopolregion Rostock höchstens Anhaltspunkte liefern, da es nur bis zum Jahr 2030 reicht und die Beschaffung entsprechender Fahrzeuge in den drei Unternehmen über die gesetzlichen Forderungen hinausgehen muss, um das regionale Ziel der Klimaneutralität bis 2035 erreichen zu können.

durch die Präferenz der Hersteller von Entsorgungsfahrzeugen für Wasserstoffantriebe gegebenenfalls erst eine Vorentscheidung darüber getroffen, welcher bzw. welche alternativen Antriebe der zukünftigen Beschaffung von Entsorgungs- und Nutzfahrzeugen zugrunde gelegt werden sollen. Um diese und weitere Unsicherheiten in der Fahrzeugbeschaffung, beispielsweise Lieferzeiten für neue Fahrzeuge, berücksichtigen zu können, müsste die beschriebene Vorausrechnung in Form von Szenarien erfolgen.

6. Zusammenfassung

Das vorrangige Ziel der vorliegenden Untersuchung bestand darin, einen Beitrag zur Anwendung von Wasserstofftechnologien und anderen alternativen Antrieben im Verkehrssektor und damit zur Energiewende in der Regiopolregion Rostock zu leisten. Mit den durchgeführten konzeptionellen Überlegungen soll die Umstellung großer, mit fossilem Dieselkraftstoff betriebener Nutzfahrzeugflotten unterstützt werden. Vor dieser Aufgabe stehen insbesondere die kommunalen Unternehmen im ÖPNV und in der Stadtentsorgung. Die konzeptionellen Überlegungen konzentrieren sich auf die Bewertung der technischen Machbarkeit der Umstellung auf alternative Antriebe und der damit erzielbaren Klima- und Umwelteffekte, auf die Schaffung der erforderlichen Voraussetzungen auf den Betriebshöfen der drei Unternehmen sowie auf die Entwicklung eines Planungs- und Umsetzungskonzepts für die Regiopolregion Rostock.

Dementsprechend gliedert sich der Bericht in einen einführenden Teil (Abschnitt 0), in eine Analyse der Ausgangslage im ÖPNV mit Omnibussen und in der kommunalen Abfallentsorgung und der dort einsetzbaren alternativen Antriebskonzepte (Abschnitt 1), in eine Beschreibung der drei kommunalen Unternehmen mit den größten Nutzfahrzeugflotten in der Regiopolregion Rostock (Abschnitt 2), in eine Bewertung der technischen Machbarkeit alternativer Antriebskonzepte (Abschnitt 3), in die Entwicklung eines Betriebshofkonzepts für Nutzfahrzeugflotten mit alternativen Antrieben (Abschnitt 4) sowie in die Entwicklung eines Planungs- und Umsetzungskonzepts für die Regiopolregion Rostock (Abschnitt 5).

Die Untersuchung des Themenfelds der kommunalen Fahrzeugflotten und alternativer Antriebskonzepte beginnt mit einer Analyse der **Ausgangslage im ÖPNV und in der Abfallentsorgung** (Abschnitt 1.1). Diese ist im Bereich des ÖPNV mit Omnibussen allgemein dadurch gekennzeichnet, dass die Entwicklung der Nutzerzahlen in Mecklenburg-Vorpommern stagniert bzw. zuletzt bedingt durch die COVID-19-Pandemie sogar rückläufig war. Dies dürfte näherungsweise auch für die Regiopolregion Rostock gelten. Diese stagnierende Nutzung erschwert die Finanzierung des ÖPNV, da nutzerseitig nur steigende Ticketpreise die Einnahmen erhöhen, jedoch zugleich die Attraktivität senken und da Bund, Länder und Kommunen somit die steigenden Kosten auffangen müssen, dazu aber nur begrenzt in der Lage sind. Zugleich steht der ÖPNV vor erheblich steigenden Anforderungen. Diese resultieren in der Europäischen Union beispielsweise aus den CVD-Quoten in der Fahrzeugbeschaffung. In Deutschland kommt das Ziel der Klimaneutralität bis 2045 hinzu. Außerdem steigen die fossilen Kraftstoffpreise - nicht zuletzt aufgrund des Brennstoffemissionshandelsgesetzes. In Mecklenburg-Vorpommern entstehen Herausforderungen aus dem Ziel der Stärkung und Vernetzung des ÖPNV sowie in der Regiopolregion Rostock aus den Zielen der Klimaneutralität bis 2035 und der Verdopplung der Nutzerzahlen bis 2030. Alle diese Ziele erfordern nicht nur die Rückführung der Nutzerzahlen auf das Niveau vor der Pandemie, sondern deren deutliche Erhöhung. Diese Anforderungen sind nur mit weiterentwickelten ÖPNV-Konzepten und mit neuen, jedoch deutlich teureren Fahrzeugen möglich, die zudem auch den Aufbau neuer Infrastrukturen parallel zum Weiterbetrieb der vorhandenen erfordern. In der Abfallentsorgung stellt sich die Situation insoweit etwas anders dar, als die Nutzung der Abfallentsorgung für die Bevölkerung und für die Wirtschaft nicht optional, sondern obligatorisch ist und das Abfallaufkommen der Bevölkerung bereits seit Jahren relativ konstant ist. Aber auch hier sind Gebührensteigerungen als Beitrag zur Finanzierung der steigenden Kosten der Abfallentsorgung enge Grenzen gesetzt. Neben der Notwendigkeit der Bewältigung der genannten Herausforderungen bietet sich den kommunalen Unternehmen mit der Umstellung ihrer Fahrzeugflotten auf alternative Antriebskonzepte jedoch auch eine Chance, mit der erneuerbaren Energieerzeugung ein weiteres Standbein aufzubauen und ein neues Geschäftsfeld zu erschließen. Hierfür verfügt die Regiopolregion Rostock über vergleichsweise günstige Voraussetzungen. Zu diesen zählen eine relativ konstante Bevölkerung, ein erhebliches Erneuerbare-Energien-Potenzial für Strom, Biogas/-methan und weitere Energieträger sowie eine bereits im Entstehen begriffene regionale Wasserstoffwirtschaft.

An die Analyse der Ausgangslage im ÖPNV und in der kommunalen Abfallentsorgung schließt sich die Analyse der **Fahrzeug- und Infrastrukturtechnologien** an, welche im Bereich der alternativen Antriebskonzepte für Nutzfahrzeuge gegenwärtig zur Verfügung stehen (Abschnitt 1.2):

- Biomethanbusse (Busse + Tankstellen) stellen eine mit Erdgas umfassend erprobte Technologie dar, deren Einsatzmöglichkeiten im Hinblick auf Reichweite und Betankungsdauer jenen von

Dieselbussen entsprechen. Im Vergleich zu diesen ergibt sich ein etwas höherer Wartungs- und Instandhaltungsaufwand für die Busse und Betriebshoftankstellen.

