



Transformationsprozess zu emissionsfreien Bussen im Kontext der Clean Vehicles Directive (CVD-Studie)

Studie erstellt im Auftrag von

WBO - Verband Baden-Württembergischer Omnibusunternehmen e.V.,



in Zusammenarbeit mit

13 Mitgliedsunternehmen des WBO und VDV Landesgruppe Baden-Württemberg,



gefördert vom

Verkehrsministerium Baden-Württemberg



Inhalt

Abbildungsverzeichnis	3
Tabellenverzeichnis	5
Abkürzungsverzeichnis	6
1. Einführung.....	7
1.1 Ausgangssituation.....	7
1.2 Ziel der Studie	9
2. Vorgehensweise	11
3. Ergebnisse	14
3.1 Ergebnisse Teil A: Flottenszenarien für Baden-Württemberg (Top- Down)	14
3.1.1 Technikannahmen und Energiebedarf	14
3.1.2 Kostenannahmen	14
3.1.3 Total-Cost-of-Ownership-Vergleich Bustechnologien	16
3.1.4 Definition der Flottenszenarien.....	24
3.1.5 Ergebnisse Energiebedarf	27
3.1.6 Ergebnisse Kosten der Flottenentwicklung.....	28
3.1.7 Finanzierungsbedarf Förderung.....	34
3.1.8 Treibhausgasemissionen - Einsparpotentiale und Vermeidungskosten	34
3.1.9 Einfluss eines Flottenwachstums	40
3.1.10 Zusammenfassung Teil A	44
3.2 Ergebnisse Teil B: Fallstudien private Busunternehmen (Bottom Up)	45
3.2.1 Einsatzgebiete & Rahmenbedingungen	45
3.2.2 Untersuchte Technologien (Rahmendaten)	46
3.2.3 Annahmen/Szenarien.....	50
3.2.4 Ergebnisse Machbarkeitsanalysen	51
3.2.5 Einsparpotentiale THG-Emissionen	55
3.2.6 Investitionskosten Umstellung der Busflotten	57
3.2.7 Zusammenfassung Teil B	60
4. Ausblick und Empfehlungen.....	61
5. Anhang.....	63
Weitere Ergebnisse Teil B: Einsparpotentiale THG-Emissionen	63

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Quotenregelung nach EU Clean Vehicles Directive bzw. SaubFahrzeugBeschG	8
Abbildung 2: Übersicht Vorgehensweise	11
Abbildung 3: Kostendegression BEV und BZ-Busse	15
Abbildung 4: Kostenentwicklung Energieträger	16
Abbildung 5: TCO Vergleich für 12 und 18 m Diesel-, BEV- und BZ-Busse in 2021, 2030 und 2035.17	17
Abbildung 6: TCO Vergleich 12 und 18 m Diesel-, BEV- und BZ-Busse ohne und mit Förderung in 2021	18
Abbildung 7: TCO Vergleich 12 und 18 m Diesel-, BEV- und BZ-Busse ohne und mit Förderung in 2030	19
Abbildung 8: TCO Vergleich 12 und 18 m Diesel-, BEV- und BZ-Busse in Abhängigkeit Fahrzeugmehrbedarf in 2021.....	20
Abbildung 9: TCO Vergleich 12 und 18 m Diesel-, BEV- und BZ-Busse in Abhängigkeit Fahrzeugmehrbedarf in 2030.....	20
Abbildung 10: Entwicklung Anschaffungskosten 12 und 18 m Diesel-, BEV und BZ Busse mit Kostenparität Diesel-BEV in 2035	21
Abbildung 11: TCO Vergleich 12 und 18 m Diesel-, BEV- und BZ-Busse mit Kostenparität Diesel-BEV in 2035	21
Abbildung 12: Entwicklung Dieseldkosten in Abhängigkeit Entwicklung CO ₂ Preis	22
Abbildung 13: TCO Kosten in 2030 in Abhängigkeit Variation CO ₂ Preis.....	22
Abbildung 14: TCO Kosten Variation 12 und 18m BEV und BZ Busse in Abhängigkeit Energieträgerkosten	23
Abbildung 15: Sensitivitätsanalyse TCO	24
Abbildung 16: Anzahl neue Fahrzeuge je Technologie pro Jahr Szenario 1 und 2 (ohne Flottenzuwachs)	25
Abbildung 17: Anzahl neue Fahrzeuge je Technologie pro Jahr Szenario 3 und 4 (ohne Flottenzuwachs)	26
Abbildung 18: Flottenentwicklung Szenario 1 (ohne Flottenzuwachs).....	26
Abbildung 19: Flottenentwicklung Szenario 2 und 3 (ohne Flottenzuwachs).....	27
Abbildung 20: Flottenentwicklung Szenario 4 (ohne Flottenzuwachs)	27
Abbildung 21: Energiebedarf pro Jahr, Szenario 1 und 2 und 4	28
Abbildung 22: Gesamtkosten der Flotte von 2021 bis einschließlich 2032.....	30
Abbildung 23: Mittlere jährliche Mehrkosten der Flotten in Szenarien 1 und 2	31
Abbildung 24: Mittlere jährliche Mehrkosten der Flotten in Szenarien 3 und 4	31
Abbildung 25: Gesamtkosten der Flotte pro Jahr, Szenario 1 und 2	32
Abbildung 26: Gesamtkosten der Flotte pro Jahr, Szenario 3 und 4	32
Abbildung 27: Investitions- und Infrastrukturmehrkosten der Flotte pro Jahr, Szenario 1 und 2.....	33
Abbildung 28: Investitions- und Infrastrukturmehrkosten der Flotte pro Jahr, Szenario 3 und 4.....	33
Abbildung 29: Jährlicher Finanzierungsbedarf Förderung	34
Abbildung 30: Strommixzusammensetzung	35
Abbildung 31: THG-Emissionen Strom- und H2 Bereitstellung.....	35
Abbildung 32 :THG-Emissionen der ÖPNV Busflotte in BW - Szenario 1 (ohne Flottenzuwachs).....	36
Abbildung 33: THG-Emissionen der ÖPNV Busflotte in BW - Szenario 2 und 3 (ohne Flottenzuwachs)	36
Abbildung 34: THG-Emissionen der ÖPNV Busflotte in BW - Szenario 4 (ohne Flottenzuwachs).....	37
Abbildung 35: THG Einsparung der Busflotte in Szenario 1 und 2,3 und 4 (ohne Flottenzuwachs)...	37
Abbildung 36: TtW THG-Emissionen Szenario 1 [Ohne Flottenzuwachs].....	38
Abbildung 37: TtW THG-Emissionen Szenario 2 und 3 (ohne Flottenzuwachs).....	38
Abbildung 38: TtW THG-Emissionen Szenario 4 (ohne Flottenzuwachs)	38

Abbildung 39: Entwicklung der CO ₂ Vermeidungskosten.....	39
Abbildung 40: Entwicklung Fahrzeugbestand Szenario 2 ohne (links) und mit (rechts) Flottenzuwachs	40
Abbildung 41: Anzahl neue Fahrzeuge je Technologie pro Jahr Szenario 1 und 2 ohne Flottenzuwachs	41
Abbildung 42: Anzahl neue Fahrzeuge je Technologie pro Jahr Szenario 1 und 2 mit Flottenzuwachs	41
Abbildung 43: Gesamtkosten ohne (links) und mit (rechts) Flottenwachstum	42
Abbildung 44: Mittlere jährliche Mehrkosten der Flotten in Szenarien 1 und 2 ohne Flottenzuwachs	43
Abbildung 45: Mittlere jährliche Mehrkosten der Flotten in Szenarien 1 und 2 mit Flottenzuwachs.....	43
Abbildung 46: Untersuchte Busunternehmen	45
Abbildung 47: Umlauflängen.....	46
Abbildung 48: Flottenzusammensetzung über alle 13 untersuchten Busunternehmen.....	47
Abbildung 49: Mittlerer Energieverbrauch 12 m BEV und BZ-Bus inkl. Bandbreiten.....	47
Abbildung 50: Beispiel für Umlaufanalyseergebnisse für BEV mit elektrischer Zusatzheizung, Umläufe 1 und 2 mit Möglichkeit zur Gelegenheitsladung unterwegs, Umlauf 3 nur mit Depotladung.....	51
Abbildung 51 Ladeleistung Betriebshof über den Tag verteilt (Depotladung).....	52
Abbildung 52: Ladeleistung Betriebshof (inkl. Gelegenheitsladung) zur Versorgung von 9 Bussen mit elektrischer Zusatzheizung	53
Abbildung 53: Anteil umstellbare Busse für 3 Gefäßgrößen (12, 8,5 und 18 m Bus)	54
Abbildung 54: THG-Emissionen pro gefahrenem Kilometer (12 m Solobus, OEM Zukunft, Bezugsjahr 2026)	56
Abbildung 55 Investitionskosten BEV-Busse +LIS (75 kW) pro Busunternehmen (Jahr 2026)	59
Abbildung 56 Spezifische Investitionskosten pro Ladepunkt (eigene Berechnungen).....	59
Abbildung 57: THG-Einsparpotentiale 8,5 m Bus.....	63
Abbildung 58: THG-Einsparpotentiale 10 m Bus.....	63
Abbildung 59: THG-Einsparpotentiale 14/15 m Bus	64
Abbildung 60: THG-Einsparpotentiale 18 m Bus.....	64

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Verbrauchswerte	14
Tabelle 2: Kostenannahmen	14
Tabelle 3: Fahrzeuginvestitionen	15
Tabelle 4: Annahmen Flottenszenarien.....	24
Tabelle 5: Verteilung der Neigungsklassen im Landkreis Karlsruhe.....	46
Tabelle 6: Verteilung der Neigungsklassen im Landkreis Ravensburg	46
Tabelle 7: Übersicht angenommener Batteriekapazitäten je Gefäßgröße basierend auf verschiedenen Herstellern (OEMs) bzw. Zukunftsprognose	48
Tabelle 8: Übersicht der angenommenen Wasserstofftankgrößen je Gefäßgröße.....	48
Tabelle 9: Übersicht technische Machbarkeit nach Antriebstechnologien (Gesamtbetrachtung über alle untersuchten Busunternehmen); Anteile der machbaren KOMs	54
Tabelle 10: Eingangsdaten der Berechnung der THG-Einsparpotentiale (Mittelwerte über alle BUs) 55	
Tabelle 11: Übersicht Einsparpotentiale der verschiedenen Technologien und Gefäßgrößen pro gefahrenem Kilometer.....	57

Abkürzungsverzeichnis

BEV	(<i>engl.</i>) Battery Electric Vehicle (<i>dt. batterieelektrisches Fahrzeug</i>)
BtL	Biomass-to-Liquid (Paraffinischer Kraftstoff auf Biomassebasis)
BU	Busunternehmen
BZ	Brennstoffzelle
BZ-REX	Brennstoffzellenfahrzeug mit Range Extender
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CVD	Clean Vehicles Directive
EE	Erneuerbare Energien
GtL	Gas-to-Liquid (paraffinischer Kraftstoff auf Erdgasbasis)
H ₂	Wasserstoff
HV	Hochvolt
KOM	Kraftomnibusse
LIS	Ladeinfrastruktur
ÖPNV	Öffentliche Personennahverkehr
OEM	(<i>engl.</i>) Original equipment manufacturer (<i>dt. Hersteller</i>)
reFuels	Regenerativ hergestellte Kraftstoffe
SoC	State-of-Charge (Ladezustand der HV Batterie)
SoH	State-of-Health (Alterungsbedingte Restkapazität bezogen auf ursprüngliche Nennkapazität)
THG	Treibhausgase
TIS	Tankinfrastruktur
TtW	Tank-to-Wheel (Berücksichtigung von aufgenommener Energie (Kraftstoff, Strom) bis zur Umwandlung in Bewegungsenergie bei Fahrzeugen)
WBO	Verband Baden-Württembergischer Omnibusunternehmer e.V.
ZEV	(<i>engl.</i>) Zero Emission Vehicles (<i>dt. emissionsfreie Busse</i>)

1. Einführung

1.1 Ausgangssituation

Um bis 2040 in Baden-Württemberg das Ziel der Klimaneutralität zu erreichen, muss der Verkehrssektor in den nächsten Jahren sowohl klima- und umweltverträglicher als auch energieeffizienter werden. Ein wesentlicher Baustein zur Zielerreichung ist der Umstieg auf erneuerbare Energien sowie der Einsatz von emissionsarmen Antriebstechnologien im Verkehrssektor. Dabei ist die Elektromobilität ein vielversprechender Ansatz, um die Ziele im Verkehrssektor zu erreichen.

Als wichtiger Teil des Verkehrssystems in Baden-Württemberg befördert der öffentliche Personennahverkehr (ÖPNV) jährlich über eine Milliarde Fahrgäste¹. Da weniger Energie und Ressourcen pro Fahrgast benötigt werden, ist die Belastung der Umwelt dabei geringer als durch den motorisierten Individualverkehr.

In ländlichen Regionen wird der ÖPNV häufig mittels Bussen sichergestellt. Bedingt durch die hohen Laufleistungen und den Dieselantrieb der Busse fallen dabei sowohl Treibhausgas- (z.B. Kohlendioxid (CO₂)) als auch Schadstoffemissionen (z.B. Stickoxide (NO_x), Partikel (PM_{2,5})) an. Für das Ziel der Klimaneutralität sind daher die anfallenden Treibhausgasemissionen möglichst weit gegen Null zu reduzieren. Dies stellt die Busbetreiber vor die Aufgabe, ihre Dieselflotten durch alternativ angetriebene Fahrzeuge zu ersetzen. Im Busnahverkehr ist die derzeit am weitesten entwickelte Alternative die Elektrifizierung des Antriebsstrangs. Für den Betrieb im Stadt- und Landgebiet bieten sich konkret folgende Optionen mit elektrischem Antrieb an:

- Batteriebusse (BEV-Bus, im Bericht auch synonym mit Batteriebus bezeichnet)
- Wasserstoff (H₂) angetriebene Brennstoffzellenbusse (BZ-Bus)
- Die Kombination aus Batterie und BZ-Bus, der sogenannte Brennstoffzellen Range Extender, kurz BZ-REX, bei dem die Brennstoffzelle zur Erhöhung der Reichweite des Batteriebusses dient
- Oberleitungsbusse, auch Trolleybusse genannt

Die gesetzlichen Vorgaben für diesen Umstieg regelt das seit August 2021 geltende Saubere-Fahrzeuge-Beschaffungs-Gesetz (SaubFahrzeugBeschG)², welches die Umsetzung der europäischen Clean Vehicles Directive (CVD) in nationales Recht darstellt. Durch das SaubFahrzeugBeschG werden verbindliche Quoten für die Neubeschaffung von „sauberen und emissionsfreien“ Bussen definiert. So müssen mindestens 45 % aller in im Zeitraum ab 2.8.2021 bis 31.12.2025 neu beschafften Nahverkehrsbusse bzw. im Rahmen neu vergebener Dienstleistungsaufträge zur Personenbeförderung eingesetzten Busse alternative, im Sinne des Gesetzes als sauber geltende Antriebskonzepte verwenden (siehe Abbildung 1). Zu diesen „sauberen“ Antriebskonzepten gehören laut SaubFahrzeugBeschG alternative Kraftstoffe wie paraffinische Kohlenwasserstoff basierte Kraftstoffe (z.B.: Gas-to-Liquid (GtL)), CNG/LNG (komprimiertes/verflüssigtes Erdgas, LPG (Flüssiggas)) und Biokraftstoffe (z.B. Biomethan, Biomasse-/Power-to-Liquid (Btl/ PtL, auch reFuels genannt), bzw.

¹ 2020: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/204485/umfrage/fahrgaeste-im-liniennahverkehr-in-baden-wuerttemberg/>

² Bundesregierung: Gesetz zur Umsetzung der Richtlinie (EU) 2019/1161 vom 20. Juni 2019 zur Änderung der Richtlinie 2009/33/EG über die Förderung sauberer und energieeffizienter Straßenfahrzeuge sowie zur Änderung vergaberechtlicher Vorschriften (Saubere-Fahrzeuge-Beschaffungs-Gesetz – SaubFahrzeugBeschG), veröffentlicht im Bundesgesetzblatt am 14. Juni 2021.

der Einsatz von konventionellem Diesel in Diesel Plug-In-Hybrid-Bussen. Mindestens die Hälfte der beschafften Busse mit sauberen Antrieben muss wiederum emissionsfrei sein. Dies entspricht einem Anteil emissionsfreier Busse (ZEV) von mindestens 22,5 % der neu zu beschaffenden bzw. im Rahmen neu vergebener Linienverkehre eingesetzten Busse. Als „emissionsfrei“ im Sinne der CVD gelten dabei elektrisch angetriebene Busse (die zuvor genannten Optionen Batterie-, BZ-, BZ-REX oder Oberleitungsbusse) und Busse mit H₂-Verbrennungsmotor. Hieraus ergibt sich in Baden-Württemberg bis Ende 2025 voraussichtlich ein Markt von mindestens 130³ emissionsfreien Bussen pro Jahr.

Mit dem 1.1.2026 wird die Quote für „saubere und emissionsfreie“ Busse weiter angehoben. Der Anteil der sauberen Bussen erhöht sich auf mindestens 65 %, so dass mindestens 32,5 % der neu eingesetzten Busse emissionsfrei sein müssen. Dadurch steigt die geschätzte Nachfrage in Baden-Württemberg auf mindestens 190 emissionsfreie Busse pro Jahr an.

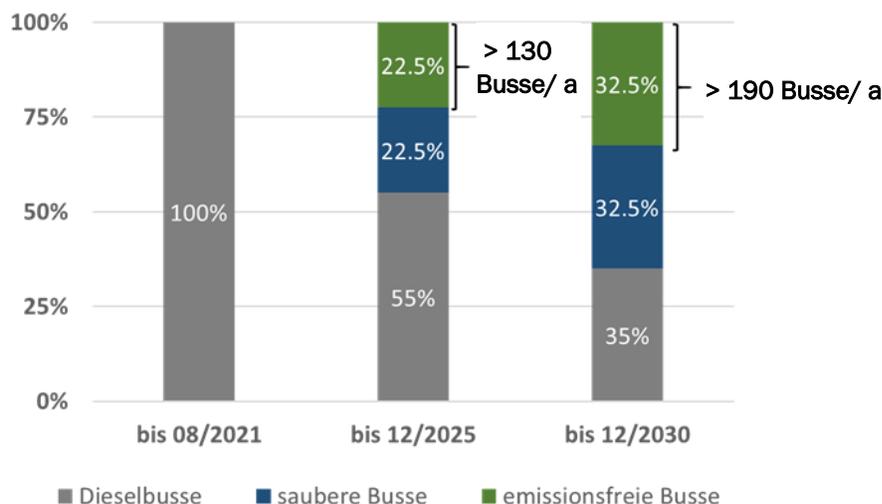


Abbildung 1: Quotenregelung nach EU Clean Vehicles Directive bzw. SaubFahrzeugBeschG

In Anbetracht der dringlichen Aufgabe des Klimaschutzes kommt es nicht nur auf die Zielsetzung, sondern vor allem darauf an, wie die Vorgaben vor Ort umgesetzt werden können. Die wesentlichen Akteure sind neben den Busunternehmen die Aufgabenträger. Den Aufgabenträgern fällt primär die Aufgabe der Zielsetzung zu, d.h. sie formulieren (Mindest-)Vorgaben für das Verkehrsangebot, einschließlich des Anteils einzusetzender sauberer bzw. emissionsfreier Busse. Den Busunternehmen fällt die eigentliche Umsetzung der geforderten Verkehrsleistung zu. Es ist entsprechend erkennbar, dass ein gemeinsam abgestimmtes Vorgehen zur Umsetzung der CVD und ihrer Ziele in Bezug auf Umwelt- und Klimaschutz zwischen Aufgabenträgern und Busunternehmen am vielversprechendsten ist.

Die Eignung der verfügbaren sauberen bzw. emissionsfreien Antriebstechnologien hängt wesentlich vom spezifischen Einsatzkontext vor Ort ab. So gilt es, die technisch-betriebliche Umsetzbarkeit und die damit verbundenen Gesamtkosten je Technologie unter Berücksichtigung der konkreten Rahmenbedingungen vor Ort und den damit verbundenen Zeitleisten für Planung und Umsetzung für Fahrzeugbeschaffung und Errichtung der benötigten Energieversorgungsinfrastruktur zu prüfen bzw. zu ermitteln. So lässt sich ein für den einzelnen Verkehrsbetrieb geeignetes Betriebskonzept,

³ Bezogen auf eine ÖPNV Flottengröße in BaWü von 7.017 Bussen (beinhaltet sowohl gemein- als auch eigenwirtschaftliche Verkehre, Referenzjahr 2020, Quelle: Drucksache Deutscher Bundestag 19/22057_Antwort BMVI 2.9.20, Anlage 1 und Kraftfahrt-Bundesamt 321-140.1/10161-20) und unter der Annahme, dass es keinen Flottenzuwachs gibt. Findet ein Flottenzuwachs statt, erhöht sich entsprechend auch anteilig der Bedarf für neu zu beschaffende ZEV Busse.

basierend auf einer oder auch mehrerer innovativer Antriebstechnologien, erstellen. Dabei besteht aufgrund des Neuigkeitsgrades der Technologien derzeit noch ein beträchtliches technisches und ökonomisches Optimierungspotential, dies gilt sowohl für die einzelnen Antriebstechnologien als auch für die Energiebereitstellung. Somit ergeben sich durch die Umstellung auf „saubere und emissionsfreie“ Busse kurz- bis mittelfristig erhebliche technische und finanzielle Unsicherheiten nicht nur für die Busunternehmen, sondern auch für die Aufgabenträger als „Besteller“ des ÖPNV.

