Energiewende in kommunalen Fahrzeugflotten in der Regiopolregion Rostock

- Bericht Wirtschaftlichkeit -

Erarbeitet durch:



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

Die vorliegende Studie wurde im Auftrag der Hanse- und Universitätsstadt Rostock im Rahmen des Bundesprojekts "Regiopolen und Regiopolregionen für Deutschland" durchgeführt.

Inhaltsverzeichnis

A	bbil	dungsverzeichnis	3
T	abell	lenverzeichnis	4
A	bküı	rzungen	5
0.	V	orbemerkungen	6
	0.1	Ziel und Gliederung	6
	0.2	Begriffe und Abgrenzungen.	7
	0.3	Methoden und Daten	9
1.	K	osten kommunaler Nutzfahrzeuge	11
	1.1	Kosten von Nutzfahrzeugen mit konventionellem Dieselantrieb	11
	1.2	Kosten von Nutzfahrzeugen mit batterieelektrischem Antrieb	12
	1.3	Kosten von Nutzfahrzeugen mit Wasserstoffantrieb (Brennstoffzellen)	16
	1.4	Kosten von Nutzfahrzeugen mit erneuerbar umgerüstetem Dieselantrieb	19
	1.5	Komponentenkosten von Nutzfahrzeugen mit alternativen Antrieben	20
2.	Е	nergiekosten	22
	2.1	Generelle Aspekte	22
	2.2	Fossile Kraftstoffe und CO ₂ -Zertifikatskosten	22
	2.3	Strom	25
	2.4	Wasserstoff	26
	2.5	Erneuerbarer Dieselkraftstoff	28
3.	F	örderangebote des Bundes im Bereich "Alternative Antriebe"	30
	3.1	Überblick über ausgewählte Förderangebote des Bundes	30
	3.2	Förderrichtlinie Busse mit alternativen Antrieben im Personenverkehr	31
	3.3	Förderrichtlinie Klimaschonende Nutzfahrzeuge und Infrastruktur (08/2021)	32
	3.4	Zwischenfazit	33
4.	W	Virtschaftlichkeit alternativer Antriebe im Systemvergleich ÖPNV	34
	4.1	Referenzsystem Dieselbus	34
	4	.1.1 Daten und Annahmen	34
	4	1.2 Systemkosten	34
	4.2	System Batteriebus	35
	4	.2.1 Daten und Annahmen	35
	4	.2.2 Systemkosten	36
	4.3	System Wasserstoffbus (mit Brennstoffzelle)	37
	4	.3.1 Daten und Annahmen	37

4.3.2 Systemkosten	37
4.4 System DME-Dieselbus	38
4.4.1 Daten und Annahmen	38
4.4.2 Systemkosten	39
4.5 Vergleich der Systeme mit Omnibussen	39
5. Wirtschaftlichkeit alternativer Antriebe im Systemvergleich ASF	43
5.1 Referenzsystem Diesel-Abfallsammelfahrzeug	43
5.1.1 Daten und Annahmen	43
5.1.2 Systemkosten	43
5.2 Referenzsystem Batterie-Abfallsammelfahrzeug	44
5.2.1 Daten und Annahmen	44
5.2.2 Systemkosten	45
5.3 Referenzsystem Wasserstoff-Abfallsammelfahrzeug	46
5.3.1 Daten und Annahmen	46
5.3.2 Systemkosten	46
5.4 Referenzsystem DME-Abfallsammelfahrzeug	47
5.4.1 Daten und Annahmen	47
5.4.2 Systemkosten	48
5.5 Vergleich der Systeme mit Abfallsammelfahrzeugen	49
6. Zusammenfassung	52
6. Literatur- und Quellenverzeichnis	55
Anhang 1. Systemkosten Omnibusse	58
Anhang 2. Systemkosten Abfallentsorgungsfahrzeuge	63
Anhang 3. Kilometerkosten im ÖPNV und in der Abfallentsorgung	68

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prozessketten/Kostenrahmen alternativer Antriebstechnologien	7
Abbildung 2: Allgemeines Modell des Systems Verkehrsunternehmen	8
Abbildung 3: Kostenarten in der TCO-Analyse	10
Abbildung 4: Entwicklung der Anschaffungskosten von Wasserstoff-Omnibussen	17
Abbildung 5: Anschaffungskosten von Wasserstofftankstellen für Omnibusse	18
Abbildung 6: Kosten-Lernkurve für Lithium-Ionen-Akkus in BEV	21
Abbildung 7: Preisentwicklung von Dieselkraftstoff, Heizöl leicht und AdBlue	23
Abbildung 8: Entwicklung des Strompreises für "Übrige Abnehmer"	25
Abbildung 9: Entwicklung der Volatilität der Day-Ahead-Strompreise an der Strombörse	26
Abbildung 10: Preisentwicklung für Wasserstoff und Dimethylether (DME)	27
Abbildung 11: Herstellungskosten synthetischer Kraftstoffe im Vergleich	29
Abbildung 12: Systemkosten des Referenzsystems Dieselbus	35
Abbildung 13: Systemkosten des Systems Batteriebus	36
Abbildung 14: Systemkosten des Systems Wasserstoffbus (BZ)	38
Abbildung 15: Systemkosten des Systems DME-Dieselbus	39
Abbildung 16: Vergleich der Systeme – Kilometerkosten – mit Förderung	40
Abbildung 17: Vergleich der Systeme – Kilometerkosten – ohne Förderung	41
Abbildung 18: Systemkosten des Referenzsystems Diesel-Abfallsammelfahrzeug	44
Abbildung 19: Systemkosten des Referenzsystems Batterie-Abfallsammelfahrzeug	45
Abbildung 20: Systemkosten des Referenzsystems Wasserstoff-Abfallsammelfahrzeug	47
Abbildung 21: Systemkosten des Referenzsystems DME-Abfallsammelfahrzeug	48
Abbildung 22: Vergleich der Systeme – Kilometerkosten – mit Förderung	49
Abbildung 23: Vergleich der Systeme – Kilometerkosten – ohne Förderung	51

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Beschaffungspreise für Batteriebusse in Abhängigkeit der Fahrzeuggröße	13
Tabelle 2: Batteriekapazitäten vollelektrischer AbfallsammelfahrzeugeAuswahl)	14
Tabelle 3: Spezifische Komponentenkosten für alternative Antriebe	20
Tabelle 4: CO ₂ -Preisentwicklung bis 2025 gemäß dem BEHG	24
Tabelle 5: Förderangebote des Bundes im Bereich "Alternative Antriebe" (Auswahl)	31
Tabelle 6: Systemkosten des Referenzsystems Dieselbus	59
Tabelle 7: Systemkosten des Systems Batteriebus	60
Tabelle 8: Systemkosten des Systems Wasserstoffbus (mit Brennstoffzelle)	61
Tabelle 9: Systemkosten des Systems DME-Dieselbus	62
Tabelle 10: Systemkosten des Systems Diesel-Abfallsammelfahrzeug	64
Tabelle 11: Systemkosten des Systems Batterie-Abfallsammelfahrzeug	65
Tabelle 12: Systemkosten des Systems Wasserstoff-Abfallsammelfahrzeug	66
Tabelle 13: Systemkosten des Systems DME-Abfallsammelfahrzeug	67
Tabelle 14: Kilometerkosten im ÖPNV	69
Tabelle 15: Kilometerkosten in der Abfallentsorgung	70

Abkürzungen

BAnz - Bundesanzeiger,

BEHG - Brennstoffemissionshandelsgesetz,

BMVI - Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur,

BZ - Brennstoffzelle,

CAPEX - Investitionsausgaben für längerfristige Anlagegüter (capital expenditures),

CCS - Kombiniertes Ladesystem (Combined Charging System),

CVD - Saubere-Fahrzeuge-Richtlinie der Europäischen Union (Clean Vehicles Directive),

DEA - Dezentrale Energieerzeugungsanlage,

DME - Dimethylether, EM - Elektromobilität,

HLKT - Heizungs-, Lüftungs- und Klimatechnik,

LIS - Ladeinfrastruktur,

LOHC - flüssige organische Wasserstoffträger (Liquid Organic Hydrogen Carriers),

LPG - Flüssiggas (Liquefied Petroleum Gas),
 MIV - motorisierter Individualverkehr,
 MKS - Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie,

NIP - Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP),
 OPEX - Betriebsausgaben für Betriebsstoffe, Personal, Energie etc. (operational expenditures),

ÖPNV - Öffentlicher Personennahverkehr,

PPA - Stromliefervertrag (Power Purchase Agreement),
RE - Reichweitenverstärker (Range Extender),
RK - regenerativer (erneuerbarer) Kraftstoff,

TCO - Lebenszykluskosten (Total Cost of Ownership),

TEUR - Tausend Euro,

TI - Tankstelleninfrastruktur,

UW - Umspannwerk,

ÜNB - Übertragungsnetzbetreiber,

VCU - Fahrzeugsteuereinheit (Vehicle Control Unit),

VDV - Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e. V. mit Sitz in Köln,

VNB - Verteilnetzbetreiber,

Regionalbezogene Abkürzungen

rebus - rebus Regionalbus Rostock GmbH

RRR - Regiopolregion Rostock,
RSAG - Rostocker Straßenbahn AG,
SR - Stadtentsorgung Rostock GmbH,

VVW - Verkehrsverbund Warnow

0. Vorbemerkungen

Gegenstand des vorliegenden Berichts ist der Wirtschaftlichkeitsvergleich alternativer Antriebe von Nutzfahrzeugen in kommunalen Fahrzeugflotten. Die im Folgenden beschriebenen Untersuchungen wurden im Rahmen des Bundesprojekts "Regiopolen und Regiopolregionen für Deutschland" zur Umsetzung der Energiewende im Segment kommunaler Fahrzeuge im Auftrag der Hanse- und Universitätsstadt Rostock durchgeführt.

Sie setzt die Technikstudie /1/ fort, welche ebenfalls im Rahmen des Bundesprojekts durchgeführt wurde und auf die Anwendung von Wasserstofftechnologien und auf die Umsetzung der Energiewende im Segment der kommunalen Fahrzeuge in der Regiopolregion Rostock zielte. Gegenstand der Technikstudie war eine Bestandsaufnahme der Energieinfrastrukturen im nicht-schienengebundenen ÖPNV und in der Stadtentsorgung sowohl in der Regiopole als auch in ihrem Verflechtungsraum. Konkret wurden darin die Rostocker Straßenbahn AG (RSAG) und die rebus Regionalbus Rostock GmbH als Betreiber von Busflotten sowie die Stadtentsorgung Rostock GmbH (SR) als Betreiber einer weiteren Nutzfahrzeugflotte untersucht.

In der Technikstudie wurde unter anderem die technische Machbarkeit, der Energieverbrauch und die Klimaschutzeffekte verschiedener alternativer Antriebsvarianten untersucht und darauf aufbauend ein Betriebshofkonzept entworfen, welches die infrastrukturellen Voraussetzungen für den Betrieb alternativ angetriebener Fahrzeugflotten erfüllt. Darauf aufbauend wurde ein Planungs- und Umsetzungskonzept für die Regiopolregion Rostock entwickelt. Die Technikstudie konzentrierte sich somit auf die technischen Aspekte der alternativen Antriebe, welche in den genannten Bus- und Nutzfahrzeugflotten die vorhandenen Dieselfahrzeugen mit dem Ziel einer Neutralisierung ihrer Treibhausgasemissionen ablösen können.

0.1 Ziel und Gliederung

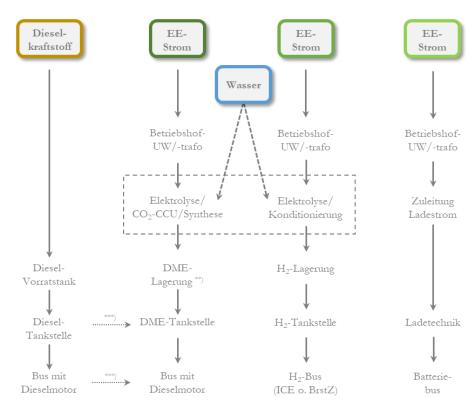
Ziel der hier durchgeführten Wirtschaftlichkeitsstudie war die (betriebs-)wirtschaftliche Priorisierung der in der Technikstudie definierten alternativen Antriebskonzepte, insoweit diese zur Umstellung der kommunalen Fahrzeugflotten in der Regiopolregion Rostock eingesetzt werden könnten. Dabei standen die alternativen Antriebskonzepte im Vordergrund, welche für die rebus Regionalbus Rostock GmbH und für die Stadtentsorgung Rostock GmbH bedeutsam sind.

Die Wirtschaftlichkeit des Betriebs der Nutzfahrzeugflotten mit alternativen Antriebskonzepten wurde durch Kostenvergleiche untersucht, wobei die gegenwärtig sowohl im ÖPNV als auch in der Stadtentsorgung vorherrschenden Dieselfahrzeuge als Referenz zugrunde gelegt wurden. Für die Kostenvergleiche wurden zum einen technische Daten aus der Technikstudie /1/ übernommen, soweit diese für die Wirtschaftlichkeitsberechnungen erforderlich waren. Diese Daten beschreiben die Fahrzeug-/Antriebsvarianten sowie die Infrastrukturen, welche zum Betrieb der Fahrzeuge erforderlich sind. Zum anderen wurde eine Vielzahl von Kostendaten zusammengetragen, die von den Unternehmen erfragt bzw. Aus anderen Datenquellen übernommen wurden (Real-/Literaturdaten).

Die jeweiligen Variantenkosten wurden anhand von Gesamtkostenrechnungen (TCO) für die wichtigsten Fahrzeug-, Antriebs- und Infrastrukturvarianten bewertet. Abbildung 1 gibt einen Überblick über die Prozessketten der betrachteten alternativen Antriebskonzepte. Diese Prozessketten setzen zugleich den Rahmen für die Kosten, welche im Einzelnen zu berücksichtigen waren. Die Abbildung bezieht sich auf Omnibusse, gilt jedoch in gleicher Weise für in der Stadtentsorgung eingesetzte Nutzfahrzeuge. In der Abbildung ist die Elektrolyse innerhalb der Prozessketten für Dieselbusse mit erneuerbarem Dieselkraftstoff (DME)¹ und für Wasserstoffbusse durch eine gestrichelte Linie eingeschlossen. Damit ist angedeutet, dass

DME ist ein strombasierter Dieselkraftstoff, welcher durch die Synthese von Wasserstoff und Kohlendioxid hergestellt wird. Sofern bei der Herstellung erneuerbarer Strom eingesetzt wird, handelt es sich um einen erneuerbaren Dieselkraftstoff. DME liegt unter Normalbedingungen gasförmig vor. Die Handhabungsanforderungen von DME ähneln jenen von Propan, das in Tanks unter Druck gelagert wird. Für den Einsatz in Dieselmotoren ist DME aufgrund seiner verbrennungstechnischen Eigenschaften prinzipiell sehr gut geeignet. Allerdings sind wegen der Viskositäts- und Schmiereigenschaften Anpassungen der Fahrzeuge (Motoren und Tanks) und der Infrastruktur (Tankstellen) erforderlich.

diese optional ist: Diese Teile der beiden Prozessketten können einerseits von den betreffenden Unternehmen selbst installiert und betrieben werden. Andererseits können die Elektrolyseprozesse auch bei Dritten durchgeführt werden, welche dann die Betreiber der kommunalen Nutzfahrzeugflotten mit den entsprechenden Kraftstoffen, also mit DME bzw. mit Wasserstoff beliefern.



*) Entfällt bei Fremdbezug. ***) Gesonderter Tank für Mischbetrieb. ***) Gegebenenfalls entstehen hier Umrüstkosten.

Abbildung 1: Prozessketten/Kostenrahmen alternativer Antriebstechnologien²

0.2 Begriffe und Abgrenzungen

In die Kostenvergleiche wurden neben den als Referenz betrachteten Dieselfahrzeugen die folgenden alternativ angetriebenen Nutzfahrzeuge einbezogen³:

- Batteriefahrzeug,
- H₂-Brennstoffzellenfahrzeug und
- Umrüstung von konventionellem Dieselkraftstoff auf eFuel (DME).

Die in einem kommunalen Unternehmen, welches eine Nutzfahrzeugflotte betreibt, ablaufenden Wertschöpfungsprozesse sind sehr komplex. Abbildung 2 zeigt ein allgemeines Modell des Systems Verkehrsunternehmen, das sinngemäß wiederum auch für Entsorgungsunternehmen zugrunde gelegt werden kann. Für die einzelnen Teilsysteme sind die Ressourcen Energie, Material, Kapital und Personal erforderlich, um den Fahrbetrieb der Nutzfahrzeuge und damit die Produktion von Personen- bzw. Entsorgungskilometern zu ermöglichen. Zusätzlich fallen neben den spezifischen Output-Einheiten der Teilsysteme Emissionen und Abfälle an. Innerhalb der Grenzen dieses Systems werden die zum Fahrbetrieb benötigten Betriebsmittel direkt von dem Unternehmen gesteuert und unterliegen nur noch beschränkt externen Einflüssen. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen wurden nur diejenigen Betriebsmittel berücksich-

-

² Quelle: Eigene Darstellung.

Hybridfahrzeuge mit Diesel- und Elektromotor werden dagegen nicht betrachtet, da diese nur eine teilweise Dekarbonisierung der betreffenden Fahrzeugflotten ermöglichen und beispielsweise die Anschaffungskosten solcher Fahrzeuge gegebenenfalls noch höher sind als jene der betrachteten alternativ angetriebenen Fahrzeuge.

tigt, die unmittelbar für den Fahrbetrieb der Nutzfahrzeuge erforderlich sind. Dabei handelt es sich zunächst um die Fahrzeuge, Weiteren die zu ihrer Versorgung erforderlichen Infrastrukturen sowie die Energieträger, welche von diesen bereitgestellt werden.

Im Einzelnen werden bei den Fahrzeugen zunächst die Fahrzeugkosten berücksichtigt (Beschaffungskosten, Lebensdauer). Zu diesen kommen die Kosten für die wesentlichen Ausstattungen hinzu, also für Batterie- bzw. Brennstoffzellensysteme (Beschaffungs- und Wiederbeschaffungskosten abhängig von der Lebensdauer). Darüber hinaus werden die Kosten für die Fahrzeuginstandhaltung berücksichtigt (Kosten je Kilometer für Wartung, Inspektion, Betriebsstoffe etc.). Bei den Infrastrukturen werden beispielsweise bei Batteriefahrzeugen die Kosten für die Ladeinfrastrukturen berücksichtigt. Diese umfassen die Ladeeinrichtungen mit Kontaktierung (Stecker) sowie die Stromversorgungsinfrastruktur einschließlich Anschlusskostenbeitrag und Baukostenzuschuss. Schließlich werden bei den Energiekosten die Kosten für Kraftstoffe (Dieselkraftstoff, Leichtigkeit, AdBlue), für Strom (einschließlich Steuern, Abgaben und Netznutzung) sowie für Wasserstoff (Bereitstellungs- bzw. Gestehungskosten) berücksichtigt. Fahrerkosten werden dagegen nicht berücksichtigt, da diese bei allen Fahrzeugen gleichermaßen entstehen.

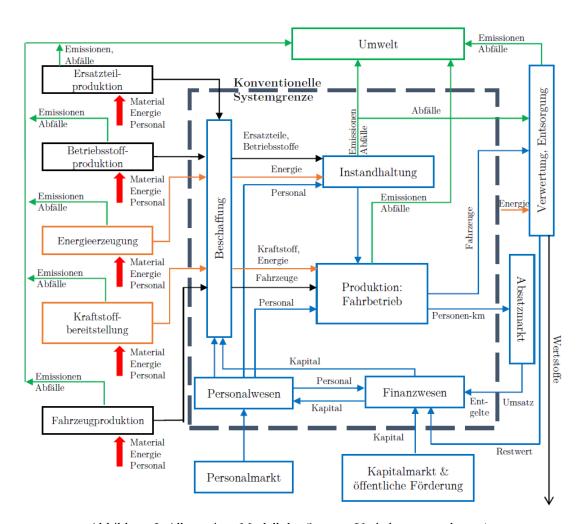


Abbildung 2: Allgemeines Modell des Systems Verkehrsunternehmen⁴

Im Übrigen gelten die gleichen Begriffe und Abgrenzungen, die bereits der Technikstudie /1/ zugrunde gelegt wurden (Straßenfahrzeuge der Klassen M und N, im Linienverkehr eingesetzte Omnibusse, alternative Antriebskonzepte, Betriebshof sowie Diesel- und Mischbetrieb bzw. Vollumstellung als die drei wesentlichen Phasen der Umstellung kommunaler Nutzfahrzeugflotten von Dieselantrieb auf alternative Antriebskonzepte).

-

⁴ Quelle: /3/, S. 68

0.3 Methoden und Daten

Für die Durchführung des Wirtschaftlichkeitsvergleichs alternativ angetriebener Nutzfahrzeuge in kommunalen Fahrzeugflotten wurde die folgende methodische Vorgehensweise realisiert:

Die Abgrenzung der Fahrzeug- bzw. Antriebsvarianten und Infrastrukturen erfolgte gemäß der Technikstudie /1/. Darauf aufbauend wurden die technischen Daten für die Fahrzeug- bzw. Antriebsvarianten festgelegt, soweit diese deren Investitions- und Betriebskosten mitbestimmen. Dabei bestehen beispielsweise die folgenden Abhängigkeiten:

- Anschaffungskosten Fahrzeuge Antriebsart und -leistung, Batteriekapazität, Ausstattung, ...), Art der Betankung⁵, Laufleistung, Nutzungsdauer etc.,
- Investitionskosten Infrastrukturen Tankstellenart und -kapazität, Leistung von elektrischen Netzanschlüssen, Ladeinfrastruktur, Elektrolyseuren etc.,
- Energie(bezugs-)kosten Jahresbezugsmenge, Art der Messung etc.,
- Fördermittel förderfähige Ausgaben, Obergrenzen für Fördersummen etc.

Die hierfür erforderlichen Wirtschaftlichkeitsdaten wurden zum Teil von den Unternehmen zur Verfügung gestellt und darüber hinaus in diesbezüglichen Recherchen durch die Auswertung von Fachveröffentlichungen gewonnen. Schließlich wurde eine Reihe von Annahmen zu den (betriebs-)wirtschaftlichen Rahmenbedingungen und Finanzierungsvarianten getroffen.

Als Zeithorizont für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wird eine durchschnittliche Nutzungsdauer kommunaler Fahrzeuge zugrunde gelegt, beispielsweise acht oder zehn Jahre.

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung erfolgte mit einer Gesamtkostenrechnung⁶ über alle Kosten, welche im Lebenszyklus des Betrachtungsgegenstandes anfallen (Gesamtkosten für Anschaffung, Betrieb und Ersatz einer Investition). Diese auch als TCO-Analyse (total cost of ownership) bezeichnete Methode wird typischerweise bei der vergleichenden Analyse der Wirtschaftlichkeit von Fahrzeugen und Fahrzeugsystemen mit alternativen Antrieben sowohl auf der Ebene des einzelnen Fahrzeugs als auch auf der Ebene von Fahrzeugflotten angewandt. Sie erlaubt die strukturierte Erfassung der Kosten und Investitionen, die dann in einer dynamischen Investitionsrechnung (Annuitätenmethode) auf einen einheitlichen Zeitpunkt diskontiert werden können. Für Betreiber, die vor einer Entscheidung zwischen den beiden Technologien stehen, sind die TCO eine wichtige Methodik: Das Total-Cost-of-Ownership-(TCO)-Konzept zählt zu den wichtigsten Instrumenten des strategieorientierten Kostenmanagements und kann branchenunabhängig als Werkzeug zur Unterstützung von mittel- und langfristigen Beschaffungsentscheidungen genutzt werden. Insbesondere in der jüngsten Literatur wird der Terminus TCO als Synonym für die ganzheitliche Kostenbetrachtung aufgefasst /3/, S. 8/10. Allerdings zeigte beispielsweise eine Auswertung von bekannten TCO-Analysen für Elektrobussysteme, dass diese in ihren Zielen, Abgrenzungen und verwendeten Daten durchaus Unterschiede aufweisen, die sich entsprechend auf die Ergebnisse auswirken können /4/.

Hier werden in der TCO-Analyse somit besonders diejenigen Kostenarten berücksichtigt, hinsichtlich derer sich die betrachteten Fahrzeug-, Antriebs- und Infrastrukturvarianten (Abschnitte 0.1 und 0.2) signifikant voneinander unterscheiden. Dies sind besonders die in Abbildung 3 genannten Kostenarten. In die TCO-Analyse wurden – soweit diese quantifizierbar waren – alle Kostenbestandteile einbezogen, in denen sich die Dieselvariante (Referenz) und die alternativen Antriebskonzepte unterscheiden. Neben den Anfangsinvestitionen sind auch Ausgaben für Ersatzbeschaffungen von Batterien und Brennstoffzellen sowie Energiekosten und Instandhaltungsausgaben enthalten. Unberücksichtigt bleiben dagegen solche Kostenbestandteile, die in allen Varianten auftreten bzw. die sich gegenüber der diese Variante nicht unterscheiden. Hierzu zählen zum Beispiel die Reifenkosten, die auf den Betriebshof bezogenen Betriebskosten der Gebäude oder die Personalkosten.

_

Dies betrifft zum Beispiel bei Brennstoffzellenfahrzeugen die Betankung mit gasförmigem (komprimiertem) oder mit flüssigem Wasserstoff, wobei sehr unterschiedliche Drücke von 350 bzw. 700 bar zu gewährleisten sind, die sich auch auf die Fahrzeug- und Infrastrukturkosten auswirken.

Diese Methode berücksichtigt einmalige Investitions- und laufende Betriebskosten (Capex/Opex). Sie unterscheidet sich faktisch nicht von den Methoden, welche zur Berechnung der Wirtschaftlichkeit von Energieinfrastrukturen eingesetzt werden.

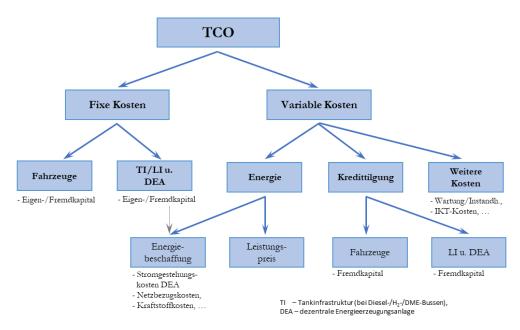


Abbildung 3: Kostenarten in der TCO-Analyse⁷

Den Wirtschaftlichkeitsvergleichen liegt die Annahme zugrunde, dass die jeweils miteinander verglichenen alternativ angetriebenen Nutzfahrzeuge, also die Omnibusse bzw. Abfallsammelfahrzeuge, unter den jeweils gleichen Betriebsbedingungen eingesetzt werden. Dies gilt insbesondere für die Jahresfahrleistungen und für die Fahrtgebiete, da beispielsweise die dort bestehenden Siedlungsstrukturen die Einsatzbedingungen der Fahrzeuge und damit den Energieverbrauch, die Wartungs- und Instandhaltungskosten etc. erheblich beeinflussen können.

Die für die betrachteten Fahrzeug-/Antriebsvarianten berechneten Ergebnisse werden als Systemkosten in EUR/(Fzg·a) und spezifisch in EUR/km ausgewiesen (hierbei werden für mehrere Fahrzeuge zugleich nutzbare Investitionen anteilig berücksichtigt, also aufgeteilt). Die aufgrund ihrer Wirtschaftlichkeit prioritären Varianten werden durch Variantenvergleiche ermittelt (Ermittlung des Wirtschaftlichkeitsabstands zur jeweiligen Referenz-Dieselvariante bzw. untereinander).

Die <u>Plausibilisierung</u> der Vergleichsergebnisse erfolgte durch die Herstellung von Bezügen zu Ergebnissen anderer Studien und in Diskussionen mit dem Auftraggeber und den Unternehmen.

⁷ Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an /2/, S. 38 ff.