- Batteriebusse (Busse + Batterien + Ladeinfrastruktur) können demgegenüber als eine reifende Technologie bezeichnet werden, deren Reichweitendefizite schrittweise abgebaut werden. Sie ist aber auch durch lange Ladezeiten gekennzeichnet. Ihre Integration in die Betriebsabläufe gestaltet sich deshalb im Vergleich zu Dieselbussen bzw. im Zusammenwirken mit diesen aufwendiger. Zudem ergibt sich ein neuartiger Wartungs- und Instandhaltungsaufwand für die Busse und für die Ladeinfrastrukturen.
- DME-Busse (Busse + Tankstellen) stellen insoweit eine erprobte Technologie dar, als DME prinzipiell in Dieselmotoren eingesetzt werden kann. DME ist zudem die erneuerbare Alternative nicht nur zu konventionellem Dieselkraftstoff, sondern auch zu GtL-Kraftstoffen dar (diese sind zwar bei Verwendung von Biogas klimaneutral, jedoch weist DME einen negativen CO_2-Saldo auf, wenn das zu dessen Herstellung erforderliche CO_2 aus CO_2-Quellemissionen abgeschiedenen wird - CCU). Der Wartungs- und Instandhaltungsaufwand ist etwas höher als bei Dieselbussen, da bestimmte technische Komponenten wie Dichtungen gegenüber DME empfindlicher sind als gegenüber konventionellem Dieselkraftstoff.
- Wasserstoffbusse (Busse + Batterien + Tankstellen) mit Brennstoffzellen sind ebenfalls eine reifende Technologie, deren Einsatzmöglichkeiten inzwischen jenen von Dieselbussen entsprechen. Allerdings ergibt sich eine etwas höhere Betankungsdauer. Auch der Wartungs- und Instandhaltungsaufwand ist höher und stellt an die Werkstätten sowohl hinsichtlich der Busse als auch der Tankstellen neue Anforderungen. Wasserstoffbusse mit ICE sind dagegen noch in der Entwicklung.

Damit stehen für die Umstellung der kommunalen Nutzfahrzeugflotten verschiedene alternative Antriebskonzepte mit jeweils spezifischen Vor- und Nachteilen zur Verfügung. Diese können bzw. müssen auf die spezifischen Anforderungen bezogen werden, welche von den Unternehmen jeweils zu erfüllen sind. Zudem erfordern die verschiedenen Antriebskonzepte die Bereitstellung von erneuerbarem Strom, von erneuerbaren Kraftstoffen (eGas – eMethan, eFuel - DME), von Wasserstoff bzw. von Biomethan. Diese Energieträger können die Unternehmen von Dritten beziehen, prinzipiell jedoch auch selbst erzeugen. Planungen zur Errichtung solcher Anlagen an anderen Standorten in Mecklenburg-Vorpommern zeigen die Beherrschbarkeit, die Marktreife und auch die Realisierbarkeit kleinerer Anlagen auf.

Die **drei größten kommunalen Flottenbetreiber in der Regiopolregion Rostock** sind in der Regiopole Rostock die Rostocker Straßenbahn AG (RSAG) und die Stadtentsorgung Rostock GmbH mit ihren beiden Tochterunternehmen (SR-Gruppe) sowie im Verflechtungsraum der Regiopolregion die rebus Regionalbus Rostock GmbH (Abschnitt 2). Tabelle *14* gibt ausgewählte Daten zu den drei Unternehmen an. Sie verfolgen aus verschiedenen Gründen unterschiedliche Strategien für die Umstellung ihrer Nutzfahrzeugflotten:

- Die RSAG führt den Omnibus-ÖPNV in der Regiopole Rostock durch und hat mit der Umstellung ihrer Omnibusflotte von Diesel- auf Batterie- und Biomethanbusse begonnen. Sie betreibt einen Omnibus-Betriebshof, bei dem die Leistungserweiterung des Netzanschlusses für die erforderlichen Ladeinfrastrukturen technisch problemlos erscheint, da der Betriebshof netz- und kraftwerksnah gelegen ist (Stadtwerke Rostock AG). Allerdings benötigt die RSAG perspektivisch voraussichtlich mehr Batteriebusse und insoweit einen zweiten Omnibus-Betriebshof. Die Versorgung der Biomethanbusse erfolgt voraussichtlich durch bilanzielles Biomethan aus dem Erdgasnetz, könnte jedoch in Form von erneuerbarem Methan (eGas) auch selbst erzeugt werden. Die Installation von eigenen Erneuerbare-Energien-Anlagen wie Photovoltaikanlagen auf dem vorhandenen Betriebshof ist möglich.
- Die von rebus betriebene Busflotte zur Durchführung des ÖPNV im Verflechtungsraum der Regiopolregion Rostock ist ungefähr doppelt so groß wie jene der RSAG. Als operative Basis dieser Busflotte betreibt rebus fünf Betriebshöfe unterschiedlicher Größe:
  - Güstrow: Der netznah gelegene Standort verfügt über Flächenpotenziale zur Installation weiterer Infrastrukturen.
  - Bad Doberan: Auch hier sind Flächen verfügbar, ein Ortsnetztransformator ist bereits vorhanden und befindet sich in unmittelbarer Nachbarschaft.

- Rostock: Der Betriebshof scheint schon aus Platzgründen am wenigsten für die Installation zusätzlicher Infrastrukturen geeignet.
- Teterow: An dem Standort bestehen Flächenpotenziale, Netznähe und Kooperationsmöglichkeiten mit den Stadtwerken Teterow.
- Gnoien: Der Betriebshof verfügt aufgrund der geringen Zahl der dort stationierten Omnibusse nicht über eine eigene Betriebshoftankstelle.

Für die Umstellung seiner Busflotte beabsichtigt rebus derzeit insbesondere aus Gründen der erforderlichen Reichweite die Einführung von Wasserstoffbussen (BZ).

- Die drei Unternehmen der SR-Gruppe betreiben eine Vielzahl von mit Dieselmotoren angetriebenen Entsorgungs- und Nutzfahrzeugen. Für deren Ersatz durch alternativ angetriebene Entsorgungsfahrzeuge kommen beispielsweise Wasserstofffahrzeuge in Betracht, da Wasserstoff die für den Energieverbrauch von Entsorgungsfahrzeugen erforderliche Energiedichte aufweist. Deshalb entwickelt beispielsweise der Fahrzeughersteller Faun solche Fahrzeuge. Die SR-Gruppe verfügt über einen Betriebshof, welcher allerdings flächenmäßig durch eine Vielzahl spezifischer Nutzungen ausgelastet ist. Allerdings gibt es mehrere Recyclinghöfe, die auf ihre Eignung für eine eigene Wasserstofferzeugung geprüft werden könnten. Ein solcher Standort könnte dann den Betriebshof versorgen. Auch die Erzeugung und Nutzung von erneuerbarem Dieselkraftstoff (DME) stellt eine Option für die Umstellung der Fahrzeugflotte dar, zumal die Nutzung von fossilem GtL als Alternative zum konventionellen Dieselkraftstoff bereits erprobt wurde[133].

Tabelle 14: Kommunale Nutzfahrzeugflotten in der Regiopolregion Rostock

Unternehmen		RSAG	rebus	SR	zusammen	
1	2	3	5	7	9	10
Allgemeine Daten						
Bestand an Nutzfahrzeugen		73	160	141	374	Nfzge.
Jahresfahrleistung		4,3	7,3	1,0	12,6	Mio. km/a
Betriebshöfe		1	5	2	8	Stück
Betriebshof-fläche	absolut	30.705	58.700	25.600	115.005	m²
	je Nfzg.	420	370	180	310	m²/Nfzg.