Um die Busunternehmen bei der Einführung emissionsfreier Antriebe zu unterstützen, gibt es verschiedenen Fördermöglichkeiten auf Bundes- und Landesebene sowie auf EU-Ebene. Auf Bundesebene wird derzeit zum Beispiel sowohl die Beschaffung von elektrischen Fahrzeugen als auch die Infrastruktur gefördert. Das Land Baden-Württemberg fördert ebenfalls die investiven Mehrkosten sowohl für Fahrzeuge und Energieversorgungsinfrastruktur als auch weitere erforderliche Anpassungen auf Betriebshöfen, seien es beispielsweise bauliche oder IT-seitige Maßnahmen⁴.

Da sich daraus voraussichtlich auch Mehrkosten für die Aufgabenträger ergeben, ist es auch auf Seiten der Aufgabenträger sinnvoll, sich möglichst frühzeitig mit den sich daraus ergebenden Konsequenzen auseinander zu setzen und Förder- bzw. Finanzierungsmöglichkeiten zu prüfen. Dies auch gerade unter dem Aspekt, dass gleichzeitig zur Einführung sauberer und emissionsarmer Fahrzeuge generell auch eine Ausweitung des ÖPNV-Angebots angestrebt wird. Durch den Einsatz von Drittmitteln, wie sie beispielsweise über den vom Land vorgeschlagenen Mobilitätspass generiert werden könnten, können hier zusätzliche Spielräume geschaffen werden.

1.2 Ziel der Studie

Um das oben erwähnte Ziel der Klimaneutralität der baden-württembergischen Landesregierung bis 2040 zu erreichen, müssen die Busflotten in den kommenden Jahren in einem über die Vorgaben der CVD-Richtlinie hinausgehenden Umfang auf emissionsfreie Antriebe umgestellt werden. Die vorliegende Studie untersucht hierbei diese Umstellung anhand von zwei Perspektiven. Zunächst werden aus der „Top-Down“ Perspektive neben der Umsetzung der CVD- Vorgaben mögliche Umsetzungsszenarien zur Erreichung des formulierten Ziels „klimaneutrale Busflotte“ in Baden-Württemberg erörtert. Dabei wird die Umstellung auf eine klimaneutrale ÖPNV-Busflotte mit zwei unterschiedlichen Zieljahren (2032 und 2040) untersucht, um die jeweils erforderlichen Ambitionsgrade hinsichtlich Anteile an emissionsfreien Bussen an den jährlichen Neubeschaffungen zu bestimmen.

Der Umstieg auf klimaneutrale Busflotten ist für die Busunternehmen in Baden-Württemberg mit erheblichen Herausforderungen nicht nur aus technisch-betrieblicher Sicht, sondern vor allem auch aus finanzieller Sicht verbunden. Daher soll die Frage beantwortet werden, mit welchem Aufwand und unter welchen Bedingungen der Transformationsprozess im Land hin zu emissionsfreien Antrieben im ÖPNV erfolgreich vollzogen werden kann. Dazu wird ermittelt, wie hoch jeweils der Finanzierungsbedarf für die Umsetzung der CVD-Richtlinie und zur Etablierung eines emissionsfreien ÖPNV mit Bussen bis 2032 bzw. 2040 ist. Ein Mittel, um die Busunternehmen bei der Umstellung zu unterstützen, sind Förderprogramme. Daher wird ebenfalls untersucht, wie sich eine Förderung der Investitions(mehr)kosten auf den Finanzierungsbedarf für den Betrieb der baden-württembergischen ÖPNV-Flotte auswirkt.

Neben diesen „Top-Down“ Untersuchungen für die gesamte ÖPNV Busflotte in Baden-Württemberg wird im Rahmen der Studie außerdem die Machbarkeit der Einführung emissionsfreier Busse bei den

⁴ Eine Übersicht zu den verschiedenen Förderprogrammen auf EU-, Bunde und Landesebene findet sich in der Förderübersicht unter <https://www.starterset-elektromobilität.de/Bausteine/OEPNV/> (in Vorbereitung).

Busunternehmen anhand konkreter Fallstudien im Sinne einer „Bottom-Up“ Analyse untersucht. Zur Abdeckung eines möglichst breiten Spektrums an Einsatzbedingungen werden 13 Mitgliedsunternehmen des Verbandes Baden-Württembergischer Omnibusunternehmer e.V. (WBO)⁵ in zwei Verkehrsräumen exemplarisch betrachtet.

Ziel der Analyse ist die Ermittlung des Anteils der Flotte, der sich auf emissionsfreie Antriebe umstellen lässt, um herauszufinden, inwiefern die Anforderungen der CVD von den einzelnen Busunternehmen erfüllt werden können. Des Weiteren gilt es zu ermitteln, mit welchen Kosten die Erfüllung der CVD-Quote bzw. die Umstellung der machbaren Umläufe verbunden ist. Dafür werden neben der Quantifizierung der umstellbaren Flottenanteile über die verschiedenen eingesetzten Gefäßgrößen (6 - 19 m Busse) auch die Anforderungen hinsichtlich der benötigten Kapazität der erforderlichen Energieversorgungsinfrastruktur (Ladeinfrastruktur, H₂ Tankstelle) ermittelt.

Aus den konkreten Ergebnissen für die 13 untersuchten Busunternehmen sollen den übrigen Mitgliedern des WBO bzw. Busunternehmen im Allgemeinen erste belastbare Anhaltspunkte gegeben werden, in welchem voraussichtlichem Umfang mit welchen Antriebstechnologien ein emissionsfreier ÖPNV angeboten werden kann und mit welchen (Mehr-)Kosten dies verknüpft ist. Diese Angaben sind vor dem Hintergrund der zum Teil sehr spezifischen betrieblichen Rahmenbedingungen und Einsatzkontexte der einzelnen Busunternehmen als indikative Bandbreiten zu verstehen. Die Auswahl einer oder auch mehrerer geeigneter Antriebstechnologien und damit des Anteils der tatsächlich umstellbaren Busse obliegt immer individuell dem einzelnen Unternehmen.

Neben diesen konkreten Einschätzungen zur Machbarkeit der (anteiligen) Flottenumstellung dient vorliegende Studie als Übersicht zum grundsätzlichen Vorgehen zur Ermittlung der geeigneten emissionsfreien Antriebstechnologie(n) unter Berücksichtigung der jeweils eigenen spezifischen betrieblichen Randbedingungen. Damit soll den Busunternehmen ermöglicht werden, konkreter einzuschätzen, ob bzw. wie die Vorgaben der CVD-Richtlinie erfüllt werden können. Weiterhin werden die Busunternehmen auf Basis einer solchen Ersteinschätzung in die Lage versetzt, in einen konstruktiven, faktenbasierten Dialog mit den Aufgabenträgern, den Genehmigungsbehörden und den involvierten politischen Gremien zu treten. Ein solcher Dialog wird als unerlässlich erachtet, um ein gemeinsames Verständnis zu erlangen, was eine Umsetzung der CVD-Richtlinie oder ggf. auch eine seitens der Politik und/oder der Aufgabenträger gewünschten Übererfüllung der Anforderungen im Zeichen eines ambitionierten Klimaschutzes bedeutet. Dies gilt hinsichtlich der Ausgestaltung des busbasierten ÖPNV-Angebots als auch den damit verknüpften Kosten.

⁵ Der WBO vertritt die Interessen von rund 350 Omnibusunternehmen in Baden-Württemberg. Zu den Mitgliedern zählen nicht nur private, sondern auch kommunale und staatliche Busunternehmen.

2. Vorgehensweise

Entsprechend der Zielsetzung der Studie wurde ein zweistufiges Vorgehen gewählt (siehe Abbildung 2). Teil A untersucht dabei die „Top-Down“ Perspektive, Teil B die „Bottom-Up“ Perspektive:

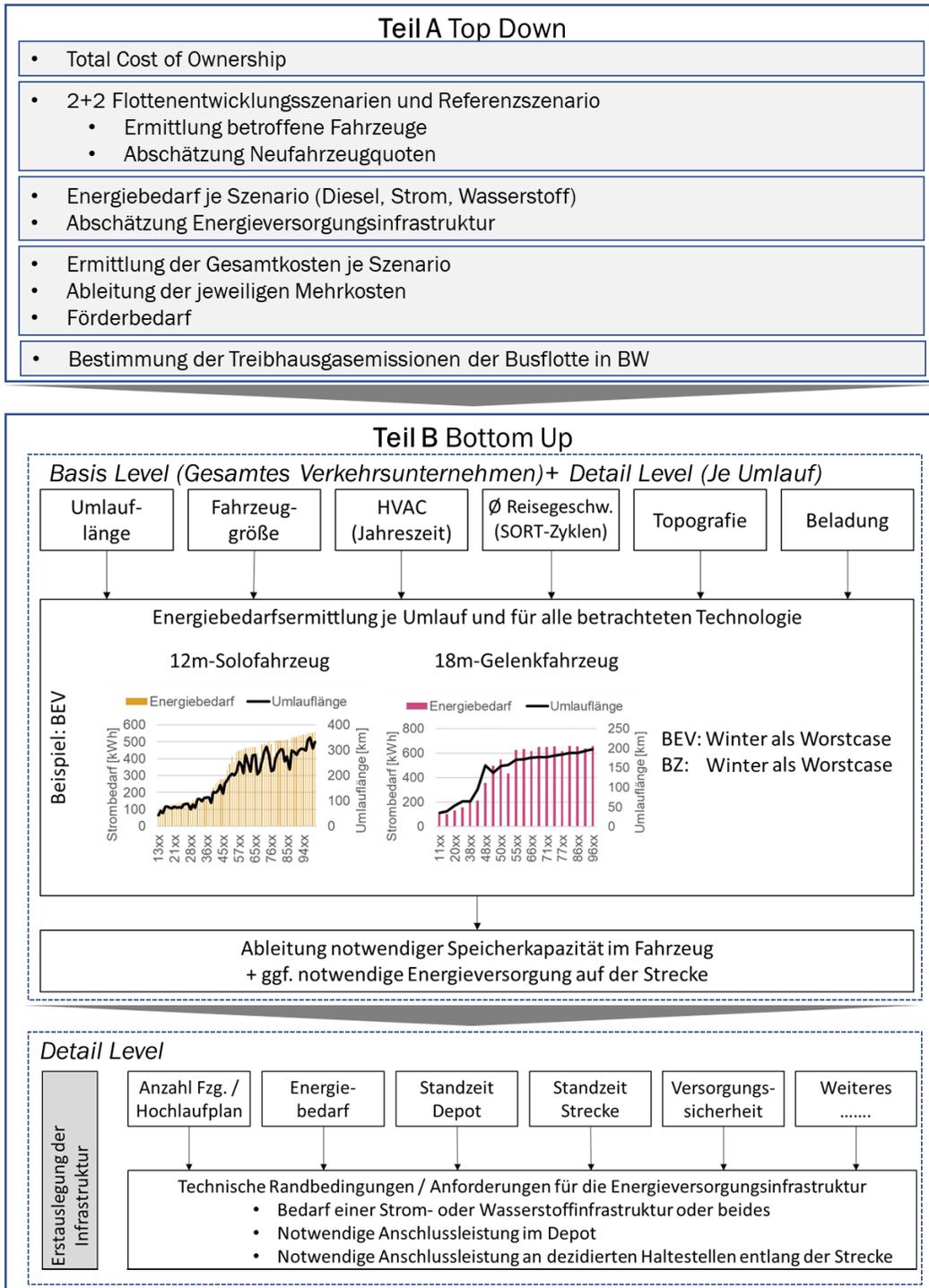


Abbildung 2: Übersicht Vorgehensweise

Teil A

Als Grundlage der untersuchten Flottenentwicklungsszenarien werden zunächst Gesamtbetriebskosten je gefahrenen Kilometern („Total Cost of Ownership“-TCO) der verschiedenen ZEV Technologien (BEV, BZ) für 12 bzw. 18 m Busse und für unterschiedliche Bezugsjahre (2021, 2030 und/oder 2035) ermittelt und mit konventionellen Dieseln als Referenzantriebstechnologie verglichen. Dafür werden Annahmen zu Investitionskosten, Technik, Verbräuchen bzw. Energiebedarfen sowie Energieträgerkosten getroffen, welche später auch für die Ermittlung der Ergebnisse der Flottenszenarien verwendet werden. Weiterhin wird im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse der Einfluss der einzelnen Parameter auf die TCO-Kosten je Antriebstechnologie untersucht.

Nach dem TCO-Vergleich der einzelnen Antriebstechnologien werden für die „Top-Down“ Perspektive zunächst zwei Flottenentwicklungsszenarien für Baden-Württemberg mit unterschiedlichem Ambitionsgraden hinsichtlich der THG Einsparungen gegenüber dem Referenzszenario mit einer reinen Diesel Euro VI Flotte definiert (siehe Kapitel 3.1.4). Im Verlauf der Studie wurden in Abstimmung mit dem Auftraggeber zwei weitere Flottenszenarien entwickelt und analysiert. Basierend auf den Szenarien werden jeweils der Energiebedarf, die Treibhausgas(THG)-Emissionen und die Gesamtkosten ermittelt. Darüber hinaus wird auch der Einfluss eines Flottenzuwachses untersucht.

Teil B

Aus der „Bottom-Up“ Perspektive wird untersucht, wie sich die Umsetzbarkeit der Einführung emissionsfreier Antriebe auf Ebene des einzelnen Busunternehmens in Baden-Württemberg konkret darstellt, sowohl aus technisch-betrieblicher als auch aus wirtschaftlicher Sicht.

Um bewerten zu können, welche Fahrzeug- und Energieversorgungstechnologie oder auch welcher Technologienmix für das jeweilige Busunternehmen die richtige Wahl ist, ist eine dezidierte Analyse des Energiebedarfs unabdingbar.

Im sogenannten „Basis Level“ wird je Busunternehmen zunächst für jeden einzelnen Bus der betrachteten Flotten der tägliche Energiebedarf anhand des mittleren Verbrauchs (kWh Strom oder kg H₂ je km) im Winter unter Berücksichtigung der gewichteten Durchschnittsgeschwindigkeit und der jeweiligen Umlauflänge sowie des mittleren Topografieprofils des Landkreises⁶, in dem die vom Busunternehmen bedienten Umläufe liegen, ermittelt. Die Durchschnittsgeschwindigkeit und Umlauflänge wird von den einzelnen Busunternehmen umlaufbezogen zur Verfügung gestellt. Dabei wird auch die individuelle Flottenzusammensetzung der von den Busunternehmen aktuell eingesetzten Gefäßgrößen und der Anzahl Busse je Gefäßgröße berücksichtigt. Für die Beladung wird eine mittlere Auslastung von 20% zugrunde gelegt.

Um den Energiespeicher im Fahrzeug und die Energieversorgungsinfrastruktur im Betriebshof sowie bei Bedarf auf der Strecke bezüglich Kapazität und Anzahl ausreichend zu dimensionieren, ist eine Worst Case Betrachtung erforderlich. Diese stellt einen zuverlässigen Betrieb auch unter (energetisch) widrigen Umständen sicher, d.h. es wird der Einsatzfall mit dem maximalen Energiebedarf untersucht. Dies ist sowohl für BEV als auch für BZ-Busse im Winter bei niedrigen Temperaturen der Fall, da hier der zusätzliche Energiebedarf für die Fahrer- und Fahrgastheizung am größten ist, zumindest unter den in Baden-Württemberg vorherrschenden klimatischen Bedingungen. Bei den BEV-Bussen werden daher neben der Batteriealterung über die Zeit auch zwei unterschiedliche Heizkonzepte untersucht, einmal mit brennstoffbasierter Zusatzheizung und einmal mit rein elektrischer Heizung. Während die brennstoffbasierte Zusatzheizung hinsichtlich der Reichweite vorteilhaft ist, ist ihr Betrieb mit Schadstoffemissionen (z.B. NO_x und PM) und abhängig vom eingesetzten Brennstoff mit Treibhausgasemissionen verknüpft, während die rein elektrische Fahrzeugheizung einen lokal

⁶ Hierzu wurden vom Regierungspräsidium Tübingen die Längsneigung sämtlicher Kreis-, Landes- und Bundesstraßen zur Verfügung gestellt.

vollständig emissionsfreien Betrieb ermöglicht, allerdings gerade bei niedrigen Temperaturen zu Lasten der Reichweite.

Im Detaillevel wird darüber hinaus für die beiden untersuchten Busunternehmen für jeden Umlauf der spezifische Verbrauch im Winter anhand der spezifischen Geschwindigkeit und dem Höhenprofil ermittelt. Außerdem wird die Energieversorgungsinfrastruktur ausgelegt. Für die Ladeinfrastruktur (LIS) und die Tankinfrastruktur (TIS) sind neben der Anzahl der Fahrzeuge und des Energiebedarfs auch Standzeiten und Versorgungssicherheit relevant. Dabei ergeben sich verschiedene technische Anforderungen an den Betriebshof, die untersucht werden müssen. Maßgeblich zu berücksichtigen sind die Anschlussleistung bzw. der Wasserstoffspeicherbedarf und der Flächenbedarf der Energieversorgungsinfrastruktur.

Als Ergebnisgrößen wird der umstellbare Anteil der Flotte sowie die damit verknüpften Energiebedarfe ausgewertet. Die in Teil B erfolgten Auslegungen werden hinsichtlich ihrer Investitionskosten und potentiellen THG-Emissionseinsparungen bewertet.

3. Ergebnisse

3.1 Ergebnisse Teil A: Flottenszenarien für Baden-Württemberg (Top-Down)

3.1.1 Technikannahmen und Energiebedarf

In Abhängigkeit von der Fahrzeuggröße und der Antriebsart ergeben sich unterschiedliche Verbrauchswerte. Tabelle 1 stellt die Verbrauchswerte der verschiedenen Antriebstechnologien dar. Dabei handelt es sich um den SORT3 Verbrauch. Diesem liegt eine durchschnittliche Geschwindigkeit von 25 km/h und keine Wendezeiten zu Grunde. Außerdem wird der BEV-Bus mit vollelektrischer Heizung betrieben.

Tabelle 1: Verbrauchswerte

Verbrauch	Diesel [l/ 100 km]	BEV [kWh/km]	BZ [kg H2/ 100 km]
12 m	36,0	1,7	9,2
18 m	47,4	2,1	10,2

3.1.2 Kostenannahmen

Die für die ökonomische Bewertung der einzelnen Szenarien genutzten Grundannahmen werden in Tabelle 2 dargestellt. Dabei wird der gesamte Lebenszyklus der Fahrzeuge bestehend aus Fahrzeugbeschaffung, -betrieb (Fahrpersonal, eingesetzter Energieträger, Wartung/ Instandhaltung, Versorgungsinfrastruktur (Energie, Werkstatt)) und Restwert für die Bewertung berücksichtigt.

Tabelle 2: Kostenannahmen

Parameter	Beschreibung
Haltedauer Fahrzeuge	12 Jahre für Szenarien /10 Jahre für Vergleich Bustechnologien ⁷
Jährliche Laufleistung je Bus	<ul style="list-style-type: none"> ○ 60.000 km (Diesel, CNG, BZ) ○ 51.800 km (BEV): Die niedrigere jährliche Leistung für BEV ergibt sich aus Fahrzeugmehrbedarf von 20% gegenüber Diesel, sowie 3% Mehrkilometer durch zusätzlich nötige Zu- und Abfahrten vom Betriebshof
Kosten Fahrpersonal	40 €/h (inkl. Gemeinkosten), (50-60 % Anteil an den TCO Kosten des Busbetriebs)
Kapitalkosten	1.5 % Zinsen

⁷ Auf Grund der vorliegenden Daten aus den Beispielunternehmen wird für den TCO-Vergleich der niedrigere Wert genommen. Bei der Flottenbetrachtung wird angenommen, dass die Busse vor Ablauf der Haltedauer von einem anderen Busunternehmen übernommen werden können und so eine Haltedauer von 12 Jahren erreichen.

Für die Fahrzeuginvestitionen werden die in Tabelle 3 beschriebenen Kosten je Bus angenommen. Dabei sind die heutigen Investitionen für BZ-Hybridbusse über alle Antriebstechnologien hinweg am höchsten.

Tabelle 3: Fahrzeuginvestitionen

Kosten je Bus heute	Solobus (12m)	Gelenkbus (18m)
Diesel Euro VI	230 k€	320 k€
CNG Euro VI	260 k€	360 k€
BEV	560 k€	710 k€
BZ Hybrid	595 k€	850 k€

Ein bedeutender Kostentreiber bei den Investitionen sind für BZ-Busse die Brennstoffzelle und für die BEV-Busse die Batterien. In Zukunft wird hier eine Kostendegression mit der Zeit, wie in Abbildung 3 dargestellt, angenommen. Auf Basis einer Reduktion von 9% pro Jahr der BZ (heute: 1.500 €/kW) und der Batteriekosten (heute: 700 €/kWh) erfolgt eine Reduktion des Fahrzeugpreises. Dabei wird eine Kapazitätserweiterung der Batterie bei den BEV-Bussen auf Grund von höheren Energiedichten im Jahr 2025 angenommen.

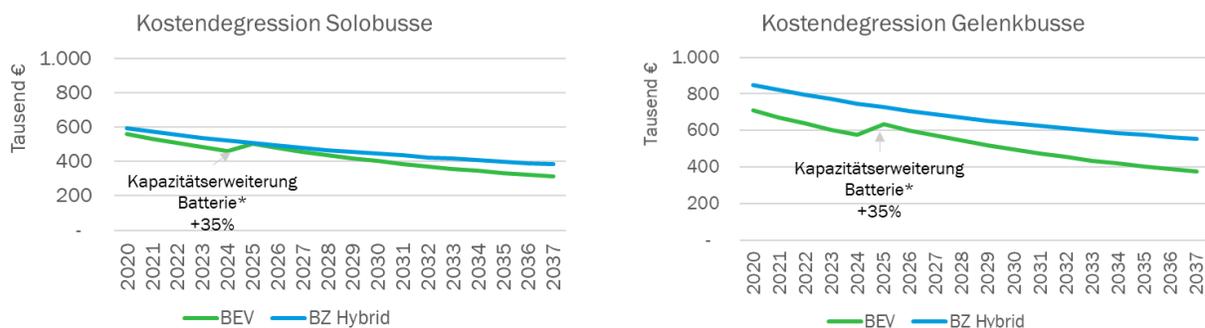


Abbildung 3: Kostendegression BEV und BZ-Busse

Die Kaufpreise von Diesel und CNG Bussen werden als konstant in der Zeit betrachtet.