1. Kosten kommunaler Nutzfahrzeuge

Die Kosten von kommunalen Nutzfahrzeugen sind neben den aus dem Fahrzeugeinsatz erzielten Erlösen ein weiterer Faktor, der die Wirtschaftlichkeit solcher Fahrzeuge wesentlich beeinflusst. Diese Kosten differieren je nach Art des Fahrzeugantriebs erheblich. Im Folgenden werden die Kosten der Beschaffung und des Betriebs von kommunalen Nutzfahrzeugen betrachtet. Diese Betrachtungen beziehen sich auf den konventionellen Dieselantrieb (Abschnitt 1.1), auf den batterieelektrischen Antrieb (Abschnitt 1.2), auf den Wasserstoffantrieb mit Brennstoffzellen (Abschnitt 1.3) sowie auf den Dieselantrieb mit erneuerbarem Dieselkraftstoff (Abschnitt 1.4). Die Energiekosten, welche einen erheblichen Anteil an den Betriebskosten von kommunalen Nutzfahrzeugen haben, werden ebenso wie die CO₂-Preise gesondert betrachtet (Abschnitt 1.5).

1.1 Kosten von Nutzfahrzeugen mit konventionellem Dieselantrieb

Unter den betrachteten Nutzfahrzeug-Antriebskonzepten ist der Dieselantrieb das einzige Antriebskonzept, welches in kommunalen Fahrzeugflotten bereits seit Jahrzehnten eingesetzt wird. Es handelt sich also bei den Fahrzeugen, bei den sie antreibenden Dieselmotoren sowie bei den zugehörigen Infrastrukturen zur Betankung, Wartung und Instandhaltung um etablierte Massenprodukte. Deshalb weisen Nutzfahrzeuge mit Dieselantrieb im Vergleich zu entsprechenden Nutzfahrzeugen mit anderen Antriebskonzepten die niedrigsten Anschaffungskosten auf.

Die aktuellen Anschaffungskosten von Stadtbussen mit konventionellem Dieselantrieb werden mit ca. 2508 bis 300 TEUR angegeben /5/, S. 58.

Allerdings sind nach Einschätzung der rebus Regionalbus GmbH die Kosten von Dieselbussen kaum zu verallgemeinern, da diese hersteller- und typabhängig sind. Ein klassischer 12-m-Regiobus kostete in den letzten Jahren ca. 220 TEUR, ein 12-m-Stadtbus ca. 280 TEUR, ein 18-m-Gelenkbus ca. 400 TEUR.

Für Dieselbusse kann bislang nach einer achtjährigen Nutzungsdauer ein Restwert von 25 Prozent des Kaufpreises angenommen werden⁹.

Die Wartungs- und Instandhaltungskosten für Dieselbusse (Solobusse) können näherungsweise mit 0,4 EUR/km angegeben werden /5/, S. 58.

Die Anschaffungskosten für ein Abfallsammelfahrzeug beinhalten die Kosten für das Fahrgestell, den Rotopress-Aufbau und die Schüttung sowie die antriebsspezifischen Kosten. Diese Anschaffungskosten unterscheiden sich je nach Fahrzeugmodell und -ausstattung. Die Anschaffungskosten für einen konventionellen Hecklader belaufen sich gegenwärtig auf ca. 160 bis 175 TEUR. Vereinzelt veröffentlichen auch Unternehmen Daten zu den Anschaffungskosten ihrer Entsorgungsfahrzeuge /6/, S. 15:

- Die Berliner Stadtreinigungsbetriebe (BSR) geben die Anschaffungskosten für ein Diesel-Abfallsammelfahrzeug mit 212 TEUR und für ein Erdgas-Abfallsammelfahrzeug mit 242 TEUR an.
- Der Abfallwirtschaftsbetrieb München (AWM) beziffert die Kosten für den Kauf eines konventionellen Abfallsammelfahrzeugs mit herkömmlicher Ausstattung auf ca. 200 TEUR.
- Die Faun Umwelttechnik GmbH gibt die Anschaffungskosten für ein konventionelles Abfallsammelfahrzeug mit 250 TEUR an.

Quelle: https://infoportal.mobil.nrw/technik/busse-mit-elektrischem-antrieb/brennstoffzellen-linienbus.html.

Allerdings ist beispielsweise ein Verkauf alter Linienbusse nach Osteuropa kaum mehr möglich, da auch dort die Städte zunehmend auf saubere Fahrzeuge setzen. Ein Verkauf ist daher allenfalls mit einem großen Wertabzug möglich. Quelle: https://www.urban-transport-magazine.com/umruestung-statt-neukauf-umbau-von-diesel-auf-elektrobusse/.

Darüber hinaus lassen sich die Anschaffungskosten beispielhaft für eine Abfallsammelfahrzeug von Zoeller mit konventionellem Dieselantrieb und mit einem Fahrgestell Mercedes Econic sowie einem Behältervolumen von 22 m³ mit 270 TEUR angeben¹0. Auf einzelne Fahrzeugarten bezogen können die folgenden Anschaffungs- und Betriebskosten angegeben werden /7/, S. 100 ff.:

- Sammelfahrzeug mit Heckbeladung (3-Achser, 10 Mg Nutzlast) für die Sammlung aller haushaltsnah zu erfassenden kommunalen Abfälle – Anschaffungskosten: 140 bis 190 TEUR, laufende Kosten für Reparatur und Wartung: jährlich ca. 11 Prozent der Investitionskosten,
- Sammelfahrzeug mit Frontbeladung (3 Achsen, 20 Mg Nutzlast, Festaufbau) für die Sammlung der meisten kommunalen und gewerblichen Abfälle, die in Umleerbehältern bereitgestellt werden - Anschaffungskosten: 140 bis 180 TEUR, Zusatzkosten für Wechselaufbau: ca. 20 TEUR, laufende Kosten für Reparatur und Wartung: jährlich ca. 11 Prozent der Investitionskosten,
- Fahrzeug mit seitlichem Liftsystem zur haushaltsnahen Sammlung der meisten Arten von Abfällen, die in Umleerbehältern bereitgestellt werden – Anschaffungskosten: 160 bis 220 TEUR, laufende Kosten für Reparatur und Wartung: jährlich ca. 11 Prozent der Investitionskosten.

Anschaffungskosten von Tankstellen für Dieselfahrzeuge

Die Tankstellen für Dieselfahrzeuge müssen bei Dieselbussen die Betankung mit Dieselkraftstoff, leichtem Heizöl und AdBlue ermöglichen. Bei solchen Tankstellen handelt es sich um ausgereifte und vielfach eingesetzte Technologien. Zu den Anschaffungskosten solcher Tankstellen liegen nur vergleichsweise wenige Daten vor. Die Anschaffungskosten von Tankstellen für Flüssigkraftstoffe können mit ca. 85 TEUR für die erste Zapfsäule, ca. 150 TEUR für Baumaßnahmen sowie für jede weitere Zapfsäule ca. 20 TEUR (Technik) bzw. ca10 TEUR (Baumaßnahmen) angesetzt werden, wobei keine Kostendegression mehr zu erwarten sind, /8/, S. 109. Dabei handelt es sich allerdings um Angaben zu öffentlichen Tankstellen. Da Betriebshof-Tankstellen deutlich kleiner ausgeführt werden, kann für diese näherungsweise von Anschaffungskosten in Höhe von insgesamt 150 TEUR ausgegangen werden. Diese Anschaffungskosten sind auf alle (Nutz-)Fahrzeuge aufzuteilen, die mit der Tankstelle versorgt werden sollen.

1.2 Kosten von Nutzfahrzeugen mit batterieelektrischem Antrieb

Neufahrzeuge

Die Investitionskosten von Batteriebussen werden aktuell als etwa doppelt so hoch wie für einen Dieselbus eingeschätzt. Hinzu kommt, dass die aktuelle Marktsituation im Batteriebusbereich durch eine steigende Nachfrage gekennzeichnet ist. Hierzu tragen sowohl die Clean Vehicle Directive (CVD) als auch die nationalen Förderprogramme bei. Diese steigende Nachfrage trifft auf ein derzeit noch begrenztes Herstellerangebot /5/, S. 58.

Die Anschaffungskosten von Batteriebussen betragen ca. 350 TEUR. Hinzu kommen die Anschaffungskosten für die Traktionsbatterie, die von der Batteriekapazität bestimmt werden und die gegenwärtig einen erheblichen Anteil an den Anschaffungskosten des gesamten Fahrzeugs haben. Die gegenwärtigen Anschaffungskosten für eine Batterie mit einer Kapazität von 250 kWh werden mit ca. 190 TEUR angegeben, während sich die Anschaffungskosten für eine Batterie mit einer Kapazität von 350 kWh auf knapp 265 TEUR belaufen /5/, S. 58. Damit liegen die gegenwärtigen Anschaffungskosten für Omnibusse mit batterieelektrischem Antrieb um das 1,8- bzw. 2,0-fache über den Anschaffungskosten von Dieselbussen.

Allerdings bestehen auch bei Batteriebussen erhebliche hersteller- bzw. typabhängige Preisspannen, wie Tabelle 1 zeigt. In den Preisspannen sind die Batteriekosten bereits enthalten. Die tatsächlichen Kosten ergeben sich aus einer Vielzahl von Parametern wie Batteriesystem, Ausstattung, Design, Hersteller, Bestellmenge, vereinbarten After-Sales-Leistungen, Garantien etc.

Quelle: https://www.now-gmbh.de/aktuelles/pressemitteilungen/einstieg-in-die-brennstoffzellen-antriebstechnik-stadt-karlsruhe-erhaelt-rund-15-millionen-euro-foerderung/.

Tabelle 1: Beschaffungspreise für Batteriebusse in Abhängigkeit der Fahrzeuggröße¹¹

Preis in Tsd. EUR	Minibus	Minibus Midibus		Gelenkbus	
1	2	3	4	5	
Fahrzeuggröße	< 8 m	8 10,5 m	12 m	18 m	
Preis min.	200	400	500	800	
Preis max.	280	550	650		

Für die Batteriebusse kann eine Nutzungsdauer von 12 Jahren angenommen werden. Der Restwert von Batteriebussen nach deren zwölfjähriger Nutzung wird beispielsweise in /5/ zu 0 Prozent der Anschaffungskosten definiert.

Zu den Wartungs- und Instandhaltungskosten von Batteriebussen liegen erst wenige verallgemeinerungsfähige Daten vor. Sie werden beispielsweise mit 0,4 EUR/km und damit auf dem gleichen Niveau wie für Dieselbusse angegeben: Zwar bietet der elektrische Antrieb selbst grundsätzlich das Potenzial für einen wartungsärmeren Betrieb als der Dieselantrieb¹². Ein erheblicher Teil der Wartungs- und Instandhaltungskosten entsteht jedoch im Zusammenhang mit nicht direkt dem Antrieb zuzuordnenden Komponenten wie Türantriebe. Zudem kommen mit einem Koppelsystem für das Laden von Batteriebussen neue, regelmäßig zu wartende Komponenten in die Fahrzeuge /5/, S. 58.

Zu den Anschaffungskosten batterieelektrischer Abfallsammelfahrzeuge liegen kaum Daten vor /6/, S. 23, obwohl im Bereich schwerer Nutzfahrzeuge der Klasse N3 bereits erste marktreife Fahrzeugkonzepte für die Abfallentsorgung existieren:

- Ein solches Fahrzeugs wurde beispielsweise in dem von 2017 bis 2020 durchgeführten Förderprojekt "BEAR Batterieelektrische Abfallentsorgung mit Roboterunterstützung" entwickelt und erprobt¹³.
- In Wien ist seit Mai 2019 ein erstes vollelektrisches Abfallsammelfahrzeug MA 48 im Einsatz, welches in Kooperation von MAN, MUT und Framo entwickelt wurde. Auch bei diesem Fahrzeug basieren der Antrieb, die Behälterentleerung und die Abfallkompaktierung vollständig auf Batteriestrom. Die Lithiumionen-Batterie hat eine Kapazität von 230 kWh, ermöglicht eine Abfallsammlung über eine Distanz von mindestens 100 km und kann an einer in jeder Betriebshof-Garage vorhandenen 400-V-Kraftstromsteckdose aufgeladen werden. Hierzu wandelt ein On-Board-Ladesystem den Wechselstrom in Gleichstrom um, sodass keine separate Ladestation benötigt wird¹⁴.
- Mercedes-Benz hat im Mai 2022 ein seriennahes batterieelektrisches Abfallsammelfahrzeug eEconic zur Erprobung im Rhein-Main-Gebiet an die Frankfurter Entsorgungs- und Service GmbH (FES)

11

Preise ohne Ladeinfrastruktur. Quelle: /5/, S. 19.

Beispielsweise entstehen anders als beim Verbrennungsmotor keine Kosten für Motoröl, Luftfilter usw. Auch ist der Elektromotor einfacher aufgebaut als ein Verbrennungsmotor. Bei Fahrzeugen mit Rekuperation wird ein erheblicher Teil der Bremsleistung rekuperiert, weshalb die Bremsen einem geringeren Verschleiß unterliegen.

In dem Projekt sollte zum einen ein rein elektrisch betriebenes Abfallsammelfahrzeug entwickelt werden, bei dem elektrisch angetriebene Systeme auch die Nebenaggregate vollständig ersetzen. Das Fahrzeug sollte für eine Geschwindigkeit von 80 km/h ausgelegt sein. Dabei wurde eine Batterielebensdauer von mindestens acht Einsatzjahren angestrebt. Zum anderen sollte ein geeignetes Batterieladekonzept entwickelt werden: Neben dem direkten Schnellladen der Batterie wurde auch ein Batteriewechselkonzept betrachtet. In beiden Ladekonzepten sollte der Einsatz von Robotern ein weitestgehend autonomes Ladeverfahren und so einen reibungslosen Einsatz des Nutzfahrzeugs in seinem Sammelgebiet ermöglichen. Das im Projekt entwickelte Faun-Versuchsfahrzeug wurde über einen Zeitraum von 12 Monaten bei der Bremerhavener Entsorgungsgesellschaft (BEG) im Realbetrieb erprobt. Dabei wurden Daten zur Wirtschaftlichkeit, zur technischen Zuverlässigkeit sowie zur Klima- und Umweltwirkung des Fahrzeugeinsatzes erfasst. Quelle: https://www.erneuerbar-mobil.de/projekte/bear.html.

Quelle: https://recyclingportal.eu/Archive/48393.

übergeben. Dabei handelt es sich um einen Hecklader Faun Variopress mit 22 m³ Transportvolumen und 27 t zulässiges Gesamtgewicht. Diese finale Testphase soll den Beginn der Serienproduktion von Mercedes-Benz Special Trucks vorbereiten. Wie bei dem batterieelektrischen Lkw eActros für den schweren Verteilerverkehr wird die technologische Basis des eEconic durch einen Antrieb mit einer E-Achse gebildet, in die zwei Elektromotoren und ein Zwei-Gang-Getriebe integriert sind. Die Batterien des eEconic bestehen aus drei Batterien mit einer Kapazität von jeweils ca. 105 kWh. Durch Rekuperation kann im Stop-and-Go-Betrieb beim Abfallsammeln elektrische Energie zurückgewonnen werden. Im Anschluss an die Tagestouren können die Batterien mit bis zu 160 kW auf den Betriebshöfen aufgeladen werden. Der eEconic soll künftig in der Konfiguration als Abfallsammelfahrzeug typische Abfallsammelrouten ohne Zwischenladen abdecken. 15.

- Auch in der Stadt Hilden soll ein batterieelektrisches Abfallsammelfahrzeug beschafft werden. Mit einer 200-kWh-Batterie soll es ohne Zwischenladung 2 bis 3 Umläufe und mit Zwischenladung 3 bis 4 Umläufe, das heißt einen vollständigen Arbeitstag realisieren. Bei einem im Dezember 2021 durchgeführten Test konnte ein solches Fahrzeug in einer Stunde von ca. 40 auf 95 Prozent seiner Batteriekapazität geladen werden. Durch die bereits gut ausgebaute Ladeinfrastruktur in Hilden sind auch bei längerem Betrieb Zwischenladungen wenig zeitaufwendig. Zudem kann anders als bei Abfallsammelfahrzeugen mit Dieselmotor durch Rekuperation zurückgewonnen und in Reichweite umgewandelt werden. Die Grundladung soll über Nacht auf dem Betriebshof erfolgen. Die Anschaffungskosten eines solchen Fahrzeugs betragen das 1,3- bis 1,5-fache der Anschaffungskosten eines entsprechenden Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor¹⁶.
- Die ALBA Group schätzt die Anschaffungskosten eines vollelektrischen Heckladers auf das 3,5-Fache eines konventionellen Heckladers, dessen Kosten mit 158 bis 175 TEUR angegeben werden. Für einen vollelektrischen Hecklader ergeben sich somit Gesamtkosten von 553 bis 613 TEUR. Diese sind besonders auf die aktuellen Kosten für Batteriesysteme und auf die hohe benötigte Batteriekapazität zurückzuführen, /6/, S. 23, Tabelle 2.

Tabelle 2: Batteriekapazitäten vollelektrischer Abfallsammelfahrzeuge (Auswahl)¹⁷

Unternehmen	Fahrzeugtyp	Batteriekapazität in kWh	
1	2	3	
Volvo Trucks	FE Electric	Li-Ion 200-300	
Volvo Trucks	FL Electric	Li-Ion 100-300	
Futuriam	Futuricum 26E	Li-Ion (NMC) 170-340	
BPW	Twin Power Drive	Li-Ion 40-360	
Daimler	Urban E-truck	Li-Ion 212	
BYD	Class 8 Refuse Truck	295	
BYD	Class 6 Cab Chassis	221	
Terberg RosRoca	eCollect	300	

_

¹⁵ Quelle: https://remondis-aktuell.de/service/batterieelektrischer-eeconic-an-die-fes-uebergeben/.

Quelle: https://gruene-hilden.de/aktuelles/neuanschaffung-eines-elektroangetriebenen-abfallsammelfahrzeuges/.

¹⁷ Quelle: /6/, S. 23.

Umgerüstete Fahrzeuge¹⁸

Als eine kostensparende Variante sind seit einigen Jahren auch Angebote marktverfügbar, die eine Umrüstung vorhandener Diesel-Omnibusse vom Diesel- auf den batterieelektrischen Antrieb beinhalten. Inzwischen haben sich bundesweit mehrere Unternehmen auf eine solche Umrüstung spezialisiert, beispielsweise die pepper motion GmbH, welche 2021 durch Umfirmierung aus dem 2019 gegründeten Unternehmen e-troFit hervorgegangen ist¹9. Zur Elektrifizierung gebrauchter Nutzfahrzeuge verfügt das Unternehmen über eine serienreifes Retrofitting-Konzept und über ein zugehöriges etrofit-Kit für die Umrüstung von Omnibussen und LKW. Dieses erfüllt alle Mindeststandards für die Umrüstung von Nutzfahrzeugen auf alternative Antriebe, die im Kriterienkatalog der Ad-hoc-Task Force Umrüstung des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur /11/ gefordert werden. Je nach Zustand des Fahrzeugs und nach Umfang soll die Umrüstung zwischen 300 und 350 TEUR und damit nur etwa die Hälfte von neuen Elektrobussen kosten. Die Umrüstung ist demnach deutlich günstiger als die Beschaffung von Neufahrzeugen. Im Hinblick auf die TCO können umgerüstete Elektrobusse somit über die Lebensdauer wirtschaftliche Vorteile gegenüber Neufahrzeugen haben.

Weitere Anbieter sind die in Schleswig-Holstein ansässigen Unternehmen I See Electric Busses und die I see electric trucks, welche Omnibusse und Lkw von Diesel- auf Elektroantrieb umrüsten. Das Unternehmen kooperiert mit der DB-Tochter Autokraft in Flensburg und rüstet für diese Omnibusse um. Die Kosten für die Umrüstung belaufen sich je Fahrzeug auf ca. 320 TEUR. Diesen Kosten steht eine Halbierung der Betriebskosten gegenüber /12/.

Schließlich rüstet auch die in Berlin/Brandenburg ansässige Tassima Produktion GmbH Omnibusse um. Bezüglich der Finanzierung einer Fahrzeugumrüstung bietet Tassima verschiedene Optionen. Beispielsweise kauft Tassima 5 bis 15 Jahre alte Dieselbusse zum Restwert von 20 bis 50 TEUR auf, rüstet diese auf Elektroantrieb um und gibt das fast neuwertige Fahrzeug anschließend als Leasing- bzw. Mietfahrzeug für maximal 6 TEUR pro Monat an den Betreiber zurück /12/, S. 46.

Neben dem Kostenvorteil besteht ein weiterer und gegebenenfalls zumindest temporär bedeutsamer Vorteil der Umrüstung darin, dass dadurch eine Vielzahl von batterieelektrischen Nutzfahrzeugen deutlich schneller zum Einsatz gebracht werden können als bei der Bestellung entsprechender Neufahrzeuge bei den jeweiligen Herstellern.

Ladeinfrastruktur für Batteriefahrzeuge

Die spezifischen Anschaffungskosten für Ladegeräte belaufen sich auf ca. 0,50 bis 0,80 TEUR je Kilowatt der maximal realisierbaren Ladeleistung. Hinzu kommen die Kosten für die Installation und Verkabelung. Für eine einzelne Ladestation mit einer Ladeleistung von 300 kW einschließlich Lademast und baulicher Umgestaltung können die Anschaffungskosten in Höhe von ca. 350 bis 450 TEUR angegeben werden. Dabei sind die Anschlusskosten und der Baukostenzuschlag noch nicht berücksichtigt /9/, S. 14.

Die Anschaffungskosten für eine Ladeinfrastruktur für Batteriebusse mit einer Ladeleistung von 150 kW mit CCS-Stecker können mit ca. 97,5 TEUR angegeben werden /5/, S. 60/61.

_

Quellen: https://www.urban-transport-magazine.com/umruestung-statt-neukauf-umbau-von-diesel-auf-elektro-bus-busse/, https://www.urban-transport-magazine.com/umruestung-statt-neukauf-umbau-von-diesel-auf-elektro-busse/, https://www.urban-transport-magazine.com/umruestung-statt-neukauf-umbau-von-diesel-auf-elektro-busse/, https://www.urban-transport-magazine.com/umruestung-statt-neukauf-umbau-von-diesel-auf-elektro-busse/, https://www.urban-transport-magazine.com/umruestung-statt-neukauf-umbau-von-diesel-auf-elektro-busse/.

**Total Comparison of the Compari

e-troFit war ein Tochterunternehmen des Entwicklungsunternehmens in-tech GmbH in München/Garching. Neben der unternehmenseigenen VCU-Software zur Fahrzeugsteuerung realisiert das Unternehmen unter anderem Ladeinfrastruktur- und Digitalisierungskonzepte. Darüber hinaus umfassen die "Green Mobility as a Service"-Lösungen die gesamte Elektromobilität eines Betriebs vom Fahrzeug inklusive Wartung über die Ladeinfrastruktur bis hin zum Flottenmanagement und bilden diese in einem "Preis pro Kilometer" ab. Quellen: https://www.peppermotion.com/produkte-loesungen/umruestung/.

1.3 Kosten von Nutzfahrzeugen mit Wasserstoffantrieb (Brennstoffzellen)

Die Anschaffungskosten von Brennstoffzellen-Wasserstoffbussen hängen von der Art bzw. Größe sowie von der Ausstattung ab, wobei insbesondere die Reichweite von der Art der Ausstattung bestimmt wird. Die Anschaffungspreise emissionsfreier Fahrzeuge liegen derzeit noch deutlich über den Anschaffungskosten von Dieselbussen und belaufen sich bei Brennstoffzellenbussen gegenwärtig auf das bis zu 2,5-fache der Anschaffungskosten vergleichbare Dieselbusse /13/, S. 36. Sie werden gegenwärtig sowohl für Brennstoffzellenbusse ohne als auch für solche mit Range Extender (RE) mit 400 TEUR angegeben.

Zu diesen Anschaffungskosten kommen allerdings noch die Anschaffungskosten für das Batterie-/Brennstoffzellen-System. Diese lassen sich mit knapp 275 TEUR für den Brennstoffzellenbus bzw. mit 255 TEUR für den Brennstoffzellenbus mit Range Extender abschätzen /5/, S. 58. Mit insgesamt 650 bis 675 TEUR liegen die gegenwärtigen Anschaffungskosten für Omnibusse mit Wasserstoffantrieb um das 2,3- bzw. 2,2-fache über den Anschaffungskosten von Dieselbussen²⁰.

Die Wartungs- und Instandhaltungskosten für Omnibusse mit Wasserstoffantrieb ohne und mit Range Extender werden beispielsweise mit 0,50 EUR/km angegeben. Die im Vergleich zu Diesel- und Batteriebussen um 0,10 EUR/km höheren Kosten von Brennstoffzellenbussen sind durch den komplexeren Aufbau des Systems aus Brennstoffzelle und Batterie bedingt /5/, S. 58.

Die Mehrkosten der Anschaffung für ein Abfallsammelfahrzeug mit Wasserstoffantrieb können gegenwärtig mit mindestens 650 TEUR abgeschätzt werden. Diese Anschaffungsmehrkosten ergeben sich aus einer Auswertung der Förderbescheide für die Anschaffung von Abfallsammelfahrzeugen, welche im Jahr 2021 vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMV) im Rahmen des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP II) an verschiedene Entsorgungsbetriebe in Deutschland übergeben wurden, damit diese die Abfallsammelfahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb im Realbetrieb erproben können²¹. Danach lagen die Mehrkosten je Fahrzeug, welche in der Regel zu 90 Prozent gefördert werden, in einem Bereich von 540 bis 755 TEUR. Beispielsweise hat die Stadt Karlsruhe 2021 für die Anschaffung von zwei Zoeller-Abfallsammelfahrzeugen mit einem Fahrgestell Typ Mercedes Econic Fördermittel in Höhe von ca. 1,5 Mio. EUR erhalten. Die Gesamtkosten der beiden Fahrzeuge beliefen sich auf ca. 2,23 Mio. EUR²². Die Umweltservice Bochum GmbH (USB) hat ebenfalls 2021 erstmals ein Wasserstoff-Abfallsammelfahrzeug angeschafft. Der Anschaffungspreis belief sich auf 772 TEUR und wurde aus dem Bundesförderprogrammes "Saubere Luft 2017-2020" mitfinanziert, wobei die Fördersumme ca. 90 Prozent der Mehrkosten dieser Anschaffungen abdeckten²³. Damit betragen die Anschaffungskosten in einigen Fällen als 4-fache vergleichbarer Fahrzeuge mit Dieselantrieb (Abschnitt 1.1).

Im August 2020 hat bei FAUN in Osterholz-Scharmbeck die Serienproduktion wasserstoffbetriebener Nutzfahrzeuge begonnen. Seit 2021 werden dort Abfallsammelfahrzeuge und auch Kehrmaschinen mit dem Wasserstoffantrieb BLUEPOWER in Serie produziert²⁴. Tests solcher Fahrzeuge erfolgen derzeit bei Entsorgungsunternehmen wie der Abfalllogistik Bremen GmbH (ALB). Dort wurde beginnend im August 2020 über 14 Wochen ein Abfallsammelfahrzeug erprobt, dass mit einer Brennstoffzelle und zwei Wasserstoff-Tanks für insgesamt 8,2 kg sowie mit einer 85-kWh-Batterie ausgestattet war. Der Antrieb erfolgte über einen 250-kW-Elektromotor. Die Anschaffungskosten für die Brennstoffzelle wurden mit 70 TEUR angegeben, sodass die Anschaffungskosten für das Fahrzeug insgesamt gegenwärtig etwa das Dreifache

²⁰ Quelle: https://infoportal.mobil.nrw/technik/busse-mit-elektrischem-antrieb/brennstoffzellen-linienbus.html.

Dazu wurden insgesamt ca. 10 Pressemeldungen zu entsprechenden Förderbescheiden ausgewertet. Quelle der Pressemeldungen: https://www.now-gmbh.de/aktuelles/pressemitteilungen/.

Dabei handelte es sich um Fahrzeuge mit 3 Achsen und einem Behältervolumen von 22 m³. Diese waren mit einem Traktionsmotor mit 250 kW und 3.500 Nm ausgestattet. Die Batteriekapazität betrug 85 kWh. Der Range Extender bestand aus zwei Brennstoffzellenmodulen mit einer Leistung von 60 kW. Das Wasserstoff-Tankvolumen betrug 16,8 kg. Quelle: https://www.now-gmbh.de/aktuelles/pressemitteilungen/einstieg-in-die-brennstoffzellen-antriebstechnik-stadt-karlsruhe-erhaelt-rund-15-millionen-euro-foerderung/.

Quelle: https://www.now-gmbh.de/aktuelles/pressemitteilungen/bochum-usb-nimmt-wasserstoff-gas-und-elektrofahrzeuge-in-flotte-auf/.