Die Bewertung der **technischen Machbarkeit einer Umstellung großer kommunaler Fahrzeugflotten von Dieselmotoren auf alternative Antriebe** erstreckte sich auf die Abschätzung der damit verbundenen Veränderungen gegenüber der Dieselreferenz, die im Energieverbrauch und in den Emissionen von Treibhausgasen und Luftschadstoffen zu erwarten sind (Abschnitt 3). Sowohl der Energieverbrauch als auch die Emissionen wurden zunächst beispielhaft anhand einer konkreten Omnibuslinie berechnet, die von der RSAG in der Regiopole Rostock betrieben wird. Dazu wurden fahrzeug- und einsatzspezifische Kennwerte zum Energieverbrauch und zu den Emissionen zusammengetragen und zur Parametrisierung eines Modells der Buslinie verwendet. Anschließend wurden der Energieverbrauch und die Emissionen von dieser einzelnen Buslinie auf die Regiopolregion Rostock insgesamt, also auf den Fahrzeugbestand bzw. auf die Jahresfahrleistungen der drei kommunalen Unternehmen hochgerechnet. Im Ergebnis ist

133 DME kann prinzipiell anstelle von GtL-Dieselkraftstoff in Dieselfahrzeugen eingesetzt werden. Diese Option ist umso bedeutsamer, als die GtL-Herstellung auf der Basis von Erdgas schon aus Klimaschutzgründen, des Weiteren aber auch aus Gründen der Erdgas-Versorgungssicherheit Deutschlands nicht zukunftsfähig ist.

festzustellen, dass der Energieverbrauch von Biomethanbussen etwas höher liegt als der Energieverbrauch von Dieselbussen. Demgegenüber haben die anderen alternativ angetriebenen Omnibusse gegenüber dem Dieselbus einen geringeren Energieverbrauch. Dies gilt insbesondere für Batteriebusse, da hier die Umwandlungsverluste von Verbrennungsmotoren entfallen. Im Hinblick auf die energetische Machbarkeit einer Umstellung der betreffenden Nutzfahrzeugflotten konnte weiterhin festgestellt werden, dass diese innerhalb der Erneuerbare-Energien-Potenziale der Regiopolregion Rostock möglich ist. Allerdings ist dabei zu berücksichtigen, dass dort neben den kommunalen Flotten auch der Verkehr insgesamt sowie andere Verbrauchssektoren zu dekarbonisieren, das heißt auf Erneuerbare Energien umzustellen sind.

Im Ergebnis der Abschätzung der Tank-to-Wheel-Treibhausgasemissionen zeigte sich, dass alle alternativ angetriebenen Nutzfahrzeuge im Vergleich zu Diesel-Nutzfahrzeugen ähnliche bzw. geringere Emissionen aufweisen. Wasserstofffahrzeuge mit Brennstoffzellen und batterieelektrische Fahrzeuge sind unter der Voraussetzung des Einsatzes von erneuerbarem Strom frei von lokalen Emissionen. Biomethan- und DME-Nutzfahrzeuge emittieren im Betrieb annähernd die gleichen CO_2-Mengen wie Nutzfahrzeuge mit Dieselantrieb. Tabelle *15* gibt den Energieverbrauch und die Tank-to-Wheel-Treibhausgasemissionen der Nutzfahrzeugflotten mit alternativen Antrieben im Vergleich zur Referenz Diesel-Nutzfahrzeuge an. Die Zahlen gelten für den Fall, dass jeder drei kommunalen Flottenbetreiber in der Regiopolregion Rostock seine Jahresfahrleistung nicht mehr mit Dieselfahrzeugen realisiert, sondern mit einer alternativ angetriebenen Fahrzeugflotte, wobei diese die Dieselflotte jeweils vollständig ersetzt. Wie die Tabelle zeigt, belaufen sich die Treibhausgasemissionen aller Diesel-Nutzfahrzeuge der drei kommunalen Unternehmen in der Regiopolregion Rostock gegenwärtig auf 13,1 kt/a $CO_{2,äq.}$. Demgegenüber sind unter der genannten Voraussetzung des Einsatzes erneuerbaren Stroms Batterie- und Wasserstofffahrzeuge frei von Treibhausgasemissionen. Die Tank-to-Wheel-Treibhausgasemissionen von Biomethan- und von DME-Nutzfahrzeugen sind mit 12,6 bzw. 12,5 kt/a $CO_{2,äq.}$ etwas geringer als die der Diesel-Nutzfahrzeuge.

Allerdings spiegeln die Tank-to-Wheel-Treibhausgasemissionen die Klimaschutzeffekte nur unzureichend wider, die mit der Umstellung der Nutzfahrzeugflotten von Dieselkraftstoff auf Biomethan bzw. DME verbunden sind. Deshalb wurden deren CO_2-Emissionen in einer erweiterten Betrachtung bilanziert, welche die in dem Biomethan bzw. im DME gebundenen CO_2-Emissionen berücksichtigt: Die von einer mit Biomethan betriebene Nutzfahrzeugflotte emittierten CO_2-Emissionen entsprechen jenen, die zuvor bei der Herstellung des Biomethans durch das Pflanzenwachstum der Atmosphäre entzogen wurden. Die von einer DME-Nutzfahrzeugflotte emittierten CO_2-Emissionen entsprechen jenen, die zur DME-Herstellung aus dem Abgasstrom eines mit fossilem Brennstoff betriebenen Kraftwerks abgeschieden werden müssen. In beiden Fällen werden somit die CO_2-Emissionen der Diesel-Nutzfahrzeugflotte vermieden. Gemäß dieser erweiterten Bilanzierung werden bei der Umstellung der Nutzfahrzeugflotten der drei kommunalen Unternehmen von Dieselkraftstoff auf Biomethan regional - 13,1 kt/a CO_2 weniger emittiert. Bei der Umstellung von Dieselkraftstoff auf DME beläuft sich der Rückgang der CO_2-Emissionen in der Regiopolregion Rostock sogar auf - 25,6 kt/a CO_2, sofern das zur DME-Herstellung erforderliche CO_2 aus einem regionalen Kraftwerk abgeschieden wird und sofern für die Abscheidung erneuerbarer Strom verwendet wird.

Im Weiteren wird für die Regiopolregion Rostock ein **Betriebshofkonzept für den Betrieb von Omnibusflotten mit alternativen Antrieben** entwickelt, welches prinzipiell auch auf den Betrieb von Entsorgungs- und Nutzfahrzeugen in der Abfallentsorgung übertragbar ist (Abschnitt 4). Das Grundkonzept wird durch den Betriebshof für Dieselfahrzeuge beschrieben. Dieser bildet den Ausgangspunkt entweder für die Umstellung der bestehenden Fahrzeugflotte auf erneuerbaren Dieselkraftstoff (DME) oder für den übergangsweisen Mischbetrieb von Dieselfahrzeugen und Fahrzeugen mit anderen alternativen Antrieben. Die Umstellung der bestehenden Fahrzeugflotten auf DME hat enorme Vorteile, da die vorhandenen Dieselfahrzeuge und die Tankstellen im Wesentlichen unverändert weiter genutzt werden können: Die Umstellung einer Nutzfahrzeugflotte von Dieselkraftstoff auf DME ist weitgehend mit den vorhandenen Betriebshöfen möglich (sofern der DME nicht selbst erzeugt, sondern angeliefert wird). Zudem sind kaum zusätzliche Werkstattkapazitäten oder -fähigkeiten erforderlich. Schließlich weist die DME-Herstellung einen negativen CO_2-Saldo auf, ist also nicht nur CO_2-neutral, sondern verbraucht CO_2 aus mit fossilen Brennstoffen betriebenen Kraftwerken.