Für den Betrieb von BEV-Bussen wird eine entsprechende Ladeinfrastruktur (inkl. bedarfsgerechtem Netzanschluss) benötigt. Auch für BZ-Busse erfordert es eine entsprechende Betankungsinfrastruktur. Zur Berücksichtigung der Infrastrukturkosten wird der Infrastrukturbedarf für je 50 Busse zu Grunde gelegt und dann in Abhängigkeit von der Flottengröße linearisiert.

Durch den Fahrzeugmehrbedarf bei BEV besteht Bedarf von zusätzlicher Betriebshoffläche zum Abstellen der Busse. Aber auch die Energieversorgungsinfrastruktur erhöht die benötigte Betriebshoffläche. Dafür werden Investitionen von ca. 50 Mio.€ für einen Betriebshof mit rund 100 Bussen angenommen. Dies entspricht Kosten von 0,5 Mio.€ pro Bus. Betriebshofflächenmehrbedarf wurde nur in den Flottenbetrachtungen, nicht jedoch im Technologie- bzw.- TCO-Vergleich beachtet. Die benötigte Betriebshoferweiterung für die zusätzlichen Busse bis zum Zieljahr wird gleichmäßig über die Jahre verteilt angenommen (ab 2024, in 2024 und 2025 noch reduziert).

Basierend auf den heutigen Werten für die einzelnen Kraftstoffe (0,19 €/kWh, 9,50 €/kg H₂, 1,04 /l Diesel) wird die in Abbildung 4 dargestellte Preisentwicklung angenommen.

Der EEG-Umlage wird eine dynamische Entwicklung zu Grunde gelegt (2022/2024/2026/2028/2030/2035-2050: 3,7/4,0/3,4/2,4/1,5/0,3 ct/kWh)⁸. Weiterhin reduziert sich ab 2023 die EEG-Umlage für Busunternehmen mit elektrisch betriebenen Bussen um 80 % auf Grund der EEG Novelle 2021. Für das Jahr 2022 endete die gesetzlich materielle Ausschlussfrist für alle Busunternehmen am 30.09.2021.

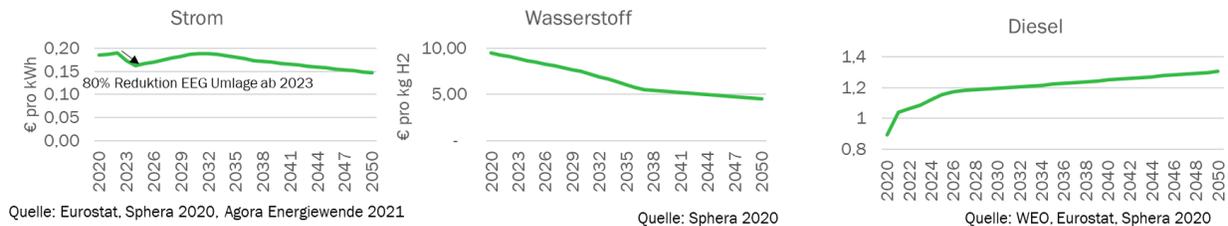


Abbildung 4: Kostenentwicklung Energieträger

3.1.3 Total-Cost-of-Ownership-Vergleich Antriebstechnologien

Basierend auf den beschriebenen Technik- und Kostenannahmen können die Total-Cost-of-Ownership (TCO)⁹ für die verschiedenen Antriebstechnologien bestimmt werden. Da es sich um einen reinen Kostenvergleich auf Fahrzeugbasis handelt, werden die Kosten für den Betriebshofflächenmehrbedarf nicht berücksichtigt.

Abbildung 5 stellt die TCO der einzelnen Bustechnologien im Anschaffungsjahr 2021 dar. Die TCO für einen 12 m Bus betragen in 2021 bei Dieseltrieb 3,5 €/km¹⁰, bei Batteriebetrieb 4,6 €/km und bei BZ-Betrieb 4,8 €. Dies entspricht bei 12 m Bussen Mehrkosten gegenüber Dieseln von 33 % bei BEV-Bussen und 37% bei BZ-Bussen. Während die Kosten für Dieselfahrzeuge in den Jahren konstant bleiben, sinken die TCO für BEV und BZ-Busse. Somit sinkt der Kostenvorteil von 12 m Dieseln gegenüber BEV-Bussen in 2030 gegenüber BEV-Bussen auf 22 % und gegenüber BZ-Bussen auf 21 %. Bis zum Jahr 2035 sind 12 m BEV-Busse noch rund 16 % und BZ-Busse noch rund 17 % teurer als vergleichbare Dieseln. Die geringsten Mehrkosten entstehen beim Betrieb von 18 m BEV-Bussen.

Dabei sind über die gesamte Analyse hinweg die Kosten für das Fahrpersonal der größte Kostenpunkt mit 2,2 €/km und einem Kostenanteil von rund 50 % bis 60 %. Bei den BEV-Bussen wird auch der erforderliche Fahrzeugmehrbedarf auf Grund der kürzeren Reichweiten berücksichtigt. Dieser beträgt rund 0,3 €/km. Der Einfluss des angenommenen CO₂-Preises auf die TCO von Dieselfahrzeugen liegt unter 0,1 €/km.

⁸ Agora Energiewende EEG Rechner (Okt 2021)

⁹ Anfallende Kosten über den gesamten Lebenszyklus hinweg.

¹⁰ Derzeitig niedrigere Kostensätze, wie sie im Rahmen aktueller Vergaben zum Teil abgegeben werden, lassen den Schluss zu, dass diese nur bedingt nachhaltig sind und zu Lasten der Substanz der Unternehmen gehen.

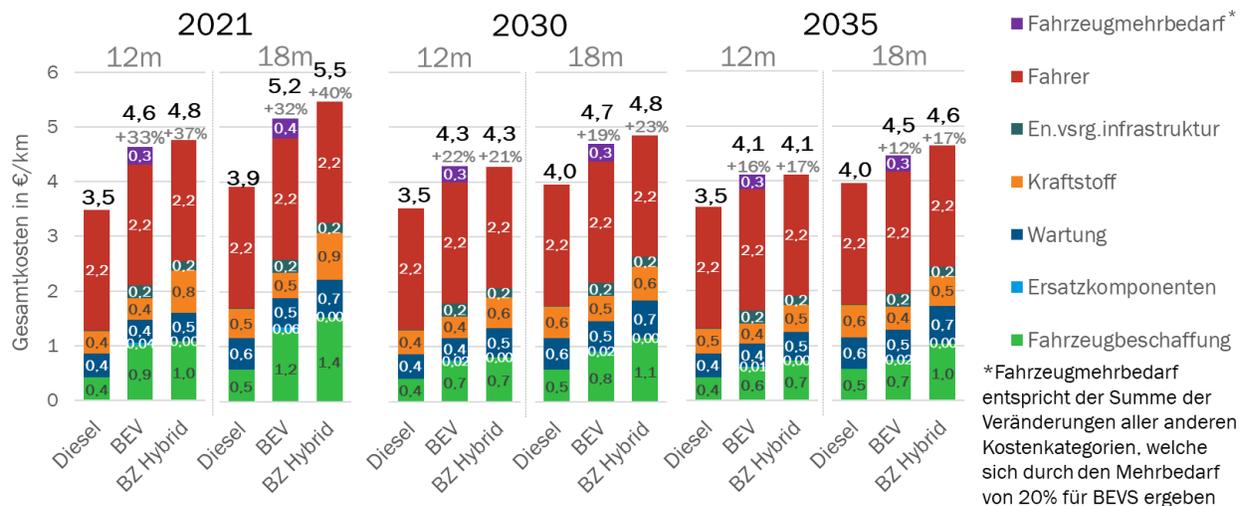


Abbildung 5: TCO Vergleich für 12 und 18 m Diesel-, BEV- und BZ-Busse in 2021, 2030 und 2035.

Förderung der Investitionskosten

Den gezeigten Untersuchungen liegt die Annahme zu Grunde, dass die Fahrzeug- und Infrastrukturinvestitionskosten keinerlei Förderung beinhalten. Derzeit können mit der Bundesförderung¹¹ 80 % der Fahrzeug-Mehrinvestitionskosten gefördert werden. Da die volle Höhe vermutlich nicht von allen Unternehmen in Anspruch genommen werden kann, liegt der nachfolgenden Analyse eine 70 %-Förderung der Mehrkosten gegenüber Dieselfahrzeugen zu Grunde.

Neben den Fahrzeugkosten wird in der folgenden Analyse auch eine Förderung der Infrastrukturinvestitionskosten von 70 % durch das Land Baden-Württemberg berücksichtigt. Im Rahmen des Landesgemeindeverkehrsfinanzierungsgesetz (LGVFG) können hier derzeit bis zu 75% der nach dem LGVFG zuwendungsfähigen Infrastrukturinvestitionskosten gefördert werden. Der Regelfördersatz liegt bei 50 %. Ein erhöhter Fördersatz von 75 % kann insbesondere bei besonders klimafreundlichen Maßnahmen der Förderung zugrunde gelegt werden. Derzeit wird geprüft, ob Maßnahmen, die die Errichtung von Ladeinfrastruktur zum Gegenstand haben, regelmäßig als besonders klimafreundlich eingestuft werden können. Zudem sind die beihilferechtlichen Voraussetzungen zu beachten. Derzeit kann eine Förderung von Verkehrsunternehmen bei Maßnahmen an Betriebshöfen nur auf Grundlage eines öffentlichen Dienstleistungsauftrags erfolgen. In den folgenden Berechnungen wird ein Fördersatz von 70 % im Sinne einer stark vereinfachten Betrachtung angenommen.

Neben der Infrastrukturförderung fördert das Land die Beschaffung von Linien- und Bürgerbussen. Es ist vorgesehen, im Rahmen der Richtlinie Busförderung 2022 ff. des Landes, die derzeit erarbeitet wird, umweltbedingte Mehrkosten mit bis zu 60 % zu fördern.

¹¹ Das BMDV fördert über die aktuelle Busförderrichtlinie neben der Beschaffung von Bussen auch die Errichtung der benötigten Infrastruktur zur Energieversorgung (excl. Netzanschluss) und Wartung der Busse

(https://www.ptj.de/lw_resource/datapool/systemfiles/cbox/7952/live/lw_bekdoc/foerderrichtlinie_bus_070_92021.pdf). Förderfähig sind diejenigen Mehrausgaben für die Infrastruktur, die durch die Beschaffung von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben gegenüber dem Einsatz konventioneller Technologie bedingt sind. Fördersatz: 40 %, bei KMU bis zu 60 %.

Die derzeit existierenden Fördermaßnahmen vom Bund oder auf Landes- und kommunaler Ebene weichen teilweise etwas davon ab, entsprechen aber im Wesentlichen den hier getroffenen Annahmen.

Durch die Fahrzeugförderung sinken die Kosten für ZEVS, während die Kosten für Dieselbusse konstant bleiben wie in Abbildung 6 und Abbildung 7 dargestellt. In 2021 reduzieren sich die Kosten der Fahrzeugbeschaffung für ZEVs von 0,9–1,4 €/km auf 0,5–0,8 €/km. Die Infrastrukturförderung führt zu einer Reduktion der Infrastrukturkosten von rund 0,2 €/km auf rund 0,1 €/km. Die Kombination von beiden Fördermaßnahmen ermöglicht eine Reduktion der Gesamtmehrkosten für ZEVs gegenüber Dieselfahrzeugen von 32–40 % auf 13–23 %. Dabei sind die Mehrkosten für 18 m BEVs am niedrigsten.

Werden die gleichen Fördersätze für die Beschaffung von ZEVs im Jahr 2030 angenommen, sinken die Mehrkosten von ZEVs von 0,7–1,1 €/km auf 0,5–0,7 €/km. Die Auswirkungen der Förderung bei den Infrastrukturkosten bleibt im Vergleich zum Anschaffungsjahr 2021 nahezu konstant. Insgesamt sinken die die Mehrkosten der ZEVs gegenüber Dieselfbussen mit beiden Fördermaßnahmen von 19–23 % auf 8–10 %.

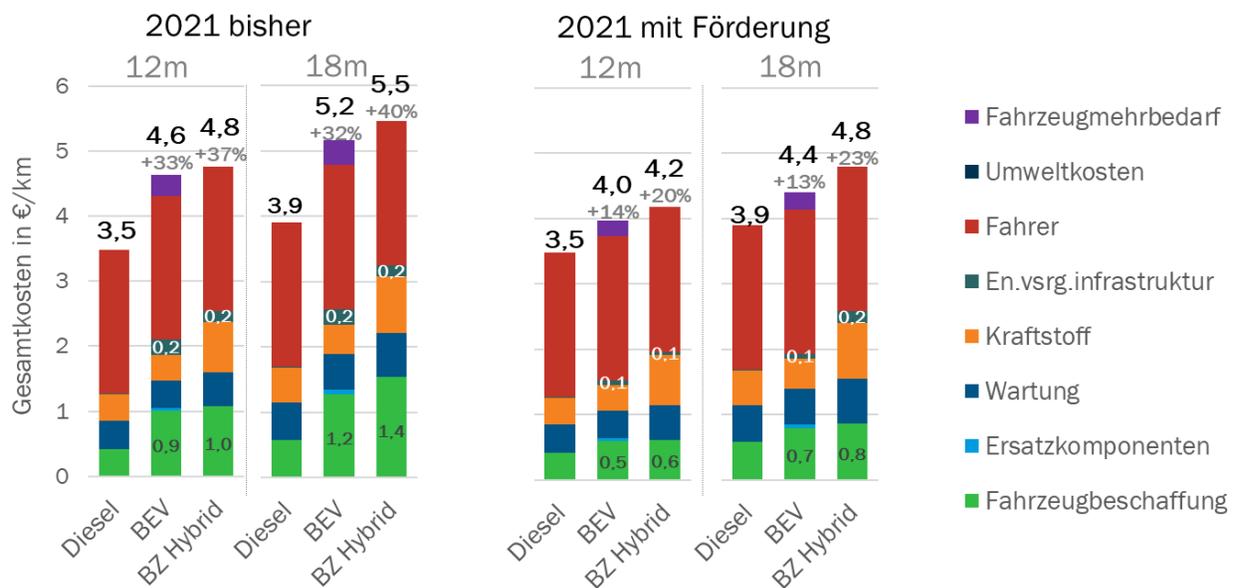


Abbildung 6: TCO Vergleich 12 und 18 m Diesel-, BEV- und BZ-Busse ohne und mit Förderung in 2021

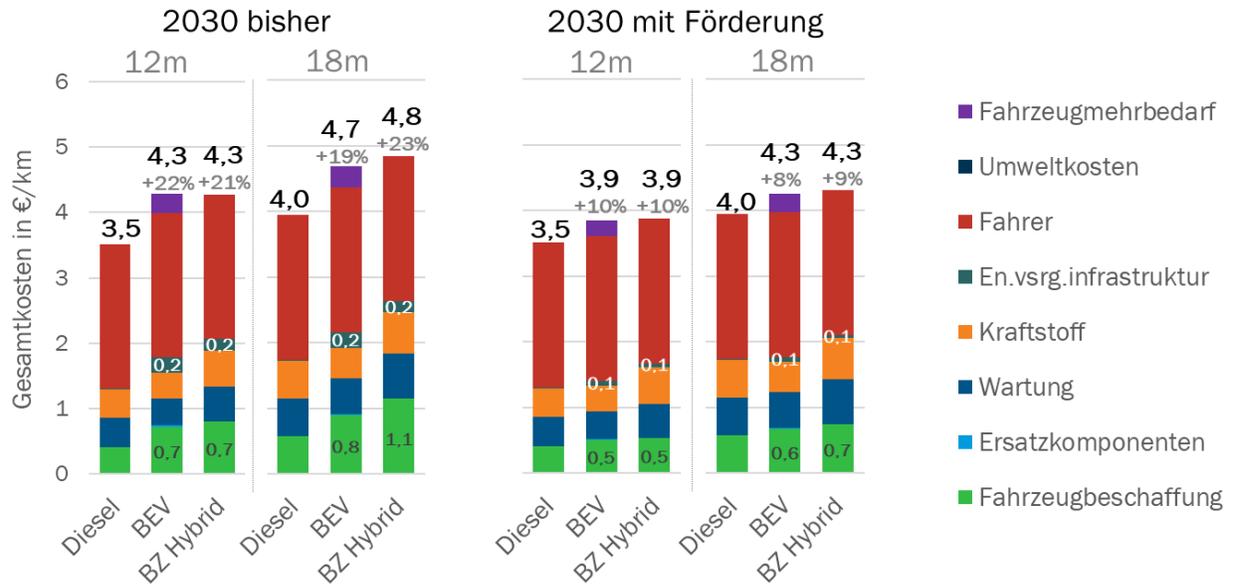


Abbildung 7: TCO Vergleich 12 und 18 m Diesel-, BEV- und BZ-Busse ohne und mit Förderung in 2030

Fahrzeugmehrbedarf

Abbildung 8 und Abbildung 9 stellen die Auswirkungen des Fahrzeugmehrbedarfs um $\pm 10\%$ gegenüber dem Basiswert von 20% in den Anschaffungsjahren 2021 und 2030 dar. Die Variation von $\pm 10\%$ bewirkt eine Veränderung der Gesamtkosten der BEV-Busse von $\pm 0,1\text{ €/km}$. Somit wirken sich unterschiedlichen Annahmen zum Fahrzeugmehrbedarf nur geringfügig auf die Gesamtkosten aus.

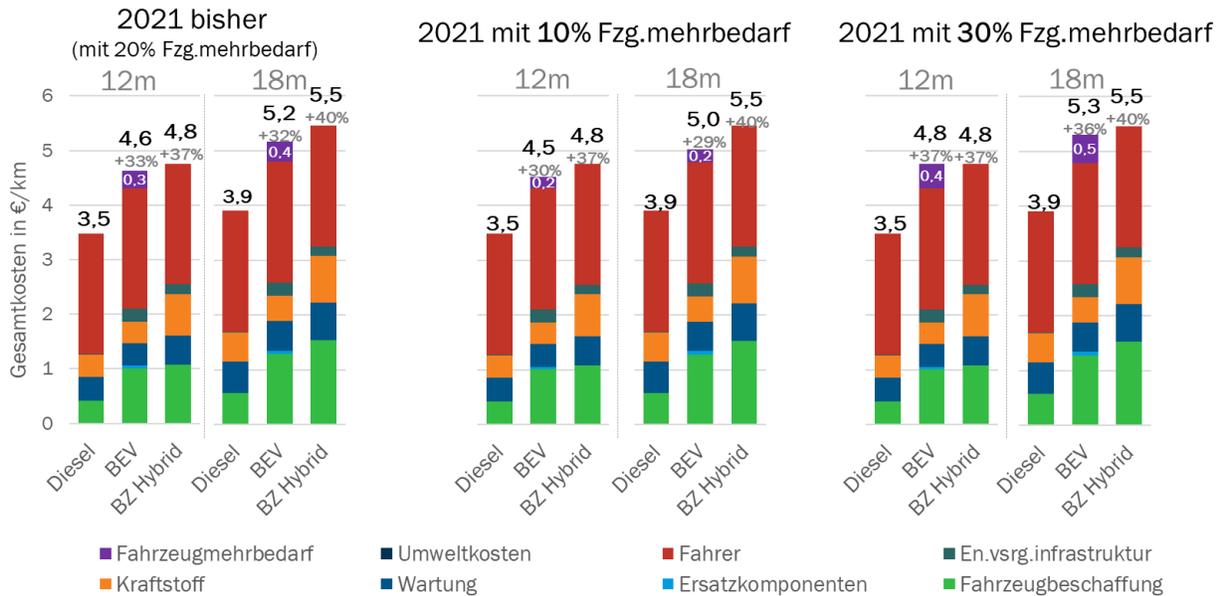


Abbildung 8: TCO Vergleich 12 und 18 m Diesel-, BEV- und BZ-Busse in Abhängigkeit Fahrzeugmehrbedarf in 2021

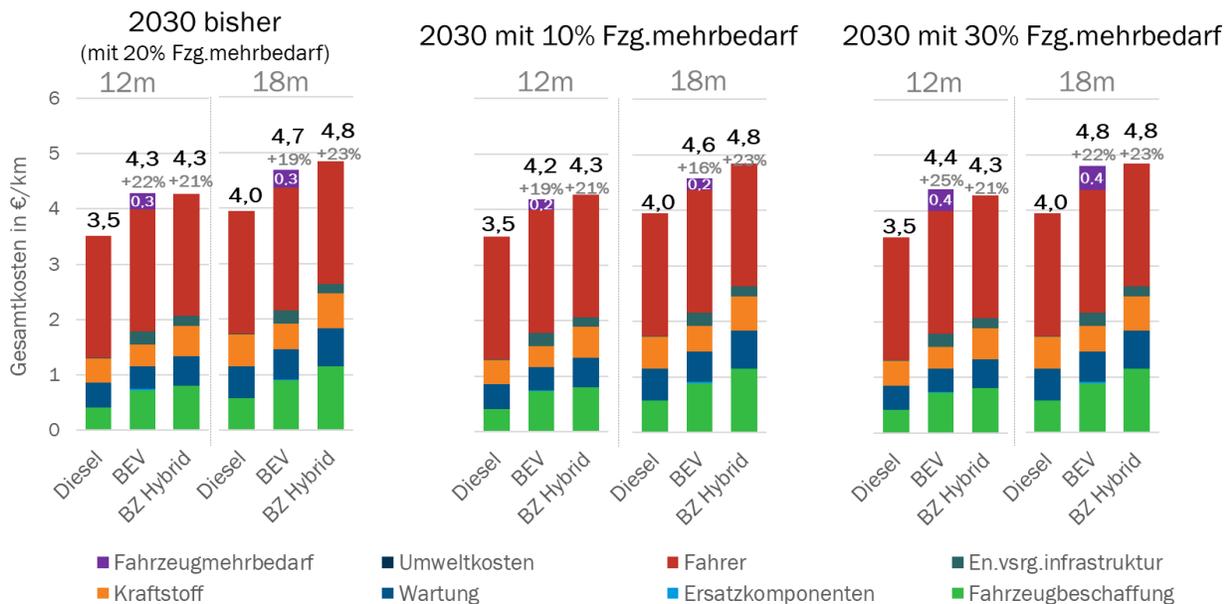


Abbildung 9: TCO Vergleich 12 und 18 m Diesel-, BEV- und BZ-Busse in Abhängigkeit Fahrzeugmehrbedarf in 2030

Fahrzeugkosten

Weitere Parameter mit Einfluss auf die Gesamtkosten sind die Annahmen für die Fahrzeugkosten. Werden für BEV und BZ Busse sinkende Anschaffungskosten unterstellt (siehe Abbildung 3 und Abbildung 10), werden beim Dieselbus zunächst konstante Anschaffungskosten angesetzt. Vor dem Hintergrund sinkender Stückzahlen und erwarteter Mehrkosten für die Erfüllung der in Vorbereitung befindlichen Euro VII Norm wird daher angenommen, dass sich bis 2035 eine Kostenparität zwischen Diesel und BEV-Bussen einstellt (siehe Abbildung 10).