Quelle: https://www.now-gmbh.de/aktuelles/pressemitteilungen/start-der-serienproduktion-von-nutzfahrzeu-gen-mit-wasserstoffantrieb/.

der Anschaffungskosten eines konventionellen Abfallsammelfahrzeugs betragen würden, die mit 250 TEUR angegeben wurden /18/.

Zu den Wartungs- und Instandhaltungskosten von Nutzfahrzeugen mit Wasserstoffantrieb liegen bislang keine Daten vor. Bei den Betriebskosten insgesamt konnten jedoch die WSW Wuppertaler Stadtwerke GmbH Mitte 2021 nach einem einjährigen Regelbetrieb feststellen, dass ihre 10 Wasserstoffbusse des belgischen Herstellers Van Hool die Kostenparität mit Dieselbussen erreicht haben. Die Wasserstoffbusse absolvieren je nach Linie tägliche Umlauflängen von bis zu 280 km. Der erforderliche Wasserstoff wird elektrolytisch unter Verwendung von Strom aus dem Müllheizkraftwerk der Stadtwerke erzeugt. Nach Einschätzung der WSW ist für die langfristige wirtschaftliche Betrachtung der Flotte neben der Wartungsintensität der Kraftstoffverbrauch bedeutsam: Während in den Sommermonaten nur ca. 8 kg/100 km verbraucht wurden, stieg der Verbrauch am kältesten Wintertag bei -16 Grad Celsius auf über 10 kg/100 km. Im Jahresdurchschnitt verbrauchten die Busse 8,7 kg/100 km. Außerdem trug der steigende CO₂-Anteil am Dieselpreis dazu bei, dass bei den Tankkosten bereits 2021 Dieselniveau erreicht wurde. Die technische Verfügbarkeit ist laut WSW auf dem Niveau modernster Dieselbusse²⁵.

Im Hinblick auf die CO₂-Einsparung werden einige Wasserstoff-Anwendungen im Verkehrssektor perspektivisch als die wettbewerbsfähigste Lösung eingeschätzt: Bei entsprechenden Rahmenbedingungen wie die Erschließung von Skaleneffekte zur Kostensenkung und steigende CO₂-Zertifikatspreise haben insbesondere Linien- und Reisebusse sowie Lkw als Fahrzeuge mit hohen Reichweiten das Potenzial, wettbewerbsfähiger als konventionelle Antriebskonzepte zu werden /19/, S. 36. Insbesondere aufgrund steigender Stückzahlen werden erhebliche Senkungen der Anschaffungskosten erwartet. Die Preisentwicklung über bereits realisierte Brennstoffzellenbus-Projekte zeigt Abbildung 4. Auch Verkehrsunternehmen wie die WSW Wuppertaler Stadtwerke GmbH erwarten eine deutliche Preisdegression bei der Fahrzeugbeschaffung. Diese sollte perspektivisch noch höher ausfallen als in dem Zeitraum von Mitte 2020 bis Mitte 2021, in dem die Preise um ca. 10 Prozent gesunken sind²⁶.

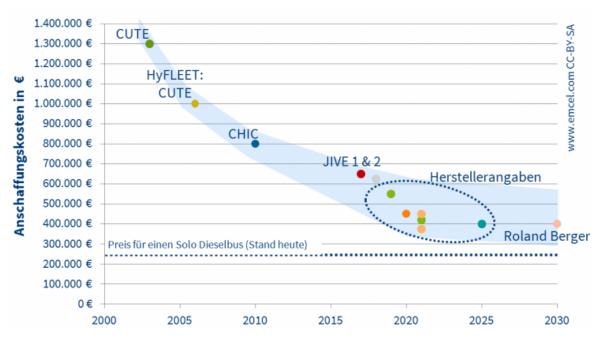


Abbildung 4: Entwicklung der Anschaffungskosten von Wasserstoff-Omnibussen²⁷

-

Quelle: https://www.wsw-online.de/unternehmen/presse-medien/presseinformationen/pressemeldung/mel-dung/wsw-wasserstoffbusse-erreichen-kostenparitaet-mit-dieselbussen/.

Quelle: https://www.wsw-online.de/unternehmen/presse-medien/presseinformationen/pressemeldung/mel-dung/wsw-wasserstoffbusse-erreichen-kostenparitaet-mit-dieselbussen/.

Quelle: https://emcel.com/de/preise-fuer-brennstoffzellenbusse/ (Stand: 16. Mai 2018).

Wasserstofftankstelle

Ebenso wie bei den Tankstellen für konventionelle Flüssigkraftstoffe werden die Anschaffungskosten für Wasserstofftankstellen zunächst von der Art der Zuführung des Wasserstoffs – gasförmige oder flüssige Anlieferung – und der Art der Speicherung ab. Weitere wichtige Einflussgrößen sind der Durchsatz, also die Anzahl der Zapfsäulen (Dispenser) und das bei der Betankung zu realisierenden Druckniveau (350/700 bar). Allerdings kommen anders als bei Tankstellen für konventionelle Flüssigkraftstoffe weitere technische und kostenintensive Komponenten hinzu, beispielsweise für (Hochdruck-)Speicher, Kompressoren und Verdampfer. Zudem sind hierbei höhere werkstoff- und sicherheitstechnische Anforderungen zu erfüllen. Näherungsweise können bei Wasserstofftankstellen die Anschaffungskosten für die erste Zapfsäule mit 330 TEUR (Technik) bzw. 210 TEUR (Baumaßnahmen) zugrunde gelegt werden. Für jede weitere Zapfsäule können 210 TEUR (Technik) bzw. 50 TEUR (Baumaßnahmen) hinzugerechnet werden /8/, S. 109. Für eine Wasserstoff-Tankstelle mit 3 Dispensern würden danach vergleichsweise moderate Anschaffungskosten in Höhe von ca. 1,3 Mio. EUR aufzuwenden sein. Demgegenüber lassen sich die Anschaffungskosten für eine Wasserstofftankstelle für 50 Brennstoffzellenbusse bei der NOW GmbH mit bis zu 5 Mio. EUR ablesen²⁸ /9/, S. 23. Anders als bei Tankstellen für konventionelle Flüssigkraftstoffe kann bei den Anschaffungskosten von Wasserstofftankstellen perspektivisch eine deutliche Kostendegression erwartet werden /10/, S. 70.

Abbildung 5 zeigt den Investitionsbedarf von Wasserstofftankstellen für Brennstoffzellenbusse in Abhängigkeit von der Tankstellenkapazität und weiteren Tankstellenmerkmalen. Darin gelten die unteren Kurven für die Anlieferung mittels GH₂-Trailer (ohne Tankstellenspeicher - grün), für die Anlieferung mittels Pipeline (blau), für die Anlieferung mittels LH₂-Trailer (grau), für die Anlieferung mittels GH₂-Trailer (mit Tankstellenspeicher - dunkelblau) sowie für die Anlieferung mit GH₂-Trailern und Speicherung in der Tankstelle in LOHC²⁹ (hellblau).

Gegebenenfalls kann ein Teil der Anlagen von Wasserstofftankstellen aus Platzgründen auch unterirdisch installiert werden, was jedoch weitere Kosten verursacht.

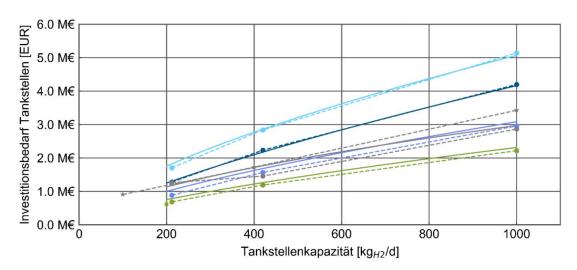


Abbildung 5: Anschaffungskosten von Wasserstofftankstellen für Omnibusse³⁰

Quelle: /14/, S. 46. Legt man beispielsweise einen durchschnittlichen Wasserstoffverbrauch von 9,5 kg/100 km

Bei kleinen Flotten von ca. 10 Brennstoffzellenbussen belaufen sich diese Kosten auf 250 kEUR für den Speicher, auf 250 kEUR für den Kompressor sowie auf 200 kEUR für die Zapfsäule.

²⁹ LOHC ist eine Technologie für die Wasserstoffspeicherung, wobei der Wasserstoff bei der Einspeicherung an einen flüssigen organischen Trägerstoff gebunden wird. Die dabei ablaufende chemische Reaktion ist reversibel, so dass der Wasserstoff und der Energieaufwand wieder ausgespeichert werden kann.

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 20 Standard- und 10 Gelenkbussen ein Tagesverbrauch von ca. 650 kg Wasserstoff.

Bei der Wartung und Instandhaltung von Brennstoffzellenbussen müssen Omnibuswerkstätten auch neue Anforderungen erfüllen. Die Investitionskosten für die Werkstattertüchtigung hängen insoweit davon ab, welche Ausrüstungen bereits vorhanden sind. Als Investitionskosten für den Omnibusbereich werden wenige 10 TEUR bis wenige 100 TEUR angegeben. Gegebenenfalls ist zu berücksichtigen, dass auch die Wasserstofftankstelle einen höheren Wartungsaufwand verursacht als eine Tankstelle für konventionelle Flüssigkraftstoffe. Sofern für die Wartung und Instandhaltung Wartungsverträge mit den Herstellern der Brennstoffzellenbusse und der Wasserstofftankstelle abgeschlossen werden, können sich die jährlichen Kosten auf 2 bis 6 Prozent der Investitionskosten belaufen. Diese externen Wartungskosten sinken in dem Maße, wie ein Verkehrsunternehmen sich diese Kompetenzen selbst aneignet /22/, S. 25/26.

1.4 Kosten von Nutzfahrzeugen mit erneuerbar umgerüstetem Dieselantrieb

Mit Dieselmotoren angetriebene Nutzfahrzeuge können vom Betrieb mit konventionellem Dieselkraftstoff auf den Betrieb mit erneuerbarem Kraftstoff³¹ umgestellt werden. Dabei wird Dimethylether (DME) als besonders vielversprechend eingeschätzt /15/, S. 133. Da es sich bei diesem erneuerbaren Dieselkraftstoff um einen strombasierten Energieträger handelt, stellt diese Form der Umstellung von Nutzfahrzeugflotten auf alternative Antriebe eine indirekte Elektrifizierung dar³².

Zur Notwendigkeit einer Anpassung oder Umrüstung des Fahrzeugantriebs, das heißt an den Dieselmotoren und Tanks, liegen allerdings divergierende Einschätzungen vor: Beispielsweise können dem eFuels Forum, dem eFuel Alliance e. V., dem UNITI Bundesverband mittelständischer Mineralölunternehmen e. V. und anderen zufolge eFuels alle gängigen mineralischen Kraft-, Brenn- und Schmierstoffe ersetzen. Sie können daher auch über das bestehende Tankstellennetz abgegeben sowie im vorhandenen Fahrzeugbestand als Beimischung in beliebigen Anteilen in fossilen Kraft- und Brennstoffen oder als reine klimaneutrale Energieträger eingesetzt werden, ohne dass dafür eine Umrüstung erforderlich ist³³. Demgegenüber lässt sich aufgrund der Kraftstoffeigenschaften die Notwendigkeit einer Umrüstung begründen³⁴ /1/. Dies gilt insbesondere bei höheren Beimischungsanteilen /21/, S. 79. Dafür konnten aber Lösungen gefunden werden, die nicht notwendigerweise hohe zusätzliche Kosten verursachen /20/, S. 539.

Bei der Umrüstung ist zu berücksichtigen, dass ein wesentlicher Vorteil von DME die Abwesenheit von Bindungen zwischen Kohlenstoffatomen innerhalb des Moleküls. Dies führt zu einer nahezu rußfreien Verbrennung. Hieraus ergibt sich zudem der Vorteil, dass DME-Motoren mit einer höheren Abgasrückführung betrieben werden können, um die NO_x-Emissionen zu senken. DME weist eine höhere Cetanzahl als konventioneller Dieselkraftstoff auf, wodurch eine Optimierung der Dieselmotoren möglich wird. Dadurch können Einrichtungen zur Abgasnachbehandlung in den umgerüsteten Dieselfahrzeugen kleiner ausgeführt werden bzw. gänzlich entfallen.

Zu den Umrüstkosten von vorhandenen Nutzfahrzeugen mit Dieselantrieb auf den Betrieb mit erneuerbarem Dieselkraftstoff liegen bislang keine veröffentlichten Daten vor.

Da der Dampfdruck von DME dem von Flüssiggas (LPG) ähnelt, kann die bestehende LPG-Infrastruktur für die Nutzung von DME angepasst werden. Anpassungskosten hierzu sind bislang nicht veröffentlicht.

Der hier zugrunde gelegte erneuerbaren Dieselkraftstoff Dimethylether (DME, C₂H₆O oder CH₃-O-CH₃, eFuel) wird synthetisch aus Wasserstoff und Kohlendioxid hergestellt. Dabei wird Strom für die Erzeugung des Wasserstoffs, für die Abscheidung bzw. Gewinnung des Kohlendioxids sowie für die Synthese benötigt. Der Dieselkraftstoff ist erneuerbarer, wenn es sich bei dem eingesetzten Strom um erneuerbaren Strom handelt.

Da dieser Kraftstoff Kohlenstoff enthält, ist der in diesem Zusammenhang ebenfalls oft verwendete Begriff der Dekarbonisierung des Verkehrssektors insoweit unzutreffend, als vielmehr dessen Defossilisierung erreicht wird. Das Ziel der Dekarbonisierung würde die zukünftige Nutzung von synthetischen Energieträgern (eFuels, eGas) ausschließen.

Quellen: https://www.efuels-forum.de/ (Wo können eFuels verwendet werden?), https://www.e-fuels.de/, https://www.cleanthinking.de/e-fuels-vorteile-und-nachteile-synthetischer-kraftstoffe/.

Die unterschiedlichen physikalischen Kraftstoffeigenschaften erfordern technische Anpassungen am Tank- und Injektionssystem von DME-Fahrzeugen. Aufgrund der geringen Siedetemperatur bei atmosphärischem Druck ist eine Speicherung von flüssigem DME nur unter leichtem Druck möglich. Die geringere Energiedichte von DME erfordert eine Querschnittsvergrößerung der Einspritzdüsen. Aufgrund des schlechten Schmierungsverhaltens von DME ist zudem eine separate Ölschmierung der Injektionspumpe notwendig. Weiterhin müssen DME-beständige Dichtungen verwendet werden /15/, S. 134.

Bei der Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von synthetischen Kraftstoffen wie DME ist zu berücksichtigen, dass sich nicht nur auf betriebswirtschaftlicher Ebene Vorteile ergeben, sondern auch auf der volkswirtschaftlichen Ebene: Untersuchungen von Frontier Economics /16/ haben gezeigt, dass selbst bei einer angestrebten autarken Energieversorgung in Deutschland durch einen Energieträgermix unter der Nutzung von eFuels und eGas bis 2050 Investitionen in einem Gesamtumfang von 250 Mrd. EUR vermieden werden können im Vergleich zu einer weitreichenden Elektrifizierung. In einer dena-Studie /17/ werden sogar Einsparungen von bis zu 600 Mrd. EUR u. a. durch die Nutzung von eFuels vorhergesagt, falls dabei auch die Möglichkeit von Importen genutzt würde /20/, S. 129.

Anschaffungskosten von DME-Tankstellen für Dieselfahrzeuge

Die Tankstellen für mit erneuerbarem Dieselkraftstoff müssen im Gegensatz zu Tankstellen für Nutzfahrzeuge, welche mit konventionellem Dieselkraftstoff betrieben werden, nur die Betankung mit DME ermöglichen. Dieser wird sowohl zum Fahren als auch zur Klimatisierung der Fahrzeuge eingesetzt. Der Einsatz von AdBlue kann bei mit dem erneuerbaren Dieselkraftstoff DME entfallen.

Angaben zu den Anschaffungskosten von DME-Tankstellen oder zu den Kosten für die Umrüstung konventioneller Dieseltankstellen liegen nicht vor. Zudem müssen im Mischbetrieb, also bei der zeitlich parallelen Nutzung von konventionellen und von umgerüsteten Dieselfahrzeugen Betankungsmöglichkeiten für beide Fahrzeugarten vorgehalten werden. Daher kann davon ausgegangen werden, dass für den Betrieb von umgerüsteten Dieselfahrzeugen eine DME-Tankstelle zu errichten ist. Für diese können näherungsweise Anschaffungskosten zugrunde gelegt werden, die aufgrund der Eigenschaften von DME ca. 15 Prozent über den Anschaffungskosten für konventionelle Dieseltankstellen liegen.

1.5 Komponentenkosten von Nutzfahrzeugen mit alternativen Antrieben

Da es bei den alternativen Antriebsarten erforderlich ist, auch innerhalb der Nutzungsdauer eines Fahrzeugs einzelne Komponenten zu ersetzen, sind neben den in den vorhergehenden Abschnitten beschriebenen Anschaffungskosten der Nutzfahrzeuge auch die Anschaffungskosten ihrer Komponenten bedeutsam. In Tabelle 3 sind die spezifischen Komponentenkosten von Nutzfahrzeugen mit alternativen Antrieben für verschiedene Jahre zusammengestellt:

Tabelle 3: Spezifische Komponentenkosten für alternative Antriebe³⁵

Komponente	Einheit	2015	2020	2025	2030
1	2	3	4	5	6
Verbrennungsmotor	EUR/kW	70	72	73	75
Elektromotor	EUR/kW	23	22	21	20
HV-Batterie (Busse, LKW)	EUR/kWh	1.000	762	523	285
Leistungselektronik	EUR/kW	15	13	12	10
Batteriemanagementsystem	EUR (pauschal)	300	267	233	200
Brennstoffzelle	EUR/kW	2.000	1.367	733	100
H ₂ -Tank	EUR/kg	1.000	767	533	300

⁻

Alle Komponentenkosten beziehen sich auf eine Preisbasis 2015 (ohne Inflation und Steuern). Quelle der Komponentenkosten der Jahre 2015 und 2030: /22/, S. 67/68. Die in der Tabelle für die Jahre 2020 und 2025 angegebenen Komponentenkosten wurden linear interpoliert.

Danach steigen die Kosten für Verbrennungsmotoren tendenziell an, was sich durch die zukünftig höheren Umweltanforderungen insbesondere der Abgasnachbehandlung begründet.

Bei den Kosten für die Fahrzeugbatterien wird wie bereits beschrieben zukünftig eine weitere Kostenreduktion erwartet. Im Jahr 2015 belief sich der Batteriepreis auf ca. 1.000 EUR/kWh. Gegenwärtig werden für Omnibusse Batteriepreise von 800 bis 900 EUR/kWh als realistisch angegeben. Für schwere Nutzfahrzeuge belief sich der spezifische Batteriepreis im Jahr 2015 auf 700 EUR/kWh. Der Preis könnte bis 2030 auf 200 bis 300 EUR/kWh sinken /10/, S. 66. Die jährliche Kostenreduktion (Lernkurve) ist Gegenstand einer Vielzahl von Untersuchungen. Abbildung 6 zeigt beispielhaft die Ergebnisse einer Metastudie /23/, aus denen sich eine jährliche Kostenreduktion von ca. 8 Prozent ableiten lässt /10/, S. 66.

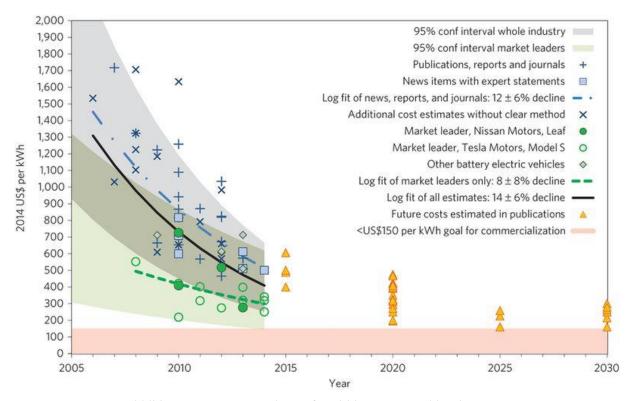


Abbildung 6: Kosten-Lernkurve für Lithium-Ionen-Akkus in BEV³⁶

Im Kostenvergleich von Batterien und Brennstoffzellen zeigt sich im Allgemeinen, dass der batterieelektrische Antrieb bei kurzen Reichweiten vorteilhaft ist, während oberhalb einer bestimmten Reichweite der Brennstoffzellenantrieb zunehmend kostengünstiger wird. Ebenso wie bei Batterien ist auch bei Brennstoffzellen zukünftig von sinkenden Anschaffungskosten auszugehen. Allerdings sind Einschätzungen zur zukünftigen Kostenentwicklung von Brennstoffzellen mit größeren Unsicherheiten behaftet. Insbesondere variieren die zukünftigen Brennstoffzellenkosten mit den Fertigungsstückzahlen. Die Anschaffungskosten von Brennstoffzellen betragen gegenwärtig ca. 800 EUR je Kilowatt. Bei diesem Preis werden die Materialkosten jedoch auf unter 20 Prozent geschätzt, was auf deutliche Kostensenkungspotenziale bei hohen Stückzahlen hinweist. Auch für den Nutzfahrzeugbereich kann damit gerechnet werden, dass große Stückzahlen den Brennstoffzellenpreis deutlich drücken /10/, S. 67.

_

³⁶ Quelle: /23/.

2. Energiekosten

Nutzfahrzeuge benötigen zum Betrieb je nach Antriebskonzept unterschiedliche Energieträger. Als fossile Energieträger werden besonders Dieselkraftstoff, Leichtes Heizöl (HEL) und Erdgas eingesetzt, während als erneuerbare Energieträger Strom, Wasserstoff, Biomethan sowie erneuerbarer Dieselkraftstoff (DME) nutzbar sind. Die Kosten dieser Energieträger haben einen wesentlichen Einfluss auf die Betriebskosten von Nutzfahrzeugen. Im Folgenden werden zunächst generelle Aspekte der Energiekosten beschrieben (Abschnitt 2.1). Anschließend werden die Preisentwicklungen für fossile Kraftstoffe und CO₂-Zertifikate (Abschnitt 2.2) sowie für die in alternativen Antrieben nutzbaren Energieträger Strom, Wasserstoff und erneuerbarer Dieselkraftstoff (Dimethylether – DME) beschrieben (Abschnitt 2.3 ff.). Diese Preisentwicklungen wurden den Berechnungen zugrunde gelegt, die zum Vergleich der Wirtschaftlichkeit der alternativ angetriebenen Nutzfahrzeuge und ihrer Infrastrukturen durchgeführt wurden (Abschnitt 4).

2.1 Generelle Aspekte

Für die Berechnung der Energiekosten über die Nutzungsdauer von Nutzfahrzeugen sind neben den aktuellen Preisen für die genannten Energieträger auch die zukünftig zu erwartenden Preisentwicklungen erforderlich. Allerdings sind diese Preisentwicklungen gegenwärtig schwer einzuschätzen, da insbesondere bei Dieselkraftstoff, leichtem Heizöl und bei Strom in den letzten Jahren erhebliche Preissteigerungen zu verzeichnen waren. Mit den seit Februar 2022 deutlich verschlechterten Beziehungen zum Rohstofflieferanten Russland wird die Bewertung der zukünftigen Preisentwicklungen zusätzlich erschwert. Dies begründet sich unter anderem dadurch, dass beispielsweise bei Kraftstoffen kurz- und mittelfristig Knappheiten nicht ausgeschlossen werden können, die gegebenenfalls zu zusätzlichen Effekten in den Preisanstiegen führen. Erst nach dem Ende des Ukraine-Krieges könnte eine Normalisierung der Energiepreisentwicklungen eintreten, welche die langjährigen Preisanstiege fortsetzen könnten. Dabei ist allerdings nicht davon auszugehen, dass die fossilen Energiepreise annähernd zu ihren jeweiligen Vorkrisen- bzw. Vorkriegsniveaus zurückkehren. Vielmehr werden diese Preise die Veränderungen spiegeln, die zwischenzeitlich beispielsweise auf den Weltmärkten eingetreten sind.

2.2 Fossile Kraftstoffe und CO₂-Zertifikatskosten

Das als Referenzsystem zugrunde gelegte Nutzfahrzeug mit Dieselantrieb benötigt Dieselkraftstoff sowie AdBlue für den Antrieb und im Falle von Omnibussen zusätzlich Leichtes Heizöl (HEL) für den Betrieb von Heizungs- und Lüftungssystemen.

Dieselkraftstoff

Die Preisentwicklung von Dieselkraftstoff ist in Abbildung 7 dargestellt. In dem Zeitraum von 2015 bis 2022 zeigt die Abbildung die realisierte Preisentwicklung. Der für das Jahr 2020 ersichtliche Preis von 0,85 EUR je Liter Dieselkraftstoff entspricht dem jahresdurchschnittlichen Preis, wie er der rebus Regionalbus Rostock GmbH tatsächlich entstanden ist³⁷. Im weiteren Verlauf folgt der Dieselpreis der vom Statistischen Bundesamt veröffentlichten Entwicklung der Preise für Dieselkraftstoff bei Lieferung an Großverbraucher in Deutschland, wobei diese Entwicklung auf das rebus-Preisniveau des Jahres 2020 und insoweit auf die Region Rostock skaliert wurde³⁸. Diese Preisentwicklung wurde sodann bis zum Jahr 2040 trendbasiert fortgeschrieben, wobei ab dem Jahr 2022 ein ebenfalls fortgeschriebener CO₂-Preis hinzugerechnet wurde. Dessen Höhe ist bis einschließlich 2025 in der aktuellen Fassung des Brennstoffemissionshandelsgesetzes (BEHG) bereits festgelegt. Für 2021 beträgt der in der Abbildung bereits erkennbare CO₂-Preis erst 0,07 EUR je Liter Dieselkraftstoff. Bis 2025 steigt er dann auf 0,15 EUR je Liter Dieselkraftstoff an. Längerfristig, also bis 2040, führt die Fortschreibung auf einen CO₂-Preis von 0,96 EUR und

Im Jahr 2020 beliefen sich die Aufwendungen des Unternehmens für Dieselkraftstoff auf 1,726 Mio. EUR / 24/ und der Verbrauch auf 2,033 Mio. Liter Dieselkraftstoff /1/.

Lange Reihen der Erzeugerpreise gewerblicher Produkte (Inlandsabsatz) ab 1976 bis Mai 2022 - Preise für leichtes Heizöl, Motorenbenzin und Dieselkraftstoff.

auf einen Dieselkraftstoffpreis auf 2,91 EUR - jeweils je Liter Dieselkraftstoff. Im längerfristigen Durchschnitt steigt der Dieselkraftstoffpreis damit um knapp 4,8 Prozent je Jahr an.

Das ist ein etwas moderaterer Preisanstieg, als ihn die rebus Regionalbus Rostock GmbH in ihren Berechnungen zugrunde gelegt hat. Dort steigt der Dieselpreis von 1,39 EUR je Liter Dieselkraftstoff im Jahr 2021 auf 2,15 EUR je Liter Dieselkraftstoff im Jahr 2030, was einen durchschnittlichen Preisanstieg von knapp 5 Prozent bedeutet /27/.

Die in der Abbildung dargestellten Preise beschreiben langfristige Entwicklungen, von denen die Preise zu bestimmten Zeitpunkten mehr oder weniger deutlich abweichen können. Beispielsweise gibt die Abbildung für das Jahr 2022 einen Preis für Dieselkraftstoff in Höhe von 1,26 EUR/l an, wohingegen die rebus Regionalbus Rostock GmbH für das erste Quartal 2022 durchschnittliche Dieselkraftstoffkosten von 1,44 EUR/l mitgeteilt hat³⁹.

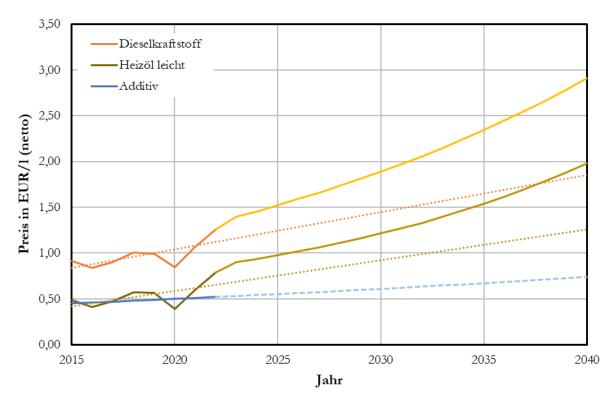


Abbildung 7: Preisentwicklung von Dieselkraftstoff, Heizöl leicht und AdBlue⁴⁰

Leichtes Heizöl (HEL)

Die in Abbildung 7 ebenfalls dargestellte Preisentwicklung für Heizöl leicht basiert für den Zeitraum von 2015 bis 2022 auf der vom Statistischen Bundesamt veröffentlichten Preisentwicklung, der eine Lieferung an Verbraucher in Tankkraftwagen mit einer Liefermenge von 40 bis 50 hl pro Auftrag am Standort Rostock zugrunde liegt⁴¹. Diese Preisentwicklung wurde in der gleichen Weise wie für Dieselkraftstoff fortgeschrieben. Dabei wurde wiederum ab dem Jahr 2022 der schrittweise steigende CO₂-Preis eingerechnet, welcher im Brennstoffemissionshandelsgesetz für Heizöl leicht in der gleichen Höhe festgesetzt ist wie für Dieselkraftstoff.