Tabelle 15: Energieverbrauch und THG-Emissionen der drei kommunalen Nutzfahrzeugflotten

Unternehmen		RSAG	rebus	SR	zusammen	
1	2	3	5	7	9	10
Energieverbrauch (für o. g. Jahresfahrleistung)						
Diesel-fahrzeug	Traktion	1.799	2.324	537	4.660	10^3 l DK
	HLKT*)	86	147		233	10^3 l HEL
	gesamt	1.885	2.471	537	4.893	10^3 l DK/HEL
Batterie-fahrzeug	Traktion	5.256	9.004	1.882	16.142	MWh
	HLKT*)	1.060	1.816		2.876	MWh
	gesamt	6.316	10.820	1.882	19.018	MWh
Biomethan-fahrzeug	Traktion	1.673	2.866	599	5.138	10^3 m^3
	HLKT*)	96	165		261	10^3 m^3
	gesamt	1.769	3.031	599	5.399	10^3 m^3
Wasserstoff-fahrzeug	Traktion	305	523	109	937	t
	HLKT*)	62	106		168	t
	gesamt	367	629	109	1.105	t
DME-Fahrzeug	Traktion	2.252	3.858	806	6.916	10^3 l DME
	HLKT*)	129	221		350	10^3 l DME
	gesamt	2.381	4.079	806	7.266	10^3 l DME
THG-Emissionen tank to wheel (für o. g. Jahresfahrleistung)						
Diesel-fahrzeug	CO_2	5.053	6.626	1.440	13.119	t/a
	CH_4	-	-	-	-	t/a
	$CO_{2,äq.}$	5.053	6.626	1.440	13.119	t/a
Batterie-fahrzeug	CO_2	-	-	-	-	t/a
	CH_4	-	-	-	-	t/a
	$CO_{2,äq.}$	-	-	-	-	t/a
Biomethan-fahrzeug	CO_2	3.910	6.660	1.300	11.870	t/a
	CH_4	10	17	3	30	t/a
	$CO_{2,äq.}$	4.153	7.077	1.382	12.612	t/a
Wasserstoff-fahrzeug	CO_2	-	-	-	-	t/a
	CH_4	-	-	-	-	t/a
	$CO_{2,äq.}$	-	-	-	-	t/a
DME-Fahrzeug	CO_2	4.120	6.980	1.400	12.500	t/a
	CH_4	-	-	-	-	t/a
	$CO_{2,äq.}$	4.120	6.980	1.400	12.500	t/a

Demgegenüber ist der Mischbetrieb durch den gleichzeitigen Betrieb von Diesel-Nutzfahrzeugen und von Nutzfahrzeugen mit alternativen Antrieben auf ein und demselben Betriebshof gekennzeichnet. Hierbei wird davon ausgegangen, dass parallel zum Dieselbetrieb jeweils nur ein alternatives Antriebskonzept realisiert wird. Dementsprechend wird das Grundkonzept in drei Varianten um die alternativen Antriebskonzepte erweitert, die für die Regiopolregion Rostock relevant sind. Diese Varianten beschreiben jeweils die für den Mischbetrieb erforderlichen infrastrukturellen Anpassungen des Betriebshofs für Dieselfahrzeuge (Grundkonzept). Das Grundkonzept bezieht sich auf eine für die Regiopolregion Rostock typische Flottengröße von ca. 60 Omnibussen[134], woraus sich je nach Fahrzeugstruktur (Busgrößen) als ein wesentlicher Parameter die Größe des Betriebshofs ergibt, der eine Fläche von 20 bis 35 Tsd. m² haben sollte. Weitere Parameter wurden jeweils in den drei Varianten des Betriebshofkonzepts festgelegt:

- Variante 1: Erweiterung des Grundkonzepts um Batteriebusse:
  Das Laden erfolgt ausschließlich auf dem Betriebshof über Nacht mit einer Ladeleistung von 150 kW. Hierfür sind entsprechende Ladeinfrastrukturen erforderlich.
- Variante 2: Erweiterung des Grundkonzepts um Wasserstoffbusse:
  Der Wasserstoff wird nicht auf dem Betriebshof erzeugt, sondern in Gasform (CGH_2) angeliefert. Die Versorgung der Nutzfahrzeuge erfordert dementsprechend eine Wasserstofftankstelle.
- Variante 3: Erweiterung des Grundkonzepts um Biomethanbusse:
  Die Busse werden auf dem Betriebshof mit bilanziellem Biomethan in Gasform (CBM) betankt, welches von der Biomethantankstelle auf dem Betriebshof aus dem Erdgasnetz entnommen und nach Druckerhöhung den Fahrzeugen zugeführt wird.

Der Ausbau der Infrastrukturen gemäß den Betriebshofvarianten betrifft neben Ladeinfrastrukturen und Tankstellen auch die Verstärkung der Stromnetzanschlüsse sowie gegebenenfalls erneuerbare Stromerzeugungsanlagen sowie Erzeugungsanlagen für Biomethan, Wasserstoff, erneuerbare Gase oder erneuerbare Kraftstoffe (eGase bzw. eFuels - DME).

Weiterhin erfordern die Betriebshofvarianten den Ausbau der Werkstattkapazitäten. Diese müssen neue Anforderungen beispielsweise im Hochvoltbereich oder bei Gasanlagen erfüllen können, die sowohl aus den Fahrzeugen als auch aus der Infrastruktur resultieren. Diese Werkstätten könnten dann allerdings auch die Wartung und Instandhaltung eigener Kraftstofferzeugungsanlagen durchführen.

Darüber hinaus erfordern die spezifischen Eigenschaften von Fahrzeugbatterien und Energieträgern wie Wasserstoff oder Biomethan und die daraus resultierenden Gefährdungen die Aus- und Weiterbildung des Werkstattpersonals sowie die Weiterentwicklung der Betriebshof-Sicherheitskonzepte im Hinblick auf den Brand- und Explosionsschutz.

Abschließend wird für die Regiopolregion Rostock ein **Planungs- und Umsetzungskonzept** entwickelt, welches den Prozess der Umstellung der dort vorhandenen kommunalen Nutzfahrzeugflotten auf alternative Antriebe beschreibt und damit eine Orientierung über die zeitlichen und inhaltlichen Handlungserfordernisse geben soll (Abschnitt 5). Diese beziehen sich zum einen auf die Umstellung der Nutzfahrzeugflotten und zum anderen auf die Anpassung der Betriebshöfe, welche die operative Basis für den Betrieb der Nutzfahrzeuge bilden. In zeitlicher Hinsicht können zunächst drei Phasen der Konzeptumsetzung definiert werden:

- status quo mit dem Betrieb von Dieselfahrzeugen als Startzeitpunkt,
- zwischenzeitlicher Mischbetrieb von Dieselfahrzeugen und von alternativ angetriebenen Fahrzeugen,
- Vollumstellung als Endzeitpunkt.

In der weiteren Konkretisierung des Konzepts für die Regiopolregion Rostock werden sodann die folgenden vier Konzeptphasen unterschieden und jeweils hinsichtlich der Veränderungen in den Nutzfahrzeugbeständen und der Infrastrukturen auf den Betriebshöfen kurz beschrieben:

[134] Die auf dem Betriebshof Petridamm stationierte Nutzfahrzeugflotte der SR-Gruppe ist etwa dreimal so groß, weshalb die Betriebshofdaten entsprechend zu skalieren sind.

1. Startphase (ca. 2018 bis 2020),
2. Einführungsphase (ca. 2020 bis 2025),
3. Konsolidierungsphase (ca. 2025 bis 2030) und
4. Abschlussphase (ca. 2030 bis 2035).

Die Umsetzung des Planungs- und Umsetzungskonzepts in der Regiopolregion Rostock sollte durch ein Monitoring begleitet werden. Hierfür sollten die Entwicklung der Fahrzeugbestände und deren Antriebsstrukturen der drei kommunalen Nutzfahrzeugflotten, die Entwicklung der Infrastrukturen auf den zugehörigen Betriebshöfen und die Entwicklung der Erzeugung bzw. des Verbrauchs der Energiemengen für den Betrieb der Fahrzeugflotten in regelmäßigen Abständen erfasst werden.