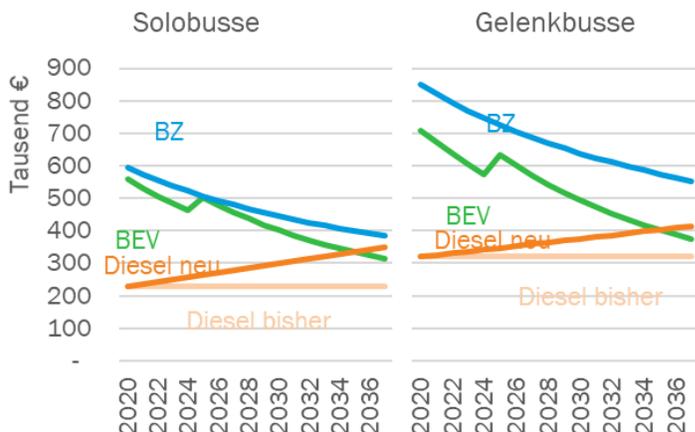


Abbildung 10: Entwicklung Anschaffungskosten 12 und 18 m Diesel-, BEV und BZ Busse mit Kostenparität Diesel-BEV in 2035

Dies führt zu sinkenden Gesamtmehrkosten, aber noch nicht zu Gesamtkostenparität wie Abbildung 11 zeigt. Die Gesamtmehrkosten für BEV- Busse gegenüber Dieselbussen sinken von 12-17 % auf 8-13 %. Die Investitionen für BZ-Busse liegen dennoch weiterhin über denen der Dieselbusse. Bei den 12 m Bussen beträgt die Kostendifferenz 65 k€, während sie bei den 18 m Bussen 170 k€ beziffert. Die Mehrkosten von BZ-Bussen sinken von 17 % auf 11-13 %. Bei einer Änderung der Rahmenbedingungen der BZ Herstellung könnten die BZ Investitionen deutlich geringer ausfallen.

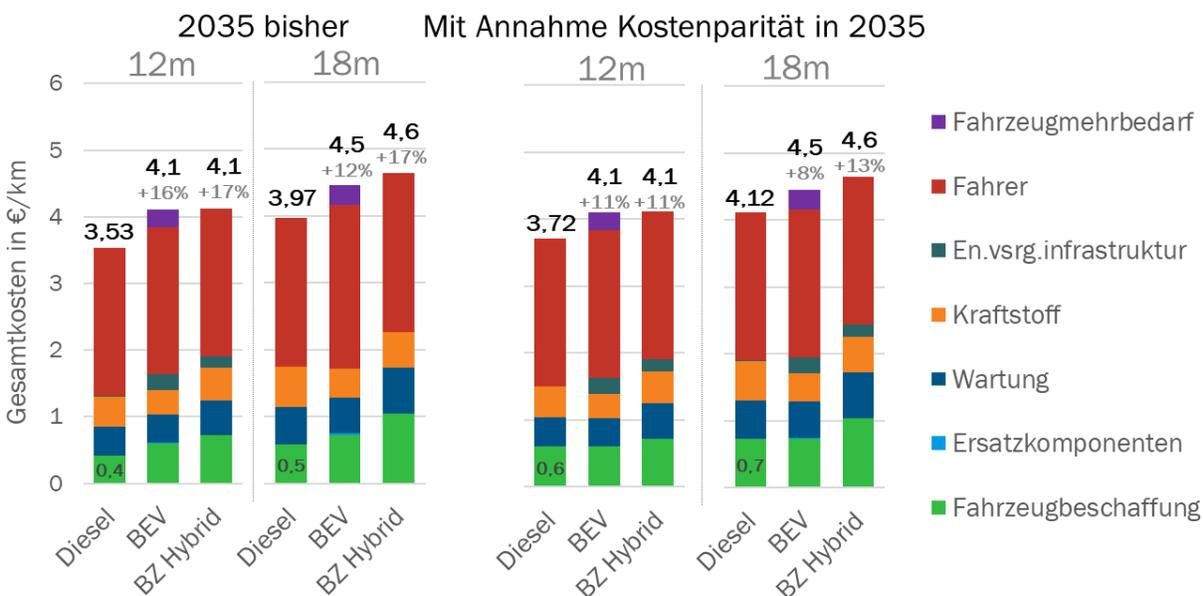


Abbildung 11: TCO Vergleich 12 und 18 m Diesel-, BEV- und BZ-Busse mit Kostenparität Diesel-BEV in 2035

CO₂ Preis

Bisher steigen die Umweltkosten innerhalb der Kraftstoffkosten auf 60 €/t CO₂ in 2026, danach sind sie konstant. Wie in Abbildung 12 dargestellt, steigen in der folgenden Analyse die Umweltkosten im Jahr 2030 auf 180 €/t CO₂ und verlaufen dann konstant. Mit höheren CO₂-Kosten steigen die Dieselpreise auf etwa 1,50 €/l in 2030, wobei der Anteil des CO₂ Preises auf 32 % ansteigt. Bedingt durch die höheren CO₂ Kosten steigen die Kraftstoffkosten für Dieselbusse um 0,1-0,2 €/km. Dies führt zu einer Reduktion der Gesamtmehrkosten der ZEV gegenüber Dieselbussen von 19-23 % auf 14-18 % (siehe Abbildung 13).

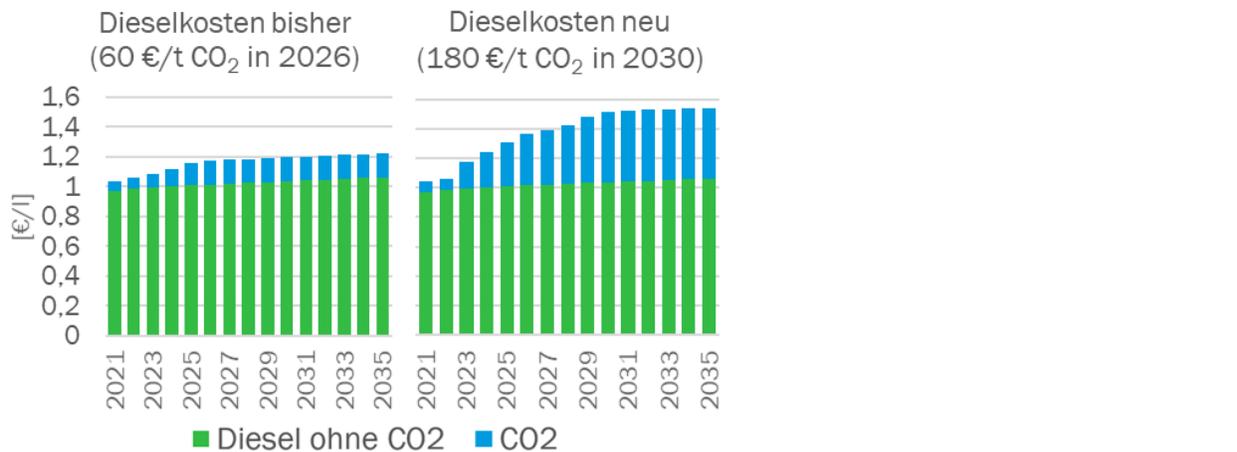


Abbildung 12: Entwicklung Dieselpreisen in Abhängigkeit Entwicklung CO₂ Preis

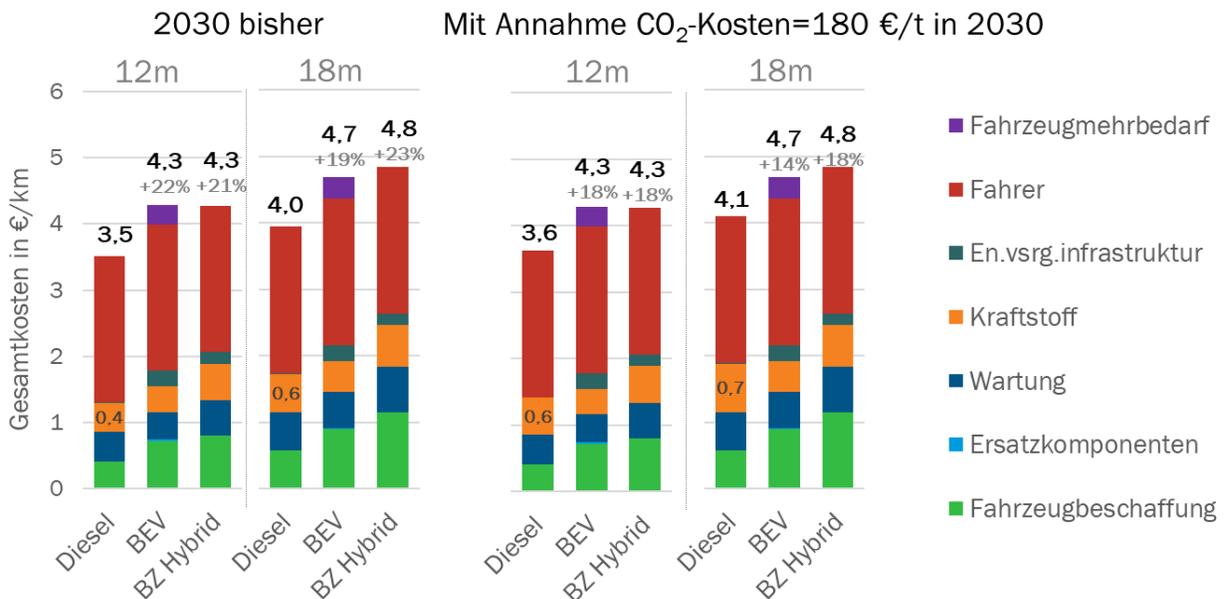


Abbildung 13: TCO Kosten in 2030 in Abhängigkeit Variation CO₂ Preis

Um Kostenparität zu erreichen, müsste für 12 m Busse der CO₂ Preis auf rund 850 €/t CO₂ beziehungsweise für 18 m Busse auf rund 700 €/t CO₂ ansteigen. Wird bei den BEVs kein Fahrzeugmehrbedarf benötigt, wird der Kosten-Breakeven bereits bei ~ 550 €/t CO₂ für 12 m bzw. ~ 400 €/t CO₂ für 18 m Busse erreicht.

Bezugskosten Strom und Wasserstoff (H₂)

Abbildung 14 stellt den Einfluss von Strom- und Wasserstoffpreisänderungen dar. Eine Änderung der Stromkosten um ± 2 ct/kWh führt zu einer TCO Kostenanpassung bei 12 m Bussen von ± 4 ct/km und bei 18 m Bussen von ± 5 ct/km. Wird der Wasserstoffpreis um ± 1 €/kg variiert, ändern sich die Preise der 12 m Busse um etwa ± 9 ct/km und die Preise der 18 m Busse um rund ± 10 ct/km.

Bezogen auf die die gesamten TCOs der ZEVS von etwa 4 bis 5,5 €/km führt die oben beschriebene Variation der Energieträgerkosten zu relativ geringen Änderungen von etwa $\pm 2,5$ %.

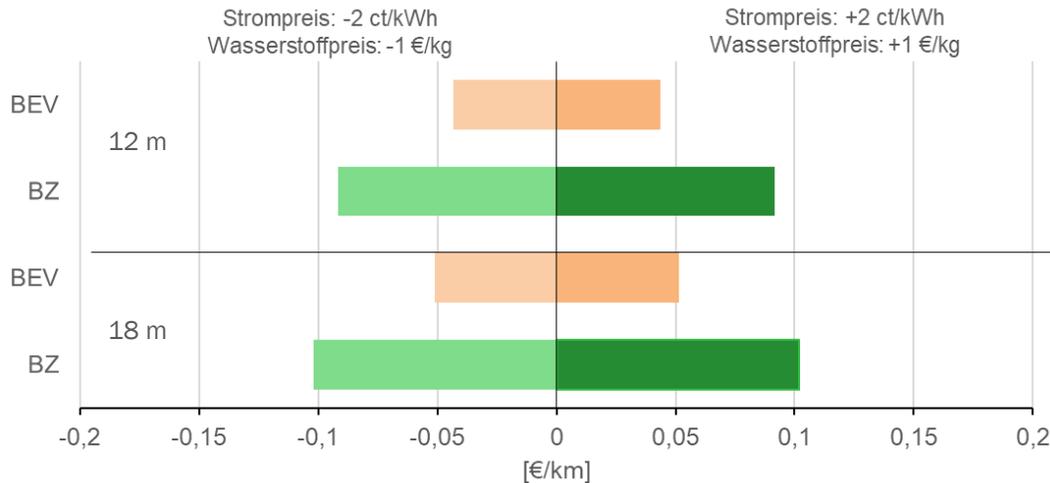


Abbildung 14: TCO Kosten Variation 12 und 18m BEV und BZ Busse in Abhängigkeit Energieträgerkosten

Wie Abbildung 15 verdeutlicht, führt die Förderung von Fahrzeugen und Infrastruktur zur höchsten Reduktion der Mehrkosten von ZEV gegenüber Dieselfahrzeugen. Die Förderung ermöglicht eine Verringerung von über 50 % der Mehrkosten sowohl in 2021 als auch in 2030. CO₂ Kosten von 180 €/t CO₂ reduzieren die Mehrkosten von ZEV gegenüber Dieselfahrzeugen um rund 17 % in 2030. Eine Kombination der beiden Maßnahmen reduziert die ZEV-Mehrkosten um rund 75 % in 2030.

Dahingegen wirken sich die Änderung des Fahrzeugmehrbedarfs und die verringerten Energieträgerkosten mit 7 % und 9 % auf die Mehrkosten gegenüber Dieselfahrzeugen aus. Wird in 2035 Kostenparität zwischen den Investitionen von ZEVs und Dieselfahrzeugen erreicht, sinken die Mehrkosten um rund 29 %.

Werden die genannten Maßnahmen kombiniert, ermöglicht dies eine Reduktion der ZEV-Mehrkosten um rund 90 %.

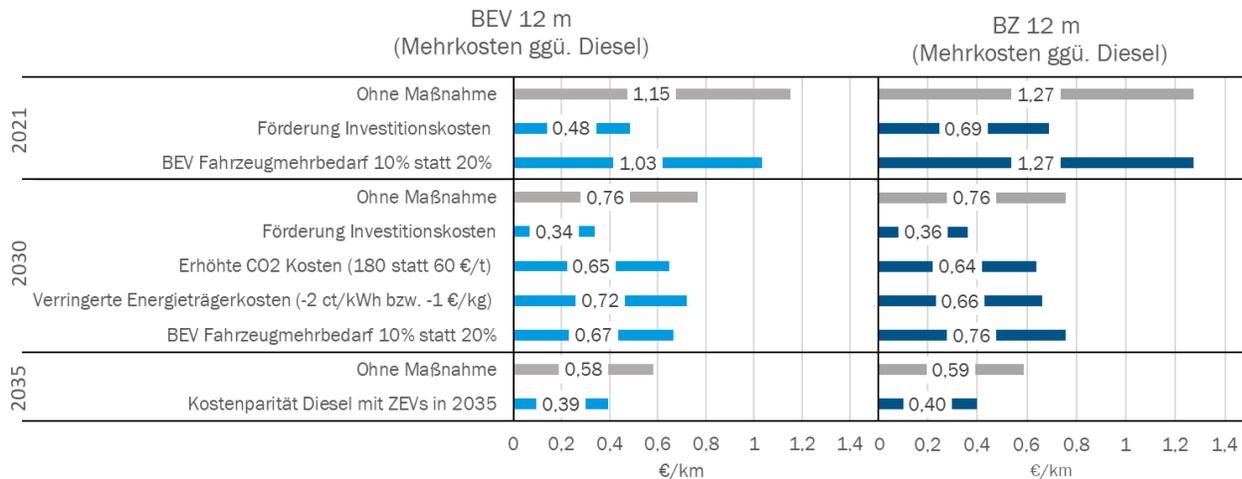


Abbildung 15: Sensitivitätsanalyse TCO

3.1.4 Definition der Flottenszenarien

Um die Auswirkungen verschiedener Ambitionen auf die Treibhausgasemissionen der Busflotten in Baden-Württemberg zu bestimmen, werden vier Szenarien erstellt:

- **Szenario 1** („Umsetzung CVD“) besitzt einen minimalen Ambitionsgrad und stellt nur die Umsetzung der CVD sicher. Der Anteil emissionsfreier Busse an Neubeschaffungen beträgt somit 22.5% bis inklusive 2025 und 32.5% ab 2026.
- **Szenario 2 und 3** („Klimaneutralität bis 2032“) stellen ein ambitioniertes Klimaschutzszenario dar und erreichen eine klimaneutrale Flotte bis 2032. Im Jahr 2022 werden zu 50 % emissionsfreie Busse beschafft. Bereits ab 2023 sind die Neubeschaffungen zu 100 % emissionsfrei. Mit diesen Neubeschaffungen besteht die Flotte 2030 bereits zu 90 % aus klimaneutralen Bussen. Die beiden Szenarien werden anhand der Kostenannahmen unterschieden (siehe Kapitel 3.1.2).
- **Szenario 4** („Klimaneutralität bis 2040“) erreicht Klimaneutralität bis 2040. Der ZEV Anteil an Neubeschaffungen ist bis 2030 mindestens CVD konform. Ab 2030 werden nur noch 100 % ZEV beschafft.

Zusätzlich dazu wird auch ein Referenzszenario **Szenario 0** mit einer reinen Dieselflotte gegenübergestellt. Die einzelnen Szenarien werden ohne Flottenwachstum untersucht. Die Auswirkung eines möglichen Flottenwachstums wird in einem eigenen Abschnitt behandelt. Für die Szenarien 1 -3 wird als Zieljahr 2032 angegeben. Die Betrachtung in **Szenario 4** erfolgt bis zum Jahr 2040. Das Fahrplanangebot wird dabei als konstant angenommen, d.h. es wird kein Flottenwachstum aufgrund einer Angebotserweiterung berücksichtigt. In Kapitel 3.1.9 wird der Einfluss einer jährlichen Angebotsausweitung und dem damit verknüpften Flottenzuwachs von 2,5% p.a. analysiert.

Des Weiteren werden die in Tabelle 4 dargestellten Annahmen getroffen, um die Flottengröße je Antriebstechnologie zu bestimmen.

Tabelle 4: Annahmen Flottenszenarien

Parameter	Beschreibung
BEV Nachladekonzept	Mischung aus Depot- und Gelegenheitsladung
BEV Antriebstechnologie Fahrzeugmehrbedarf vs. Diesel	Bei BEV's sind die Reichweiten systembedingt limitiert, daher können BEV auf kurzen Umläufen Dieselbusse 1:1 ersetzen. Sind längere Umläufe zu bedienen, ist das Fahrzeug im Falle des

Parameter	Beschreibung
	Depotladekonzepts untertägig zu tauschen, dadurch ergibt sich umlaufplanabhängig ein Mehrbedarf, der >>30% sein kann. Im Fall der Gelegenheitsladung ergibt sich üblicherweise auch ein geringfügiger Mehrbedarf (ca. 10%). Somit wird mit einem Zuwachs von + 20 % (1 Dieselfahrzeug wird mit 1,2 BEV Fahrzeugen ersetzt) gerechnet.
BZ Antriebstechnologie Fahrzeugmehrbedarf vs. Diesel	± 0% (1 Dieselfahrzeug wird mit 1 BZ Fahrzeug ersetzt)
Anteil BZ an klimaneutralen Antriebstechnologien	Dynamisiert: 2022: 5%, 2023: 6,5%, 2024 8%, 2025: 10%, 2026 12%, 2027 14%, 2028 16%, 2029: 18% ab 2030: 20% konstant (basierend auf Befragung WBO/Bundesverband Deutscher Omnibusunternehmer)

Bleibt die Größe der Flotte konstant, ist auch die Anzahl der jährlichen Neubeschaffungen im **Szenario 0** unverändert (siehe Abbildung 16). Der Zuwachs in den Szenarien entsteht nur durch den benötigten Fahrzeugmehrbedarf der BEV-Busse. Dies führt zu einem jährlichen Mehrbedarf an Neubeschaffungen in **Szenario 1** gegenüber dem **Szenario 0** von 30 Bussen (5 %) und in **Szenario 2/3** von 114 Bussen (19 %) in 2030. Da in **Szenario 4** Klimaneutralität erst später erreicht wird, werden in 2030 21 Busse mehr beschafft gegenüber dem Referenzszenario wie Abbildung 17 zeigt. Die Beschaffungen von CNG-Fahrzeugen orientieren sich am heutigen Fahrzeugbestand und bleiben über den Betrachtungszeitraum hinweg konstant.