Der so für das Jahr 2022 ermittelte Preis für Heizöl leicht beläuft sich auf 0,79 EUR je Liter Heizöl. Dies entspricht dem Preis, den die rebus Regionalbus Rostock GmbH für den Januar 2022 mit 0,7895 EUR je

Quelle: E-Mail-Mitteilung der rebus Regionalbus Rostock GmbH vom 26. April 2022.

Quelle: Eigene Darstellung auf der Grundlage von Daten des Statistischen Bundesamtes für den Zeitraum von 2015 bis 2022: Preise für Dieselkraftstoff und Heizöl leicht.

Ab dem Jahr 2011 wird der nächstgelegene Berichtsort Magdeburg herangezogen, da das Statistische Bundesamt die Heizölpreise am Standort Rostock seitdem nicht mehr berichtet.

Liter Heizöl auf Anfrage mitgeteilt hat. Bis zum Jahr 2030 steigt der Heizölpreis gemäß der Abbildung auf ca. 1,98 EUR je Liter und damit ähnlich wie der Dieselkraftstoffpreis auf das Fünffache.

AdBlue

Die in Abbildung 7 dargestellte Preisentwicklung für das Kraftstoffadditiv AdBlue geht von einem Preis von 0,50 EUR je Liter im Jahr 2020 aus⁴². Diese Preisentwicklung wird mit einem jährlichen Anstieg von 2 Prozent bis zum Jahr 2040 fortgeschrieben /34/, S. 31. Danach würde der AdBlue-Preis bis zum Jahr 2040 auf 0,74 EUR je Liter ansteigen. Auch hier ist zu berücksichtigen, dass es sich um ein Preismodell handelt, welches einen längerfristigen Entwicklungstrend beschreibt, von dem die AdBlue-Preise einzelner Jahre mehr oder weniger deutlich abweichen können. So hat die rebus Regionalbus Rostock GmbH für das erste Quartal 2022 einen AdBlue-Preis von 0,68 EUR je Liter (netto) mitgeteilt.

CO₂-Kosten

Bei der Verbrennung der in Nutzfahrzeugen eingesetzten Energieträger Dieselkraftstoff, Leichtes Heizöl und Erdgas entstehen CO₂-Emissionen. Diese CO₂-Emissionen unterliegen gemäß dem Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG) vom 12. Dezember 2019 einer Bepreisung⁴³. Gemäß dem Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung steigen die Preise in der Einführungsphase beginnend 2021 mit 25 EUR/t CO₂ jährlich an, Tabelle 4. Für das Jahr 2026 legt das Gesetz einen Preiskorridor mit einem Mindestpreis von 55 EUR/t CO₂ und einem Höchstpreis von 65 EUR/t CO₂ fest⁴⁴.

Jahr	3.6	2021	2022	2023	2024	2025	
Energieträger	Menge	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	

Tabelle 4: CO₂-Preisentwicklung bis 2025 gemäß dem BEHG⁴⁵

Hinsichtlich der zukünftigen Entwicklung des CO₂-Preises wird angenommen, dass dieser Preisanteil im Dieselkraftstoff und im leichten Heizöl bis 2030 auf 32 EUR je Liter und bis 2040 auf knapp 100 EUR je Liter ansteigt. Dies würde einem CO₂-Preis von ca. 130 bzw. ca. 370 EUR/t CO₂ entsprechen⁴⁶.

Erfasst sind gemäß Anlage 1 des BEHG zum einen Brennstoffe, die dazu bestimmt sind, als Kraft- oder Heizstoff verwendet zu werden, soweit diese nicht synthetischer Herkunft sind. Zum anderen gelten als Brennstoffe im Sinne des Gesetzes auch Waren, die zur Verwendung als Zusatz von Kraftstoffen bestimmt sind.

4

Im Jahr 2017 belief sich der AdBlue-Preis auf 0,15 EUR je Liter /30/, S. 41.

⁴⁴ Ab 2027 sieht das Gesetz keine Festpreise bzw. Ober- und Untergrenzen mehr vor. Die Preisentwicklung für diesen Zeitraum wird von Angebot und Nachfrage bestimmt werden und lässt sich derzeit nicht voraussagen. Quellen: https://www.bdew.de/presse/pressemappen/gaspreis-und-co-2-preis/#Wie hoch ist der CO2-Preis und wie wird er sich in Zukunft entwickeln?.

⁴⁵ Quelle: § 10 BEHG 2019.

Gemäß einer Mitteilung des Bundesrechnungshofs an das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz sehen verschiedene Gutachten zur längerfristigen Preisentwicklung im nationalen Emissionshandel einen bis zum Jahr 2030 linear ansteigenden CO₂-Preis von 130 bis 180 EUR/t CO₂ vor /31/, S. 16.

2.3 Strom

Die zurückliegende Entwicklung des Strompreises für "Übrige Abnehmer"⁴⁷ in Mecklenburg-Vorpommern von 2005 bis 2017 und eine mögliche Fortsetzung dieser Entwicklung bis zum Jahr 2040 zeigt Abbildung 8. Danach beläuft sich der aktuelle Strompreis für diese Verbrauchergruppe auf ca. 0,2156 EUR/kWh⁴⁸. Gemäß der in der Abbildung dargestellten Fortschreibung würde der Strompreis für die Verbrauchergruppe "Übrige Abnehmer" bis zum Jahr 2040 auf ca. 0,329 EUR/kWh ansteigen.

Bei fortgesetzter Fortschreibung ergibt sich für das Jahr 2050 ein Strompreis von 0,393 EUR/kWh. Dies würde gegenüber dem Strompreis des Jahres 2015 eine Erhöhung auf das 2,4-fache bedeuten. Demgegenüber wird in einer Veröffentlichung des Umweltbundesamtes für das Jahr 2050 ein um das 3,2-fache höherer Strompreis ermittelt⁴⁹. Allerdings handelt es sich dabei um einen Basisstrompreis, der noch nicht zwischen verschiedenen Verbrauchergruppen differenziert.

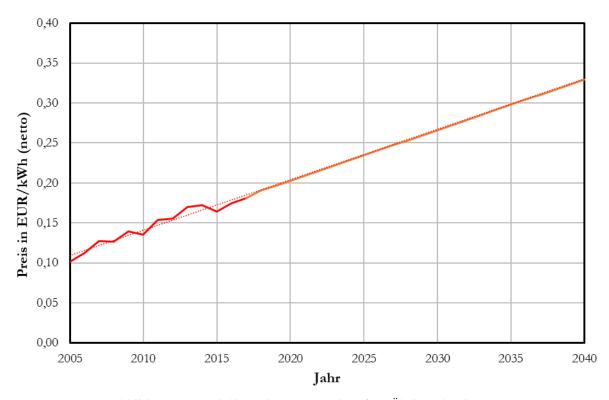


Abbildung 8: Entwicklung des Strompreises für "Übrige Abnehmer"50

Unter den Energiepreisen sind die zukünftigen Strompreise gegebenenfalls diejenigen, deren aktuelle Vorausberechnungen mit den größten Unsicherheiten behaftet sind. Dies begründet sich im Wesentlichen

In der amtlichen Statistik werden als "Übrige Abnehmer" neben öffentlichen Einrichtungen, dem Handel und Gewerbe sowie der Landwirtschaft auch Unternehmen in der Wirtschaftsbranche Verkehr und in Lagerei geführt, sofern diese jährlich mindestens 10.000 kWh Strom verbrauchen.

Tatsächlich hat beispielsweise die rebus Regionalbus Rostock GmbH einen etwas niedrigeren Strompreis mitgeteilt, was im Wesentlichen auf einen bereits seit mehreren Jahren bestehenden Vertrag zurückzuführen ist. Quelle: E-Mail-Mitteilung der rebus Regionalbus Rostock GmbH vom 26. April 2022.

Gegenüber einem Basisstrompreis von 25 EUR/MWh im Jahr 2015 hat das OBA für das Jahr 2050 über 10 verschiedene Szenarien gemittelt einen Basisstrompreis von ca. 82 EUR/MWh errechnet. Quelle: /32/, S. 131.

Quelle: Eigene Darstellung auf der Grundlage von Daten des Statistischen Amtes Mecklenburg-Vorpommern für den Zeitraum von 2005 bis 2017: Erlöse für Strom in Mecklenburg-Vorpommern. (Die Erlöse aus dem Stromabsatz der Energieversorgungsunternehmen enthalten die Netznutzungsentgelte, die Stromsteuer, die Konzessionsabgaben sowie die Ausgleichsabgaben nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz und dem Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz. Unberücksichtigt sind die Umsatzsteuer und Stromsteuererstattungen nach § 10 Stromsteuergesetz.).

dadurch, dass diese im Gegensatz zu den Preisen anderer Energieträger besonders vielfältigen Einflüssen unterliegen.

Beispielsweise wurden in dem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Kopernikus-Projekt SynErgie bis 2030 steigende und zudem zunehmend stärker schwankende Day-Ahead-Strompreise von 0,930 EUR/kWh prognostiziert, die allerdings bereits im II. Halbjahr 2021 erreicht und übertroffen wurden: Während der Durchschnittspreis von 2016 bis 2020 noch konstant und deutlich unter 0,500 EUR/kWh lag, stieg er 2021 sprunghaft auf knapp 0,100 EUR/kWh. Hinzu kommt, dass – im Gegensatz zu den Vorjahren – im Jahr 2021 auch sehr viel größere Preisschwankungen sowie ein Rückgang der Anzahl von Stunden mit negativem Strompreis beobachtet wurden. Im IV. Quartal 2021 stieg der Durchschnittspreis dann sogar auf über 0,150 EUR/kWh. Zudem hat das Jahr 2022 mit genauso hohen Day-Ahead-Strompreisen begonnen und dieses hohe Preisniveau bisher auch beibehalten. Ebenso übertraf das Preismaximum 2021 mit 0,620 EUR/kWh das prognostizierte Maximum von 0,138 EUR/kWh um ein Vielfaches, was die ebenso enormen Preisschwankungen im vergangenen Jahr verdeutlicht, Abbildung 9.

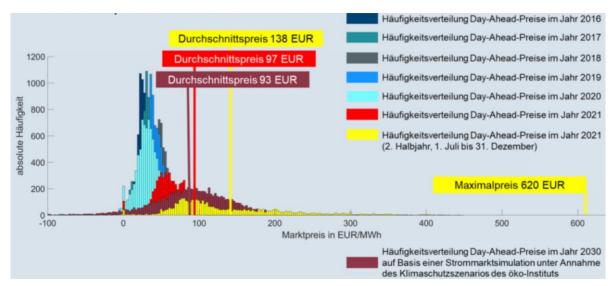


Abbildung 9: Entwicklung der Volatilität der Day-Ahead-Strompreise an der Strombörse⁵¹

2.4 Wasserstoff

Die Entwicklung der Kosten der Wasserstofferzeugung und -nutzung hängen von verschiedenen Einflussfaktoren ab, die sich beispielsweise in den folgenden Szenarien beschreiben lassen /19/, S. 28:

- Konservatives Szenario (schwache Entwicklung): H₂- und BZ-Technologien bleiben eher Nischenprodukte – H₂-Technologien ab ca. 2040 wettbewerbsfähig zu meisten CO₂-armen Konkurrenztechnologien
- Basisszenario (erwartete Entwicklung): H₂- und BZ-Technologien entwickeln sich stärker H₂-Technologien ab ca. 2030 wettbewerbsfähig zu meisten CO₂-armen Konkurrenztechnolog,
- Progressive Szenario (starke Entwicklung): Weltweiter Durchbruch der H₂- und BZ-Technologien H₂-Technologien ab ca. 2025 wettbewerbsfähig zu meisten CO₂-armen Konkurrenztechnologien.

Während die Wasserstoffkosten in dem konservativen Szenario auf hohem Niveau bleiben oder nur geringfügig sinken, sinken sie in den beiden anderen Szenarien stärker bzw. deutlich. Diese Entwicklungen werden auch durch wirtschaftspolitische und durch regulatorische Maßnahmen beeinflusst.

Die H₂-Gestehungskosten berechnen sich aus den Investitionskosten (Capex) und den Betriebskosten (Opex) der Wasserelektrolyse. Der Capex-Anteil wird durch die Höhe der Investitionskosten der Anlage aber auch durch die erzielbaren Volllaststunden und die Lebensdauer des Elektrolyseurs bestimmt. Der

Quelle: https://synergie-projekt.de/news/strompreise-sind-bereits-heute-so-hoch-wie-fuer-2030-vorhergesagt.

Opex-Anteil wird durch den Bezug von Strom und Wasser, durch die Wartungskosten sowie durch den Wirkungsgrad der Anlage bestimmt. Die Stromkosten machen typischerweise den größten Anteil der Gestehungskosten für Wasserstoff aus. Daneben sind auch die Volllaststunden des Elektrolyseurs ein wesentlicher Einflussfaktor der H2-Gestehungskosten. Beide Parameter werden durch die Wahl der Strombezugsoption bestimmt, welche damit einen maßgeblichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit des Elektrolyseurs hat /19/, S. 49/50.

Es wird davon ausgegangen, dass Elektrolyseure nach § 118 Abs. 6 EnWG für 20 Jahre vom Netzentgelt befreit sind. Folgende Bestandteile bestimmen die resultierenden Strombezugskosten⁵² /19/, S. 51/52: Stromgestehungskosten, EEG-Umlage, Stromsteuer, Netzentgelte (i.d.R. sind Elektrolyseure für 20 Jahre befreit) und netzentgeltbezogene Abgaben. Für die Bereitstellung des Elektrolysestroms bestehen prinzipiell drei Möglichkeiten /19/, S. 52/53:

- Stromversorgung über das Netz der allgemeinen Versorgung und Einkauf über Strombörse,
- Netzversorgung über PPAs mit Betreibern von Windenergieanlagen oder
- Eigenversorgung.

Die Entwicklung des Preises von Wasserstoff für den Betrieb von Nutzfahrzeugen mit Brennstoffzellen zeigt Abbildung 10. Diese Preisentwicklung beginnt im Jahr 2022, für das ein Preis von 8,78 EUR/kg zugrunde gelegt wurde⁵³. Dieser Preis resultiert aus einer Analyse verschiedener Studien: Danach liegt der aktuelle Preis für Wasserstoff je nach örtlichen Gegebenheiten zwischen 5,50 und 9,50 EUR/kg /9/, S. 22, /33/, S. 40, /34/, S. 23, /35/, S. 24⁵⁴.

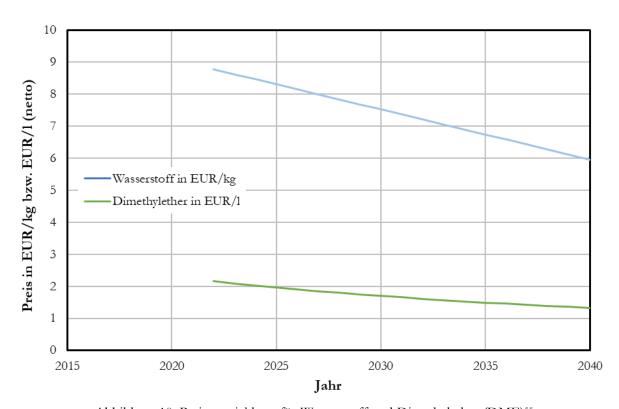


Abbildung 10: Preisentwicklung für Wasserstoff und Dimethylether (DME)55

_

Unter heutiger Regulierung werden Elektrolyseure als Letztverbraucher eingestuft, daher fallen für den Strombezug in der Regel alle Abgaben und Umlagen an. Besondere Ausnahmetatbestände können für das produzierende & stromintensive Gewerbe gelten, welche in der Regel von einem Entfall der Stromsteuer und einer starken Reduzierung der EEG-Umlage profitieren.

Dieser Preis von 8,78 EUR/kg entspricht näherungsweise einem von der rebus Regionalbus Rostock mitgeteilten Preis, welcher aus einer konkreten Anfrage bei einem regionalen Anbieter resultiert.

Der Wasserstoff-Preis von 9,50 EUR/kg war zunächst ein politisch gesetzter Preis, auf den sich die Partner der H2 Mobility verständigt hatten. Soviel kostete der Wasserstoff an jeder Zapfsäule in Deutschland /34/, S. 23.

 $^{^{55}\,\,}$ Quelle: Eigene Darstellung.

Der europäische Verband Hydrogen Europe hat für 2030 zur Erschließung eines Massenmarktes für "grünen" Wasserstoff Produktionszielkosten von 1,50 bis 3,00 EUR/kg und Transportkosten von unter 1,00 EUR/kg Wasserstoff formuliert. Entscheidend für die zukünftigen Kosten werden dabei vor allem lokale Rahmenbedingungen wie die Auslastung der Anlagen (v. a. bei der Elektrolyse) sowie lokale Rohstoffkosten (beispielsweise für Strom, Biomasse, CO₂-Speicherung) sein, aus denen sich mögliche Bandbreiten für zukünftige Wasserstoff-Herstellungskosten ergeben. Für die Herstellung von "grünem" Wasserstoff besteht dabei das Potenzial, Herstellungskosten von bis zu unter 2,00 EUR/kg Wasserstoff zu erreichen /35/, S. 26, /36/, S. 20.

2.5 Erneuerbarer Dieselkraftstoff

Die in Abbildung 10 (oben) dargestellte Preisentwicklung für den erneuerbaren Dieselkraftstoff Dimethylether (DME) beginnt ebenso wie jene für Wasserstoff im Jahr 2022, wobei ein DME-Preis von 3,15 EUR je Liter, also dem 2,5-fachen des Preises von konventionellem Dieselkraftstoff, zugrunde gelegt ist. Das entspricht einem Preis auf den Energieinhalt bezogenen von 60 ct/kWh. In der Fortschreibung der in Abbildung 10 dargestellten Preisentwicklung würde der Preis bis 2030 auf 2,05 EUR je Liter und bis 2050 auf 1,17 EUR je Liter sinken, was einem Preis von 39 bzw. 15 ct/kWh entspricht.

Allerdings ist die Preisentwicklung von erneuerbarem Dieselkraftstoff Dimethylether (DME) ähnlich schwierig einzuschätzen wie jene von Strom. Dies zeigt sich unter anderem daran, dass in vorliegenden Untersuchungen eine Vielzahl von unterschiedlichen Daten aufzufinden ist:

- DME wird bereits heute in großem Maßstab in der chemischen Industrie genutzt. Dementsprechend existieren großskalige Anlagen zur Herstellung auf Basis fossiler Energieträger, wobei Methanol in einem einzigen Syntheseschritt zu DME umgesetzt und anschließend aufgereinigt wird /15/, S. 135.
- Im Vergleich der heutigen Herstellungskosten synthetischer Kraftstoffe und der daraus berechneten spezifischen Kraftstoffkosten für Lkw stellt sich DME als relativ günstig dar, Abbildung 11.
- Der ADAC nennt einen aktuellen Preis von 4,50 EUR je Liter für die Herstellung von synthetischen Kraftstoffen, wobei keine weitere Abgrenzung hinsichtlich des Orts und der Art der Herstellung sowie hinsichtlich enthaltener Kostenbestandteile (Steuern etc.) genannt werden⁵⁶.
- Die Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE) schätzt die Produktionskosten von erneuerbarem DME auf ca. 9 bis 26 ct/kWh⁵⁷.
- Würden synthetische Kraftstoffe heute in Deutschland und dort zentral hergestellt, beliefen sich die Kosten von Wasserstoff auf 0,22 EUR/kWh, von Methan auf 0,23 EUR/kWh, von DME auf 0,26 EUR/kWh und von Methanol auf 0,27 EUR/kWh. Fischer-Tropsch-Kraftstoffe könnten bis zu 0,32 EUR/kWh und OME bis zu 0,37 EUR/kWh kosten /20/, S. 569.

Auch die zukünftige Preisentwicklung wird sehr unterschiedlich eingeschätzt:

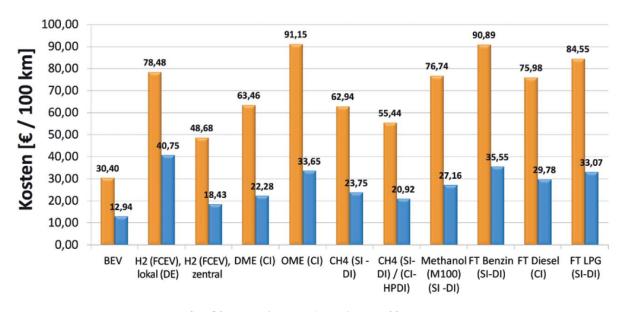
- Der in Hamburg ansässige eFuel Alliance e. V. nennt für das Jahr 2025 Herstellungskosten von 1,61 bis 1,90 EUR je Liter. Diese sollen bis 2030 auf 0,98 bis 1,75 EUR je Liter und bis 2040 auf 0,84 bis 1,54 EUR je Liter fallen. 2050 könnten 0,70 bis 1,33 EUR je Liter erreicht werden. Dabei sind zum einen eine ansteigende Beimischung (2025 4 Prozent, 2050 100 Prozent) und zum anderen fallende Produktionskosten durch den Ausbau der Produktionskapazitäten berücksichtigt. Danach würde Dieselkraftstoff mit einer eFuels-Beimischung 2025 für Tankstellenkunden 1,22 Euro kosten, wohingegen die Kosten von reinem e-Diesel im Jahr 2050 1,38 bis 2,17 Euro je Liter kosten würde (nach heutigen Steuern und Abgaben). Damit wäre dieser Kraftstoff für Endverbraucher in jeder Hochlaufphase preislich erschwinglich⁵⁸.
- Das Wuppertal Institut gibt für das Jahr 2030 einen Preis für synthetische Kraftstoffe in Höhe von 2,29 EUR je Liter an. Darin sind eine Energiesteuer von 65 Ct je Liter sowie die Umsatzsteuer enthalten /38/, S. 12.

Ouelle: https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/alternative-antriebe/synthetische-kraftstoffe/.

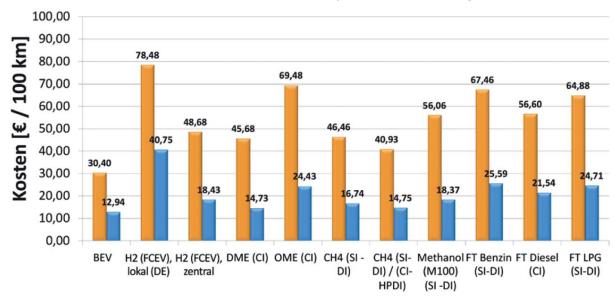
⁵⁷ Quelle: https://www.fluessiggas1.de/dimethylether/.

Ouelle: https://www.efuel-alliance.eu/de/efuels/kosten-ausblick.

Agora Verkehrswende gibt die Kosten synthetischer Kraftstoffe für das Jahr 2022 mit 24 ct/kWh sowie mit einer Bandbreite von 19 bis 32 ct/kWh an, sofern der Kraftstoff unter Verwendung von erneuerbarem Strom aus der Nord- bzw. Ostsee erzeugt wird. Allerdings enthält dieser Preis für das Endprodukt noch keine Netzentgelte und Vertriebskosten. Diese Kosten könnten bis 2050 auf ca. 10 ct/kWh sinken /21/, S. 19/20.



a) bei CO2-Entnahme aus der Luft (min - blau, max - orange)



b) bei CO₂-Abscheidung aus vorhandenen Quellen (min - blau, max - orange)

Abbildung 11: Herstellungskosten synthetischer Kraftstoffe im Vergleich⁵⁹

-

⁵⁹ Quelle: /*37*/, S. 54/55.

3. Förderangebote des Bundes im Bereich "Alternative Antriebe"

In diesem Abschnitt wird zunächst ein kurzer Überblick über solche Förderangebote des Bundes gegeben, die für kommunale Nutzfahrzeugflotten bedeutsam sind (Abschnitt 2.1). Anschließend werden die Rahmenbedingungen der Förderung für zwei konkrete Förderangebote näher beschrieben. Bei diesen handelt es sich um die Förderrichtlinie Busse mit alternativen Antrieben im Personenverkehr (Abschnitt 2.2) und um die Förderrichtlinie Klimaschonende Nutzfahrzeuge (Abschnitt 2.3). In einem kurzen Zwischenfazit werden die Förderquoten zusammengefasst, die im Weiteren für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit kommunaler Nutzfahrzeuge mit alternativen Antrieben herangezogen werden.

3.1 Überblick über ausgewählte Förderangebote des Bundes

Die Förderprogramme des Bundes lassen sich in die drei Bereiche⁶⁰

- Alternative Kraftstoffe Erneuerbare Kraftstoffe im Mobilitäts- und Energiesektor: von LNG bis Wasserstoff mit den Schwerpunkten:
 - NIP Wasserstoff und Brennstoffzelle,
 - MKS Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie
 - RK Regenerative Kraftstoffe sowie
 - EXI Exportinitiative Umwelttechnologien,
- Batterie und Ladeinfrastruktur Förderung von Elektrofahrzeugen und Ladeinfrastruktur sowie
- Alternative Antriebe Batterie, Wasserstoff, Oberleitung bzw. Zug, Bus und Lkw

gliedern. In Tabelle 5 sind ausgewählte Förderangebote zusammengestellt. Bei den Alternativen Antrieben/Bus erfolgt die Förderung in dem Programm "Skizzeneinreichung für Busse mit alternativen Antrieben (05/2022)" und bei den Alternativen Antrieben/Lkw in dem Programm "Klimafreundliche Nutzfahrzeuge". Dieses Programm unterteilt sich in die beiden Teilprogramme "Klimaschonende Nutzfahrzeuge und Infrastruktur (08/2021)" und "Klimaschonende Nutzfahrzeuge -Machbarkeitsstudien". Ziel des Programms "Klimafreundliche Nutzfahrzeuge" ist zwar die Dekarbonisierung des schweren Straßengüterverkehrs mit den EG-Fahrzeugklassen N2 (mehr als 3,5 bis 12 t zulässiges Gesamtgewicht) und N3 (mehr als 12 t zulässiges Gesamtgewicht), , die eine hohe Verkehrsleistung erbringen und mit drei bis fünf Jahren vergleichsweise kurze Einsatzzyklen haben. Jedoch sind dort beispielsweise auch Kommunal- und Abfallsammelfahrzeuge wie FAUN Bluepower oder FUTURICUM FM COLLECT 26E und FUTURICUM COLLECT LOW ENTRY 26E erfasst⁶¹. Zudem hat das Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) im Rahmen der Förderung klimafreundlicher Nutzfahrzeuge am 15. Juni 2022 einen zweiten Förderaufruf veröffentlicht. Dieser wird durch einen zusätzlichen Aufruf für Sonderfahrzeuge und Infrastruktur ergänzt. Außerdem besteht bei diesen Förderaufrufen die Möglichkeit, Wasserstoffinfrastruktur zu beantragen. Die Antragsstellung für beide Aufrufe soll ab dem 29.06.2022 möglich sein⁶².

-

Quelle: https://www.now-gmbh.de/foerderung/foerderprogramme/.

Quelle: https://www.klimafreundliche-nutzfahrzeuge.de/praxis/fahrzeugdatenbank/.

Quelle: Pressemitteilung der NOW GmbH vom 15. Juni 2022, verfügbar unter: https://www.klimafreundliche-nutzfahrzeug-foerderung/. Der zweite Förderaufruf und der Sonderaufruf vom 15. Juni 2022 sind auf der Website der Bewilligungsbehörde Bundesamt für Güterverkehr (BAG) veröffentlicht: https://www.bag.bund.de/DE/Foerderprogramme/KlimaschutzundMobilitaet/KSNI/Ksni_node.html;jsessio_nid=CC4CF23BAB68A3973CA49EC7D6DC0B78.live11291.