Zudem sollte die Umsetzung des Planungs- und Umsetzungskonzepts einer periodischen Erfolgskontrolle unterzogen werden. Um den dafür erforderlichen Vergleich von Ist- und Zielwerten durchführen zu können, ist eine Vorausrechnung der Zielwerte durchzuführen. Allerdings liegen wesentliche Eingangsdaten für eine solche Vorausrechnung gegenwärtig nicht vor. Diesbezügliche Annahmen würden aus verschiedenen Gründen mit größeren Unsicherheiten behaftet sein. Um diese Unsicherheiten berücksichtigen zu können, sollte die Vorausrechnung in Form von Szenarien erfolgen.

7. Literatur- und Quellenverzeichnis

/1/ Verordnung (EU) 2018/858 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2018 über die Genehmigung und die Marktüberwachung von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern sowie von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für diese Fahrzeuge. Verfügbar unter: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=celex%3A32018R0858.

/2/ DIN EN 16258:2013-03 (2013): Methode zur Berechnung und Deklaration des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen bei Transportdienstleistungen (Güter- und Personenverkehr). Deutsche Fassung: EN 16258:2012.

/3/ DStGB/DVGW (2019): Einsatz von Gasbussen im ÖPNV. Ein Beitrag zum Klimaschutz und zur Luftreinhaltung. Berlin/Bonn.

/4/ Del Duce, Andrea; Egede, Patricia; Öhlschläger, Gerlind; Dettmer, Tina; Althaus, Hans-Jörg; Bütler, Thomas; Szczechowicz, Eva (2013): Guidelines for the LCA of electric vehicles. Verfügbar unter: http://www.elcar-project.eu/fileadmin/dokumente/Guideline_versions/eLCAr_guidelines.pdf.

/5/ Gesetz über den öffentlichen Personennahverkehr in Mecklenburg-Vorpommern (ÖPNVG M-V) vom 15. November 1995, zuletzt geändert durch Gesetz vom 29. Mai 2020 (GVOBl. M-V S. 445). Verfügbar unter: https://www.landesrecht-mv.de/bsmv/document/jlr-ÖPNVGMVrahmen.

/6/ Ministerium für Energie, Infrastruktur und Digitalisierung Mecklenburg-Vorpommern (2018): Integrierter Landesverkehrsplan Mecklenburg-Vorpommern. Schwerin. Verfügbar unter: https://www.regierung-mv.de/Landesregierung/em/Infrastruktur/Landesverkehrsplan/.

/7/ Reinhardt, Winfried (2018): Öffentlicher Personennahverkehr. Technik – rechts- und betriebswirtschaftliche Grundlagen. Verlag Springer Vieweg. Wiesbaden.

/8/ Ministerium für Energie, Infrastruktur und Digitalisierung Mecklenburg-Vorpommern (2018): Landesraumentwicklungsprogramm Mecklenburg-Vorpommern (LEP M-V). Schwerin. Verfügbar unter: https://www.regierung-mv.de/Landesregierung/em/Raumordnung/Landesraumentwicklungsprogramm/aktuelles-Programm/.

/9/ Roland Berger GmbH (2021): Verkehrswende gestalten – Leistungsstark & nachhaltig. Gutachten über die Finanzierung von Leistungskosten der öffentlichen Mobilität. München. Verfügbar unter: https://www.vdv.de/verkehrswende-gestalten-gutachten-zur-finanzierung-der-leistungskosten-der-oeffentlichen-mobilitaet.aspx.

/10/ Sommer, Carsten (2021): Zukünftige Finanzierung des Öffentlichen Personennahverkehrs. In: Verkehr und Technik 03/2021. S. 75-79. https://doi.org/10.37307/j.1868-7911.2021.03.

/11/ Lewisch, Stephan (2021): Bussysteme der Zukunft. In: Verkehr und Technik 06/2021. S. 187-189. https://doi.org/10.37307/j.1868-7911.2021.06.02.

/12/ Hansestadt Rostock (2021): Bericht der Hanse- und Universitätsstadt Rostock gemäß Artikel 7 Abs. 1 der Verordnung (EG) 1370/2007 für 2020. Verfügbar unter: https://rathaus.rostock.de/de/wirtschaft_verkehr/mobilitaet/oepnv/271942.

/13/ Landkreis Rostock (2021): Bericht des Landkreises Rostock gemäß Artikel 7 Absatz 1 der Verordnung (EG) Nr. 1370/2007 für den Zeitraum vom 01.01.2020 bis 31.12.2020. Verfügbar unter: https://www.landkreis-rostock.de/landkreis/kreisverwaltung/kreisentwicklung/bericht.html.

/14/ Hanse- und Universitätsstadt Rostock (2021): Bericht der Hanse- und Universitätsstadt Rostock gemäß Artikel 7 Abs. 1 der Verordnung (EG) 1370/2007 für 2020. Verfügbar unter: https://rathaus.rostock.de/de/wirtschaft_verkehr/mobilitaet/oepnv/271942.

/15/ Infas, DLR, IVT und infas 360 (2020): Mobilität in Deutschland – MiD Regionalbericht Mecklenburg-Vorpommern. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur. Bonn/Berlin. Verfügbar unter: https://www.regierung-mv.de/Landesregierung/em/Infrastruktur/Mobilitaet-in-M-V/.

/16/ Hanse- und Universitätsstadt Rostock (2021): Statistisches Jahrbuch 2021. Rostock. Verfügbar unter: https://rathaus.rostock.de/de/rathaus/rostock_in_zahlen/veroeffentlichungen/statistisches_jahrbuch_2018/276420.

/17/ Hanse- und Universitätsstadt Rostock (2020): Satzung über die Abfallwirtschaft in der Hanse- und Universitätsstadt Rostock (Abfallsatzung - AbfS). Amts- und Mitteilungsblatt der Hanse- und Universitätsstadt Rostock Nr. 25 vom 18. Dezember 2019. Verfügbar unter: https://rathaus.rostock.de/de/service/aemter/amt_fuer_umwelt_und_klimaschutz/abfallwirtschaft/gebuehren/250960.

/18/ Landkreis Rostock (2016): Satzung über die Abfallentsorgung im Landkreis Rostock. Güstrow. Verfügbar unter: https://www.abfall-lro.de/de/satzung-gebuehren/satzung.php.

/19/ Landkreis Vorpommern-Rügen (2020): Satzung über die Abfallbewirtschaftung im Landkreis Vorpommern–Rügen (Abfallsatzung – AbfS). Verfügbar unter: https://www.lk-vr.de/Kreisverwaltung/Abfallwirtschaft/Eigenbetrieb-AWI/Satzungen/index.php.

/20/ Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern (2021): Daten zur Abfallwirtschaft 2019. Güstrow. Verfügbar unter: https://www.lung.mv-regierung.de/insite/cms/publikation/publikation_download/publikation_download_abfall.htm.

/21/ Hansestadt Rostock (2012): Abfallwirtschaftskonzept der Hansestadt Rostock. Rostock. Verfügbar unter: https://rathaus.rostock.de/de/service/aemter/amt_fuer_umwelt_und_klimaschutz/abfallwirtschaft/abfallwirtschaftskonzept/250835.