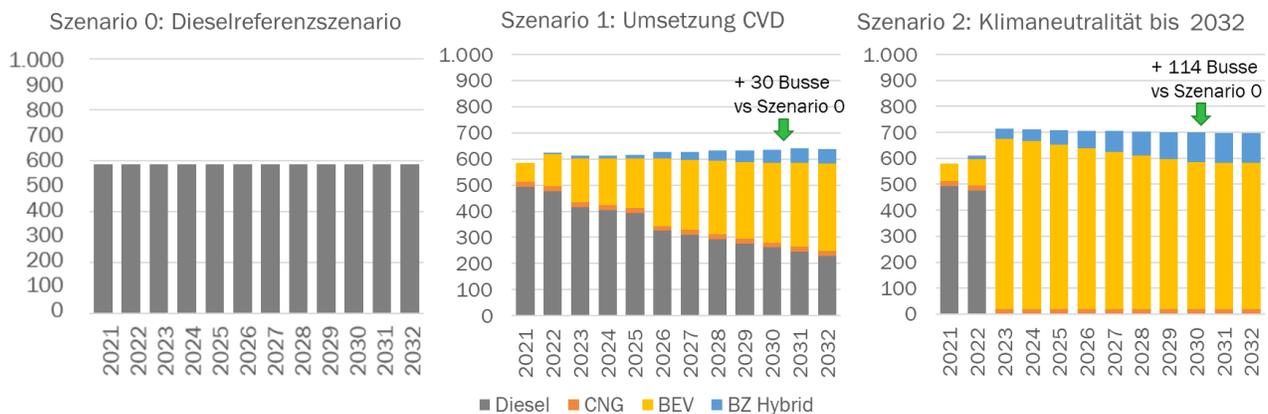


Abbildung 16: Anzahl neue Fahrzeuge je Technologie pro Jahr Szenario 1 und 2 (ohne Flottenzuwachs)

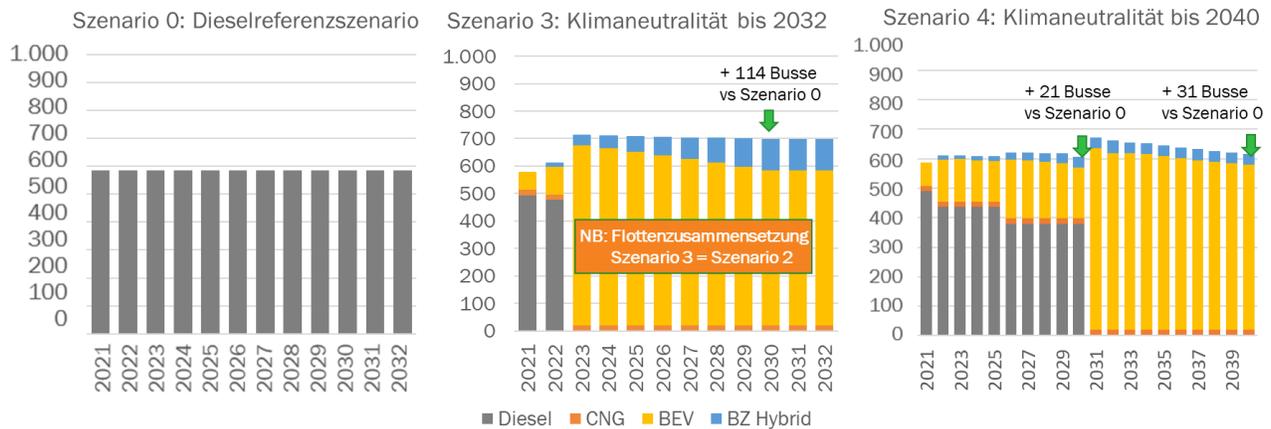


Abbildung 17: Anzahl neue Fahrzeuge je Technologie pro Jahr Szenario 3 und 4 (ohne Flottenzuwachs)

Durch die jährliche Anschaffung von Fahrzeugen mit alternativen Antriebstechnologien ändert sich die Flottenzusammensetzung für **Szenario 1** wie in Abbildung 18 aufgezeigt. Der Flottenanteil von ZEV beträgt 25 % in 2030 und 31 % in 2032. Da der Betrachtung kein Flottenzuwachs zu Grunde liegt, ergibt sich der gesamte Zuwachs aus dem Fahrzeugmehrbedarf beim Einsatz von BEV.

In Abbildung 19 wird deutlich, dass in **Szenario 2/3** nur noch ZEV-Busse beschafft werden und daher der Anteil der Dieselsebuse gegenüber **Szenario 1** schneller abnimmt. Somit liegt der Anteil der ZEV Busse in 2030 bei 73 % und in 2032 bei 88 %. Der gesamte Flottenzuwachs von 15 % (1.044 Busse) ist durch den Flottenmehrbedarf beim Einsatz von BEV-Busse bedingt und liegt daher auch unter einer Betrachtung mit Flottenzuwachs von 55 % (3.840. Busse).

Da in **Szenario 4**, welches in Abbildung 20 dargestellt wird, höhere Batteriekapazitäten und somit größere Reichweiten erzielt werden, liegt hier der Fahrzeugmehrbedarf bedingt durch die BEV mit 593 Bussen niedriger als in **Szenario 2/3**.

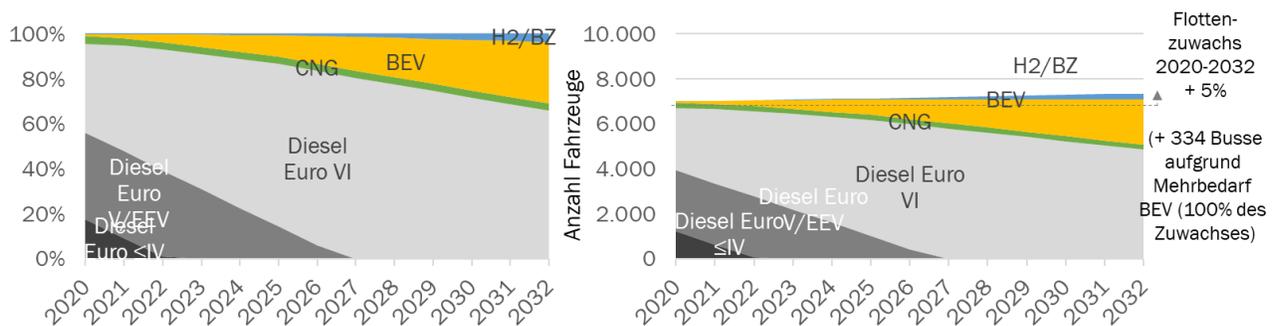


Abbildung 18: Flottenentwicklung Szenario 1 (ohne Flottenzuwachs)

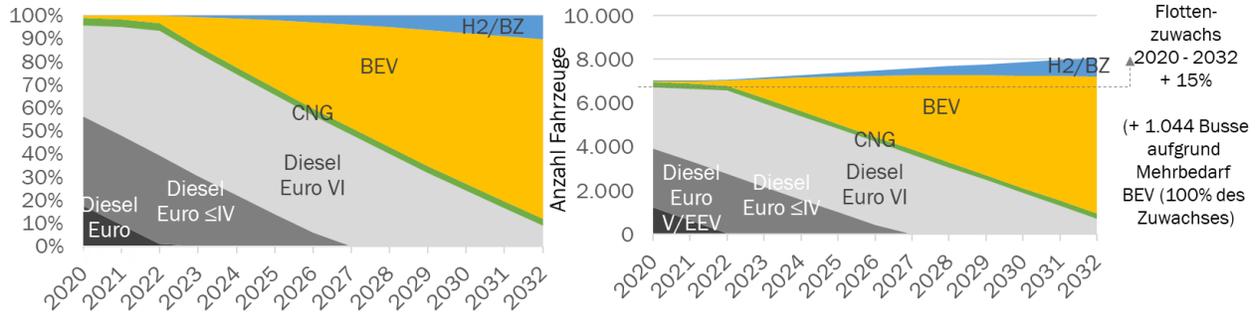


Abbildung 19: Flottenentwicklung Szenario 2 und 3 (ohne Flottenzuwachs)

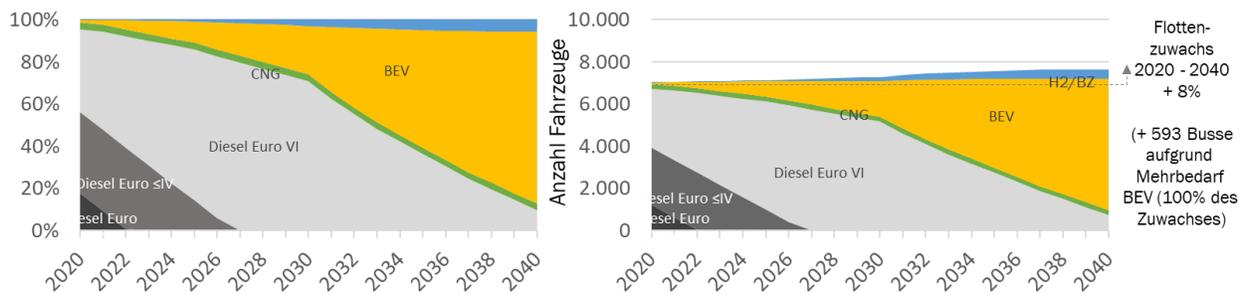


Abbildung 20: Flottenentwicklung Szenario 4 (ohne Flottenzuwachs)

3.1.5 Ergebnisse Energiebedarf

Basierend auf den oben genannten Annahmen ergeben sich für die Szenarien die in Abbildung 21 aufgezeigten Energieverbräuche. Durch die gleichbleibende Anzahl an Dieselnissen in **Szenario 0**, bleibt der Dieselbedarf über die betrachteten Jahre konstant. Wenn nur die CVD in **Szenario 1** erfüllt wird, sinkt der Dieselbedarf gegenüber dem Referenzszenario um 26 % in 2030.

Nur das ambitionierte **Szenario 2/3** senkt den Dieselbedarf in 2030 signifikant um 73 % gegenüber dem **Szenario 0**. Der verbleibende Dieselbedarf von 44 Mio. l Diesel in 2030 und 17 Mio. l Diesel in 2032 stellt eine potentielle Nachfrage für regenerativ hergestellte Kraftstoffe (reFuels) da. Durch das spätere Erreichen der Klimaneutralität in **Szenario 4**, findet auch der signifikante Zuwachs des Strombedarfs erst später statt als in **Szenario 2/3**.

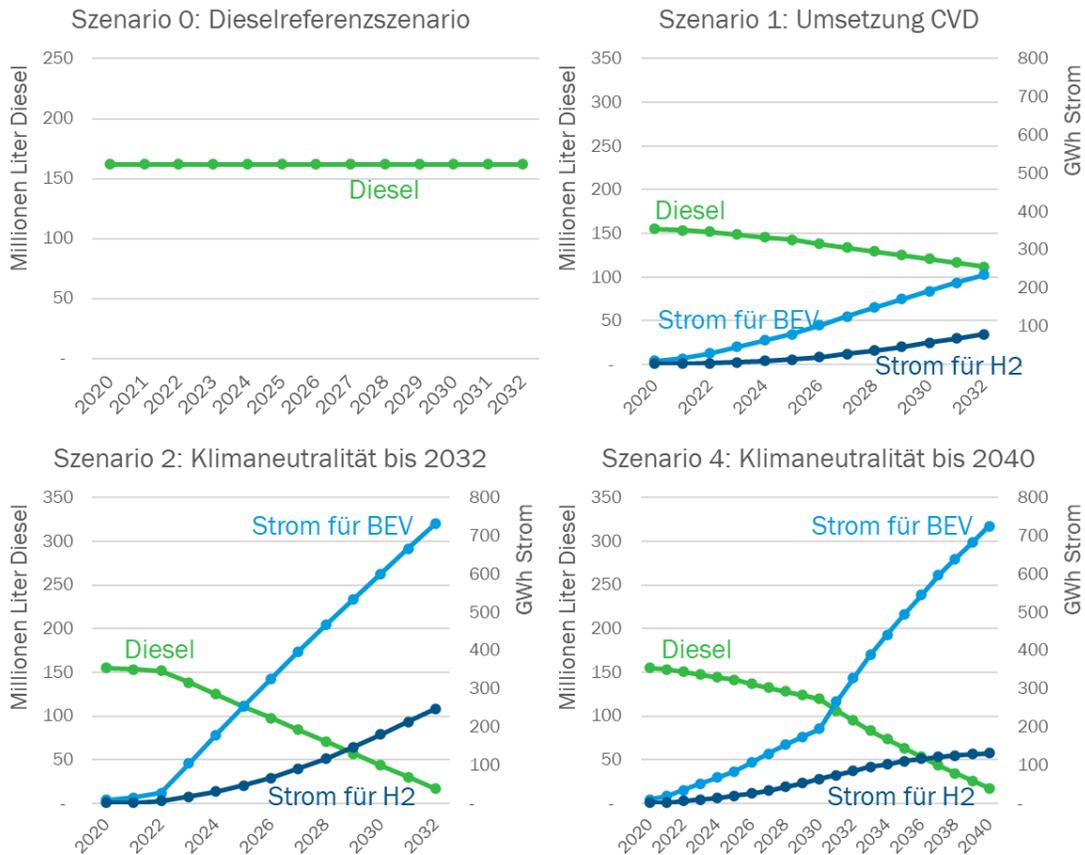


Abbildung 21: Energiebedarf pro Jahr, Szenario 1 und 2 und 4

3.1.6 Ergebnisse Kosten der Flottenentwicklung

Basierend auf den Flottenszenarien (siehe Kasten) resultieren die in Abbildung 22 dargestellten Kosten für den Busbetrieb in Baden-Württemberg.

<p>Szenario 0: Dieselreferenzszenario</p> <p>Szenario 1: Umsetzung der CVD</p> <p>Szenario 2: Klimaneutralität bis 2032</p> <p>Szenario 3: Klimaneutralität bis 2032 mit Förderung</p> <p>Szenario 4: Klimaneutralität bis 2040</p>
--

Veränderte Kostenannahmen Szenarien 3 und 4

Für die Szenarien 3 und 4 werden die Kostenannahmen aus Kapitel 3.1.2 wie folgt angepasst:

Szenario 3:

In **Szenario 3** (Definition Flottenszenarien s. Kapitel 3.1.4) werden die Fahrzeugmehrkosten gegenüber Diesel und die Infrastrukturkosten der alternativen Antriebstechnologien mit jeweils 70 %

gefördert. Daneben sind die in den Dieselpreisen enthaltenen CO₂-Kosten im Jahr 2030 höher als in **Szenario 1** und **2** (180 €/t geg. 60 €/t CO₂).

Szenario 4:

Bei der Betrachtung in **Szenario 4** liegt den Kostenannahmen eine erhöhte Förderunterstützung und eine progressive Technikentwicklung bei den alternativen Antrieben zu Grunde. Dadurch wird die Kostenparität für die Fahrzeugbeschaffungskosten für BEV mit Diesel im Jahr 2035 erreicht. Außerdem erhöht sich die Batteriekapazität erneut um 35 % in 2030. Dies führt zu einem geringeren Fahrzeugmehrbedarf von 10 %.

Daneben wird die Förderung für Fahrzeuge und Infrastruktur ab 2030 bis 2040 linear auf null zurückgefahren. Die CO₂ Kosten werden bis 2040 auf 233 €/t CO₂ erhöht.¹²

Die übrigen Annahmen für die Energie- und Fahrzeugkosten bleiben von diesen Änderungen unverändert und sind somit in allen Szenarien gleich.

Diese genannten Annahmen führen zu geringeren Mehrkosten der alternativen Antriebe, welche als das untere Ende der Mehrkosten einzuschätzen sind. Sobald einzelne Annahmen so nicht eintreffen, ergeben sich entsprechend veränderte Mehrkosten, die nach Einschätzung der Studienautoren voraussichtlich eher höher liegen werden.

Ergebnisse

Für das **Szenario 0** liegen die Gesamtkosten bei rund 19 Mrd.€, in **Szenario 1** bei 20 Mrd.€ und in **Szenario 2** bei rund 22 Mrd.€. Durch die Fördermaßnahmen sind die Kosten in **Szenario 3** 2 Mrd.€ geringer als in **Szenario 2**. Da sich in **Szenario 4** die Betrachtung bis 2040 erstreckt, fallen hier auch die höchsten Gesamtkosten von 33 Mrd.€ an.

Dabei besitzen die Kosten für das Fahrpersonal in allen Szenarien mit 50-60 % den größten Anteil an den Gesamtkosten.

Die Flottenkosten ohne Berücksichtigung des Fahrpersonals betragen in **Szenario 0** 1,40 €/km, in **Szenario 1** 1,56 €/km und in **Szenario 2** 1,91 €/km, in **Szenario 3** 1,66 €/km und in **Szenario 4** 1,59 €/km. In **Szenario 1** bis **Szenario 4** sind nach den Fahrerkosten die Beschaffungskosten der größte Kostenträger, wobei es bei **Szenario 0** die Kraftstoffkosten sind. Durch die Förderung liegen die Kosten für die Fahrzeugbeschaffung und die Energieinfrastruktur in **Szenario 3** unter denen von **Szenario 2**.

¹² Entsprechend des CO₂ Kostensatzes aus der UBA Methodenkonvention 3.1 zur Ermittlung von Umweltkosten.

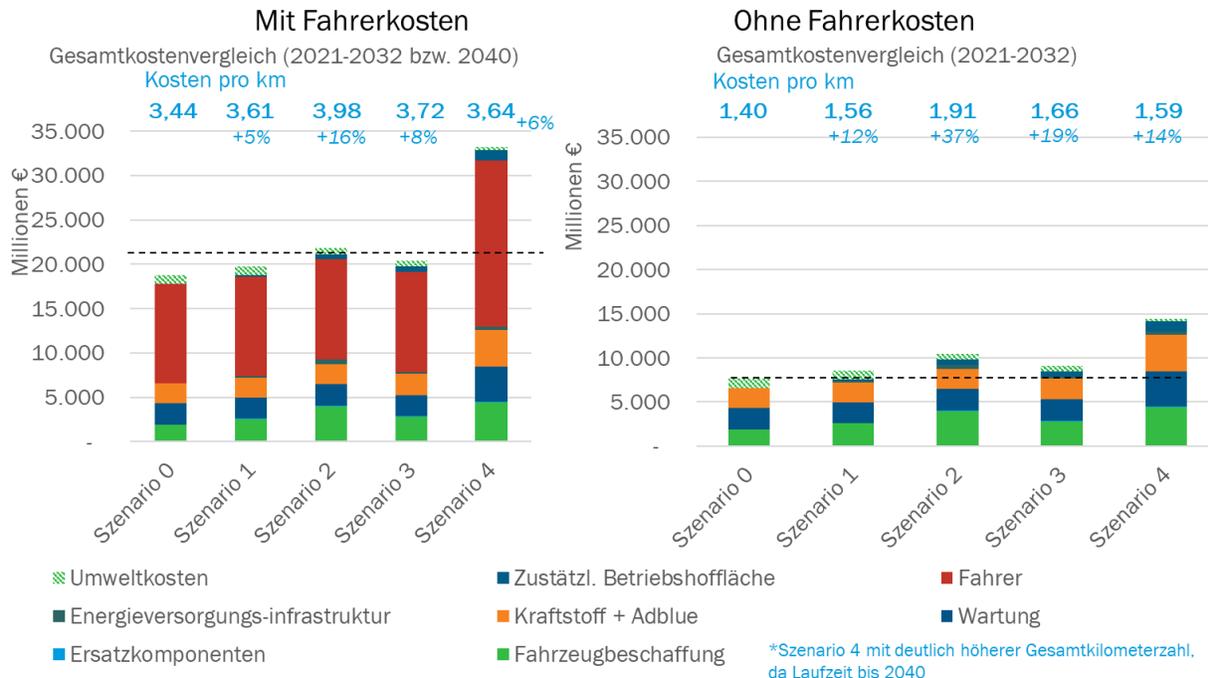


Abbildung 22: Gesamtkosten der Flotte von 2021 bis einschließlich 2032

Pro Jahr ergeben sich daher die in Abbildung 23 und Abbildung 24 dargestellten mittleren jährlichen Mehrkosten. Für **Szenario 1** belaufen sich die jährlichen mittleren Mehrkosten auf 88 Mio.€ und in **Szenario 2** auf 280 Mio.€. 6-12 % der mittleren Gesamtjahresmehrkosten sind durch die Reichweite der BEV bedingt. Diese entsprechen 6 Mio.€ in **Szenario 1** und 33 Mio.€ in **Szenario 2**.

Die Förderung der Investitionskosten in **Szenario 3** führt zu einer Reduktion der Mehrkosten gegenüber **Szenario 2** um 53 %. Somit betragen die Mehrkosten rund 133 Mio.€. Die spätere Beschaffung der ZEV Fahrzeuge (100 % ZEV Anteil erst ab 2031) in **Szenario 4** führt zu einem kostendämpfenden Effekt gegenüber **Szenario 2** und **3**. Die mittleren jährlichen Mehrkosten belaufen sich in diesem Szenario auf rund 35 Mio.€.