Tabelle 5: Förderangebote des Bundes im Bereich "Alternative Antriebe" (Auswahl)⁶³

Bezeichnung	Frist	Laufzeit	Fördergegenstand	Sektor/Anwendungsbereich
1	2	3	4	5
Biologische Methanisierung unter Nutzung von CO ₂ -Quellen aus der Bioenergieproduk- tion und Wasserstoff ⁶⁴	31.10.2022	ohne	RK (regenerative Kraftstoffe), Konzept	Mobilität, Kraftstofferzeugung, Biokraftstoff, LNG & CNG
F&E-Projekte H ₂ und Brennstoffzelle (Frist zur Skizzenpriorisie- rung) ⁶⁵	30.09.2022	30.06.2024	NIP, Forschung und Entwicklung	Busse, Pkw, Leicht-/Nutz-/ Flur- förder- und Sonderfahrzeuge, Infrastruktur, Energieversorgung, Kraftstofferzeugung, Kompo- nenten & Systeme, Normierung, H ₂
Förderaufruf für Fahr- zeuge und LIS für Kommunen ⁶⁶	28.07.2022	31.12.2025	EM, Invest	Mobilität, Pkw / Leicht- und Sonderfahrzeuge, Infrastruktur, Strom
Skizzeneinreichung für Busse mit alternativen Antrieben (05/2022) ⁶⁷	15.07.2022	31.12.2025	BUS, Invest	Busse
Nicht öffentlich zu- gängliche Ladestatio- nen für Elektrofahr- zeuge – Unternehmen und Kommunen ⁶⁸	ohne	31.12.2022	LIS, Invest	Mobilität, Pkw / Leichtfahrzeuge, Infrastruktur, Strom
Klimaschonende Nutzfahrzeuge und Infrastruktur (08/2021)	27.09.2021	31.12.2024	LKW, Invest	Nutzfahrzeug, Infrastruktur, Strom, Wasserstoff

3.2 Förderrichtlinie Busse mit alternativen Antrieben im Personenverkehr

Innerhalb der vorstehend beschriebenen Förderangebote des Bundes im Bereich der alternativen Antriebe ist für den nicht-schienengebundenen ÖPNV die BMVI-Förderrichtlinie "Busse mit alternativen Antrieben im Personenverkehr vom 7. September 2021 /25/ von besonderer Bedeutung. Diese Richtlinie wendet sich gezielt an Verkehrsbetriebe und zielt auf die Beschaffung von neuen Bussen sowie auf die Umrüstung von vorhandenen Bussen, sofern diese kostengünstiger ist bzw. kein geeignetes Fahrzeug am

Quelle: https://www.now-gmbh.de/foerderung/foerderfinder/? sfm status fa=open.

Weiterführende Informationen: https://www.now-gmbh.de/foerderung/foerderfinder/biologische-methanisie-rung-unter-nutzung-von-co2-quellen-aus-der-bioenergieproduktion-und-wasserstoff/.

Weiterführende Informationen: https://www.now-gmbh.de/foerderung/foerderfinder/fe-projekte-wasserstoff-und-brennstoffzelle-frist-zur-skizzenpriorsierung/.

Mit diesem Förderangebot wird die Förderung fortgesetzt, die bislang in dem am 31. Dezember 2022 auslaufenden Förderangebot "Nicht öffentlich zugänglichen Ladestationen für Elektrofahrzeuge – Unternehmen und Kommunen" erfolgt. Weiterführende Informationen: https://www.now-gmbh.de/foerderung/foerderfinder/fahrzeuge-und-ladeinfrastruktur-fuer-kommunen/.

Weiterführende Informationen: https://www.now-gmbh.de/foerderung/foerderfinder/skizzeneinreichung-fuer-busse-mit-alternativen-antrieben-05-2022/.

Weiterführende Informationen: https://www.now-gmbh.de/foerderung/foerderfinder/nicht-oeffentlich-zuga-engliche-ladestationen-fuer-elektrofahrzeuge-unternehmen-und-kommunen/.

Markt verfügbar ist. Fördergegenstand der Richtlinie und des aktuellen Aufrufs (05/2022) sind Fahrzeug-Infrastruktur-Systeme, wobei die folgenden Antriebsarten förderfähig sind:

- batterieelektrische Antriebe (Batteriebusse und Batterie-Oberleitungsbusse),
- brennstoffzellenbasierte Antriebe (Brennstoffzellenbusse, Batteriebusse mit Brennstoffzellen als Range-Extender),
- und Antriebe, die bilanziell zu 100 Prozent mit aus Biomasse erzeugtem Methan betrieben werden (Gasbusse).

Die Förderung erfolgt über Zuschüsse zu Investitionsmehrausgaben für umweltfreundliche Busse. Diese werden jeweils im Vergleich mit einem konventionellen Referenzbus gleicher Größe ermittelt, der ohne Förderung angeschafft würde. Sofern innerhalb der Gesamtinvestitionsausgaben die Investition in den Umweltschutz getrennt ermittelt werden kann, werden diese umweltschutzbezogenen Ausgaben als zuwendungsfähige Ausgaben zugrundegelegt. Dies kann zum Beispiel bei der Umrüstung von Fahrzeugen gegeben sein. Die Förderung beträgt bei den Batterie- und Brennstoffzellenbussen maximal 80 Prozent und bei den Gasbussen 40 Prozent. Außerdem sind die zuwendungsfähigen Ausgaben durch eine Preisobergrenze für die jeweiligen Buskategorien limitiert.

Über die Fahrzeuge hinaus wird auch die Beschaffung von nicht-öffentlicher Infrastruktur zum Einsatz der vorstehend genannten Fahrzeuge gefördert:

- Infrastruktur, die das Aufladen der Batterieeinheiten gewährleistet,
- Betankungsinfrastruktur zur Abgabe von Wasserstoff für die Brennstoffzellenbusse,
- Betankungsinfrastruktur zur Abgabe von bilanziell zu 100 Prozent aus Biomasse erzeugtem Methan für Gasbusse,
- Wartungsinfrastruktur, die zusätzlich für den Betrieb der Busse mit alternativen Antrieben angeschafft werden muss.

Bei der Infrastruktur entsprechen die zuwendungsfähigen projektbezogenen Ausgaben den Mehrausgaben für die Infrastruktur, die durch die Beschaffung der geförderten Fahrzeuge bzw. Antriebsarten gegenüber dem Einsatz konventioneller Technologie bedingt sind. Die Umfänge der zu betrachtenden Mehrausgaben werden im Rahmen der Aufrufe zur Skizzeneinreichung näher definiert. Hier können die zuwendungsfähigen Ausgaben für die Lade-, Betankungs- und Wartungsinfrastruktur mit 50 Prozent gefördert werden. Für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) ist eine Erhöhung der Beihilfeintensität um 20 bzw. 10 Prozentpunkte möglich.

3.3 Förderrichtlinie Klimaschonende Nutzfahrzeuge und Infrastruktur (08/2021)

Die Förderrichtlinie, die Bestandteil des BMVI-Maßnahmenpaketes aus dem Gesamtkonzept klimafreundliche Nutzfahrzeuge ist, umfasst mit dem Infrastrukturaufbau und dem regulatorischen Rahmen⁶⁹ sowie der Fahrzeugförderung drei Elemente. Der Aufruf zur Förderung von Nutzfahrzeugen mit alternativen, klimaschonenden Antrieben und dazugehöriger Tank- und Ladeinfrastruktur (KsNI) /26/, dessen Antragsfrist am 27. September 2021 endete, ist auf die Anschaffung von neuen klimafreundlichen Nutzfahrzeugen sowie der für den Betrieb erforderliche Ladeinfrastruktur ausgerichtet und soll zum Markthochlauf von emissionsarmen Nutzfahrzeugen beitragen.

Mit der Förderrichtlinie wird die Förderquote von 80 Prozent gegenüber früheren Förderprogrammen deutlich angehoben und mit einer Laufzeit bis zunächst Ende 2024 eine mittelfristige Perspektive und damit Planungssicherheit geschaffen. Der Programmschwerpunkt liegt auf den im Klimaschutzprogramm

Der regulatorische Kern besteht in einer Bemessung der Lkw-Maut nach der CO₂-Emission eines Fahrzeugs. Für Lkw mit geringen oder gar keinen Emissionen soll die Infrastrukturgebühr ab 2023 auf bis zu 25 Prozent ermäßigt werden.

2030 der Bundesregierung genannten Technologien Batterie, Brennstoffzelle sowie hybride Oberleitungsantriebe. Der aktuelle Förderaufruf umfasst die beiden zentrale Punkte:

- Förderung der Anschaffung von neuen klimafreundlichen Nutzfahrzeugen der EG-Fahrzeugklassen N1, N2 und N3 sowie auf alternative Antriebe umgerüsteter Nutzfahrzeuge der EG-Fahrzeugklassen N2 und N3 in Höhe von 80 Prozent der Investitionsmehrausgaben im Vergleich zu einem konventionellen Dieselfahrzeug und
- Förderung der für den Betrieb der klimafreundlichen Nutzfahrzeuge erforderlichen Tank- und Ladeinfrastruktur in Höhe von 80 Prozent der zuwendungsfähigen projektbezogenen Gesamtausgaben.

3.4 Zwischenfazit

Für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit kommunaler Nutzfahrzeuge mit alternativen Antrieben können zusammenfassend die folgenden Förderquoten herangezogen werden:

- für Batterie- und Brennstoffzellenbusse: bis zu 80 Prozent der Mehrausgaben bzw. bis zu einer Preisobergrenze für die jeweiligen Buskategorien,
- für die Lade-, Betankungs- und Wartungsinfrastruktur von Batterie- und Brennstoffzellenbussen: 50 Prozent der Mehrausgaben (bei KMU maximal 70 Prozent),
- für die Beschaffung von neuen klimafreundlichen Nutzfahrzeugen wie Abfallsammelfahrzeugen bzw. für deren Umrüstung: 80 Prozent der Investitionsmehrausgaben im Vergleich zu einem konventionellen Dieselfahrzeug,
- für den Betrieb der für klimafreundliche Nutzfahrzeuge erforderlichen Tank- und Ladeinfrastruktur: 80 Prozent der zuwendungsfähigen projektbezogenen Gesamtausgaben.

Da in den ausgewerteten Förderrichtlinien für mit DME betriebene Nutzfahrzeuge keine Förderquoten angegeben werden, werden hierfür die gleichen Förderquoten zugrundegelegt wie für Gasbusse, also 40 Prozent der Mehrausgaben für die Beschaffung bzw. der Ausgaben für die Umrüstung der Fahrzeuge. Diese Förderquote wird außerdem auch für die Beschaffung bzw. Umrüstung der Infrastruktur, also der DME-Tankstelle, zugrundegelegt.

4. Wirtschaftlichkeit alternativer Antriebe im Systemvergleich ÖPNV

In den vorhergehenden Abschnitten wurden die Anschaffungs-, Infrastruktur- und Betriebskosten kommunaler Nutzfahrzeuge (Abschnitt 1), die Energiekosten (Abschnitt 2) sowie die Förderangebote des Bundes im Bereich alternativer Antriebe (Abschnitt 3) beschrieben. Auf der Grundlage der dort zusammengetragenen Informationen und Daten wird im Folgenden die Wirtschaftlichkeit der alternativen Antriebe von Omnibussen in kommunalen Verkehrsbetrieben anhand ihrer jeweiligen TCO berechnet und bewertet (Abschnitt 0.3). Dabei wurden jeweils das Einzelfahrzeug und die zugehörige Infrastruktur als System betrachtet. Als Fahrzeug wurde in den betrachteten Systemen jeweils ein 12-m-Regiobus zugrunde gelegt. Die TCO werden jeweils in dem Zeitraum von 2022 bis 2040 berechnet. Da dieser Zeitraum die Nutzungsdauer aller Fahrzeuge übersteigt, werden jeweils zu bestimmten Zeitpunkten Ersatzinvestitionen vorgesehen. Anhand der System-TCO konnte anschließend ein Systemvergleich für die alternativ angetriebenen Omnibusse durchgeführt werden. Die für die einzelnen Systeme berechneten Systemkosten sind in Anhang 1 in Tabellenform zusammengestellt.

4.1 Referenzsystem Dieselbus

4.1.1 Daten und Annahmen

Für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit des Referenzsystems Dieselbus werden Anschaffungskosten in Höhe von 250 TEUR angesetzt. Die Nutzungsdauer wird mit 8 Jahren festgelegt. Eine Förderung der Anschaffungskosten erfolgt nicht. Nach Ablauf der Nutzungsdauer ist eine Ersatzinvestitionen erforderlich. Diese wird mit 95 Prozent der ursprünglichen Anschaffungskosten berechnet (238 TEUR).

Die Investitionen in die Infrastruktur, also in die Dieselkraftstoff-, Heizöl- und AdBlue-Tankstelle werden mit 150 sowie mit 40 bzw. 40 TEUR zugrundegelegt. Diese werden auf einen Fahrzeugbestand von 60 Omnibussen aufgeteilt und über einen Zeitraum von 20 Jahren abgeschrieben.

Die Verzinsung aller Investitionen, also der Anschaffungskosten, erfolgt hier wie in allen folgenden Systemen einheitlich mit 3,5 Prozent.

Der Jahresenergieverbrauch wird mit einem spezifischen Verbrauch von 35 l Dieselkraftstoff, 4 l Heizöl leicht und 0,8 l AdBlue je 100 km sowie mit einer Jahresfahrleistung von 50.000 km/a ermittelt (diese Jahresfahrleistung wird ebenfalls in allen folgenden Systemen einheitlich zugrunde gelegt).

Die Wartungs- und Instandhaltungskosten je Fahrzeug werden mit 0,28 EUR/km berücksichtigt. Die Wartungs- und Instandhaltungskosten der Infrastruktur (Tankstellen) werden mit 1,5 Prozent der Investitionskosten zugrunde gelegt und wiederum auf 60 Fahrzeuge aufgeteilt.

4.1.2 Systemkosten

Die mit diesen Parametern berechneten Systemkosten für das Referenzsystem Dieselbus sind in Abbildung 12 für den Zeitraum von 2022 bis 2040 dargestellt. Ersichtlich ist, dass diese Systemkosten neben den Fahrzeugkosten insbesondere von den deutlich ansteigenden Energiekosten bestimmt werden. Die Betriebskosten, also die Wartungs- und Instandhaltungskosten, sowie die Infrastrukturkosten sind demgegenüber relativ gering. Die Fahrzeugkosten haben zu Beginn des betrachteten Zeitraums, also im Jahr 2022 einen Anteil von 46 Prozent an den Gesamtkosten, wohingegen die Anteile der Energie- und der Betriebskosten 36 Prozent bzw. 18 Prozent ausmachen. Am Ende des Betrachtungszeitraums, also 2040 belaufen sich die entsprechenden Anteile bei den Fahrzeugkosten auf 29 Prozent, bei den Energiekosten auf 58 Prozent und bei den Betriebskosten auf 13 Prozent.

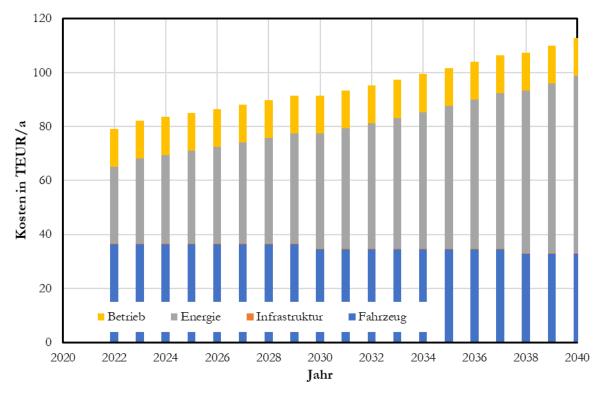


Abbildung 12: Systemkosten des Referenzsystems Dieselbus⁷⁰

4.2 System Batteriebus

4.2.1 Daten und Annahmen

Für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit des Systems Batteriebus werden Anschaffungskosten in Höhe von 313 TEUR angesetzt. Die Nutzungsdauer wird mit 12 Jahren festgelegt. Hinzu kommen die Kosten für die Anschaffung der zugehörigen Batterie von 263 TEUR, wobei eine Batterie mit einer Kapazität von 350 kWh und ein spezifischer Anschaffungspreis von 750 EUR/kWh zugrunde gelegt sind. Eine Förderung der Anschaffungskosten dieser Erstinvestitionen erfolgt mit 45,2 Prozent⁷¹. Da die Batterie nur eine Lebensdauer von 6 Jahren hat, ist allerdings nach Ablauf der halben Nutzungsdauer des Batteriebusses eine Ersatzinvestition erforderlich. Diese wird aufgrund der zu erwartenden Kostendegression bei den Batteriepreisen mit 223 TEUR, also mit 70 Prozent der Erstinvestition zugrunde gelegt. Für diese Ersatzinvestition berechnet sich eine Förderquote von 42,7 Prozent.

Als Ladeeinrichtung wird in dem System Batteriebus für das einzelne Fahrzeug ein Ladepunkt mit einer Ladeleistung von 150 kW mit CCS-Stecker zugrunde gelegt. Die Investitionen in diese Ladeinfrastruktur werden mit 97,5 TEUR berücksichtigt. Hinzu kommen 53 TEUR für die Stromversorgungsinfrastruktur (350 EUR/kW) sowie 26 TEUR als Baukostenzuschuss und Netzanschlusskostenbeitrag⁷². Diese Investitionen werden über einen Zeitraum von 12 Jahren abgeschrieben. Dementsprechend ist im 13. Jahr des Betrachtungszeitraums eine Ersatzinvestitionen in die Ladeinfrastruktur erforderlich, allerdings ohne Baukostenzuschuss und Netzanschlusskostenbeitrag.

.

⁷⁰ Quelle: Eigene Darstellung.

Diese Förderquote wurde wie folgt berechnet: Die Anschaffungskosten des Referenzsystems Dieselbus belaufen sich auf 250 TEUR. Die Anschaffungskosten des Batteriebusses ergeben sich als Summe aus den Fahrzeug- und den Batteriekosten in Höhe von 575 TEUR. Daraus errechnen sich Mehrkosten des alternativen Antriebs in Höhe von 325 TEUR. Werden diese mit einer Förderquote von 80 Prozent gefördert, beläuft sich die Fördersumme auf 260 TEUR, also auf 45,2 Prozent der Anschaffungskosten des Batteriebusses.

Der Baukostenzuschuss wird mit 115 EUR/kW und der Netzanschlusskostenbeitrag mit 56 EUR/kW berücksichtigt.

Die Verzinsung aller Investitionen, also der Anschaffungskosten, erfolgt wiederum mit 3,5 Prozent.

Der Jahresenergieverbrauch wird mit einem spezifischen Stromverbrauch von 123 kWh je 100 km für das Fahren und von 49,5 kWh je 100 km für die Klimatisierung sowie wiederum mit einer Jahresfahrleistung von 50.000 km/a ermittelt.

Die Wartungs- und Instandhaltungskosten je Fahrzeug werden mit 0,24 EUR/km berücksichtigt. Die Wartungs- und Instandhaltungskosten der Ladeinfrastruktur werden mit 1,5 Prozent der Investitionskosten zugrunde gelegt.

4.2.2 Systemkosten

Die mit diesen Parametern berechneten Systemkosten für das System Batteriebus sind in Abbildung 13 für den Zeitraum von 2022 bis 2040 dargestellt. Ersichtlich ist, dass diese Systemkosten neben den Fahrzeugkosten insbesondere von den steigenden Energiekosten bestimmt werden, welche hier allerdings moderater ansteigen als im Referenzsystem Dieselbus. Die Betriebskosten, also die Wartungs- und Instandhaltungskosten, sowie die Infrastrukturkosten sind demgegenüber relativ gering. Deutlicher als bei dem Referenzsystem Dieselbus treten hier auch die Kosten für die Infrastruktur in Erscheinung. Die Fahrzeugkosten haben zu Beginn des betrachteten Zeitraums, also im Jahr 2022 einen Anteil von 52 Prozent an den Gesamtkosten, wohingegen die Anteile der Energie- und der Betriebskosten 26 Prozent bzw. 16 Prozent ausmachen. Die Infrastrukturkosten haben demgegenüber nur einen Anteil von 6 Prozent. Am Ende des Betrachtungszeitraums, also 2040 belaufen sich die entsprechenden Anteile bei den Fahrzeugkosten auf 41 Prozent, bei den Energiekosten auf 38 Prozent, bei den Betriebskosten auf 15 Prozent und bei den Infrastrukturkosten wiederum auf 6 Prozent.

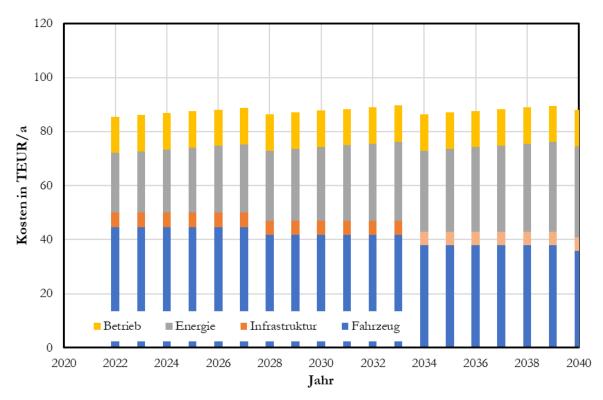


Abbildung 13: Systemkosten des Systems Batteriebus⁷³

⁷³ Quelle: Eigene Darstellung.

4.3 System Wasserstoffbus (mit Brennstoffzelle)

4.3.1 Daten und Annahmen

Für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit des Systems Wasserstoffbus werden Anschaffungskosten in Höhe von 366 TEUR angesetzt. Die Nutzungsdauer wird mit 12 Jahren festgelegt. Hinzu kommen die Kosten für die Anschaffungen der Brennstoffzelle und der Fahrzeugbatterie in Höhe von 275 TEUR bzw. von 34 TEUR. Damit belaufen sich die Anschaffungskosten für das Fahrzeug insgesamt auf 675 TEUR. Die Nutzungsdauer für die Brennstoffzelle wird mit 8 Jahren und jene der Batterie wiederum mit 6 Jahren angenommen. Die Förderung der Anschaffungskosten erfolgt mit einer Förderquote von 50,4 Prozent. Nach Ablauf der Nutzungsdauer der jeweiligen Komponenten sind Ersatzinvestitionenen erforderlich. Die Anschaffungskosten für eine nach 6 Jahren zu beschaffende Ersatzbatterie belaufen sich wie bei dem Batteriebus auf 70 Prozent der Anschaffungskosten der Erstinvestitionen, also auf 32 TEUR. Die Anschaffungskosten für die nach 8 Jahren zu ersetzende Brennstoffzelle werden entsprechend der oben beschriebenen Kostendegression (Tabelle 3 im Abschnitt 1.5) mit 54 Prozent der Erstinvestition angenommen, also mit 148 TEUR. Die Förderquote für diese beiden Ersatzinvestitionen errechnet sich zu 43,4 Prozent.

Die Investitionen in die Infrastruktur, also in die Wasserstofftankstelle werden entsprechend einer Omnibusflotte mit 60 Standardbussen mit 5 Mio. EUR zugrunde gelegt. Diese werden auf einen Fahrzeugbestand aufgeteilt und über einen Zeitraum von 20 Jahren abgeschrieben.

Die Verzinsung aller Investitionen, also der Anschaffungskosten, erfolgt auch hier mit 3,5 Prozent.

Der Jahresenergieverbrauch wird mit einem spezifischen Wasserstoffverbrauch von 7,0 kg für das Fahren und von 2,9 kg für die Klimatisierung je 100 km sowie mit einer Jahresfahrleistung von 50.000 km/a ermittelt.

Die Wartungs- und Instandhaltungskosten je Fahrzeug werden mit 0,28 EUR/km berücksichtigt. Die Wartungs- und Instandhaltungskosten der Infrastruktur, also der Wasserstofftankstelle werden auch hier mit 1,5 Prozent der Investitionskosten zugrunde gelegt und wiederum auf 60 Fahrzeuge aufgeteilt.

4.3.2 Systemkosten

Die mit diesen Parametern berechneten Systemkosten für das System Wasserstoffbus (BZ) sind in Abbildung 14 für den Zeitraum von 2022 bis 2040 dargestellt. Ersichtlich ist, dass diese Systemkosten neben den Fahrzeugkosten wiederum insbesondere von den Energiekosten bestimmt werden, welche hier allerdings aufgrund der sinkenden Erzeugungskosten für den Wasserstoff stetig abnehmen. Die Betriebskosten, also die Wartungs- und Instandhaltungskosten, sowie die Infrastrukturkosten sind demgegenüber relativ gering. Auch bei dem System Wasserstoffbus sind die Kosten für die Infrastruktur deutlich größer als beim Referenzsystem Dieselbus und insoweit erheblich, wenn auch in einem etwas geringeren Umfang als bei dem System Batteriebus. Die Fahrzeugkosten haben zu Beginn des betrachteten Zeitraums, also im Jahr 2022 einen Anteil von 37 Prozent an den Gesamtkosten, wohingegen die Anteile der Energie- und der Betriebskosten 47 Prozent bzw. 14 Prozent ausmachen. Die Infrastrukturkosten haben demgegenüber nur einen Anteil von 2,6 Prozent. Am Ende des Betrachtungszeitraums, also 2040 belaufen sich die entsprechenden Anteile bei den Fahrzeugkosten auf 26 Prozent, bei den Energiekosten auf 49 Prozent, bei den Betriebskosten auf 21 Prozent und bei den Infrastrukturkosten auf 4 Prozent.

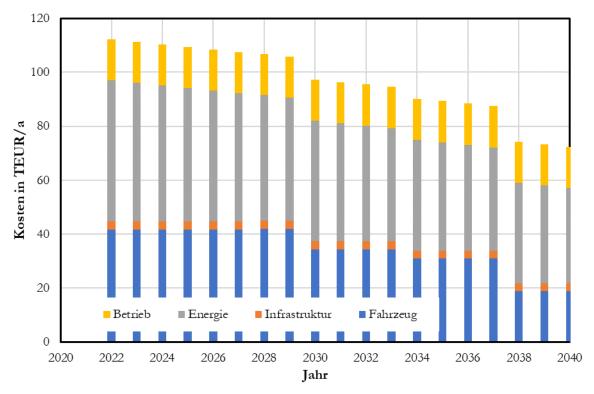


Abbildung 14: Systemkosten des Systems Wasserstoffbus (BZ)74

4.4 System DME-Dieselbus

4.4.1 Daten und Annahmen

Für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit des Systems DME-Dieselbus werden keine Anschaffungskosten zugrunde gelegt. Statt dessen werden Kosten für die Umrüstung eines vorhandenen Dieselbusses in Höhe von 10 Prozent von dessen Anschaffungskosten, also 25 TEUR angesetzt. Die (Rest-)Nutzungsdauer wird mit 6 Jahren festgelegt, der entsprechende Dieselbus wäre also nach spätestens 2 Jahren seiner achtjährigen Nutzungsdauer umzurüsten. Eine Förderung der Umrüstungskosten erfolgt in Höhe von 40 Prozent. Nach Ablauf der jeweiligen sechsjährigen Nutzungsdauer sind in diesem System Ersatzinvestitionen für die Umrüstung weiterer Dieselbusse erforderlich. Für diese zeitlich späteren Umrüstungen werden sinkende Umrüstungskosten berechnet, wobei für die zweite Umrüstung 85 Prozent und für die dritte Umrüstung 70 Prozent der ursprünglichen Umrüstungskosten berechnet werden (21 TEUR bzw. 18 TEUR).

Die Investitionen in die Infrastruktur, also in die DME-Tankstelle, werden mit 175 TEUR zugrunde gelegt (diese Investitionkosten werden somit aufgrund der spezifischen Eigenschaften des erneuerbaren Dieselkraftstoffs DME um 15 Prozent höher angenommen als jene für eine Dieseltankstelle). Auch hier werden diese Investitionskosten auf einen Fahrzeugbestand von 60 Omnibussen aufgeteilt und über einen Zeitraum von 20 Jahren abgeschrieben.

Die Verzinsung aller Investitionen erfolgt wiederum mit 3,5 Prozent.

Der Jahresenergieverbrauch wird mit einem spezifischen DME-Verbrauch von 53 l für das Fahren und von 6 l für die Klimatisierung je 100 km sowie mit einer Jahresfahrleistung von 50.000 km/a ermittelt. Die Verbrauchswerte entsprechen jenen von Dieselbussen, berücksichtigen jedoch die Heizwertdifferenz zwischen dem konventionellen und dem erneuerbaren Dieselkraftstoff.