/22/ Landkreis Rostock (2013): Abfallwirtschaftskonzept für den Landkreis Rostock. Güstrow. Verfügbar unter: https://www.abfall-lro.de/de/satzung-gebuehren/satzung.php.

/23/ Landkreis Vorpommern-Rügen (2020): Abfallwirtschaftskonzept ab dem Jahr 2021 des Landkreises Vorpommern-Rügen. Stralsund. Verfügbar unter: https://www.lk-vr.de/Kreisverwaltung/Abfallwirtschaft/Aktuelles/index.php.

/24/ Hanse- und Universitätsstadt Rostock (2020): Haushaltsplan 2020/2021. Band I: Rostock. Verfügbar unter: https://rathaus.rostock.de/de/service/aemter/kaemmereiamt/haushaltsplaene/252751.

/25/ Hanse- und Universitätsstadt Rostock (2020): Haushaltsplan 2020/2021. Band VI: Testierte Jahresabschlüsse der Eigen- und Beteiligungsgesellschaften und der Eigenbetriebe. Rostock. Verfügbar unter: https://rathaus.rostock.de/de/service/aemter/kaemmereiamt/haushaltsplaene/252751.

/26/ Verordnung (EU) 2019/1242 des europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Juni 2019 zur Festlegung von CO_2-Emissionsnormen für neue schwere Nutzfahrzeuge und zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 595/2009 und (EU) 2018/956 des Europäischen Parlaments und des Rates sowie der Richtlinie 96/53/EG des Rates (Text von Bedeutung für den EWR).

/27/ Umweltbundesamt (2021): Klimaschutzinstrumente im Verkehr. CO_2-Standards Lkw. Dessau. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/dokument/co2-standards-lkw.

/28/ Europäische Union (2019): Richtlinie (EU) 2019/1161 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Juni 2019 zur Änderung der Richtlinie 2009/33/EG über die Förderung sauberer und energieeffizienter Straßenfahrzeuge. Verfügbar unter: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=CELEX:32019L1161.

/29/ Gesetz über die Beschaffung sauberer Straßenfahrzeuge (Saubere-Fahrzeuge-Beschaffungs-Gesetz – SaubFahrzeugBeschG) vom 9. Juni 2021 (BGBl. I S. 1691).

/30/ Bundes-Klimaschutzgesetz vom 12. Dezember 2019 (BGBl. I S. 2513), zuletzt geändert durch Artikel 1 des Gesetzes vom 18. August 2021 (BGBl. I S. 3905).

/31/ Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2021): Ad-hoc-Task-Force zu Mindeststandards bei der Umrüstung von konventionellen Nutzfahrzeugen auf alternative Antriebe. Ergebnisbericht. Berlin. Verfügbar unter: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/StV/ergebnisbericht-umruestung-nutzfahrzeuge.html.

/32/ Lebküchner, Matthias et al. (2020): Abschätzung des Einsatz- und CO_2-Reduktionspotenzials durch Busse mit nicht fossilen Antriebstechnologien und Fördermöglichkeiten. Grundlagenstudie im

Auftrag des Bundesamtes für Energie. Zürich. https://www.bav.admin.ch/dam/bav/de/dokumente/themen/umwelt/energiestrategie-projekte/schlussbericht-p201.pdf.download.pdf/P-201_3422a_E-Bus-BFE_Schlussbericht_final_20201012.pdf.

/33/ Schrödl, Manfred (2021): Batterie oder Wasserstoff – Wer macht das Rennen in der zukünftigen Mobilität? In: Verkehr und Technik 09/2021. S. 299-304. https://doi.org/10.37307/j.1868-7911.2021.09.

/34/ Betriebspraxis (2021): Praxisversuch zeigt Marktreife von E-Bussen auch im regionalen Linienverkehr. In: Verkehr und Technik 10/2021. S. 354. https://doi.org/10.37307/j.1868-7911.2021.10.

/35/ Schwertner, Michael (2017): Energetischer Systemvergleich von Diesel-, Hybrid- und Elektrobussen. Diss. ETH Zürich. Zürich.

/36/ Kunith, Alexander W. (2017): Methodik zur Technologiebewertung für die Elektrifizierung des urbanen öffentlichen Busverkehrs. Diss. TU Berlin.

/37/ Berthold, Kilian (2018): Techno-ökonomische Auslegungsmethodik für die Elektrifizierung urbaner Busnetze. Diss. Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Karlsruhe.

/38/ Bunzel, Alexander (2020): Leistungsbedarf Bestimmung elektrifizierter Stadtbusse im Linieneinsatz. Diss. TU Dresden.

/39/ Jefferies, Dominic Richard (2021): Auslegung, Simulation und Optimierung elektrifizierter Stadtbussysteme. Diss. TU Berlin.

/40/ Rogge, Matthias (2020): Electrification of Public Transport Bus Fleets with Battery Electric Buses. Diss. RWTH Aachen.

/41/ Fay, Tu-Anh. (2019): Methodischer Technologievergleich von Systemkonzepten für die Elektrifizierung von Stadtbussen Diss. TU Berlin.

/42/ Ufert, Martin (2020): Simulationsbasierte Systemauslegung von Elektrobuslinien. Diss. TU Dresden.

/43/ Luz, Raphael (2015): Simulationsbasierte Methode zur Zertifizierung der CO_2 Emissionen von schweren Nutzfahrzeugen. Diss. TU Graz.

/44/ Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches (2019): Bewertung von Gasbussen im ÖPNV und Vergleich mit alternativen Antrieben. Abschlussbericht. Bonn.

/45/ Allekotte, Michel et al. (2020): Ökologische Bewertung von Verkehrsarten. Abschlussbericht. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Heidelberg/Zürich/Berlin.

/46/ Müller, Kerstin K. et al. (2017): Clean Hydrogen in European Cities. CHIC Final Report – Part A (2017). Verfügbar unter: https://www.fuelcellbuses.eu/sites/default/files/documents/Final%20Report_CHIC_28022017_Final_Public.pdf.

/47/ Nachtmann, Korbinian Andreas (2017): Mechanistische Untersuchung des Kristallbildungsprozesses von resublimierendem Kohlendioxid aus variablen Gasgemischen unter Atmosphärendruck an festen Oberflächen. Diss. TU München.

/48/ Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e. V. (2020): Auswirkungen der „Clean Vehicles Directive“ im Linienbus auf Betriebshöfe und Werkstätten. VDV-Schrift 825. Stand: 11/2020. Köln.

/49/ Omari, Ahmad; Heuser, Benedikt; Pischinger, Stefan (2017): Potential of oxymethylenether-diesel blends for ultra-low emission engines. In: Fuel, Volume 209, 2017, S. 232-237. Verfügbar unter: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.07.107.

/50/ Pélerin, Dominik (2021): Potentiale der synthetischen Kraftstoffe Oxymethylenether und Dimethylether zur Realisierung klimaneutraler, schadstoffarmer sowie vereinfachter Dieselmotoren. Diss. TU München.

/51/ Zubel, Marius Konstantin (2021): Brennverfahrensoptimierung für den bivalenten Betrieb von Dimethylether und Diesel. Diss. RWTH Aachen.

/52/ Narankhuu Jamsran; Ocktaeck Lim (2016): A Study on the Autoignition Characteristics of DME–LPG Dual Fuel in the HCCI Engine. In: Heat Transfer Engineering, 37(2016)17, S. 1488-1497. Verfügbar unter: https://doi.org/10.1080/01457632.2016.1142816.

/53/ Beck, Jennifer Maria (2019): One-step CO_2 hydrogenation to methanol and dimethyl ether. Diss. Universität Freiburg i. Br. Freiburg.