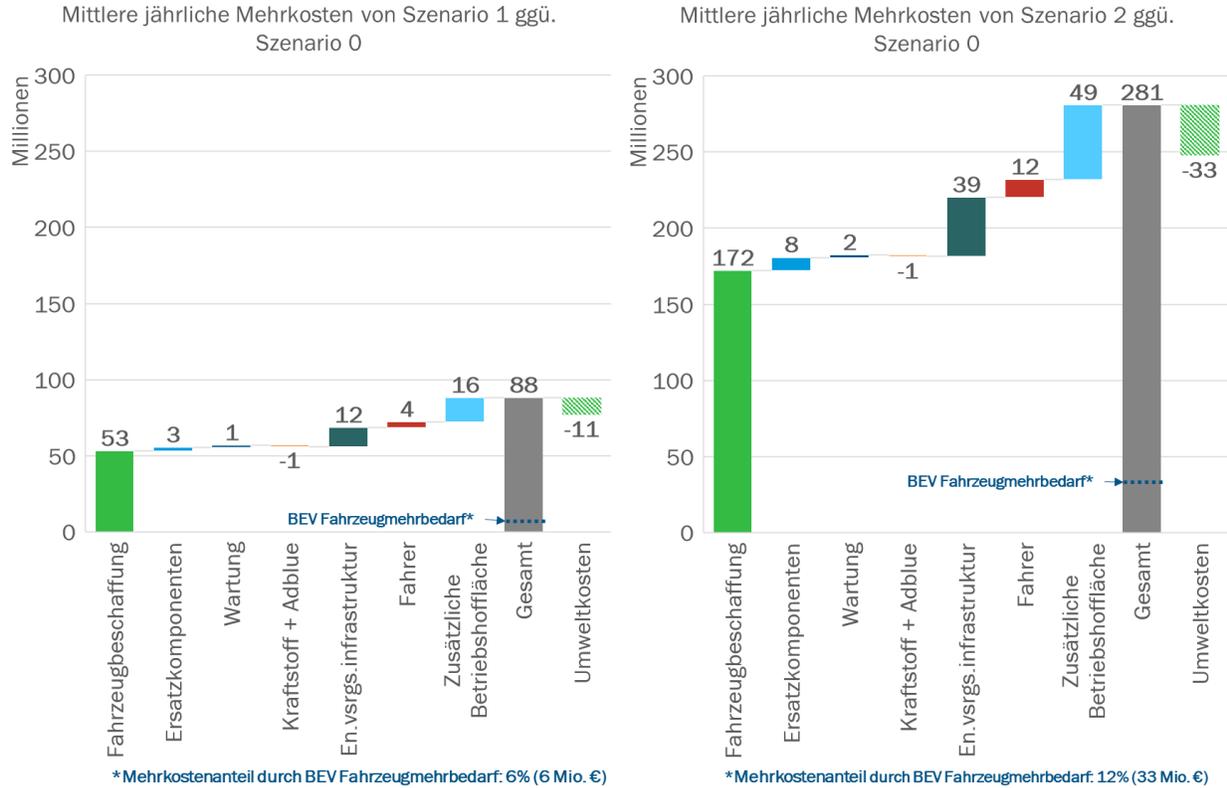


Abbildung 23: Mittlere jährliche Mehrkosten der Flotten in Szenarien 1 und 2

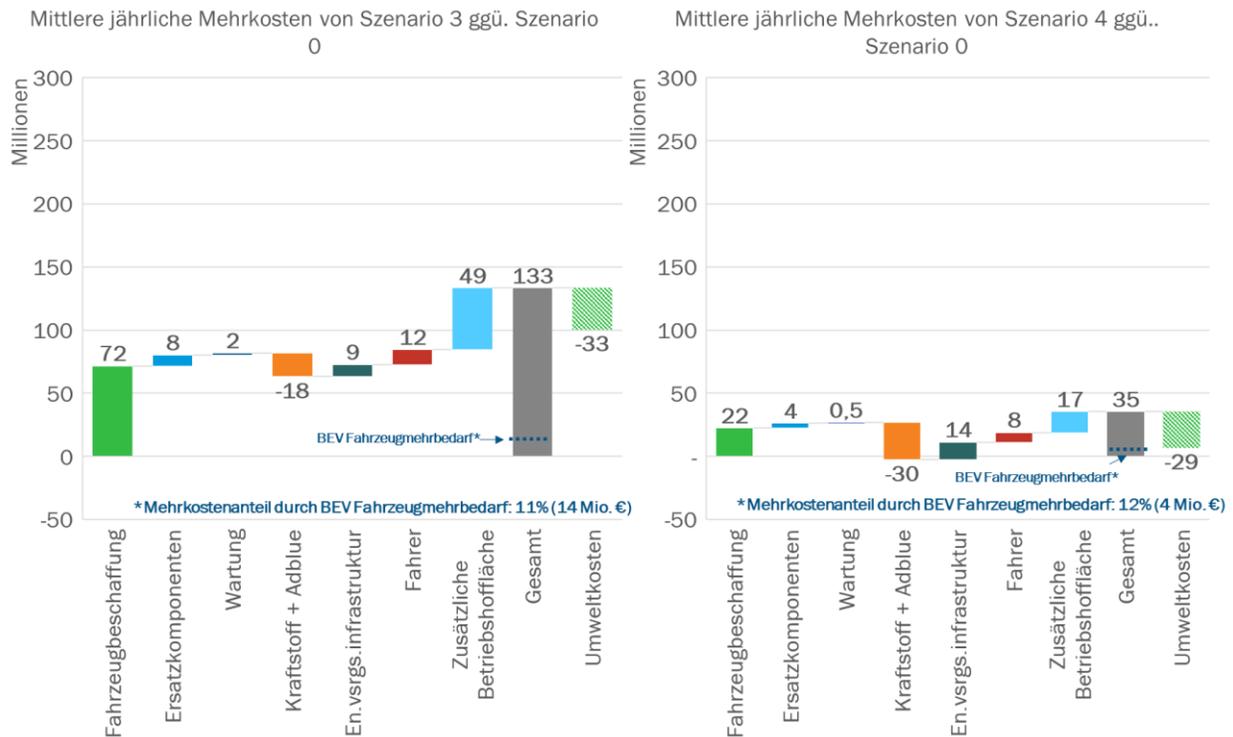


Abbildung 24: Mittlere jährliche Mehrkosten der Flotten in Szenarien 3 und 4

Wie bereits beschrieben, haben die Kosten für das Fahrpersonal mit ca. 45-60 % den größten Anteil an den Gesamtkosten. Dies gilt auch für die Betrachtung über alle Jahre hinweg (siehe Abbildung 25 und Abbildung 26). In 2032 betragen die jährlichen Kosten in **Szenario 1** über 1600 Mio.€. In **Szenario 2** treten bereits ab dem Jahr 2024 auch die Kosten für die zusätzliche Betriebsfläche auf Grund des Fahrzeugmehrbedarfs bei BEV auf. Die Kosten für die Fahrzeugbeschaffung erreichen im Jahr 2023 ihren Höhenpunkt, da in diesem Jahr mit der Beschaffung der ZEVs begonnen wird und nehmen dann ab. In **Szenario 3** hingegen wird der Anstieg bei den Kosten für die Fahrzeugbeschaffung durch die Fördermaßnahmen verringert.

In **Szenario 3** reduzieren sich die mittleren jährlichen Mehrkosten von **Szenario 2** von 281 Mio.€ auf 133 Mio.€. In **Szenario 4** liegen diese nur bei 35 Mio.€, was einer Reduktion von 88 % entspricht.

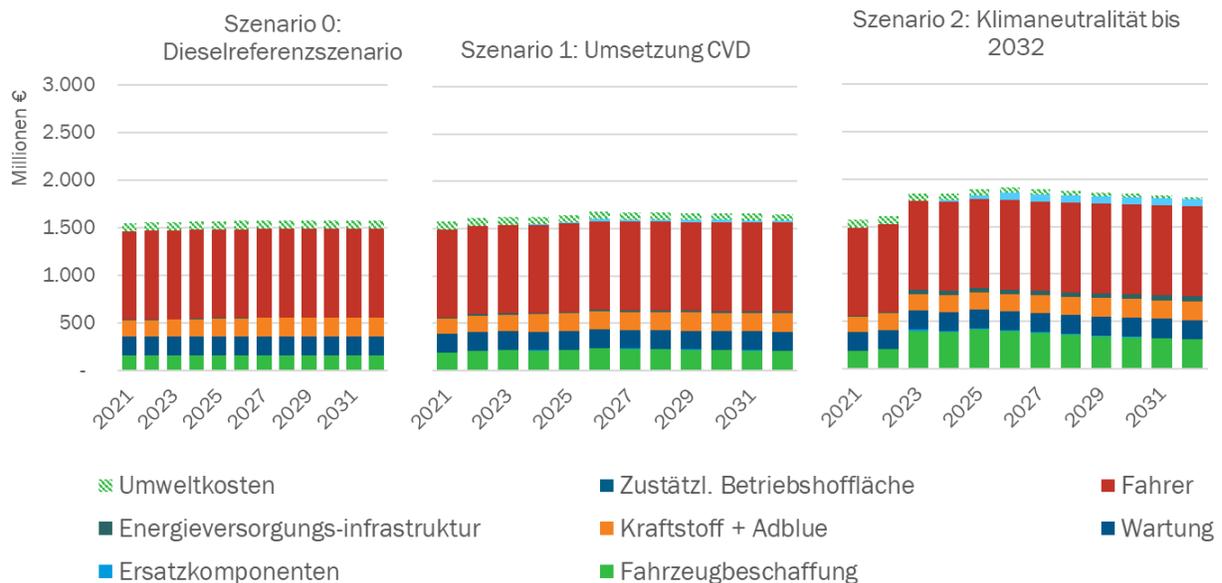


Abbildung 25: Gesamtkosten der Flotte pro Jahr, Szenario 1 und 2

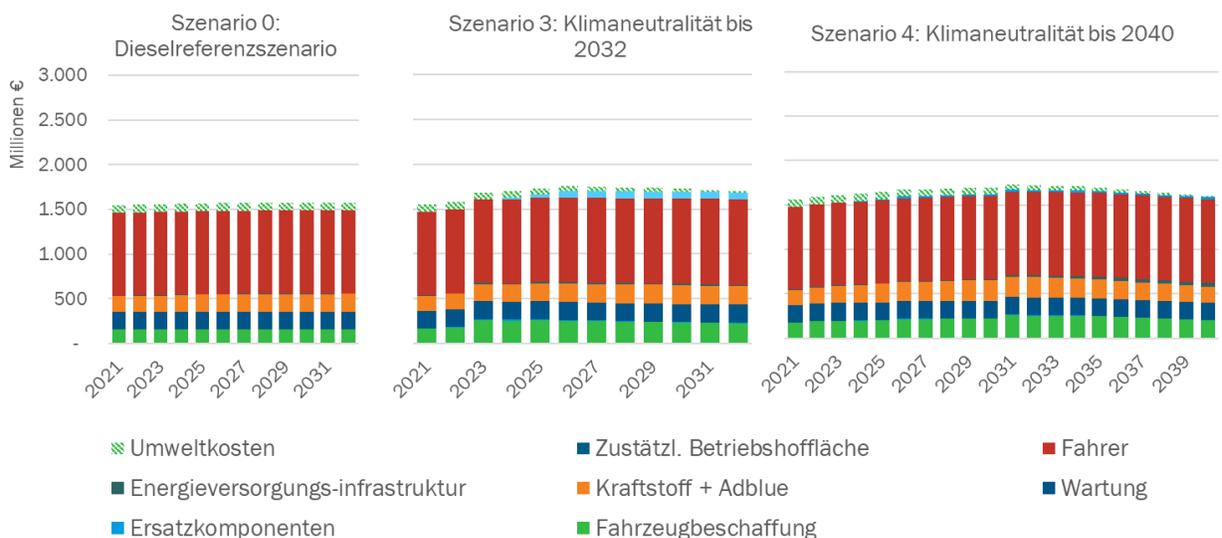


Abbildung 26: Gesamtkosten der Flotte pro Jahr, Szenario 3 und 4

Da neben den Betriebskosten insbesondere Investitionsmehrkosten gegenüber Diesel für Flottenbetreiber von Interesse sind, werden diese in Abbildung 27 und Abbildung 28 genauer analysiert. In allen Szenarien steigen die Mehrkosten aus der Fahrzeugbeschaffung gegenüber einer reinen Dieselflotte bis 2026 an. In **Szenario 2** verläuft der Anstieg bis zum Ende des Betrachtungszeitraums weiter. Die sinkenden Fahrzeugkosten führen in **Szenario 1** zu einer Reduktion der Mehrkosten.

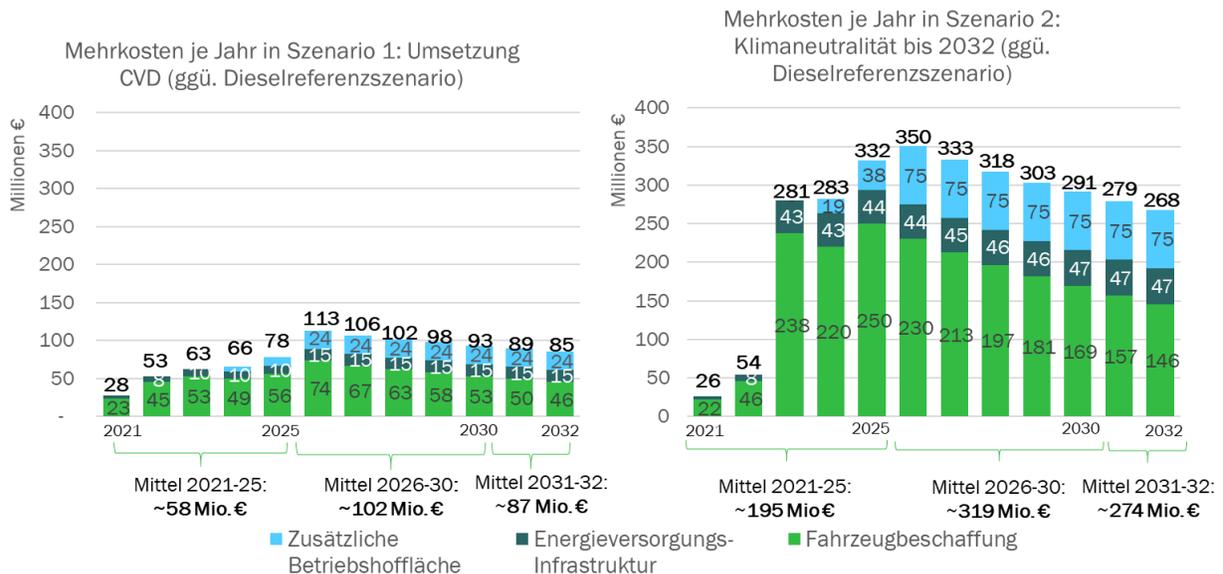


Abbildung 27: Investitions- und Infrastrukturmehrkosten der Flotte pro Jahr, Szenario 1 und 2

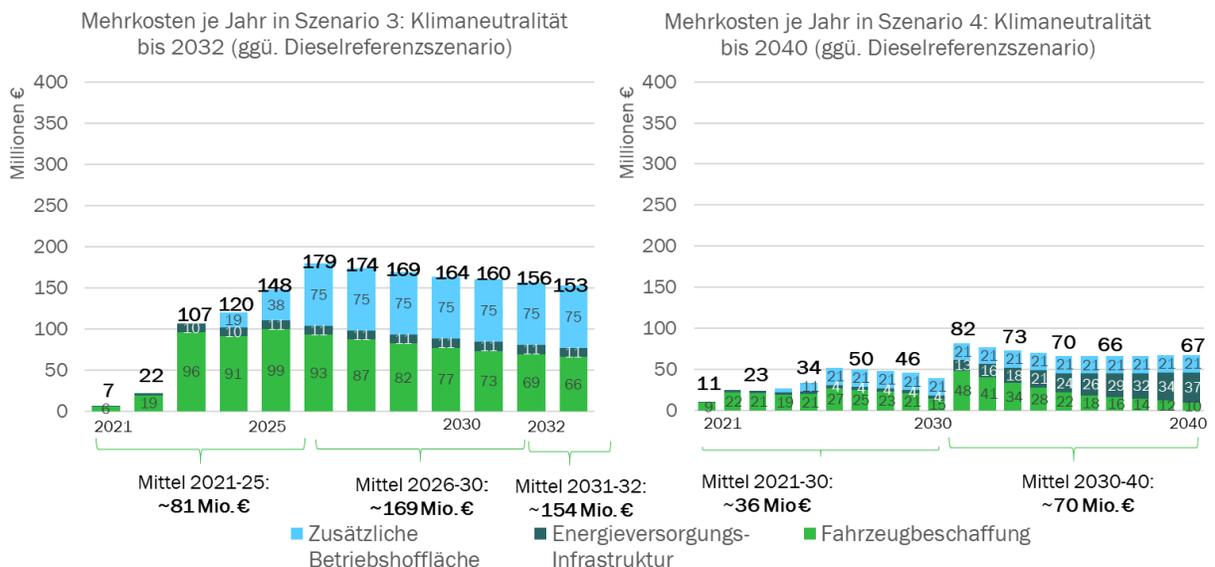


Abbildung 28: Investitions- und Infrastrukturmehrkosten der Flotte pro Jahr, Szenario 3 und 4

Im Mittel betragen die Mehrkosten ab 2031 87 Mio.€ für **Szenario 1** und 274 Mio.€ für **Szenario 2**. Bei Flottenwachstum würden die Mehrkosten noch höher ausfallen. In **Szenario 1** führt diese Entwicklung zu einem Anstieg auf 119 Mio.€ und in **Szenario 2** auf 355 Mio.€.

Die Förderungen in **Szenario 3** reduzieren die Mehrkosten ab 2031 auf 154 Mio.€. Diese liegen somit unter den Mehrkosten von **Szenario 2**.

Da in **Szenario 4** ein höherer CO₂ Preis zu Grunde liegt als in **Szenario 1**, befinden sich die Mehrkosten unter denen des **Szenarios 1**. Durch den langsameren Umstieg auf ZEV liegen die jährlichen Mehrkosten in **Szenario 4** ab 2030 bei rund 70 Mio.€ und sind damit niedriger als in **Szenario 2/3**, welche früher Klimaneutralität erreichen.

3.1.7 Finanzierungsbedarf Förderung

In den **Szenarien 3** und **4** wird ein Teil der Fahrzeug- und Infrastrukturbeschaffungskosten entsprechend den in Kapitel 3.1.3 genannten Förderkonditionen gefördert. Somit fällt ein Finanzierungsbedarf von staatlicher Seite an. Dieser beläuft sich über die Jahre in **Szenario 3** auf insgesamt rund 1,5 Mrd.€ und in **Szenario 4** auf rund 0,6 Mrd.€.

Abbildung 29 stellt den jährlichen Finanzierungsbedarf dar. Bis zum Jahr 2022 liegt der Bedarf unter 40 Mio.€/a. Ab dem Jahr 2023 übersteigt der Finanzierungsbedarf in **Szenario 3** den in **Szenario 4** und steigt auf über 170 Mio.€/a an. Der Grund dafür sind die in 2023 beginnenden Beschaffungen von ZEV.

Auf Grund der geringeren Beschaffungen von ZEV übersteigt der Bedarf in **Szenario 4** im gesamten Betrachtungszeitraum nicht 80 Mio.€/a. Der Peak wird im Jahr 2030 erreicht, da ab diesem Jahr vermehrt ZEV beschafft werden, um Klimaneutralität in 2040 zu erreichen. Ab dem Jahr 2030 wird die Förderung in **Szenario 4** linear bis zum Jahr 2040 reduziert, daher nimmt der Finanzierungsbedarf ab 2030 wieder ab.

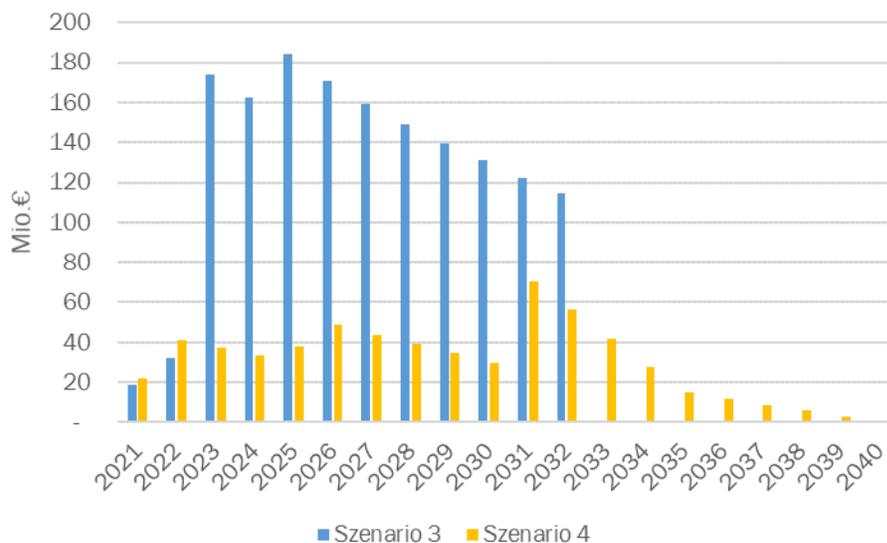


Abbildung 29: Jährlicher Finanzierungsbedarf Förderung

3.1.8 Treibhausgasemissionen - Einsparpotentiale und Vermeidungskosten

Strommix

Durch den Umstieg auf BEV und BZ-Busse werden die Busse lokal emissionsfrei. Ein bedeutender Faktor für die Gesamtemissionen sind dabei die THG-Emissionen des Stroms in Baden-Württemberg. Daher ist der zugrundeliegende Strommix entscheidend. Abbildung 30 stellt verschiedene Strommixzusammensetzungen dar.

Der deutsche Strommix bestand in 2020 zu 54 % aus erneuerbaren Energien (EE). Um die größtmögliche Reduktion an THG-Emissionen zu erreichen, sollte für den Betrieb der Busse nur erneuerbarer Strom genutzt werden. Insbesondere der Photovoltaikanteil war in Baden-Württemberg im Jahre 2020 höher als im durchschnittlichen Anteil in Deutschland. Für den zukünftigen Erneuerbare-Energien-Mix bis 2030 wird ein starker Zuwachs an Windenergie erwartet.