Die Wartungs- und Instandhaltungskosten je Fahrzeug werden in der gleichen Höhe wie bei den Dieselbussen, also mit 0,28 EUR/km berücksichtigt. Die Wartungs- und Instandhaltungskosten der

⁷⁴ Quelle: Eigene Darstellung.

Infrastruktur (DME-Tankstelle) werden auch hier mit 1,5 Prozent der Investitionskosten zugrunde gelegt und wiederum auf 60 Fahrzeuge aufgeteilt.

4.4.2 Systemkosten

Die mit diesen Parametern berechneten Systemkosten für das System DME-Dieselbus sind in Abbildung 15 für den Zeitraum von 2022 bis 2040 dargestellt. Ersichtlich ist, dass diese Systemkosten neben den Fahrzeugkosten wiederum insbesondere von den Energiekosten bestimmt werden, welche hier allerdings aufgrund der deutlich sinkenden DME-Erzeugungskosten stetig abnehmen. Die Betriebskosten, also die Wartungs- und Instandhaltungskosten, sowie die Infrastrukturkosten sind demgegenüber relativ gering. Die Kosten für die Infrastruktur sind demgegenüber innerhalb der Systemkosten bei dem System DME-Dieselbus ähnlich wie bei dem Referenzsystem Dieselbus vergleichsweise unbedeutend. Die Fahrzeugkosten haben zu Beginn des betrachteten Zeitraums, also im Jahr 2022 einen Anteil von 31 Prozent an den Gesamtkosten, wohingegen die Anteile der Energie- und der Betriebskosten 58 Prozent bzw. 11 Prozent ausmachen. Die Infrastrukturkosten haben demgegenüber nur einen Anteil von 0,2 Prozent. Am Ende des Betrachtungszeitraums, also 2040 belaufen sich die entsprechenden Anteile bei den Fahrzeugkosten auf 45 Prozent, bei den Energiekosten auf 36 Prozent, bei den Betriebskosten auf 19 Prozent und bei den Infrastrukturkosten auf 0,4 Prozent.

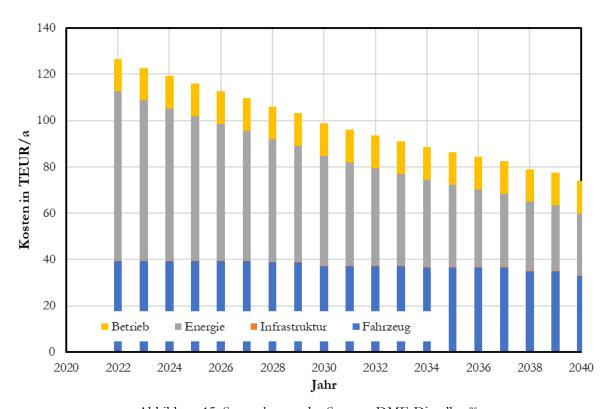


Abbildung 15: Systemkosten des Systems DME-Dieselbus⁷⁵

4.5 Vergleich der Systeme mit Omnibussen

Auf der Grundlage der in den vorstehenden Abschnitten dargestellten Wirtschaftlichkeit der einzelnen alternativ angetriebenen Omnibus-Systeme – also des jeweiligen Einzelfahrzeugs und der zugehörigen Infrastruktur – wurde ein Wirtschaftlichkeitsvergleich durchgeführt. Hierfür wurden die für den Zeitraum von 2022 bis 2040 berechneten TCO auf die jährliche Fahrleistung bezogen. Diese wurde für alle Systeme

⁷⁵ Quelle: Eigene Darstellung.

gleichermaßen mit 50.000 km/a zugrunde gelegt. In Abbildung 16 ist dieser Systemvergleich dargestellt. Die der Abbildung zugrunde liegenden Daten sind im Anhang 3 tabellarisch zusammengestellt.

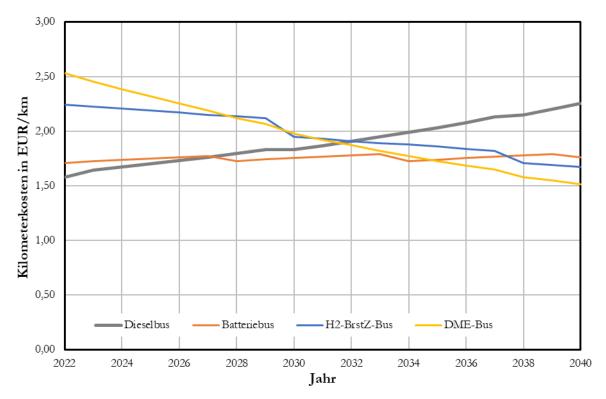


Abbildung 16: Vergleich der Systeme – Kilometerkosten – mit Förderung⁷⁶

Die Abbildung zeigt zunächst die Entwicklung der Kilometerkosten für das Referenzsystem Dieselbus (graue Kurve in Abbildung 16). Diese steigen über den gesamten betrachteten Zeitraum deutlich an. Dieser Anstieg ist ausschließlich auf die Energiekosten zurückzuführen, das heißt auf die steigenden Preise für Dieselkraftstoff, für Heizöl leicht sowie für AdBlue. Die Fahrzeug-, Infrastruktur- und Betriebskosten bleiben demgegenüber weitgehend konstant.

Die Kilometerkosten des Systems Batteriebus (orangefarbene Kurve in Abbildung 16) liegen zu Beginn des Betrachtungszeitraums annähernd gleich auf wie die Kilometerkosten des Referenzsystems Dieselbus. Voraussetzung hierfür ist die finanzielle Förderung der Erstinvestitionen in das Fahrzeug und in die Ladeinfrastruktur. In der weiteren zeitlichen Entwicklung bleiben die Kilometerkosten der Systems Batteriebus relativ konstant. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die steigenden Energiekosten für den Ladestrom durch die sinkenden Anschaffungskosten für Ersatzfahrzeuge und -komponenten kompensiert werden (Kostendegression bei den Batteriepreisen etc.).

Die Kilometerkosten des Systems Wasserstoffbus mit Brennstoffzelle (blaue Kurve in Abbildung 16) sind zu Beginn des Betrachtungszeitraums trotz der finanziellen Förderung der Erstinvestitionen in das Fahrzeug und in die Wasserstofftankstelle deutlich höher als jene des Referenzsystems Dieselbus. Allerdings sinken sie im weiteren zeitlichen Verlauf deutlich. Dies ist sowohl auf die sinkenden Erzeugungskosten für den Wasserstoff als auch auf die sinkenden Anschaffungskosten für Ersatzfahrzeuge und -komponenten zurückzuführen.

Bei dem System DME-Dieselbus wurde keine Anschaffung eines Neufahrzeugs zugrunde gelegt. Vielmehr wurde angenommen, dass ein vorhandenes Dieselfahrzeug vom konventionellen Dieselbetrieb auf den Betrieb mit dem erneuerbaren Dieselkraftstoff DME umgerüstet und eine neue DME-Tankstelle errichtet

⁷⁶ Quelle: Eigene Darstellung.

wird (die Umrüstung der vorhandenen Tankstelle für konventionellen Dieselkraftstoff wäre nur möglich, wenn alle vorhandenen Dieselfahrzeuge zugleich auf den Betrieb mit DME umgerüstet würden). Während die Umrüstungskosten deutlich unter den Anschaffungskosten eines Neufahrzeugs liegen, sind die Anschaffungskosten für die DME-Tankstelle nur geringfügig höher als jene für eine konventionelle Dieseltankstelle. Dennoch liegen die Kilometerkosten des Systems (gelbe Kurve in Abbildung 16) zu Beginn des Betrachtungszeitraums über jenen des Referenzsystems Dieselbus und im Vergleich aller betrachteten Systeme am höchsten. Dies ist auf die anfänglich noch hohen Herstellungskosten für den erneuerbaren Dieselkraftstoff DME zurückzuführen. Allerdings führt ein Rückgang dieser Herstellungskosten zu kontinuierlich sinkenden Kilometerkosten. Am Ende des betrachteten Zeitraums liegen die Kilometerkosten des Systems deutlich unter jenen des Referenzsystems und zudem auch unter jenen der Systeme Batteriebus und Wasserstoffbus mit Brennstoffzelle.

Im Ergebnis des Systemvergleichs ist festzustellen, dass alle alternativ angetriebenen Systeme unter der Voraussetzung finanzieller Förderung der Anschaffung von Fahrzeugen und Infrastruktur im zeitlichen Verlauf Kilometerkosten erreichen, welche unterhalb derjenigen des Referenzsystems Dieselbus liegen. Dieser Break-Even wird – bei den hier für die einzelnen Systeme zugrunde gelegten Kostenstrukturen – als erstes von dem System Batteriebus erreicht, und zwar noch vor 2030. Die Kostengleichheit der beiden anderen betrachteten Systeme, also des Wasserstoffbusses mit Brennstoffzelle und des DME-Dieselbusses wird annähernd gleichzeitig kurz nach 2030 erreicht.

Wie eine Berechnung aller TCO und Kilometerkosten ohne finanzielle Förderungen der Anschaffung von Fahrzeugen und Infrastrukturen bei den alternativ angetriebenen Omnibus-Systemen zeigt, ist diese Förderung Voraussetzung für eine zeitnahe Umstellung kommunaler Nutzfahrzeugflotten auf alternative Antriebe, Abbildung 17. Ohne finanzielle Förderung können danach der Batteriebus und der Wasserstoffbus mit Brennstoffzelle erst um das Jahr 2040 Kilometerkosten erreichen, welche mit jenen des Referenzsystems Dieselbus vergleichbar sind. Lediglich das System DME-Dieselbus würde die Kostengleichheit weiterhin kurz nach 2030 erreichen. Dies begründet sich dadurch, dass die Umrüstungskosten für den

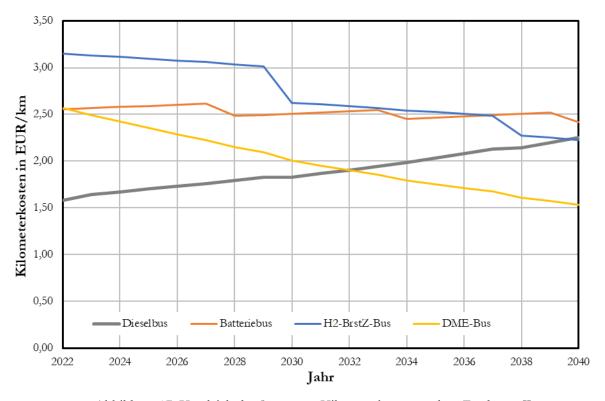


Abbildung 17: Vergleich der Systeme – Kilometerkosten – ohne Förderung⁷⁷

-

⁷⁷ Quelle: Eigene Darstellung.

DME-Dieselbus im Vergleich zu den Anschaffungskosten eines Neufahrzeugs relativ gering sind. Auch die Anschaffungskosten für die Infrastruktur, also für die DME-Tankstelle, fallen innerhalb der Systemkosten kaum ins Gewicht, da sie wie bei dem Referenzsystem Dieselbus und bei dem System Wasserstoffbus auf einen Fahrzeugbestand von 60 Omnibussen aufgeteilt werden. Dementsprechend ist der Unterschied zwischen den TCO bzw. zwischen den Kilometerkosten des Systems DME-Bus mit und ohne eine finanzielle Förderung der Umrüstung und der Anschaffung der DME-Tankstelle gering.

5. Wirtschaftlichkeit alternativer Antriebe im Systemvergleich ASF

Die für den Vergleich der Wirtschaftlichkeit von Abfallsammelfahrzeugen mit alternativen Antrieben herangezogenen Informationen und Daten wurden vorn hinsichtlich der Anschaffungs-, Infrastruktur- und Betriebskosten (Abschnitt 1), die Energiekosten (Abschnitt 2) sowie die Förderangebote des Bundes im Bereich alternativer Antriebe (Abschnitt 3) beschrieben. Auf der Grundlage der dort zusammengetragenen Informationen und Daten wird im Folgenden die Wirtschaftlichkeit der alternativen Antriebe von kommunalen Abfallsammelfahrzeugen anhand ihrer jeweiligen TCO berechnet und bewertet (Abschnitt 0.3). Dabei wurden jeweils das Einzelfahrzeug und die zugehörige Infrastruktur als System betrachtet. Als Fahrzeug wurde in den betrachteten Systemen jeweils ein typisches Restabfallsammelfahrzeug (Hecklader mit ca. 20 m³ Aufbauvolumen) zugrunde gelegt. Die TCO werden jeweils in dem Zeitraum von 2022 bis 2040 berechnet. Da dieser Zeitraum die Nutzungsdauer aller Fahrzeuge übersteigt, werden jeweils zu bestimmten Zeitpunkten Ersatzinvestitionen vorgesehen. Anhand der System-TCO konnte anschließend ein Systemvergleich für die alternativ angetriebenen Abfallsammelfahrzeugen durchgeführt werden. Die für die einzelnen Systeme berechneten Systemkosten sind in Anhang 2 in Tabellenform zusammengestellt.

5.1 Referenzsystem Diesel-Abfallsammelfahrzeug

5.1.1 Daten und Annahmen

Für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit des Referenzsystems Abfallsammelfahrzeug im konventionellen Dieselbetrieb werden Anschaffungskosten in Höhe von 230 TEUR angesetzt⁷⁸. Die Nutzungsdauer wird mit 8 Jahren festgelegt. Eine Förderung der Anschaffungskosten erfolgt nicht. Nach Ablauf der Nutzungsdauer ist eine Ersatzinvestitionen erforderlich. Diese wird mit 95 Prozent der ursprünglichen Anschaffungskosten berechnet (219 TEUR).

Die Investitionen in die Infrastruktur, also in die Dieselkraftstoff- und AdBlue-Tankstelle werden mit 150 sowie mit 40 TEUR zugrundegelegt. Diese werden auf einen Fahrzeugbestand von 60 Abfallsammelfahrzeugen aufgeteilt und über einen Zeitraum von 20 Jahren abgeschrieben.

Die Verzinsung aller Investitionen, also der Anschaffungskosten, erfolgt hier wie in allen folgenden Systemen einheitlich mit 3,5 Prozent.

Der Jahresenergieverbrauch wird mit einem spezifischen Verbrauch von 70 l Dieselkraftstoff für das Fahren und für alle sonstigen Antriebe, mit einem spezifischen Verbrauch von 0,8 l AdBlue je 100 km sowie mit einer Jahresfahrleistung von 11.000 km/a ermittelt (diese Jahresfahrleistung wird ebenfalls in allen folgenden Systemen einheitlich zugrunde gelegt).

Die Wartungs- und Instandhaltungskosten je Fahrzeug werden mit 11 Prozent der Anschaffungskosten und über den gesamten Betrachtungszeitraum gleichbleibend berücksichtigt /7/, S. 100/103/106. Die Wartungs- und Instandhaltungskosten der Infrastruktur (Tankstellen) werden mit 1,5 Prozent der Investitionskosten zugrunde gelegt und wiederum auf 60 Fahrzeuge aufgeteilt.

5.1.2 Systemkosten

Die mit diesen Parametern berechneten Systemkosten für das Referenzsystem Abfallsammelfahrzeug im konventionellen Dieselbetrieb sind in Abbildung 18 für den Zeitraum von 2022 bis 2040 dargestellt. Ersichtlich ist, dass diese Systemkosten neben den Fahrzeugkosten insbesondere von den deutlich ansteigenden Energiekosten bestimmt werden. Auch die Betriebskosten, also die Wartungs- und Instandhaltungskosten tragen erheblich zu den Systemkosten bei. Die Infrastrukturkosten sind demgegenüber sehr gering. Die Fahrzeugkosten haben zu Beginn des betrachteten Zeitraums, also im Jahr 2022 einen Anteil von 47 Prozent an den Gesamtkosten, wohingegen die Anteile der Energie- und der Betriebskosten 16 Pro-

Die Anschaffungskosten für ein konventionelles ASF unterscheiden sich allgemein je nach Modell und Ausstattung. Die Gesamtkosten für einen konventionellen Hecklader belaufen sich auf einen Betrag von 158 bis 175 TEUR /6/, S. 15.

zent bzw. 36 Prozent ausmachen. Am Ende des Betrachtungszeitraums, also 2040 belaufen sich die entsprechenden Anteile bei den Fahrzeugkosten auf 36 Prozent, bei den Energiekosten auf 33 Prozent und bei den Betriebskosten auf 31 Prozent.

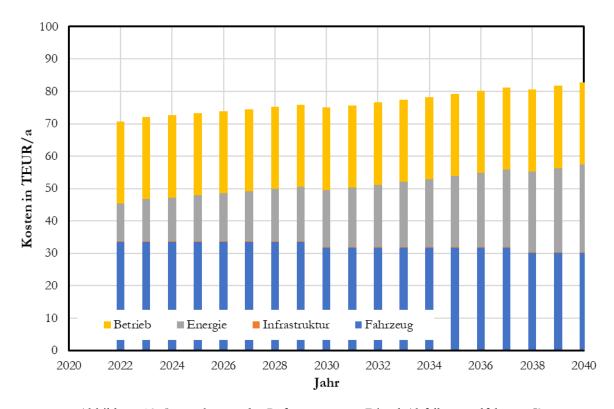


Abbildung 18: Systemkosten des Referenzsystems Diesel-Abfallsammelfahrzeug⁷⁹

5.2 Referenzsystem Batterie-Abfallsammelfahrzeug

5.2.1 Daten und Annahmen

Für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit des Systems Batterie-Abfallsammelfahrzeug werden Anschaffungskosten in Höhe von 322 TEUR angesetzt. Die Nutzungsdauer wird mit 12 Jahren festgelegt. Hinzu kommen die Kosten für die Anschaffung der zugehörigen Batterie von 263 TEUR, wobei eine Batterie mit einer Kapazität von 315 kWh und ein spezifischer Anschaffungspreis von 750 EUR/kWh zugrunde gelegt sind. Eine Förderung der Anschaffungskosten dieser Erstinvestitionen erfolgt mit 47,0 Prozent⁸⁰. Da die Batterie nur eine Lebensdauer von 6 Jahren hat, ist allerdings nach Ablauf der halben Nutzungsdauer des Batterie-Abfallsammelfahrzeugs eine Ersatzinvestition erforderlich. Diese wird aufgrund der zu erwartenden Kostendegression bei den Batteriepreisen mit 201 TEUR, also mit 70 Prozent der Erstinvestition zugrunde gelegt. Für diese Ersatzinvestition berechnet sich eine Förderquote von 44,8 Prozent.

Die Investitionen in die Ladeinfrastruktur werden mit 97,5 TEUR für eine Ladeeinrichtung mit einer Ladeleistung von 150 kW mit CCS-Stecker sowie mit 53 TEUR für die Stromversorgungsinfrastruktur

⁷⁹ Quelle: Eigene Darstellung.

Diese Förderquote wurde wie folgt berechnet: Die Anschaffungskosten des Referenzsystems Abfallsammelfahrzeug im konventionellen Dieselbetrieb belaufen sich auf 230 TEUR. Die Anschaffungskosten des Batterie-Abfallsammelfahrzeugs ergeben sich als Summe aus den Fahrzeug- und den Batteriekosten in Höhe von 558 TEUR. Daraus errechnen sich Mehrkosten des alternativen Antriebs in Höhe von 328 TEUR. Werden diese mit einer Förderquote von 80 Prozent gefördert, beläuft sich die Fördersumme auf 263 TEUR, also auf 47,0 Prozent der Anschaffungskosten des Batterie-Abfallsammelfahrzeugs.

(350 EUR/kW) bzw. mit 26 TEUR (Baukostenzuschuss und Netzanschlusskostenbeitrag) zugrunde gelegt⁸¹. Diese werden über einen Zeitraum von 12 Jahren abgeschrieben. Dementsprechend ist im 13. Jahr des Betrachtungszeitraums eine Ersatzinvestitionen für die Ladeinfrastruktur erforderlich, wobei allerdings kein Baukostenzuschuss und Netzanschlusskostenbeitrag mehr anfällt.

Die Verzinsung aller Investitionen, also der Anschaffungskosten, erfolgt wiederum mit 3,5 Prozent.

Der Jahresenergieverbrauch wird mit einem spezifischen Stromverbrauch von 248 kWh je 100 km für das Fahren und für alle sonstigen Antriebe sowie wiederum mit einer Jahresfahrleistung von 11.000 km/a ermittelt.

Die Wartungs- und Instandhaltungskosten je Fahrzeug werden mit 85 Prozent der vergleichbaren Kosten eines Abfallsammelfahrzeugs im konventionellem Dieselbetrieb berücksichtigt (diese Relation entspricht den Wartungs- und Instandhaltungskosten von Diesel- und Batteriebussen und ist insoweit als Näherung zu betrachten). Die Wartungs- und Instandhaltungskosten der Ladeinfrastruktur werden mit 1,5 Prozent der Investitionskosten zugrunde gelegt.

5.2.2 Systemkosten

Die mit diesen Parametern berechneten Systemkosten für das System Batterie-Abfallsammelfahrzeug sind in Abbildung 19 für den Zeitraum von 2022 bis 2040 dargestellt. Ersichtlich ist, dass diese Systemkosten neben den Fahrzeugkosten insbesondere von den Betriebskosten, also den Wartungs- und Instandhaltungskosten bestimmt werden. Die Energiekosten, welche hier moderater ansteigen als im Referenzsystem Abfallsammelfahrzeug im konventionellem Dieselbetrieb, tragen aufgrund der relativ geringen Jahresfahr-

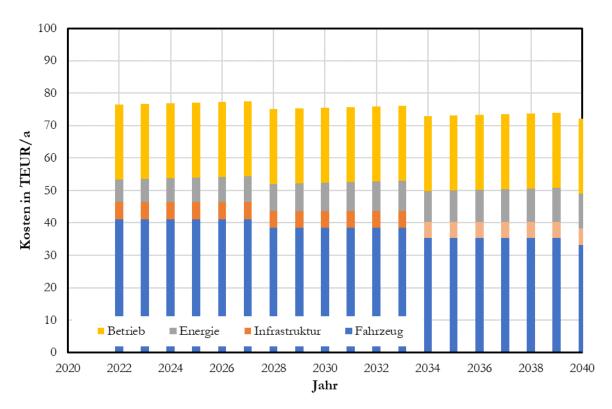


Abbildung 19: Systemkosten des Referenzsystems Batterie-Abfallsammelfahrzeug⁸²

Der Baukostenzuschuss wird mit 115 EUR/kW und der Netzanschlusskostenbeitrag mit 56 EUR/kW berücksichtigt.

⁸² Quelle: Eigene Darstellung.

leistung nur in begrenztem Umfang zu den Systemkosten bei. Dies gilt auch für die Infrastrukturkosten, die im Vergleich zu den anderen Kosten relativ gering sind. Die Fahrzeugkosten haben zu Beginn des betrachteten Zeitraums, also im Jahr 2022 einen Anteil von 54 Prozent an den Gesamtkosten, wohingegen die Anteile der Energie- und der Betriebskosten 9 Prozent bzw. 30 Prozent ausmachen. Die Infrastrukturkosten haben demgegenüber nur einen Anteil von 7 Prozent. Am Ende des Betrachtungszeitraums, also 2040 belaufen sich die entsprechenden Anteile bei den Fahrzeugkosten auf 46 Prozent, bei den Energiekosten auf 15 Prozent, bei den Betriebskosten auf 32 Prozent und bei den Infrastrukturkosten wiederum auf 7 Prozent.

5.3 Referenzsystem Wasserstoff-Abfallsammelfahrzeug

5.3.1 Daten und Annahmen

Für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit des Systems Wasserstoff-Abfallsammelfahrzeug werden Anschaffungskosten in Höhe von 748 TEUR angesetzt. Die Nutzungsdauer wird mit 12 Jahren festgelegt. Hinzu kommen die Kosten für die Anschaffungen der Brennstoffzelle und der Fahrzeugbatterie in Höhe von 70 TEUR bzw. von 64 TEUR. Damit belaufen sich die Anschaffungskosten für das Fahrzeug insgesamt auf 881 TEUR. Die Nutzungsdauer für die Brennstoffzelle wird mit 8 Jahren und jene der Batterie wiederum mit 6 Jahren angenommen. Die Förderung der Anschaffungskosten erfolgt mit einer Förderquote von 59,1 Prozent. Nach Ablauf der Nutzungsdauer der jeweiligen Komponenten sind Ersatzinvestitionenen erforderlich. Die Anschaffungskosten für eine nach 6 Jahren zu beschaffende Ersatzbatterie belaufen sich wie bei dem Batteriebus auf 70 Prozent der Anschaffungskosten der Erstinvestitionen, hier also auf 54 TEUR. Die Anschaffungskosten für die nach 8 Jahren zu ersetzende Brennstoffzelle werden entsprechend der oben beschriebenen Kostendegression (Tabelle 3 im Abschnitt 1.5) mit 54 Prozent der Erstinvestition angenommen, also mit 38 TEUR. Die Förderquote für diese beiden Ersatzinvestitionen errechnet sich bei einer 80-prozentigen Förderung der Mehrkosten gegenüber dem Abfallsammelfahrzeug mit konventionellem Dieselbetrieb zu 58,1 Prozent.

Die Investitionen in die Infrastruktur, also in die Wasserstofftankstelle werden entsprechend einer Fahrzeugflotte mit 60 Abfallsammelfahrzeugen mit 4 Mio. EUR zugrunde gelegt⁸³. Diese werden auf einen Fahrzeugbestand aufgeteilt und über einen Zeitraum von 20 Jahren abgeschrieben.

Die Verzinsung aller Investitionen, also der Anschaffungskosten, erfolgt auch hier mit 3,5 Prozent.

Der Jahresenergieverbrauch wird mit einem spezifischen Wasserstoffverbrauch von 14,0 kg für das Fahren und für die sonstigen Antriebe sowie mit einer Jahresfahrleistung von 11.000 km/a ermittelt.

Die Wartungs- und Instandhaltungskosten je Fahrzeug werden in gleicher Höhe wie bei dem Abfallsammelfahrzeug mit konventionellem Dieselbetrieb berücksichtigt. Sie entsprechen damit einem Anteil von 3 Prozent der Anschaffungskosten. Die Wartungs- und Instandhaltungskosten der Infrastruktur, also der Wasserstofftankstelle werden auch hier mit 1,5 Prozent der Investitionskosten zugrunde gelegt und wiederum auf 60 Abfallsammelfahrzeuge aufgeteilt.

5.3.2 Systemkosten

-

Die mit diesen Parametern berechneten Systemkosten für das System Wasserstoffbus (BZ) sind in Abbildung 20 für den Zeitraum von 2022 bis 2040 dargestellt. Ersichtlich ist, dass diese Systemkosten neben den Fahrzeugkosten wiederum insbesondere von den Energiekosten sowie von den Betriebskosten, be-

Diese im Vergleich zu der Wasserstofftankstelle für 60 Wasserstoffbusse geringeren Investitionen berücksichtigen, dass der jährliche Wasserstoffdurchsatz durch die Tankstelle deutlich kleiner ist als bei der Tankstelle für die Wasserstoffbusse: Zwar ist hier die gleiche Anzahl von Nutzfahrzeugen zu betanken und Abfallsammelfahrzeuge weisen einen höheren spezifischen Verbrauch als Wasserstoffbusse auf, jedoch sind die Jahresfahrleistung und damit der absolute Verbrauch an Wasserstoff deutlich kleiner als bei der Tankstelle für Wasserstoffbusse.

stimmt werden. Während die Energiekosten aufgrund der sinkenden Erzeugungskosten für den Wasserstoff stetig abnehmen, bleiben die Wartungs- und Instandhaltungskosten annahmegemäß über den gesamten Betrachtungszeitraum konstant. Demgegenüber sind die Infrastrukturkosten relativ gering. Die Fahrzeugkosten haben zu Beginn des betrachteten Zeitraums, also im Jahr 2022 einen Anteil von 47 Prozent an den Gesamtkosten, wohingegen die Anteile der Energie- und der Betriebskosten 19 Prozent bzw. 31 Prozent ausmachen. Die Infrastrukturkosten haben demgegenüber nur einen Anteil von 2,7 Prozent. Am Ende des Betrachtungszeitraums, also 2040 belaufen sich die entsprechenden Anteile bei den Fahrzeugkosten auf 44 Prozent, bei den Energiekosten auf 16 Prozent, bei den Betriebskosten auf 37 Prozent und bei den Infrastrukturkosten auf 3 Prozent.