/54/ Laske, Andreas (2022): Ladetechnik für Elektrobusse – Systemlösungen von Siemens. In: Verkehr und Technik 01/2022 S. 13-20. https://doi.org/10.37307/j.1868-7911.2022.01.04.

/55/ BPV Consult GmbH (2019): traffiQ - Planung von Elektrobuslinien und ihrer Infrastruktur. Technisches Handbuch Elektrobus. Koblenz. Verfügbar unter: https://www.traffiq.de/fileadmin/user_upload/pdfs/Vergaben/2019/traffiQ_Technisches_Handbuch_Buendel_A_2019_06_28.pdf&usg=AOvVaw33lfJrO4e7Gb3Fk7-kPr9P.

/56/ Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (2021): Marktübersicht Elektro- und Wasserstoffbusse. Stand 2020. Wien.

/57/ Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2021): Innovative Antriebe im straßengebundenen ÖPNV Bus. Marktübersicht. Programmbegleitforschung Innovative Antriebe und Fahrzeuge. Berlin.

/58/ VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V. (2020): Logistik, Energie und Mobilität 2030. Metastudie im BMWi-Technologieprogramm IKT für Elektromobilität. Berlin. Verfügbar unter: https://www.vde.com/de/presse/pressemitteilungen/logistik-energie-und-mobilitaet-2030

/59/ Bürgerschaft der Freien und Hansestadt Hamburg (2021): Elektrobusse im Ganzjahresbetrieb. Drucksache 22/341 vom 23. März 2021. Verfügbar unter: https://www.buergerschaft-hh.de/parldok/vorgang/68440.

/60/ e-mobil BW GmbH (2017): Nullemissionsfahrzeuge. Vom ökologischen Hoffnungsträger zur ökologischen Alternative. Stuttgart.

/61/ FAUN Umwelttechnik GmbH & Co. KG (2021): Nutzfahrzeuge mit H_2-Brennstoffzellen-Antrieb. Osterholz-Scharmbeck. Verfügbar unter: https://www.faun.com/produkte/alternative_antriebe/bluepower/.

/62/ Tomaszewska, Anna et al. (2019): Lithium-ion battery fast charging: A review. In: eTransportation, Vol. 1, 2019, 100011. Verfügbar unter: https://doi.org/10.1016/j.etran.2019.100011.

/63/ Raab, Andreas F.; Lauth, Enrico; Strunz, Kai; Göhlich, Dietmar (2019): Implementation Schemes for Electric Bus Fleets at Depots with Optimized Energy Procurements in Virtual Power Plant Operations. In: World Electric Vehicle Journal, Vol. 10, No. 1, 2032-6653. Verfügbar unter: https://doi.org/10.3390/wevj10010005.

/64/ Xiaohan Liu, Xiaobo Qu, Xiaolei Ma (2021): Optimizing electric bus charging infrastructure considering power matching and seasonality. In: Transportation Research Part D: Transport and Environment, Vol. 100, 2021, 103057. Verfügbar unter: https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.103057.

/65/ Olsen, Nils; Kliewer, Natalia (2020): Scheduling Electric Buses in Public Transport: Modeling of the Charging Process and Analysis of Assumptions. In: Logistics Research (2020) 13:4. Verfügbar unter: doi:10.23773/2020_.

/66/ Kai Liu; Hong Gao; Zhe Liang; Meng Zhao; Cheng Li (2021): Optimal charging strategy for large-scale electric buses considering resource constraints. In: Transportation Research Part D: Transport and Environment, Vol. 99, 2021, 103009, https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.103009.

/67/ e-mobil BW GmbH (2013): Wasserstoff-Infrastruktur für eine nachhaltige Mobilität. Entwicklungsstand und Forschungsbedarf. Stuttgart.

/68/ TÜV-Verband e. V. (2009): Merkblatt DRGA 514: Druckgase 514 - Anforderungen an Wasserstofftankstellen. Berlin.

/69/ Bünnagel, Claus (2021): Biomethanbusse: Große Chance oder Sackgasse? In: Verkehr und Technik 10/2021. S. 358-365. https://doi.org/10.37307/j.1868-7911.2021.10.

/70/ Gäfgen, Frank (2021): Batterie und Wasserstoff. Erster Wasserstoffbus der Stadtwerke Münster. In: Verkehr und Technik 04/2021. S. 130-132. https://doi.org/10.37307/j.1868-7911.2021.04.

/71/ Möllenbruck, Florian (2020): Power-to-X-Konzepte zur Herstellung von synthetischen Kraftstoffen. Diss. Univ. Duisburg-Essen. 2020.

/72/ Bertau, Martin (2019): Methanol – der Kraftstoff, der uns morgen antreibt. In: Maus, Wolfgang (Hrsg.): Zukünftige Kraftstoffe. Energiewende des Transports als ein weltweites Klimaziel. Springer Verlag. Berlin. S. 480–531. Verfügbar unter: https://doi.org/10.1007/978-3-662-58006-6_21.

/73/ Gierlich, Christian Henning; Beydoun, Kassem; Klankermayer, Jürgen; Palkovits, Regina (2021): Challenges and Opportunities in the Production of Oxymethylene Dimethylether: In: Chemie Ingenieur Technik 92(2020)1-2. S. 116-124. Verfügbar unter: https://doi.org/10.1002/cite.202100167.

/74/ Banivaheb, Soudeh; Pitter, Stephan; Delgado, Karla Herrera; Rubin, Michael; Sauer, Jörg und Dittmeyer, Roland (2022): Recent Progress in Direct DME Synthesis and Potential of Bifunctional Catalysts. In: Chemie Ingenieur Technik 94(2022)3. S.240-255. Verfügbar unter: https://doi.org/10.1002/cite.202100167.

/75/ Decker, Lutz (2019): Liquid Hydrogen Distribution Technology. Vortrag auf dem Hyper Closing Seminar am 11. Dezember 2019 in Brüssel. Verfügbar unter: https://www.sintef.no/globalassets/project/hyper/presentations-day-2/day2_1105_decker_liquid-hydrogen-distribution-technology_linde.pdf.

/76/ BDO AG Wirtschaftsprüfungsgesellschaft (2021): Bericht über die Prüfung des Jahresabschlusses und des Lageberichts für das Geschäftsjahr vom 1. Januar 2020 bis zum 31. Dezember 2020 der rebus Regionalbus Rostock GmbH Güstrow.

/77/ Schlensog, Christian (2021): Stadtentsorgung Rostock GmbH SR Technik GmbH SR Service GmbH - Umwelt- und Energiebericht 2021 für das Jahr 2020. Rostock.

/78/ NOW GmbH (2021): Leitfaden für Busse mit alternativen Antrieben. Berlin. Verfügbar unter: https://www.now-gmbh.de/aktuelles/pressemitteilungen/neue-publikation-der-now-gmbh-leitfaden-fuer-busse-mit-alternativen-antrieben/.

/79/ Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e. V. (2016): Richtlinie für den Bau von Omnibus-Betriebshöfen. VDV-Schrift 822. Stand: 09/2016. Köln.

/80/ Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e. V. (2020): E-Bus - Infrastruktur/Ladestellen. VDV-Schrift 260. Stand: 03/2016. Köln.

/81/ Lauth, Enrico (2021): Simulationsbasierte Planung und Evaluation von Depots für elektrische Busse. Diss. TU Berlin.

/82/ Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2021): Projektübersicht 2020/2021 Zero Emission Busse in Deutschland. Berlin. Verfügbar unter: https://www.xn--starterset-elektromobilitt-4hc.de/Infothek/Publikationen/projektuebersicht-2020-2021-zero-emission-busse-in-deutschland/210922_busstudieneue-fassung-fin.pdf.