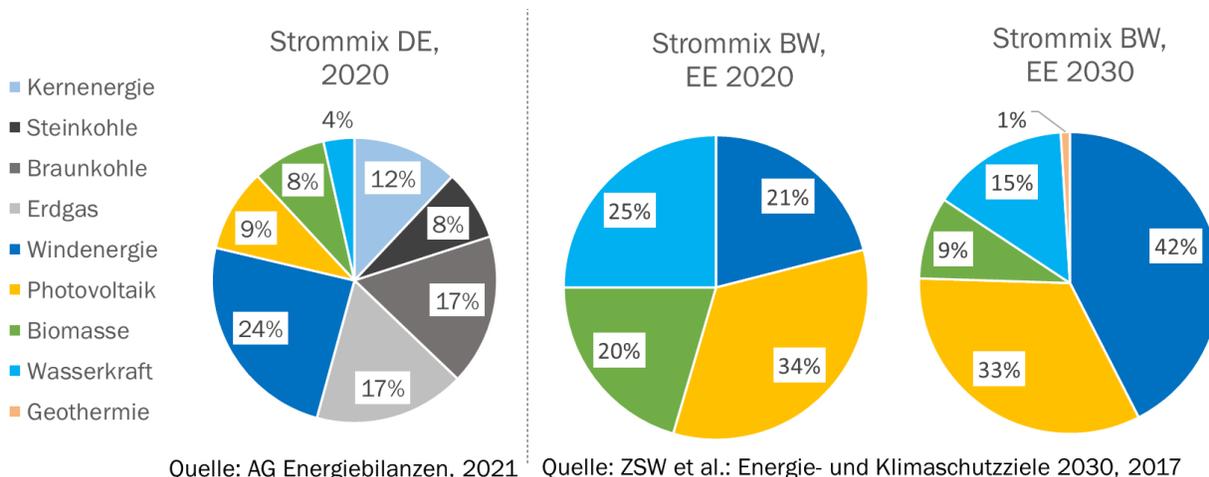


Abbildung 30: Strommixzusammensetzung

Die THG-Emissionen setzen sich dabei aus den einzelnen Energieträgern und deren THG-Emissionen zusammen. Abbildung 31 stellt daher die THG-Emissionen der einzelnen Energieträger und der verschiedenen Strommixe dar. Im Vergleich zum heutigen deutschen Strommix reduziert die Verwendung von einem komplett erneuerbaren Mix die THG-Emissionen bereits um 86 %. Bei der Bereitstellung von Wasserstoff reduziert die Elektrolyse mit EE die THG-Emissionen um 69 % im Vergleich zur Dampfreformierung mit Erdgas. Bis 2030 steigt die Reduktion des EE-Mixes auf 92 %. Die Elektrolyse ermöglicht eine Reduktion um 80 % gegenüber grauem Wasserstoff. Somit bietet sich sowohl beim Strom als auch beim Wasserstoff ein signifikantes THG Einsparpotential durch die Verwendung von Erneuerbaren Energien.

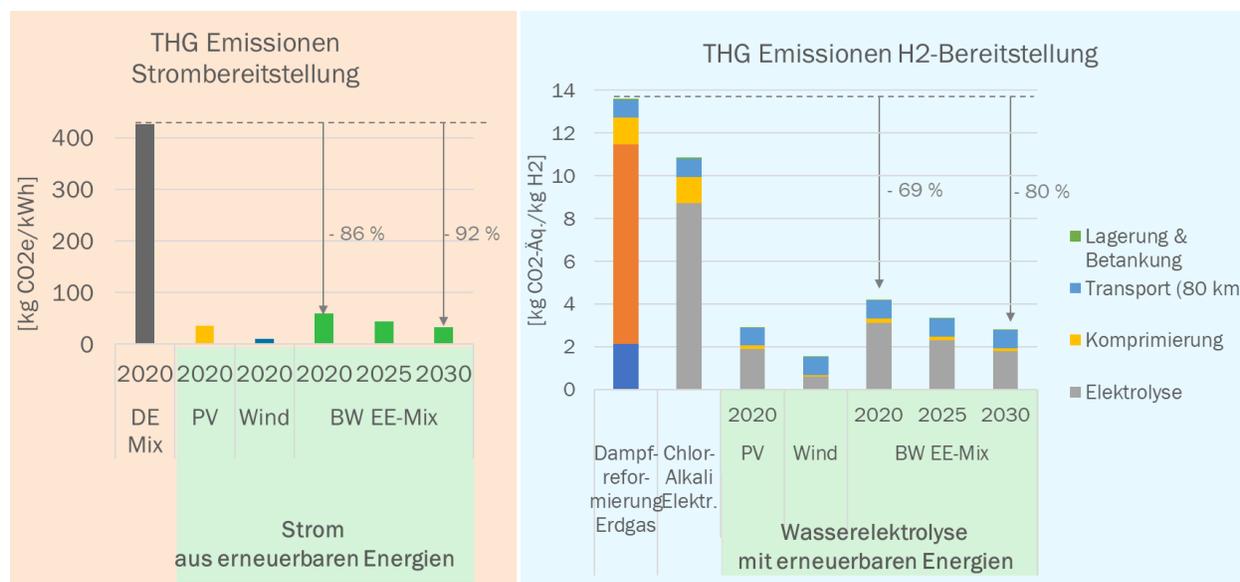


Abbildung 31: THG-Emissionen Strom- und H2 Bereitstellung

Einsparpotentiale THG-Emissionen je Szenario

In den **Szenarien 1-4** sinken die jährlichen THG-Emissionen gegenüber dem Basisjahr wie in Abbildung 32, Abbildung 33 und Abbildung 34 dargestellt. Insgesamt reduzieren sich die Emissionen in **Szenario 1** um 20 % und in **Szenario 2** und **3** um 63 % bis 2032. In **Szenario 4** beträgt die Reduktion rund 28 % im Jahr 2032 und im Jahr 2040 67 %. Die höhere Reduktion gegenüber **Szenario 2** und **3** ergibt sich aus weiter sinkenden GHG-Emissionen aus der EE-Stromherstellung bis 2040. In **Szenario 1** bleiben die vorhandenen Dieselfahrzeuge der Haupttreiber der Betriebsemissionen, da im Jahr 2032 noch 66 % Dieselfahrzeuge in Betrieb sind. Durch den späteren vollständigen Umstieg auf ZEVs, gilt dies im Jahr 2032 auch für das **Szenario 4**. Mit der Nutzung von reFuels kann ein THG neutraler Betrieb bei den verbliebenen Dieselnbussen erreicht werden.

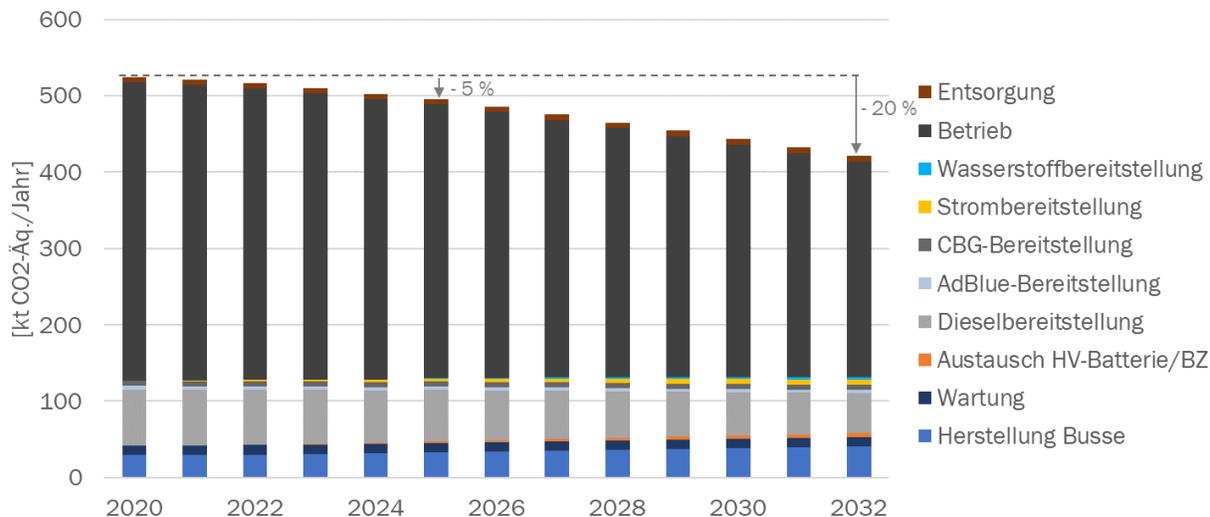


Abbildung 32 :THG-Emissionen der ÖPNV Busflotte in BW - Szenario 1 (ohne Flottenzuwachs)

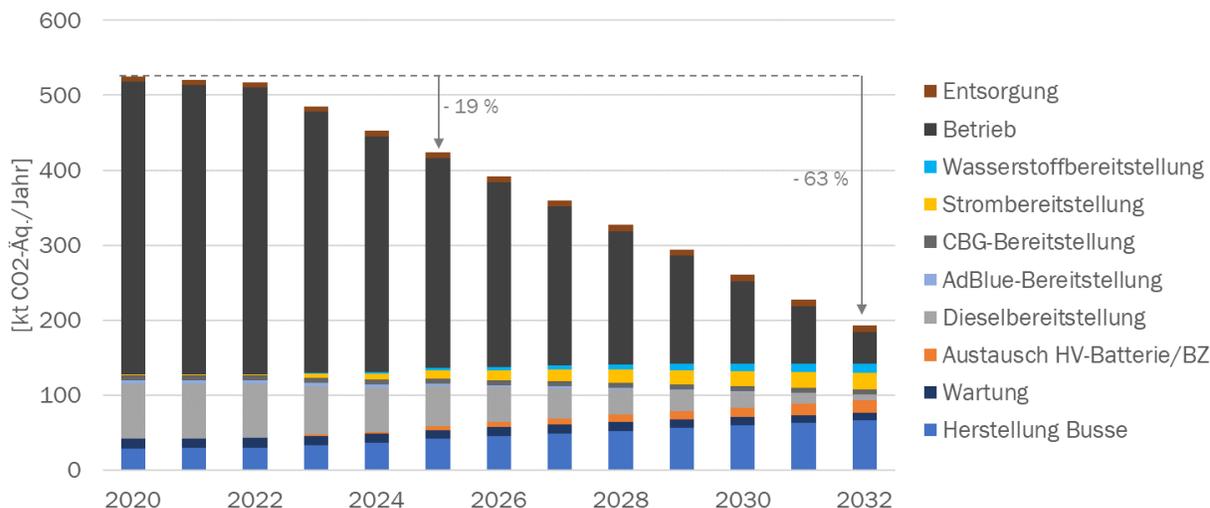


Abbildung 33: THG-Emissionen der ÖPNV Busflotte in BW - Szenario 2 und 3 (ohne Flottenzuwachs)

Die Reduktion der Betriebsemissionen in **Szenario 2** und **3** ist insbesondere bedingt durch die sinkende Zahl der Dieselnbussen. Die aufwendigere Herstellung von BEV-Bussen gegenüber Dieselnbussen wird durch entfallende Betriebsemissionen ausgeglichen, da die Strom- und H₂-

Bereitstellung niedrigere THG-Emissionen als die Dieselerstellung aufweist. Der Anteil der Busherstellung an den THG-Emissionen steigt in **Szenario 2** und **3** im Jahr 2032 auf rund 33 %.

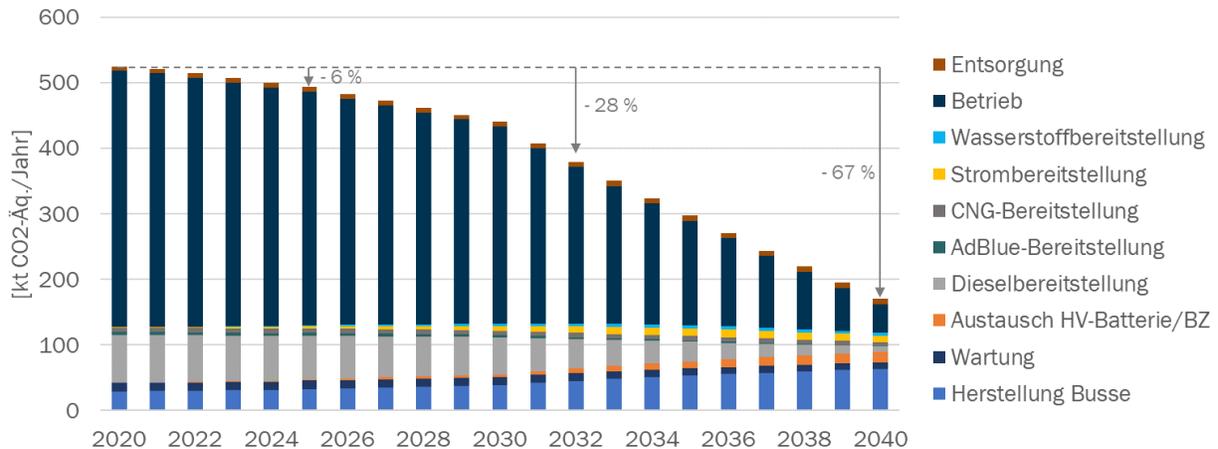


Abbildung 34: THG-Emissionen der ÖPNV Busflotte in BW - Szenario 4 (ohne Flottenzuwachs)

In Abbildung 35 Abbildung werden die THG Emissionseinsparungen gegenüber der reinen Dieselflotte je Betrachtungsjahr und Szenario aufgezeigt. In **Szenario 1** werden die THG-Emissionen im Jahr 2032 um 22 % und in **Szenario 2** um 64 % reduziert. Die Einsparungen gegenüber einer reinen Dieselflotte liegen für **Szenario 4** in 2032 bei 29 % und reduzieren sich weiter bis zu 68 % in 2040. Die langsamere Reduktion in **Szenario 4** ist bedingt durch den niedrigeren ZEV-Anteil im Jahr 2032 gegenüber **Szenario 2** und **3**.

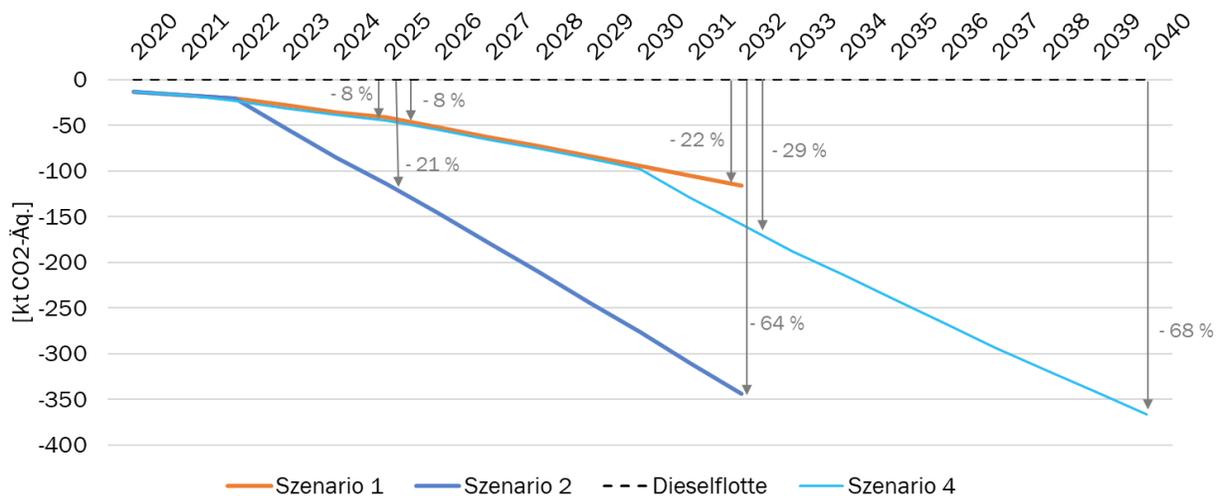


Abbildung 35: THG Einsparung der Busflotte in Szenario 1 und 2,3 und 4 (ohne Flottenzuwachs)

Abbildung 36, Abbildung 37 und Abbildung 38 zeigen die Tank-to-Wheel (TtW)¹³ THG-Emissionen der verschiedenen Szenarien. In **Szenario 1** sinken diese Emissionen um 28 %. Die höhere Reduktion wird auf Grund der starken Abnahme der Dieselflotten erreicht. Die Reduktion der THG-Emissionen im Jahr 2040 ist in **Szenario 4** auf gleichem Niveau wie die in **Szenario 2** und **3**.

¹³ TtW Emissionen berücksichtigen alle Emissionen, die ab der Betankung/Ladung der Fahrzeuge bis zur Fahrt entstehen.

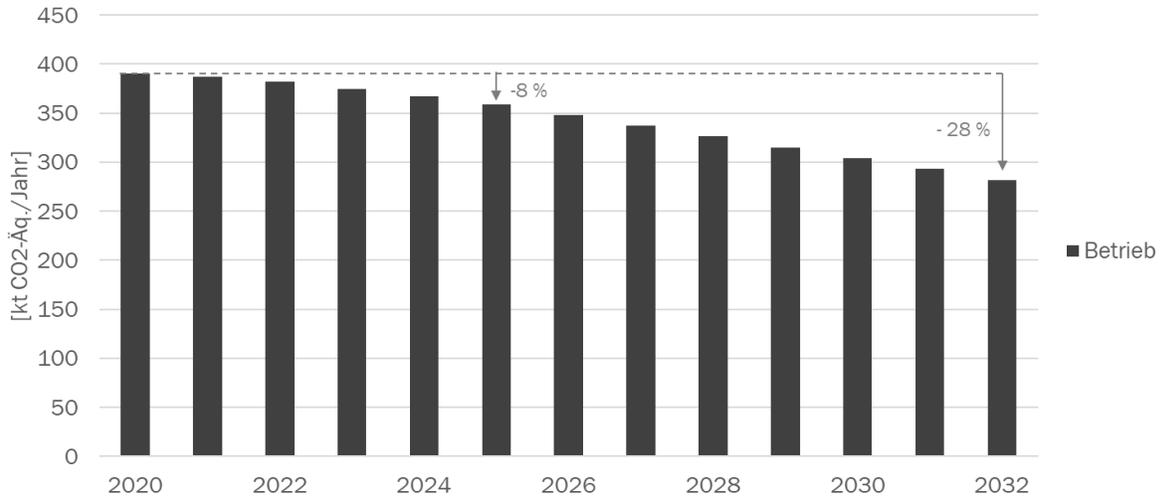


Abbildung 36: TtW THG-Emissionen Szenario 1 [Ohne Flottenzuwachs]

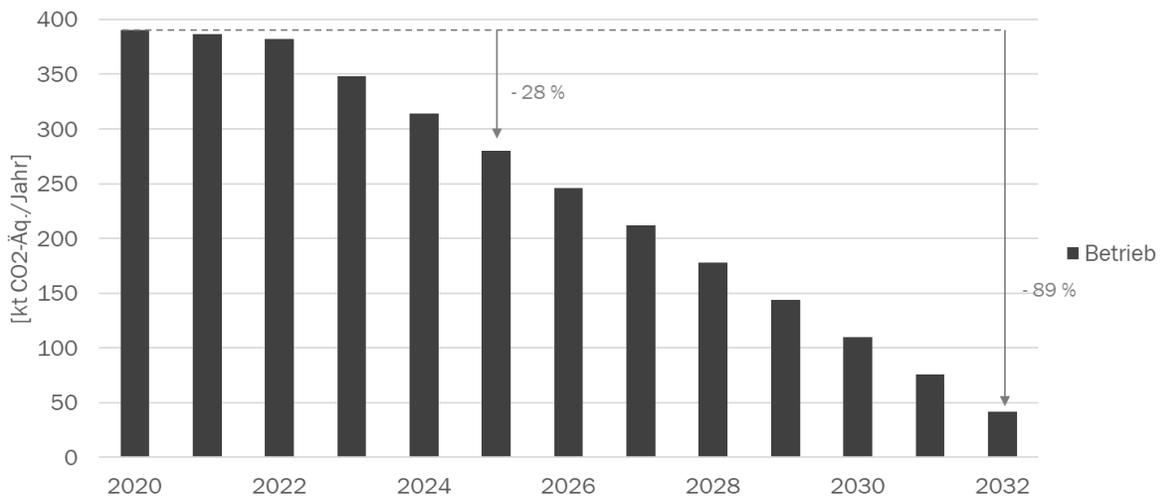


Abbildung 37: TtW THG-Emissionen Szenario 2 und 3 (ohne Flottenzuwachs)

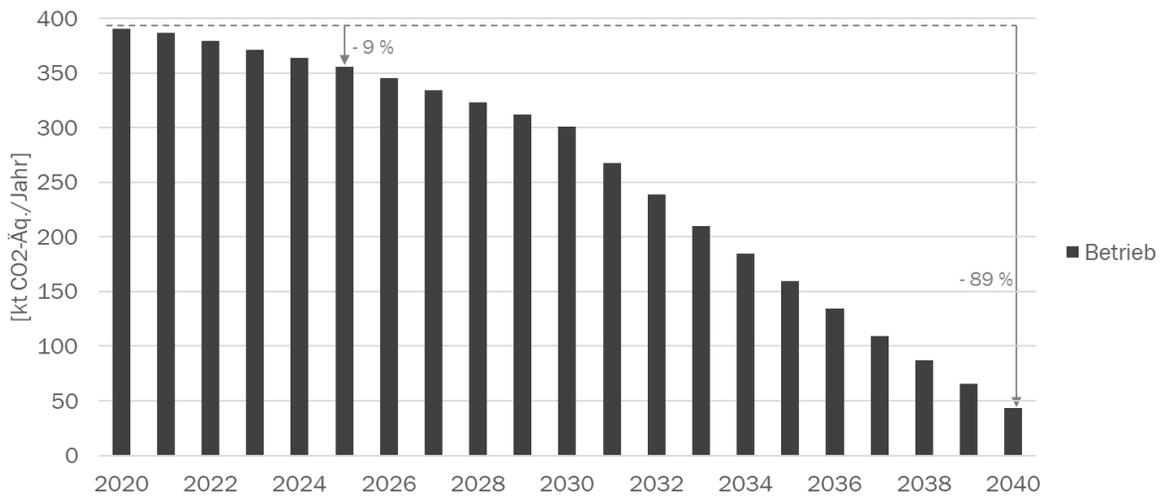


Abbildung 38: TtW THG-Emissionen Szenario 4 (ohne Flottenzuwachs)

Vermeidungskosten

Abbildung 39 stellt die anfallenden Kosten pro vermiedener Tonne CO₂ von **Szenario 1** bis **Szenario 4** gegenüber **Szenario 0** dar.