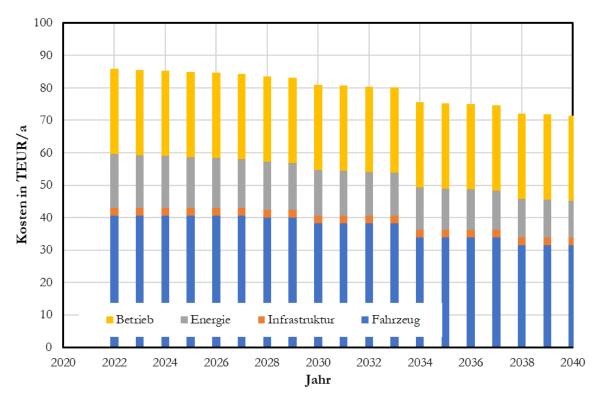


Abbildung 20: Systemkosten des Referenzsystems Wasserstoff-Abfallsammelfahrzeug⁸⁴

5.4 Referenzsystem DME-Abfallsammelfahrzeug

5.4.1 Daten und Annahmen

Für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit des Systems DME-Abfallsammelfahrzeug werden keine Anschaffungskosten zugrunde gelegt. Statt dessen werden Kosten für die Umrüstung eines vorhandenen Diesel-Abfallsammelfahrzeugs in Höhe von 10 Prozent von dessen Anschaffungskosten, also 23 TEUR angesetzt. Die (Rest-)Nutzungsdauer wird mit 6 Jahren festgelegt, das entsprechende Diesel-Abfallsammelfahrzeug wäre also spätestens nach 2 Jahren umzurüsten, wenn sich seine Gesamtnutzungsdauer auf 8 Jahre beläuft. Hinsichtlich einer Förderung der Umrüstungskosten wird angenommen, dass diese in Höhe von 40 Prozent der Umrüstungskosten erfolgt. Nach Ablauf der jeweiligen sechsjährigen Nutzungsdauer sind in diesem System Ersatzinvestitionen für die Umrüstung weiterer Diesel-Abfallsammelfahrzeuge erforderlich. Für diese zeitlich später durchzuführenden Umrüstungen werden unter der Annahme ihrer zunehmenden Verbreitung und der daraus resultierenden Kostendegression sinkende Umrüstungskosten berechnet. Dabei werden für die zweite Umrüstung 85 Prozent und für die dritte Umrüstung 70 Prozent der ursprünglichen Umrüstungskosten berechnet (21 TEUR bzw. 18 TEUR).

⁸⁴ Quelle: Eigene Darstellung.

Die Investitionen in die Infrastruktur, also in die DME-Tankstelle, werden mit 175 TEUR zugrunde gelegt (diese Investitionkosten werden somit aufgrund der spezifischen Eigenschaften des erneuerbaren Dieselkraftstoffs DME um 15 Prozent höher angenommen als jene für eine Dieseltankstelle). Auch hier werden diese Investitionskosten auf einen Fahrzeugbestand von 60 Abfallsammelfahrzeugen aufgeteilt und über einen Zeitraum von 20 Jahren abgeschrieben.

Die Verzinsung aller Investitionen erfolgt wiederum mit 3,5 Prozent.

Der Jahresenergieverbrauch wird mit einem spezifischen DME-Verbrauch von 106 l je 100 km für das Fahren und für die sonstigen Antriebe sowie mit einer Jahresfahrleistung von 11.000 km/a ermittelt. Die Verbrauchswerte entsprechen jenen von Diesel-Abfallsammelfahrzeugen, berücksichtigen jedoch die Heizwertdifferenz zwischen dem konventionellen und dem erneuerbaren Dieselkraftstoff.

Die Wartungs- und Instandhaltungskosten je Fahrzeug werden in der gleichen Höhe wie bei den Diesel-Abfallsammelfahrzeugen berücksichtigt, also mit 11 Prozent der Anschaffungskosten des ursprünglichen Dieselfahrzeugs (vor der Umrüstung). Die Wartungs- und Instandhaltungskosten der Infrastruktur (DME-Tankstelle) werden auch hier mit 1,5 Prozent der Investitionskosten zugrunde gelegt und wiederum auf 60 Abfallsammelfahrzeuge aufgeteilt.

5.4.2 Systemkosten

Die mit diesen Parametern berechneten Systemkosten für das System DME-Abfallsammelfahrzeug sind in Abbildung 21 Abbildung 15 für den Zeitraum von 2022 bis 2040 dargestellt. Ersichtlich ist, dass die Systemkosten zunächst von den Fahrzeugkosten bestimmt werden. Darüber hinaus sind insbesondere die über die Zeit unverändert bleibenden Betriebskosten für Wartung und Instandhaltung sowie die Energiekosten bedeutsam. Die Energiekosten nehmen allerdings aufgrund der deutlich sinkenden DME-Erzeugungskosten stetig ab. Die Kosten für die Infrastruktur sind demgegenüber innerhalb der Systemkosten

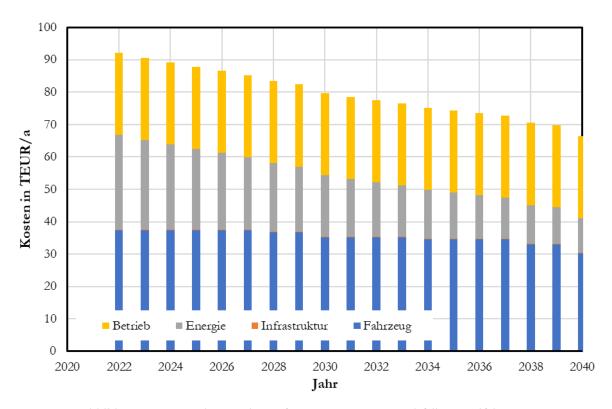


Abbildung 21: Systemkosten des Referenzsystems DME-Abfallsammelfahrzeug⁸⁵

⁸⁵ Quelle: Eigene Darstellung.

bei dem System DME-Abfallsammelfahrzeug ähnlich wie bei dem Referenzsystem Diesel-Abfallsammelfahrzeug vergleichsweise unbedeutend. Die Fahrzeugkosten haben zu Beginn des betrachteten Zeitraums, also im Jahr 2022 einen Anteil von 40 Prozent an den Gesamtkosten, wohingegen die Anteile der Energieund der Betriebskosten 32 Prozent bzw. 28 Prozent ausmachen. Die Infrastrukturkosten haben demgegenüber nur einen Anteil von 0,2 Prozent. Am Ende des Betrachtungszeitraums, also 2040 belaufen sich
die entsprechenden Anteile bei den Fahrzeugkosten auf 46 Prozent, bei den Energiekosten auf 16 Prozent, bei den Betriebskosten auf 38 Prozent und bei den Infrastrukturkosten auf 0,3 Prozent.

5.5 Vergleich der Systeme mit Abfallsammelfahrzeugen

Auf der Grundlage der in den vorstehenden Abschnitten dargestellten Wirtschaftlichkeit der einzelnen alternativ angetriebenen Abfallsammelfahrzeug-Systeme – also des jeweiligen Einzelfahrzeugs und der zugehörigen Infrastruktur – wurde ein Vergleich durchgeführt. Hierfür wurden die für den Zeitraum von 2022 bis 2040 berechneten TCO auf die jährliche Fahrleistung von 11.000 km bezogen. Diese wurde für alle Systeme gleichermaßen zugrunde gelegt. In Abbildung 22 ist dieser Systemvergleich dargestellt. Die der Abbildung zugrunde liegenden Daten sind im Anhang 3 tabellarisch zusammengestellt.

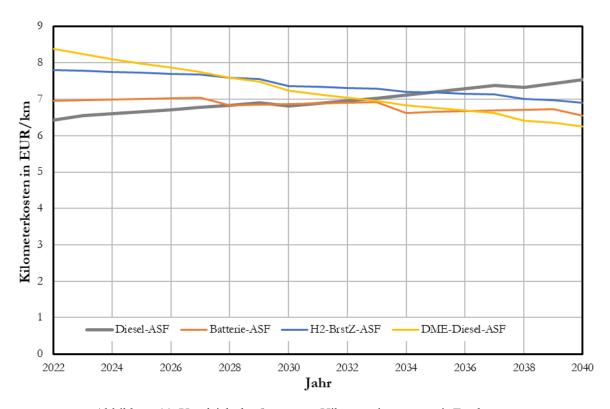


Abbildung 22: Vergleich der Systeme – Kilometerkosten – mit Förderung⁸⁶

Die Abbildung zeigt zunächst die Entwicklung der Kilometerkosten für das Referenzsystem Abfallsammelfahrzeug mit konventionellem Dieselbetrieb (graue Kurve in Abbildung 22). Diese steigen über den gesamten betrachteten Zeitraum deutlich an, wofür ausschließlich die steigenden Energiekosten verantwortlich sind. Diese resultieren zum einen aus den steigenden Preisen für Dieselkraftstoff sowie für AdBlue. Zum anderen resultieren sie aus einem steigenden Preisanteil für den nationalen Handel mit CO₂-Emissionszertifikaten. Die anderen Beiträge zu den Systemkosten bleiben demgegenüber weitgehend konstant (Infrastruktur- und Betriebskosten) bzw. sind leicht rückläufig (Fahrzeugkosten).

⁸⁶ Quelle: Eigene Darstellung.

Die Kilometerkosten des Systems Batterie-Abfallsammelfahrzeug (orangefarbene Kurve in Abbildung 22) liegen zu Beginn des Betrachtungszeitraums leicht über den Kilometerkosten des Referenzsystems Abfallsammelfahrzeug mit konventionellem Dieselbetrieb. Voraussetzung hierfür ist die finanzielle Förderung der Erst- und auch der Ersatzinvestitionen in das Fahrzeug und in die Ladeinfrastruktur. In der weiteren zeitlichen Entwicklung nehmen die Kilometerkosten der Systems Batterie-Abfallsammelfahrzeug nur wenig ab. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die steigenden Energiekosten für den Ladestrom durch die sinkenden Anschaffungskosten für Ersatzfahrzeuge und -komponenten kompensiert werden (Kostendegression bei den Batteriepreisen etc.).

Die Kilometerkosten des Systems Wasserstoff-Abfallsammelfahrzeug mit Brennstoffzelle (blaue Kurve in Abbildung 22) sind zu Beginn des Betrachtungszeitraums trotz der finanziellen Förderung der Erstinvestitionen in das Fahrzeug und in die Wasserstofftankstelle deutlich höher als jene des Referenzsystems Abfallsammelfahrzeug mit konventionellem Dieselbetrieb. Allerdings sinken sie im weiteren zeitlichen Verlauf deutlich. Dies ist sowohl auf die sinkenden Erzeugungskosten für den Wasserstoff als auch auf die sinkenden Anschaffungskosten für Ersatzfahrzeuge und -komponenten zurückzuführen (Kostendegression bei den Brennstoffzellen und Batterien).

Bei dem System DME-Abfallsammelfahrzeug wurde keine Anschaffung eines Neufahrzeugs zugrunde gelegt. Vielmehr wurde angenommen, dass ein vorhandenes Dieselfahrzeug vom konventionellen Dieselbetrieb auf den Betrieb mit DME umgerüstet und dass eine neue DME-Tankstelle errichtet wird (die Umrüstung der vorhandenen Tankstelle für konventionellen Dieselkraftstoff wäre nur möglich, wenn alle vorhandenen Dieselfahrzeuge zugleich auf den Betrieb mit DME umgerüstet würden). Während die Umrüstungskosten deutlich unter den Anschaffungskosten eines Neufahrzeugs liegen, sind die Anschaffungskosten für die DME-Tankstelle nur geringfügig höher als jene für eine konventionelle Dieseltankstelle. Dennoch liegen die Kilometerkosten des Systems (gelbe Kurve in Abbildung 22) zu Beginn des Betrachtungszeitraums deutlich über jenen des Referenzsystems Abfallsammelfahrzeug mit konventionellem Dieselbetrieb und darüber hinaus im Vergleich aller betrachteten Systeme am höchsten. Dies ist auf die anfänglich noch hohen Herstellungskosten für den erneuerbaren Dieselkraftstoff DME zurückzuführen. Allerdings führt ein Rückgang dieser Herstellungskosten zu kontinuierlich sinkenden Kilometerkosten. In der Folge liegen die Kilometerkosten des Systems DME-Abfallsammelfahrzeug am Ende des Betrachtungszeitraums deutlich unter jenen des Referenzsystems und außerdem auch unter jenen der Systeme mit dem Batterie- und dem Wasserstoff-Abfallsammelfahrzeug, also insgesamt am niedrigsten.

Im Ergebnis des Systemvergleichs ist festzustellen, dass alle alternativ angetriebenen Systeme unter der Voraussetzung finanzieller Förderung der Beschaffung von Fahrzeugen und Infrastruktur im zeitlichen Verlauf die Kilometerkosten des Referenzsystems Abfallsammelfahrzeug mit konventionellem Dieselbetrieb erreichen und unterschreiten. Dieser Break-Even wird – bei den hier für die einzelnen Systeme zugrunde gelegten Kostenstrukturen – als erstes von dem System Batterie-Abfallsammelfahrzeug erreicht, und zwar noch vor 2030. Die Kostengleichheit des Systems mit dem DME-Abfallsammelfahrzeug wird nur wenig später, also kurz nach 2030 erreicht. Die Gleichheit der Kilometerkosten des Systems mit dem Wasserstoff-Abfallsammelfahrzeug mit Brennstoffzelle ist demgegenüber voraussichtlich erst um das Jahr 2035 zu erwarten. Am Ende des Betrachtungszeitraums weisen alle Systeme mit alternativ angetriebenen Abfallsammelfahrzeugen niedrige Kilometerkosten auf als das Referenzsystem Abfallsammelfahrzeug mit konventionellem Dieselbetrieb.

Wie bei dem Systemvergleich der alternativ angetriebenen Omnibusse wurde auch für die Systeme mit Abfallsammelfahrzeugen eine Berechnung aller TCO und Kilometerkosten ohne finanzielle Förderungen der Anschaffung von Fahrzeugen und Infrastrukturen durchgeführt, Abbildung 23. Wie die Abbildung zeigt, ist auch bei den alternativ angetriebenen Abfallsammelfahrzeug-Systemen diese Förderung Voraussetzung für eine zeitnahe Umstellung kommunaler Nutzfahrzeugflotten auf alternative Antriebe. Ohne finanzielle Förderung können das System Batterie-Abfallsammelfahrzeug und das System Wasserstoff-Abfallsammelfahrzeug mit Brennstoffzelle in dem Betrachtungszeitraum keine Kilometerkosten erreichen, welche mit jenen des Referenzsystems Abfallsammelfahrzeug mit konventionellem Dieselbetrieb vergleichbar sind. Lediglich das System DME-Abfallsammelfahrzeug würde die Kostengleichheit

weiterhin kurz nach 2030 erreichen. Dies begründet sich dadurch, dass die Umrüstungskosten für den DME-Abfallsammelfahrzeug im Vergleich zu den Anschaffungskosten eines Neufahrzeugs relativ gering sind. Auch die Anschaffungskosten für die Infrastruktur, also für die DME-Tankstelle, fallen innerhalb der Systemkosten kaum ins Gewicht, da sie wie bei dem Referenzsystem Abfallsammelfahrzeug mit konventionellem Dieselbetrieb und bei dem System Wasserstoff-Abfallsammelfahrzeug mit Brennstoffzelle auf einen Fahrzeugbestand von 60 Abfallsammelfahrzeugen aufgeteilt werden. Dementsprechend ist auch der Unterschied zwischen den TCO bzw. zwischen den Kilometerkosten des Systems DME-Abfallsammelfahrzeug mit und ohne eine finanzielle Förderung der Umrüstung und der Anschaffung der DME-Tankstelle relativ klein.

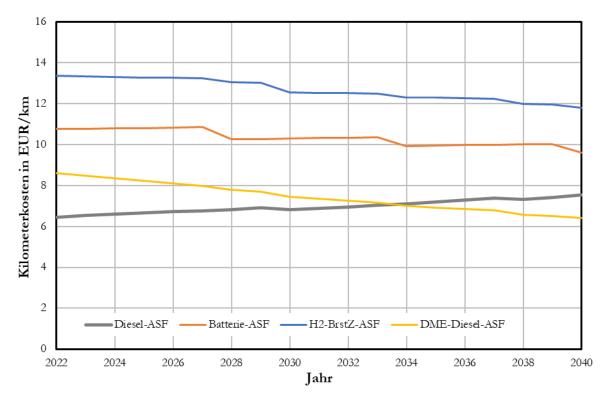


Abbildung 23: Vergleich der Systeme – Kilometerkosten – ohne Förderung⁸⁷

⁸⁷ Quelle: Eigene Darstellung.

6. Zusammenfassung

Der vorliegende Projektbericht beschreibt die Ergebnisse einer Untersuchung zum Vergleich der Wirtschaftlichkeit von kommunalen Nutzfahrzeugen im ÖPNV und in der Abfallentsorgung, wenn diese mit unterschiedlichen Antrieben ausgestattet sind. Dieser Vergleich erfolgte anhand der Gesamtkosten (Total Cost of Ownership - TCO) und der spezifischen, also auf die jeweilige Jahresfahrleistung der Nutzfahrzeuge bezogenen TCO. Dazu wurden sowohl im ÖPNV als auch in der Abfallentsorgung folgende Fahrzeugsysteme miteinander verglichen, die jeweils aus einem Fahrzeug und der zugehörigen Infrastruktur bestehen:

- Referenzsystem Dieselfahrzeug im Betrieb mit konventionellem (fossilem) Dieselkraftstoff,
- System Batteriefahrzeug,
- System Wasserstofffahrzeug mit Brennstoffzelle,
- System DME-Fahrzeug (für den Betrieb mit erneuerbarem Dieselkraftstoff umgerüstetes Dieselfahrzeug).

Diese Fahrzeugsysteme wurden anhand eines 12-m-Regiobusses im ÖPNV bzw. eines typischen Abfallsammelfahrzeugs (Hecklader mit ca. 20 m³ Aufbauvolumen) in der Abfallentsorgung jeweils über den Zeitraum von 2022 bis 2040 betrachtet, wobei die jeweiligen Erstinvestitionen in das Jahr 2022 fallen. Da die Fahrzeuge, ihre wesentlichen Komponenten (Batterien, Brennstoffzellen) sowie die Infrastrukturen teilweise Nutzungsdauern aufweisen, welche kürzer als der Betrachtungszeitraum sind, wurden innerhalb dieses Betrachtungszeitraums entsprechende Ersatzinvestitionen vorgesehen.

Die jeweiligen Gesamtkosten dieser Fahrzeugsysteme bestehen zunächst aus den Fahrzeug- und aus den Infrastrukturkosten. Deren Anschaffungskosten werden jeweils als Kredite behandelt, also anhand eines konstanten Zinssatzes in jährlich gleiche Tilgungen (Annuitäten) umgerechnet. Dabei setzen sich die Anschaffungskosten für die Fahrzeuge jeweils aus den Fahrzeugkosten und den wesentlichen Komponentenkosten zusammen (Batterien, Brennstoffzellen). Hinzu kommen die Energiekosten, also die Kosten für den konventionellen bzw. erneuerbaren Dieselkraftstoff (DME), für Strom bei den Batteriefahrzeugen und für Wasserstoff bei den Wasserstofffahrzeugen mit Brennstoffzelle. Zur Berechnung der Energiekosten werden für jeden dieser Energieträger über den Betrachtungszeitraum Preisentwicklungen zugrunde gelegt. Des Weiteren werden Betriebskosten in Form von Wartungs- und Instandhaltungskosten für die Fahrzeuge und Infrastrukturen berücksichtigt, die sich für die einzelnen Fahrzeugsysteme insbesondere dadurch unterscheiden, dass die Fahrzeuge mit unterschiedlichen wartungsintensiven Komponenten ausgestattet sind (Dieselmotoren, Batterien, Brennstoffzellen).

Nach einer kurzen Beschreibung der Ziele und der Abgrenzung der Untersuchung, der verwendeten Begriffe, Methoden und Daten (Abschnitt 0) wurden zunächst die Kosten kommunaler Nutzfahrzeuge angegeben (Abschnitt 1). Dabei wurden in den einzelnen Abschnitten die oben genannten Fahrzeugsysteme und die zugehörigen Infrastrukturen betrachtet, wobei zunächst auf Omnibusse im ÖPNV und anschließend auf Abfallsammelfahrzeuge eingegangen wurde. Dabei wurden jeweils Daten und Informationen zu den Anschaffungskosten der Fahrzeuge und ihrer wesentlichen Komponenten und zu den perspektivisch zu erwartenden Kosten Entwicklungen angegeben. Außerdem wurden die Wartungs- und Instandhaltungskosten quantifiziert und begründet, soweit dafür entsprechende Informationen und Daten vorlagen.

Im Anschluss daran wurden die Energiekosten betrachtet, welche bei dem Betrieb von kommunalen Nutzfahrzeugen im ÖPNV und in der Abfallentsorgung entstehen (Abschnitt 2). Bei den fossilen Energieträgern Dieselkraftstoff, leichtes Heizöl setzen sich schon die aktuellen und mehr noch die zukünftigen Preise aus dem jeweiligen Energiepreis und dem CO₂-Zertifikatspreis zusammen. Beide Preisbestandteile werden in der Zukunft ebenso wie der AdBlue-Preis weiter steigen. Dies gilt im Wesentlichen auch für die zukünftige Entwicklung des Strompreises. Sinkende Preise werden dagegen bei den erneuerbaren Energieträgern Wasserstoff und DME erwartet. Dies ist auf die perspektivisch deutlich sinkenden Herstellungskosten zurückzuführen. Während die Anschaffungskosten für die Fahrzeuge, Komponenten und Infra-

strukturen auf überregional verfügbaren Daten basieren und insoweit Deutschland insgesamt repräsentieren, entsprechen die Energiekosten stärker die Gegebenheiten in der Regiopolregion Rostock, da hier Unternehmens- bzw. regionalspezifische Kraftstoff- und Strompreise ermittelt werden konnten.

Um die Einführung kommunaler Nutzfahrzeuge mit alternativen Antrieben zu unterstützen und zu beschleunigen, hat die Bundesregierung in den vergangenen Jahren verschiedene Förderprogramme eingeführt. Die aktuellen Förderprogramme wurden ausgewertet, um die wesentlichen für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung relevanten Parameter zu gewinnen (Abschnitt 3).

Auf der Grundlage der zusammengetragenen Daten und Informationen zu den wesentlichen Kostenbestandteilen der oben genannten Fahrzeugsysteme wurde zunächst die Wirtschaftlichkeit von alternativ angetriebenen Omnibussen im ÖPNV untersucht (Abschnitt 4). Dabei zeigte sich, dass die Gesamtkosten des Referenzsystems Dieselbus im konventionellen Dieselbetrieb von ca. 80 TEUR im Jahr 2022 auf ca. 110 TEUR im Jahr 2040 ansteigen. Die Systemkosten des Batteriebusses steigen demgegenüber nur von 86 auf 88 TEUR. Demgegenüber sinken die Systemkosten des Wasserstoffbusses mit Brennstoffzelle in dem gleichen Zeitraum von ca. 110 auf 84 TEUR und die des DME-Busses von 127 auf 75 TEUR. Die Kostenstruktur dieser Fahrzeugsysteme wird neben den Fahrzeugkosten insbesondere von den Energiekosten bestimmt. Die Betriebskosten, also die Wartungs- und Instandhaltungskosten, tragen demgegenüber in geringerem Umfang zu den jeweiligen Gesamtkosten bei. Die Anschaffungskosten für die Infrastrukturen sind in allen betrachteten Fahrzeugsystemen von geringerer Bedeutung, wenngleich sie im System mit Batteriebus und auch im System mit Wasserstoffbus mit Brennstoffzelle einen Anteil von knapp 10 Prozent an den Gesamtkosten haben können. Für den direkten Vergleich der betrachteten Fahrzeugsysteme wurden deren Gesamtkosten auf eine einheitliche Jahresfahrleistung bezogen, welche hier entsprechend den Gegebenheiten bei der rebus Regionalbus Rostock GmbH in Höhe von 50.000 km zugrunde gelegt wurde. Im Ergebnis des Vergleichs der kilometerbezogenen Gesamtkosten ist festzustellen, dass alle alternativ angetriebenen Systeme unter der Voraussetzung finanzieller Förderung der Anschaffung von Fahrzeugen und Infrastruktur im zeitlichen Verlauf Kilometerkosten erreichen, welche unterhalb derjenigen des Referenzsystems Dieselbus liegen. Dieser Break-Even wird - bei den hier für die einzelnen Systeme zugrunde gelegten Kostenstrukturen – als erstes von dem System Batteriebus erreicht, und zwar noch vor 2030. Die Kostengleichheit der beiden anderen betrachteten Systeme, also des Wasserstoffbusses mit Brennstoffzelle und des DME-Dieselbusses wird annähernd gleichzeitig kurz nach 2030 erreicht. Demgegenüber zeigt eine Berechnung aller TCO und Kilometerkosten ohne finanzielle Förderung, dass der Batteriebus und der Wasserstoffbus mit Brennstoffzelle erst um das Jahr 2040 Kilometerkosten erreichen, welche mit jenen des Referenzsystems Dieselbus vergleichbar sind. Lediglich das System DME-Dieselbus würde die Kostengleichheit weiterhin kurz nach 2030 erreichen. Dies begründet sich dadurch, dass die Umrüstungskosten für den DME-Dieselbus im Vergleich zu den Anschaffungskosten eines Neufahrzeugs relativ gering sind. Auch die Anschaffungskosten für die Infrastruktur, also für die DME-Tankstelle, fallen innerhalb der Systemkosten kaum ins Gewicht, da sie wie bei dem Referenzsystem Dieselbus und bei dem System Wasserstoffbus auf einen Fahrzeugbestand von 60 Omnibussen aufgeteilt werden. Dementsprechend ist der Unterschied zwischen den TCO bzw. zwischen den Kilometerkosten des Systems DME-Bus mit und ohne eine finanzielle Förderung der Umrüstung und der Anschaffung der DME-Tankstelle gering.

Im Anschluss an die Untersuchung der Wirtschaftlichkeit von Omnibussen im ÖPNV wurde in der gleichen Weise die Wirtschaftlichkeit von alternativ angetriebenen Abfallsammelfahrzeugen in der Stadtentsorgung untersucht (Abschnitt 5). Dort steigen die Gesamtkosten des Referenzsystems Abfallsammelfahrzeug im konventionellen Dieselbetrieb von ca. 71 TEUR im Jahr 2022 auf ca. 83 TEUR im Jahr 2040 an. Die Systemkosten des Batterie-Abfallsammelfahrzeugs sinken demgegenüber leicht von 77 auf 72 TEUR, was im Wesentlichen auf die sinkenden Batteriepreise zurückzuführen ist, die bei den zwischenzeitlichen Ersatzinvestitionen wirksam werden. Demgegenüber sinken die Systemkosten des Wasserstoff-Abfallsammelfahrzeugs mit Brennstoffzelle in dem gleichen Zeitraum von ca. 86 auf 76 TEUR und die des DME-Abfallsammelfahrzeugs von 92 auf 69 TEUR. Die Kostenstruktur dieser Fahrzeugsysteme wird neben den Fahrzeugkosten insbesondere von den Betriebskosten bestimmt, also den Wartungs- und Instandhaltungskosten. Die Energiekosten tragen anders als bei den Omnibussen im ÖPNV in einem geringeren Umfang

zu den Gesamtkosten der Abfallsammelfahrzeuge bei. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die typische Jahresfahrleistung eines Abfallsammelfahrzeugs in der Regiopole Rostock deutlich kleiner ist als die Jahresfahrleistung eines Omnibusses im ÖPNV, welcher den Verflechtungsraum der Regiopolregion Rostock abdeckt. Auch hier sind die Anschaffungskosten für die Infrastrukturen in allen betrachteten Fahrzeugsystemen von im Vergleich zu den anderen Kostenarten von geringerer Bedeutung. In den Systemen Batterie-Abfallsammelfahrzeug und Wasserstoff-Abfallsammelfahrzeug mit Brennstoffzelle haben sie einen Anteil von 7 bzw. 3 Prozent an den Gesamtkosten. Für den direkten Vergleich der betrachteten Fahrzeugsysteme wurde die typische Jahresfahrleistung des Abfallsammelfahrzeugs in der Stadtentsorgung entsprechend den Gegebenheiten bei der Stadtentsorgung Rostock GmbH mit 11.000 km zugrunde gelegt. Im Ergebnis des Systemvergleichs ist festzustellen, dass alle alternativ angetriebenen Systeme unter der Voraussetzung finanzieller Förderung der Beschaffung von Fahrzeugen und Infrastruktur im zeitlichen Verlauf die Kilometerkosten des Referenzsystems Abfallsammelfahrzeug mit konventionellem Dieselbetrieb erreichen und unterschreiten. Dieser Break-Even wird - bei den hier für die einzelnen Systeme zugrunde gelegten Kostenstrukturen – als erstes von dem System Batterie-Abfallsammelfahrzeug erreicht, und zwar noch vor 2030. Die Kostengleichheit des Systems DME-Abfallsammelfahrzeug wird nur wenig später, also kurz nach 2030 erreicht. Die Gleichheit der Kilometerkosten des Systems Wasserstoff-Abfallsammelfahrzeug mit Brennstoffzelle ist demgegenüber voraussichtlich erst um das Jahr 2035 zu erwarten. Am Ende des Betrachtungszeitraums weisen alle Systeme mit alternativ angetriebenen Abfallsammelfahrzeugen niedrige Kilometerkosten auf als das Referenzsystem Abfallsammelfahrzeug mit konventionellem Dieselbetrieb.