/83/ Akademie des Deutschen Kraftfahrzeuggewerbes GmbH (2020): Arbeitsschutz und Ausstattung für die Wartung und Instandsetzung von Fahrzeugen mit LNG-Antrieb - Leitfaden für Kfz-Werkstätten. Verfügbar unter: https://www.tak.de/praxisratgeber.aspx.

/84/ NOW GmbH (2018): Einführung von Wasserstoffbussen im ÖPNV. Fahrzeuge, Infrastruktur und betriebliche Aspekte. Berlin. Verfügbar unter: https://www.now-gmbh.de/aktuelles/pressemitteilungen/broschuere-einfuehrung-von-wasserstoffbussen-im-oepnv/.

/85/ Kollmann, Christoph; Rogalla, Dirk (2021): E-Busse bei BOGESTRA und HCR: Vom Beschluss bis zum Dauereinsatz auf Linie. In: Verkehr und Technik 09/2021 S.325-328. https://doi.org/10.37307/j.1868-7911.2021.09.05.

/86/ Frank, Marcel (2021): Auf dem Weg zu einem nachhaltigen emissionsfreien ÖPNV – Betriebserfahrungen mit der größten H_2-Busflotte in Deutschland. In: Verkehr und Technik 09/2021 S. 314-316. https://doi.org/10.37307/j.1868-7911.2021.09.04.

/87/ ATI erc gGmbH (2010): Vorstellung des EU-Projekts "Baltic Biogas Bus" - Regenerativer Kraftstoff für einen klimaneutralen Personennahverkehr. Vortrag auf dem 4. Rostocker Bioenergieforum "Zukunftstechnologien für Bioenergie" der Universität Rostock am 27./28.10.2010. Rostock. Verfügbar unter: https://www..ati-erc.de/download/Vortraege_Bioenergieforum_deutsch.pdf.

/88/ Röder, Klaus (2018): Klimaneutraler Nahverkehr in Augsburg. Biomethan-Busse im Einsatz. Stadtwerke Augsburg Verkehrs-GmbH. Augsburg. Verfügbar unter: https://www..gat-wat.de/wp-content/uploads/2018/11/Klimaneutraler-Nahverkehr_Röder.pdf.

/89/ Reuß, Markus Eduard (2019): Techno-ökonomische Analyse alternativer Wasserstoffinfrastruktur. Diss. RWTH Aachen.

/90/ Bünnagel, Claus (2021): Kosten sparen mit optimiertem Lademanagement. Ausgangslage – Investitionskosten – Weitere Infrastrukturmaßnahmen – Monitoring. In: Verkehr und Technik 09/2021 S. 322-324. https://doi.org/10.37307/j.1868-7911.2021.09.10.

/91/ Jahic, Amra; Eskander, Mina; Schulz, Detlef (2019): Charging Schedule for Load Peak Minimization on Large-Scale Electric Bus Depots. In: Applied Sciences 9, Nr. 9: 1748. Verfügbar unter: https://doi.org/10.3390/app9091748.

/92/ Bundesamt für Verkehr (2019): Leitfaden Flottenelektrifizierung für Busbetriebe. Bern. Verfügbar unter: https://www.bav.admin.ch/bav/de/home/allgemeine-themen/forschung-innovation/forschungs-innovationsprogramme/ESoeV2050/esoev-news/ausgaben-2020/esoev-news-februar-2020/flottenelektrifizierung-busse.html.

/93/ .

Anhang

A.1 Vergleich der Tank-to-Wheel-Emissionen für alternativ angetriebene Nutzfahrzeuge

Die folgenden Tabellen untersetzen die in Tabelle *13* (Abschnitt 3.2.2) zusammengefassten jährlichen Emissionen von Treibhausgasen und Luftschadstoffen für die drei kommunalen Unternehmen RSAG, rebus und SR. Dabei handelt es sich um die Tank-to-Wheel-Emissionen, welche in den kommunalen Fahrzeugflotten der drei Unternehmen entstehen, wenn deren Diesel-Nutzfahrzeuge jeweils vollständig durch Nutzfahrzeuge mit alternativen Antrieben ersetzt werden.

Tabelle 16: Vergleich der Tank-to-Wheel-Emissionen - RSAG

THG bzw. Schadstoff		CO_2	CH_4	NO_x	Staub	CO	NMVOC
Antriebsart		RSAG - Emissionsvergleich Tank-to-Wheel in t/a					
1	2	3	4	5	6	7	8
Diesel-fahrzeuge	Traktion	4.826	0,0	7,2	0,2	72,5	2,9
	HKLT	228	0,0	0,3	0,0	3,4	0,1
Batterie-fahrzeuge	Traktion	-	-	-	-	-	-
	HKLT	-	-	-	-	-	-
Biomethan-fahrzeuge	Traktion	3.697	9,2	7,4	0,2	73,6	2,9
	HKLT	213	0,5	0,4	0,0	4,2	0,2
Wasserstoff-fahrzeuge (BZ)	Traktion	-	-	-	-	-	-
	HKLT	-	-	-	-	-	-
DME-Fahrzeuge	Traktion	3.847	0,0	4,8	0,0	0,0	0,0
	HKLT	221	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0

Tabelle 17: Vergleich der Tank-to-Wheel-Emissionen - rebus

THG bzw. Schadstoff		CO_2	CH_4	NO_x	Staub	CO	NMVOC
Antriebsart		rebus - Emissionsvergleich Tank-to-Wheel in t/a					
1	2	3	4	5	6	7	8
Diesel-fahrzeuge	Traktion	6.236	0,0	9,4	0,2	93,6	3,7
	HKLT	390	0,0	0,6	0,0	5,9	0,2
Batterie-fahrzeuge	Traktion	-	-	-	-	-	-
	HKLT	-	-	-	-	-	-
Biomethan-fahrzeuge	Traktion	6.334	15,8	12,6	0,3	126,1	5,0
	HKLT	365	0,9	0,7	0,0	7,3	0,3
Wasserstoff-fahrzeuge (BZ)	Traktion	-	-	-	-	-	-
	HKLT	-	-	-	-	-	-
DME-Fahrzeuge	Traktion	6.591	0,0	8,2	0,0	0,0	0,0
	HKLT	378	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0

Tabelle 18: Vergleich der Tank-to-Wheel-Emissionen – SR-Gruppe

THG bzw. Schadstoff		CO_2	CH_4	NO_x	Staub	CO	NMVOC
Antriebsart		SR - Emissionsvergleich Tank-to-Wheel in t/a					
1	2	3	4	5	6	7	8
Diesel-fahrzeuge	Traktion & Funktion	1.440	0,0	2,2	0,1	21,6	0,9
Batterie-fahrzeuge	Traktion & Funktion	-	-	-	-	-	-
Biomethan-fahrzeuge	Traktion & Funktion	1.324	3,3	2,6	0,1	26,4	1,1
Wasserstoff-fahrzeuge (BZ)	Traktion & Funktion	-	-	-	-	-	-
DME-Fahrzeuge	Traktion & Funktion	1.377	0,0	1,7	0,0	0,0	0,0

Dr.-Ing. Grüttner
Energie · Umwelt · Strategie
GmbH

18239 Hohen Luckow
Bützower Str. 1a
Fon +49(0)38295 74-109
Fax +49(0)38295 74-141
Mobil: 0173 973 8243
info@gruettner-eus.de
www.gruettner-eus.de