Wie bei dem Systemvergleich der alternativ angetriebenen Omnibusse wurde auch für die Systeme mit Abfallsammelfahrzeugen eine Berechnung aller TCO und Kilometerkosten ohne finanzielle Förderung der Anschaffung von Fahrzeugen und Infrastrukturen durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass auch bei den alternativ angetriebenen Abfallsammelfahrzeug-Systemen diese Förderung Voraussetzung für eine zeitnahe Umstellung kommunaler Nutzfahrzeugflotten auf alternative Antriebe ist: Ohne finanzielle Förderung können das System Batterie-Abfallsammelfahrzeug und das System Wasserstoff-Abfallsammelfahrzeug mit Brennstoffzelle in dem Betrachtungszeitraum keine Kilometerkosten erreichen, welche mit jenen des Referenzsystems Abfallsammelfahrzeug mit konventionellem Dieselbetrieb vergleichbar sind. Lediglich das System DME-Abfallsammelfahrzeug würde die Kostengleichheit weiterhin kurz nach 2030 erreichen. Dies begründet sich dadurch, dass die Umrüstungskosten für den DME-Abfallsammelfahrzeug im Vergleich zu den Anschaffungskosten eines Neufahrzeugs relativ gering sind. Auch die Anschaffungskosten für die Infrastruktur, also für die DME-Tankstelle, fallen innerhalb der Systemkosten kaum ins Gewicht, da sie wie bei dem Referenzsystem Abfallsammelfahrzeug mit konventionellem Dieselbetrieb und bei dem System Wasserstoff-Abfallsammelfahrzeug mit Brennstoffzelle auf einen Fahrzeugbestand von 60 Abfallsammelfahrzeugen aufgeteilt werden. Dementsprechend ist auch der Unterschied zwischen den TCO bzw. zwischen den Kilometerkosten des Systems DME-Abfallsammelfahrzeug mit und ohne eine finanzielle Förderung der Umrüstung und der Anschaffung der DME-Tankstelle relativ klein.

Zusammenfassend kann im Hinblick auf alternativ angetriebene Omnibusse im ÖPNV festgehalten werden, dass aus der betriebswirtschaftlichen Perspektive unter der Voraussetzung der finanziellen Förderung der Batteriebus Kilometerkosten verspricht, die bereits vor 2028 jene des Referenzsystems Dieselbus im konventionellen Dieselbetrieb erreichen und unterschreiten. Das System Wasserstoff mit Brennstoffzelle und insbesondere das System DME-Dieselbus weisen demgegenüber vor ihrem Break-Even-Zeitpunkt deutlich höhere Kilometerkosten als das Referenzsystem und der Batteriebus auf. Allerdings sind umgekehrt um das Jahr 2040 die Kostenvorteile des Wasserstoffbusses und besonders des DME-Dieselbusses größer als jene des Batteriebusses. Angesichts der Langlebigkeit der zugehörigen Infrastrukturen (Tankstellen) sind somit aus einer längerfristigen Perspektive der Wasserstoffbus mit Brennstoffzelle und insbesondere der DME-Dieselbus zu präferieren. Diese Verhältnisse gelten sinngemäß auch für alternativ angetriebene Abfallsammelfahrzeuge in der Stadtentsorgung, sofern auch hier eine finanzielle Förderung erfolgt. Allerdings werden hier die Zeitpunkte der Gleichheit der Kilometerkosten der alternativ angetriebenen Abfallsammelfahrzeuge und des Referenzsystems erst ca. fünf Jahre später als bei den Omnibussen erreicht.

6. Literatur- und Quellenverzeichnis

- /1/ Dr.-Ing. Grüttner Energie Umwelt Strategie GmbH (2022): Energiewende in kommunalen Fahrzeugflotten in der Regiopolregion Rostock. Im Auftrag der Hanse- und Universitätsstadt Rostock. Hohen Luckow/Rostock.
- /2/ Mummel, Jan (2019): Entscheidungsunterstützung in der Planung von Infrastrukturen für Elektrofahrzeugflotten. Diss. Univ. Braunschweig. Dr. Huth Verlag. München.
- /3/ Kunith, Alexander W. (2017): Methodik zur Technologiebewertung für die Elektrifizierung des urbanen öffentlichen Busverkehrs. Diss. TU Berlin.
- /4/ Jefferies, D.; Göhlich, D. A Comprehensive TCO Evaluation Method for Electric Bus Systems Based on Discrete-Event Simulation Including Bus Scheduling and Charging Infrastructure Optimization. World Electr. Veh. J. 2020, 11, 56. https://doi.org/10.3390/wevj11030056.
- /5/ Schreven, Sebastian; Rogge, Matthias (2020): Elektrifizierung des Stadtbussystems INGO. Ebusplan. St. Ingbert. Verfügbar unter: https://map.now-gmbh.de/sites/default/files/project-pdf/03EMK3041 StIngbert Abschlussbericht Machbarkeitsstudie.pdf.
- /6/ Alba GROUP/TU Berlin (2019): Netzdienliche Integration hybrider Entsorgungsfahrzeuge. Abschlussbericht zum Forschungsprojekt (Förderkennzeichen: 1160-B5-O / 1179-B5-O). Berlin. Verfügbar unter: https://www.berlin.de/sen/uvk/assets/umwelt/foerderprogramme/berliner-programm-fuer-nachhaltige-entwicklung-bene/bene-projekte/1160/und/1179-b5-o/abschlussbericht/verbundvorhaben.pdf.
- /7/ Umweltbundesamt (2018): Bewährte Verfahren zur kommunalen Abfallbewirtschaftung. Dessau-Roßlau. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/bewaehrte-verfahren-zur-kommunalen-0.
- /8/ Kasten, Peter et al. (2015): Erarbeitung einer fachlichen Strategie zur Energieversorgung des Verkehrs bis zum Jahr 2050. Studie des Öko-Instituts und des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) im Auftrag des Umweltbundesamtes. Berlin/Karlsruhe. Verfügbar unter: https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pools/Forschungsdaten-bank/fkz 3713 45 103 energieversorgung verkehr 2050 bf.pdf.
- /9/ 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/.
- /10/ e-mobil BW GmbH (2017): Nullemissionsfahrzeuge. Vom ökologischen Hoffnungsträger zur ökologischen Alternative. Stuttgart.
- /11/ Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2021): Ad-hoc-Task-Force zu Min-deststandards bei der Umrüstung von konventionellen Nutzfahrzeugen auf alternative Antriebe. Ergebnisbericht. Berlin. Verfügbar unter: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/StV/ergebnis-bericht-umruestung-nutzfahrzeuge.html.
- /12/ Fromm, Leonhard (2019): Wie Dieselbusse sauber werden. In: Busplaner 08/2019. S. 44-46. Verfügbar unter: https://www.busplaner.de/de/fachmagazin/fachartikel/mobilitaet-antriebssysteme-unternehmens-wirtschaft-und-branchen-nachrichten-sonst-wie-dieselbusse-sauber-werden-11481.html.
- /13/ Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e. V. (2020): Emissionsfreie Energie- und Antriebs-konzepte für Stadtbusse zur Umsetzung der europäischen Clean Vehicles Directive. Köln.
- /14/ Reuß, Markus Eduard (2019): Techno-ökonomische Analyse alternativer Wasserstoffinfrastruktur. Diss. RWTH Aachen. Verfügbar unter: https://publications.rwth-aachen.de/record/765438/.
- /15/ Neugebauer, Raimund (2022): Wasserstofftechnologien. Springer Vieweg. Berlin/Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-64939-8.

- /16/ Frontier Economics Ltd (2017): Der Wert der Gasinfrastruktur für die Energiewende in Deutschland. Eine modellbasierte Analyse. Köln. Verfügbar unter: https://www.frontier-economics.com/de/de/news-und-veroeffentlichungen/veroeffentlichungen/article-i4363-der-wert-dergasinfrastruktur-fuer-die-energiewende-in-deutschland/.
- /17/ Deutsche Energie-Agentur GmbH (2018): dena-Leitstudie Integrierte Energiewende. Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050. Ergebnisbericht und Handlungsempfehlungen. Berlin. Verfügbar unter: https://www.dena.de/themen-projekte/projekte/energiesysteme/dena-leitstudie-integrierte-energiewende/.
- /18/ Abfalllogistik Bremen GmbH (2020): Die Zukunft der Entsorgung: Erstes wasserstoffbetriebenes Entsorgungsfahrzeug in Bremen im Einsatz. Pressemeldung vom 13. August 2020. Bremen.
- /19/ Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt, Natur und Digitalisierung Schleswig-Holstein (2021): H₂-Erzeugung und Märkte Schleswig-Holstein. Kiel.
- /20/ Maus, Wolfgang (2019): Zukünftige Kraftstoffe. Energiewende des Transports als ein weltweites Klimaziel. Springer Vieweg. Berlin/Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-58006-6.
- /21/ Agora Verkehrswende, Agora Energiewende und Frontier Economics (2018): Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe. Berlin/Köln. Verfügbar unter: https://www.agora-verkehrswende.de/veroeffentlichungen/die-zukuenftigen-kosten-strombasierter-synthetischer-brennstoffe/.
- /22/ NOW GmbH (2018): Einführung von Wasserstoffbussen im ÖPNV. Fahrzeuge, Infrastruktur und betriebliche Aspekte. Berlin. Verfügbar unter: https://www.now-gmbh.de/aktuelles/pressemittei-lungen/broschuere-einfuehrung-von-wasserstoffbussen-im-oepnv/.
- /23/ Nikvist, Björn et al. (2015): Systematic review of EV battery pack costs suggests economies of scale may push toward US\$200/kWh without further cell chemistry improvements. Green Car Congress, 20.04.2015. Verfügbar unter: https://www.greencarcongress.com/2015/04/20150420-bevs.html.
- /24/ 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.
- /25/ Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2021): Richtlinie zur Förderung alternativer Antriebe von Bussen im Personenverkehr. Vom 7. September 2021. BAnz AT 17.09.2021 B6.
- /26/ Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2021): Richtlinie über die Förderung von leichten und schweren Nutzfahrzeugen mit alternativen, klimaschonenden Antrieben und dazugehöriger Tank- und Ladeinfrastruktur für elektrisch betriebene Nutzfahrzeuge (reine Batterieelektrofahrzeuge, von außen aufladbare Hybridelektrofahrzeuge und Brennstoffzellenfahrzeuge) (Richtlinie KsNI) vom 2. August 2021.
- /27/ rebus Regionalbus Rostock GmbH (2022): Vortrag im Themenblock "H₂-Ökosystem für kommunale Fahrzeuge" auf der 2. Wasserstoffkonferenz der Region Rostock am 27. April 2022 in Rostock.
- /28/ Schwertner, Michael (2017): Energetischer Systemvergleich von Diesel-, Hybrid- und Elektrobussen. Diss. ETH Zürich. Zürich.
- /29/ Berthold, Kilian (2018): Techno-ökonomische Auslegungsmethodik für die Elektrifizierung urbaner Busnetze. Diss. Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Karlsruhe.
- /30/ Knote, Thoralf et al. (2017): E-Bus-Standard. Ansätze zur Standardisierung und Zielkosten für Elektrobusse. Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI. Verfügbar unter: https://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/2018-04/Abschlussbericht.pdf.
- /31/ Bundesrechnungshof (2022): Abschließende Mitteilung an das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz über die Prüfung Ausgestaltung des Emissionshandels. Teil I: Nationaler Emissionshandel. Bonn. 22. April 2022. Verfügbar unter: https://www.bundesrechnungshof.de/de/veroeffentlichungen/produkte/pruefungsmitteilungen/2022-pruefungsmitteilungen/ausgestaltung-desemissionshandels-teil-i-nationaler-emissionshandel/@@download/langfassung_pdf.

- /32/ Burstedde, Barbara; Nicolosi, Markus (2021): Strommarkt und Klimaschutz: Transformation der Stromerzeugung bis 2050. Abschlussbericht. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Dessau-Roßlau. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/strommarkt-klimaschutz-transformation-der.
- /33/ Pütz, Ralf (2018): Ökologischer und ökonomischer Vergleich der SWG-Busflotte in Abhängigkeit ihrer Zusammensetzung auf den Zeithorizonten "heute" und "mittelfristig". Hochschule Landshut. Verfügbar unter: https://www.giessen.de/media/custom/684 18911 1.PDF.
- /34/ Regionale Kooperation Westküste (2020): Einsatz von wasserstoffbetriebenen Bussen in den Kreisen Dithmarschen und Steinburg. Machbarkeitsstudie. Itzehoe. Verfügbar unter: https://www.xn-rk-westkste-0hb.de/fileadmin/Redakteur/Downloads/Seite Wasserstoffbetriebene Busse/RK Westkueste Machbarkeitsstudie H2-Busse Dithmarschen Steinburg end.pdf.
- /35/ Weichenhain, Uwe et al. (2020): Potenziale der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie in Baden-Württemberg. Studie der Roland Berger GmbH im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft des Landes Baden-Württemberg. München. Verfügbar unter: https://um.baden-wuerttemberg.de/de/wirtschaft/wasserstoffwirtschaft/studie/.
- /36/ Hydrogen Council (2020): Path to hydrogen Competitiveness. A cost perspective. Brüssel. Verfügbar unter: https://www.hynergy.de/kostenstudie-des-hydrogen-council-sieht-break-even-von-lang-strecken-wasserstofffahrzeugen-mit-benzin-und-diesel-schon-zwischen-2020-und-2030/.
- /37/ Kramer, Ulrich et al. (2018): Defossilisierung des Transportsektors Optionen und Voraussetzungen in Deutschland. Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. Frankfurt am Main. Verfügbar unter: https://www.fvv-net.de/fileadmin/user-upload/medien/materia-lien/FVV Kraftstoffe Studie Defossilisierung R586 final v.3 2019-06-14 DE.pdf.
- /38/ Rudolph, Frederic (2019): Der Beitrag von synthetischen Kraftstoffen zur Verkehrswende: Optionen und Prioritäten. Kurzstudie des Wuppertal-Instituts im Auftrag von Greenpeace Deutschland. Wuppertal. Verfügbar unter: https://wupperinst.org/p/wi/p/s/pd/807.

Anhang 1. Systemkosten Omnibusse

Tabelle 6: Systemkosten des Referenzsystems Dieselbus

	Fahrzeug	Infrastruktur	Energie	Betrieb	gesamt
Jahr	TEUR	TEUR	TEUR	TEUR	TEUR
	1	2	3	4	5
2020					
2021					
2022	36,37	0,27	28,37	14,06	79,06
2023	36,37	0,27	31,51	14,06	82,21
2024	36,37	0,27	32,82	14,06	83,52
2025	36,37	0,27	34,36	14,06	85,06
2026	36,37	0,27	35,85	14,06	86,55
2027	36,37	0,27	37,41	14,06	88,11
2028	36,37	0,27	39,04	14,06	89,74
2029	36,37	0,27	40,75	14,06	91,45
2030	34,55	0,27	42,54	14,06	91,42
2031	34,55	0,27	44,41	14,06	93,29
2032	34,55	0,27	46,37	14,06	95,25
2033	34,55	0,27	48,42	14,06	97,30
2034	34,55	0,27	50,56	14,06	99,44
2035	34,55	0,27	52,80	14,06	101,68
2036	34,55	0,27	55,15	14,06	104,03
2037	34,55	0,27	57,60	14,06	106,48
2038	32,82	0,27	60,17	14,06	107,32
2039	32,82	0,27	62,86	14,06	110,01
2040	32,82	0,27	65,67	14,06	112,82

Tabelle 7: Systemkosten des Systems Batteriebus

	Fahrzeug	Infrastruktur	Energie	Betrieb	gesamt
Jahr	TEUR	TEUR	TEUR	TEUR	TEUR
	1	2	3	4	5
2020					
2021					
2022	44,70	5,25	22,08	13,46	85,50
2023	44,70	5,25	22,73	13,46	86,14
2024	44,70	5,25	23,38	13,46	86,79
2025	44,70	5,25	24,03	13,46	87,44
2026	44,70	5,25	24,67	13,46	88,09
2027	44,70	5,25	25,32	13,46	88,73
2028	41,73	5,25	25,97	13,46	86,40
2029	41,73	5,25	26,62	13,46	87,05
2030	41,73	5,25	27,26	13,46	87,70
2031	41,73	5,25	27,91	13,46	88,35
2032	41,73	5,25	28,56	13,46	88,99
2033	41,73	5,25	29,21	13,46	89,64
2034	37,96	5,04	29,85	13,46	86,32
2035	37,96	5,04	30,50	13,46	86,96
2036	37,96	5,04	31,15	13,46	87,61
2037	37,96	5,04	31,79	13,46	88,26
2038	37,96	5,04	32,44	13,46	88,91
2039	37,96	5,04	33,09	13,46	89,55
2040	35,72	5,04	33,74	13,46	87,97

Tabelle 8: Systemkosten des Systems Wasserstoffbus (mit Brennstoffzelle)

	Fahrzeug	Infrastruktur	Energie	Betrieb	gesamt
Jahr	TEUR	TEUR	TEUR	TEUR	TEUR
	1	2	3	4	5
2020					
2021					
2022	41,82	2,93	52,23	15,25	112,23
2023	41,82	2,93	51,30	15,25	111,30
2024	41,82	2,93	50,36	15,25	110,37
2025	41,82	2,93	49,43	15,25	109,44
2026	41,82	2,93	48,50	15,25	108,50
2027	41,82	2,93	47,57	15,25	107,57
2028	42,01	2,93	46,63	15,25	106,83
2029	42,01	2,93	45,70	15,25	105,90
2030	34,40	2,93	44,77	15,25	97,35
2031	34,40	2,93	43,84	15,25	96,42
2032	34,40	2,93	42,90	15,25	95,48
2033	34,40	2,93	41,97	15,25	94,55
2034	34,60	2,93	41,04	15,25	93,82
2035	34,60	2,93	40,10	15,25	92,89
2036	34,60	2,93	39,17	15,25	91,96
2037	34,60	2,93	38,24	15,25	91,02
2038	29,91	2,93	37,31	15,25	85,40
2039	29,91	2,93	36,37	15,25	84,47
2040	30,13	2,93	35,44	15,25	83,75

Tabelle 9: Systemkosten des Systems DME-Dieselbus

	Fahrzeug	Infrastruktur	Energie	Betrieb	gesamt
Jahr	TEUR	TEUR	TEUR	TEUR	TEUR
	1	2	3	4	5
2020					
2021					
2022	39,18	0,27	73,09	14,06	126,60
2023	39,18	0,27	69,25	14,06	122,76
2024	39,18	0,27	65,74	14,06	119,26
2025	39,18	0,27	62,36	14,06	115,87
2026	39,18	0,27	59,11	14,06	112,62
2027	39,18	0,27	55,98	14,06	109,49
2028	38,76	0,27	52,97	14,06	106,06
2029	38,76	0,27	50,09	14,06	103,18
2030	36,94	0,27	47,51	14,06	98,78
2031	36,94	0,27	44,71	14,06	95,98
2032	36,94	0,27	42,21	14,06	93,48
2033	36,94	0,27	39,83	14,06	91,10
2034	36,58	0,27	37,57	14,06	88,49
2035	36,58	0,27	35,45	14,06	86,36
2036	36,58	0,27	33,44	14,06	84,35
2037	36,58	0,27	31,57	14,06	82,48
2038	34,86	0,27	29,81	14,06	79,00
2039	34,86	0,27	28,19	14,06	77,37
2040	34,55	0,27	26,69	14,06	75,56

Anhang 2. Systemkosten Abfallentsorgungsfahrzeuge

Tabelle 10: Systemkosten des Systems Diesel-Abfallsammelfahrzeug

	Fahrzeug	Infrastruktur	Energie	Betrieb	gesamt
Jahr	TEUR	TEUR	TEUR	TEUR	TEUR
	1	2	3	4	5
2020					
2021					
2022	33,46	0,22	11,75	25,35	70,78
2023	33,46	0,22	13,03	25,35	72,06
2024	33,46	0,22	13,58	25,35	72,61
2025	33,46	0,22	14,22	25,35	73,25
2026	33,46	0,22	14,84	25,35	73,87
2027	33,46	0,22	15,48	25,35	74,51
2028	33,46	0,22	16,16	25,35	75,19
2029	33,46	0,22	16,87	25,35	75,90
2030	31,79	0,22	17,60	25,35	74,96
2031	31,79	0,22	18,38	25,35	75,73
2032	31,79	0,22	19,18	25,35	76,54
2033	31,79	0,22	20,03	25,35	77,38
2034	31,79	0,22	20,91	25,35	78,26
2035	31,79	0,22	21,83	25,35	79,18
2036	31,79	0,22	22,79	25,35	80,14
2037	31,79	0,22	23,79	25,35	81,15
2038	30,20	0,22	24,84	25,35	80,61
2039	30,20	0,22	25,94	25,35	81,71
2040	30,20	0,22	27,08	25,35	82,85

Tabelle 11: Systemkosten des Systems Batterie-Abfallsammelfahrzeug

	Fahrzeug	Infrastruktur	Energie	Betrieb	gesamt
Jahr	TEUR	TEUR	TEUR	TEUR	TEUR
	1	2	3	4	5
2020					
2021					
2022	41,13	5,25	7,01	23,15	76,54
2023	41,13	5,25	7,22	23,15	76,74
2024	41,13	5,25	7,42	23,15	76,95
2025	41,13	5,25	7,63	23,15	77,15
2026	41,13	5,25	7,84	23,15	77,36
2027	41,13	5,25	8,04	23,15	77,56
2028	38,45	5,25	8,25	23,15	75,09
2029	38,45	5,25	8,45	23,15	75,29
2030	38,45	5,25	8,66	23,15	75,50
2031	38,45	5,25	8,86	23,15	75,71
2032	38,45	5,25	9,07	23,15	75,91
2033	38,45	5,25	9,27	23,15	76,12
2034	35,26	5,04	9,48	23,15	72,93
2035	35,26	5,04	9,69	23,15	73,14
2036	35,26	5,04	9,89	23,15	73,34
2037	35,26	5,04	10,10	23,15	73,55
2038	35,26	5,04	10,30	23,15	73,75
2039	35,26	5,04	10,51	23,15	73,96
2040	33,25	5,04	10,71	23,15	72,15

Tabelle 12: Systemkosten des Systems Wasserstoff-Abfallsammelfahrzeug

	Fahrzeug	Infrastruktur	Energie	Betrieb	gesamt
Jahr	TEUR	TEUR	TEUR	TEUR	TEUR
	1	2	3	4	5
2020					
2021					
2022	40,68	2,35	16,59	26,30	85,91
2023	40,68	2,35	16,29	26,30	85,61
2024	40,68	2,35	15,99	26,30	85,31
2025	40,68	2,35	15,70	26,30	85,02
2026	40,68	2,35	15,40	26,30	84,72
2027	40,68	2,35	15,10	26,30	84,43
2028	40,05	2,35	14,81	26,30	83,50
2029	40,05	2,35	14,51	26,30	83,20
2030	38,19	2,35	14,22	26,30	81,05
2031	38,19	2,35	13,92	26,30	80,75
2032	38,19	2,35	13,62	26,30	80,46
2033	38,19	2,35	13,33	26,30	80,16
2034	37,64	2,35	13,03	26,30	79,32
2035	37,64	2,35	12,73	26,30	79,02
2036	37,64	2,35	12,44	26,30	78,73
2037	37,64	2,35	12,14	26,30	78,43
2038	36,61	2,35	11,85	26,30	77,11
2039	36,61	2,35	11,55	26,30	76,81
2040	36,14	2,35	11,25	26,30	76,04

Tabelle 13: Systemkosten des Systems DME-Abfallsammelfahrzeug

	Fahrzeug	Infrastruktur	Energie	Betrieb	gesamt
Jahr	TEUR	TEUR	TEUR	TEUR	TEUR
	1	2	3	4	5
2020					
2021					
2022	37,34	0,27	29,23	25,36	92,20
2023	37,34	0,27	27,70	25,36	90,67
2024	37,34	0,27	26,29	25,36	89,27
2025	37,34	0,27	24,94	25,36	87,91
2026	37,34	0,27	23,64	25,36	86,61
2027	37,34	0,27	22,39	25,36	85,36
2028	36,76	0,27	21,19	25,36	83,58
2029	36,76	0,27	20,03	25,36	82,42
2030	35,09	0,27	19,00	25,36	79,72
2031	35,09	0,27	17,88	25,36	78,60
2032	35,09	0,27	16,88	25,36	77,60
2033	35,09	0,27	15,93	25,36	76,64
2034	34,59	0,27	15,03	25,36	75,25
2035	34,59	0,27	14,18	25,36	74,40
2036	34,59	0,27	13,38	25,36	73,60
2037	34,59	0,27	12,62	25,36	72,85
2038	33,00	0,27	11,92	25,36	70,56
2039	33,00	0,27	11,27	25,36	69,90
2040	32,58	0,27	10,67	25,36	68,88

Anhang 3. Kilometerkosten im ÖPNV und in der Abfallentsorgung

Tabelle 14: Kilometerkosten im ÖPNV

	Dieselbus	Batteriebus	H ₂ -BrstZ-Bus	DME-Bus
Jahr		EUR	L/km	
	1	2	3	4
2020				
2021				
2022	1,58	1,71	2,24	2,53
2023	1,64	1,72	2,23	2,46
2024	1,67	1,74	2,21	2,39
2025	1,70	1,75	2,19	2,32
2026	1,73	1,76	2,17	2,25
2027	1,76	1,77	2,15	2,19
2028	1,79	1,73	2,14	2,12
2029	1,83	1,74	2,12	2,06
2030	1,83	1,75	1,95	1,98
2031	1,87	1,77	1,93	1,92
2032	1,90	1,78	1,91	1,87
2033	1,95	1,79	1,89	1,82
2034	1,99	1,73	1,88	1,77
2035	2,03	1,74	1,86	1,73
2036	2,08	1,75	1,84	1,69
2037	2,13	1,77	1,82	1,65
2038	2,15	1,78	1,71	1,58
2039	2,20	1,79	1,69	1,55
2040	2,26	1,76	1,67	1,51

Tabelle 15: Kilometerkosten in der Abfallentsorgung

	Diesel-ASF	Batterie-ASF	H ₂ -BrstZ-ASF	DME-Diesel-ASF		
Jahr	EUR/km					
	1	2	3	4		
2020						
2021						
2022	6,43	6,96	7,81	8,38		
2023	6,55	6,98	7,78	8,24		
2024	6,60	7,00	7,76	8,11		
2025	6,66	7,01	7,73	7,99		
2026	6,72	7,03	7,70	7,87		
2027	6,77	7,05	7,68	7,75		
2028	6,84	6,83	7,59	7,59		
2029	6,90	6,84	7,56	7,49		
2030	6,81	6,86	7,37	7,24		
2031	6,88	6,88	7,34	7,14		
2032	6,96	6,90	7,31	7,05		
2033	7,03	6,92	7,29	6,96		
2034	7,11	6,63	7,21	6,84		
2035	7,20	6,65	7,18	6,76		
2036	7,29	6,67	7,16	6,69		
2037	7,38	6,69	7,13	6,62		
2038	7,33	6,70	7,01	6,41		
2039	7,43	6,72	6,98	6,35		
2040	7,53	6,56	6,91	6,26		



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