In den Jahren 2021 und 2022 sind die Mehrkosten und eingesparten THG-Emissionen gegenüber **Szenario 0** in beiden Szenarien gleich hoch. Da ab 2023 in **Szenario 2** nur noch ZEVs angeschafft werden, steigen so die Mehrkosten gegenüber **Szenario 0** schneller an als in **Szenario 1** und **4**. Auf Grund der nicht in gleicher Weise sinkenden Emissionen, erhöhen sich die CO₂ Vermeidungskosten in 2023 für **Szenario 2** im Vergleich zu **Szenario 1** und **4**. In den darauffolgenden Jahren nimmt die Differenz der CO₂ Vermeidungskosten von **Szenario 1** zu **Szenario 2** ab. Die Erhöhung der ZEV-Quote im Jahr 2026 führt zu steigenden CO₂ Vermeidungskosten in **Szenario 1**.

Im Mittel belaufen sich die CO₂ Vermeidungskosten in **Szenario 1** auf 1.270 €/t CO₂ und in **Szenario 2** auf 1.491 €/t CO₂. Bedingt durch die Fördermaßnahmen sind die CO₂ Vermeidungskosten in **Szenario 3** mit einer Höhe von 788 €/t CO₂ am geringsten. In **Szenario 4** liegen sie bei 1.327 €/t CO₂ bis zum Jahr 2032. Dabei sollte beachtet werden, dass die angegebenen Werte Kosten aus Sicht des Flottenbetreibers sind. Für die Förderung in Szenarien 3 und 4 entstehen im Gegenzug Kosten für die öffentliche Hand.

Mit Hilfe der Förderung können so die geringsten CO₂ Vermeidungskosten für die Busbetreiber erreicht werden, während die größten THG Einsparungen bis zum Jahr 2032 erlangt werden.

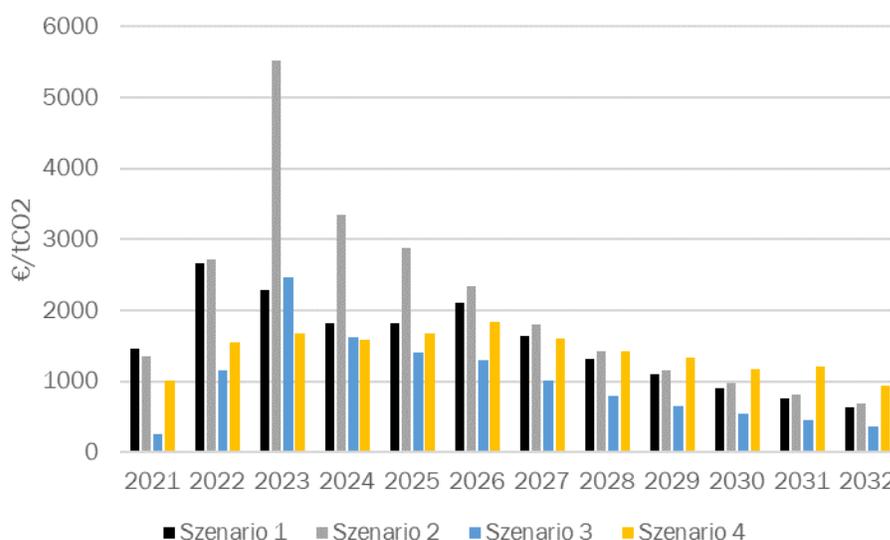


Abbildung 39: Entwicklung der CO₂ Vermeidungskosten

Im Jahr 2023 ist für **Szenario 2** ein großer Ausschlag der Vermeidungskosten zu erkennen, mit etwa 5.500 €/t CO₂. Dies ist damit zu erklären, dass in **Szenario 2** ab 2023 nur noch ZEV-Fahrzeuge beschafft werden (siehe Abbildung 16), was mit hohen Kosten verbunden ist. Dies ist vor allem in diesen frühen Jahren, in denen noch keine große Kostenreduktion der Technologie stattgefunden hat (siehe Abbildung 3) der Fall. Gleichzeitig sind die Einsparungen an CO₂ gegenüber einer reinen Dieselflotte noch nicht so umfassend, da die Anzahl an ZEV in Relation zur Gesamtflotte noch relativ klein ist (in vorherigen Jahren 2021 und 2022 wurden nur eine kleine Anzahl ZEV-Neubeschaffungen getätigt). Mit fortschreitender Flottenentwicklung wird dieser Effekt immer kleiner, da die THG Einsparungen gegenüber einer Dieselflotte mit ansteigendem ZEV-Anteil immer größer werden. Dies zeigt sich in jährlich sinkenden Vermeidungskosten (in allen Szenarien). **Szenario 3** verläuft bezüglich

der CO₂ Einsparungen analog zu **Szenario 2**. Allerdings sind hier die Kosten für Investitionen in Fahrzeuge und Infrastruktur deutlich reduziert.

3.1.9 Einfluss eines Flottenwachstums

Anzahl Fahrzeuge

Abbildung 40 stellt den Fahrzeugbestand in **Szenario 2** mit und ohne Flottenzuwachs gegenüber. In 2032 führt die Betrachtung mit jährlichem Flottenzuwachs zu einem Anwachsen der Flotte um 55 %. Dabei werden rund 39 % dieses Anstiegs bedingt durch die Reichweitenbeschränkungen der BEV, bzw. der damit verbundenen Notwendigkeit, mehr Fahrzeuge anzuschaffen. Ohne Flottenzuwachs wächst die Flotte nur um 15 %, was vollständig durch den BEV-Mehrbedarf bedingt ist. Insgesamt liegt der Fahrzeugmehrbedarf durch BEV um fast 2.800 Fahrzeuge bei der Betrachtung mit Flottenzuwachs über der Betrachtung ohne.

Die Gegenüberstellung zeigt, dass somit der Effekt aus dem Flottenzuwachs höher ist als der des Fahrzeugmehrbedarfs durch BEV.

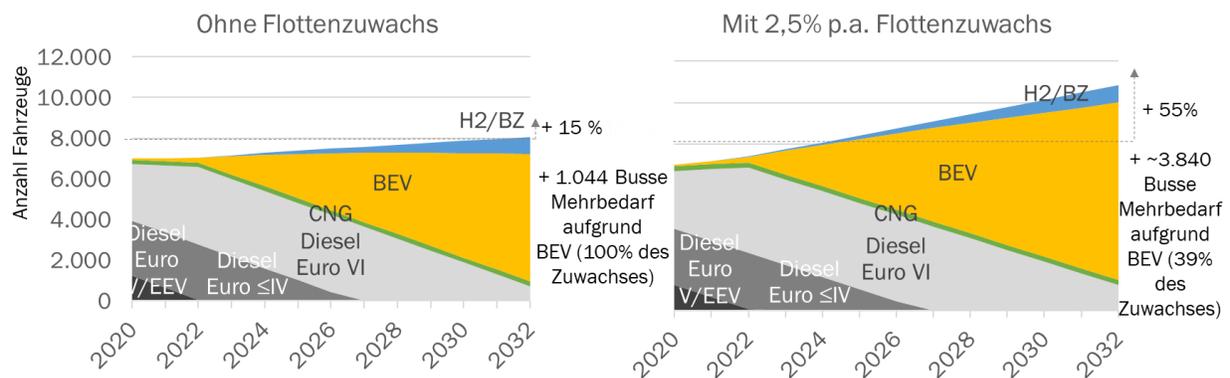


Abbildung 40: Entwicklung Fahrzeugbestand Szenario 2 ohne (links) und mit (rechts) Flottenzuwachs

Jährliches Flottenwachstum

Die bisherigen Analysen basieren auf der Annahme, dass keine Angebotserweiterung stattfindet und damit die Flottengröße über den betrachteten Zeitraum stabil bleibt. In diesem Kapitel soll nun die Auswirkungen einer angestrebten Angebotsausweitung und damit Vergrößerung der Flotte in kompakter Form betrachtet werden. Hierzu werden die bisherigen Ergebnisse ohne Flottenzuwachs einer angenommen Angebotsmehrung und somit einem jährlichen Flottenwachstum von 2,5 % gegenübergestellt.¹⁴

Zu Beginn (Gesamtflotte etwa 7000 Fahrzeuge) entspricht der Zuwachs von 2,5% etwa 180 Fahrzeugen) pro Jahr. Dieser Unterschied zeigt sich auch in Abbildung 42 gegenüber Abbildung 41. So werden im Jahr 2021 ohne Flottenwachstum in Szenario 1 585 Fahrzeuge neu beschafft, im gleichen Szenario mit Flottenwachstum hingegen 761. Dieser Unterschied steigt über die Zeit an, da sich das Flottenwachstum von 2,5% p.a. jeweils auf die Flottengröße des vorherigen Jahres bezieht.

Bei der Betrachtung mit Flottenwachstum (Abbildung 42) wird der erforderliche Anstieg der Anzahl der jährlichen Neubeschaffungen von Dieselfahrzeugen in **Szenario 0** zur Abdeckung des erweiterten Angebotes ersichtlich, wohingegen die Anzahl der Neubeschaffungen bei der Betrachtung ohne Flottenwachstum (Abbildung 41) konstant bleibt.

¹⁴ Bedingt durch den Projektverlauf werden im Nachfolgenden nur die Szenarien 0, 1 und 2 berücksichtigt.

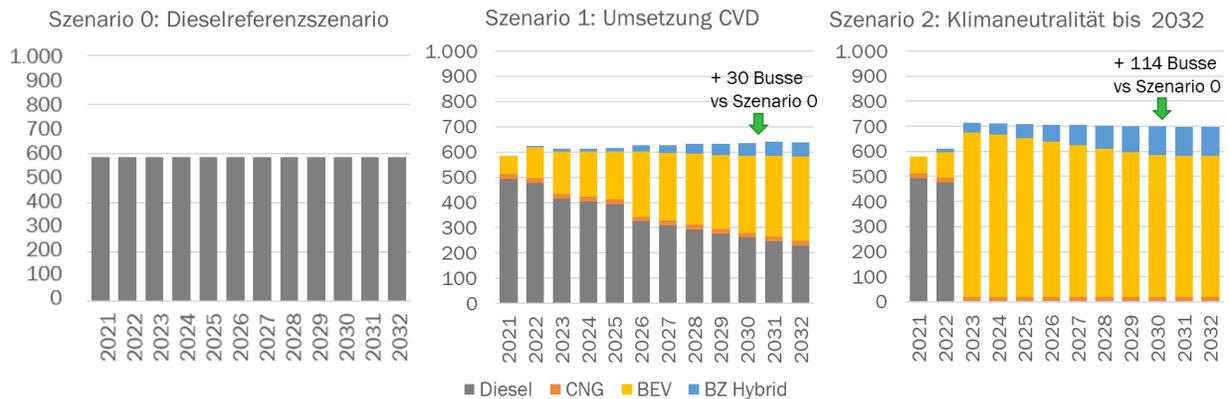


Abbildung 41: Anzahl neue Fahrzeuge je Technologie pro Jahr Szenario 1 und 2 ohne Flottenzuwachs

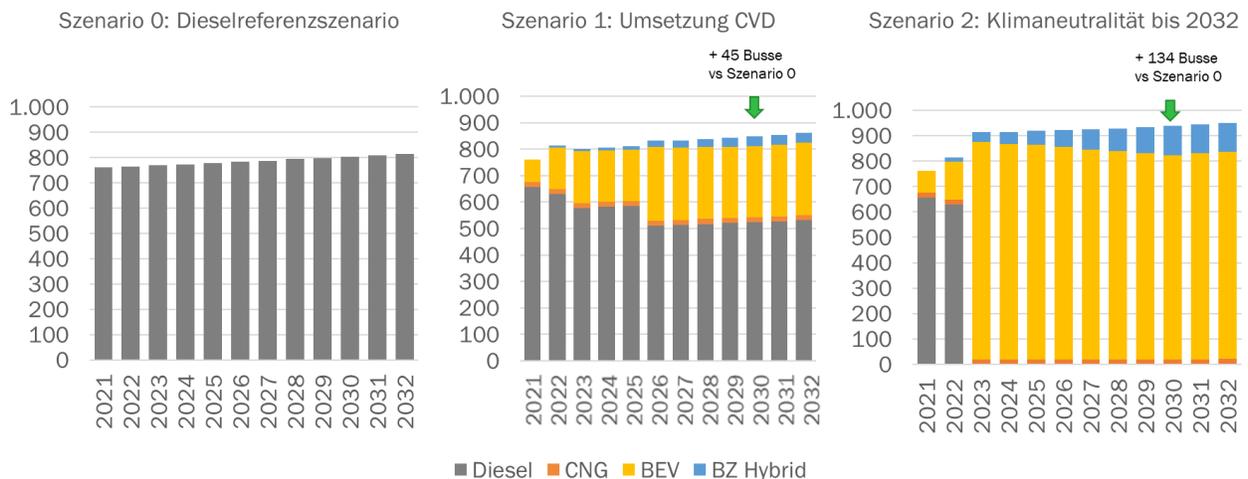


Abbildung 42: Anzahl neue Fahrzeuge je Technologie pro Jahr Szenario 1 und 2 mit Flottenzuwachs

In **Szenario 1** mit Flottenwachstum besteht im Jahr 2030 ein jährlicher Mehrbedarf von 45 Fahrzeugen gegenüber dem Dieselszenario aufgrund des unterstellten Mehrbedarfs von 20% für die beschafften BEV Busse. Dies entspricht einer Differenz von 15 Fahrzeugen p.a. gegenüber dem BEV bedingten Mehrbedarf in der Betrachtung ohne Flottenwachstum. Für **Szenario 2** erhöht sich die Differenz zwischen der Anzahl neubeschaffter Fahrzeuge in 2030 mit und ohne Flottenwachstum auf 20 Fahrzeuge p.a., dies ist bedingt durch die höhere Anzahl an beschafften batterieelektrischen Bussen und dem damit einhergehenden Mehrbedarf (+20%).

Kosten

Abbildung 43 stellt die Gesamtkosten und die Kosten pro km mit und ohne Flottenwachstum dar. Insgesamt liegen die Gesamtkosten für alle Szenarien in der Betrachtung mit Flottenzuwachs über denen der Betrachtung ohne Flottenzuwachs.

In **Szenario 0** steigen die Kosten pro gefahrenem Kilometer bei der Betrachtung mit Flottenwachstum gegenüber der Betrachtung ohne Flottenwachstum um 0,3 €/km an. Dies liegt zum einen begründet in der zusätzlich benötigten Betriebshoffläche. Außerdem werden bei der Bestandsflotte die Investitionskosten nicht berücksichtigt, die gefahrenen Kilometer hingegen schon. Daher steigen auch

die Investitionskosten pro km bei der Betrachtung mit Flottenwachstum an, da die anfängliche Bestandsflotte (ohne berechnete Investitionskosten) hier einen kleineren Anteil der Gesamtflotte ausmacht.

Bei **Szenario 1** und **Szenario 2** führt neben diesen Faktoren der Fahrzeugmehrbedarf bei den BEV bei der Betrachtung mit Flottenzuwachs zu einem Anstieg der Kosten pro km gegenüber der Betrachtung ohne Flottenwachstum. In **Szenario 1** beträgt die Differenz zwischen den beiden Betrachtungen mit und ohne Flottenwachstum 0,33€/km und bei **Szenario 2** 0,37 €/km.

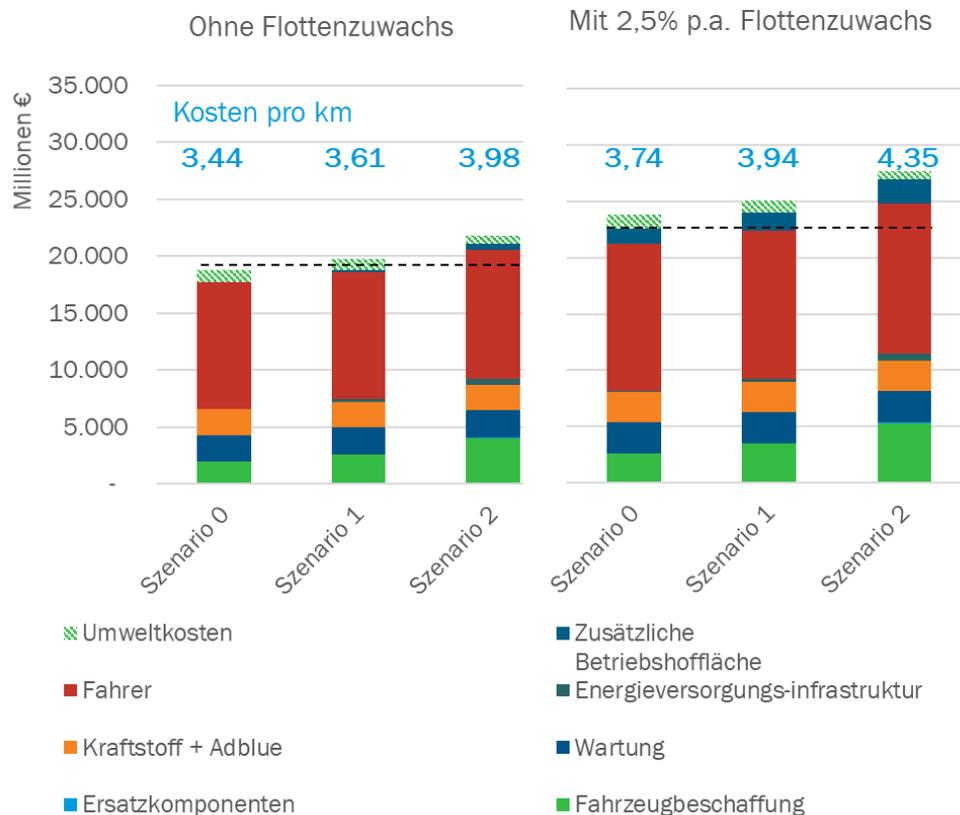


Abbildung 43: Gesamtkosten ohne (links) und mit (rechts) Flottenwachstum

Mit steigenden Gesamtkosten nehmen auch die mittleren jährlichen Mehrkosten gegenüber dem Dieselreferenzszenario zu, wie Abbildung 44 und Abbildung 45 darstellen. In **Szenario 1** steigen diese bei der Berücksichtigung von Flottenwachstum um 31 Mio.€ und in **Szenario 2** um 83 Mio.€ gegenüber keinem Flottenwachstum an. Dies wird insbesondere durch steigende Fahrzeugbeschaffungskosten, Kosten für die Energieversorgungsinfrastruktur und die zusätzlich benötigte Betriebsfläche verursacht.

Der Mehrkostenanteil durch den BEV Fahrzeugmehrbedarf bleibt dabei nahezu konstant. In **Szenario 1** liegt dieser bei der Betrachtung ohne Flottenwachstum bei 6 % und somit nur einen Prozentpunkt höher als bei der Betrachtung mit Flottenwachstum. In **Szenario 2** liegt dieser Wert bei beiden Betrachtungsweisen bei 12 %.

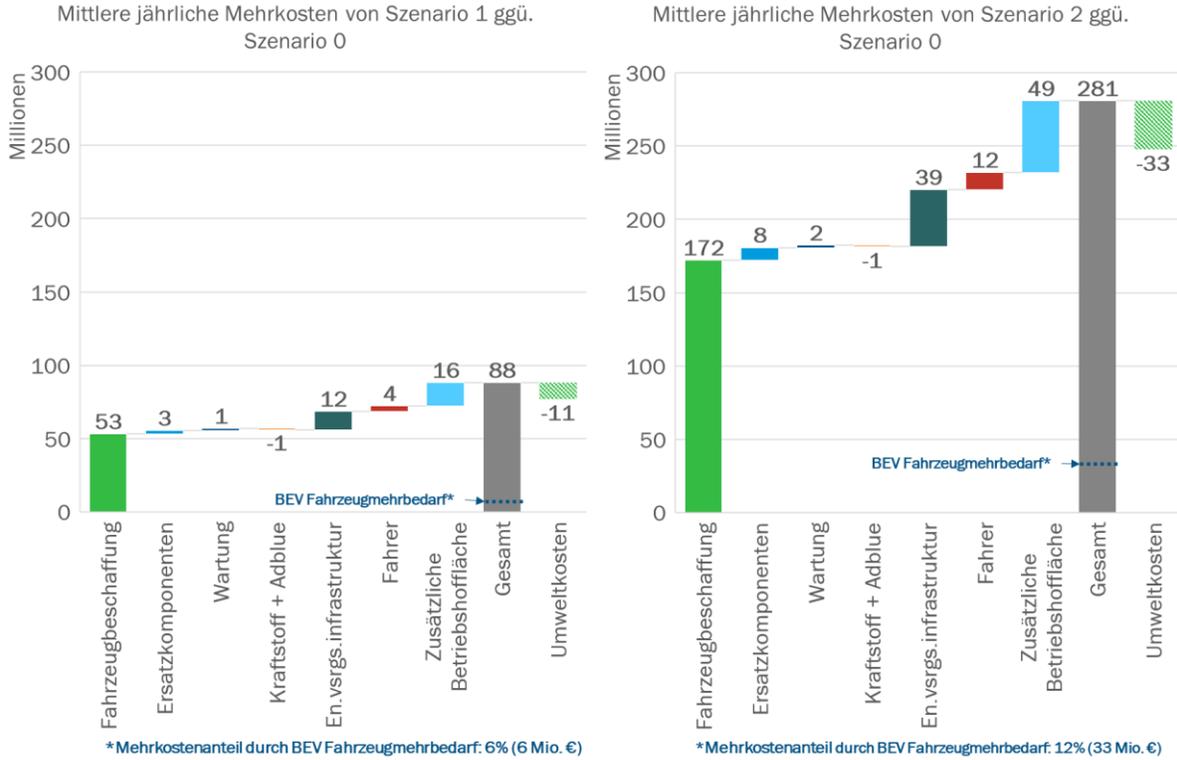


Abbildung 44: Mittlere jährliche Mehrkosten der Flotten in Szenarien 1 und 2 ohne Flottenzuwachs

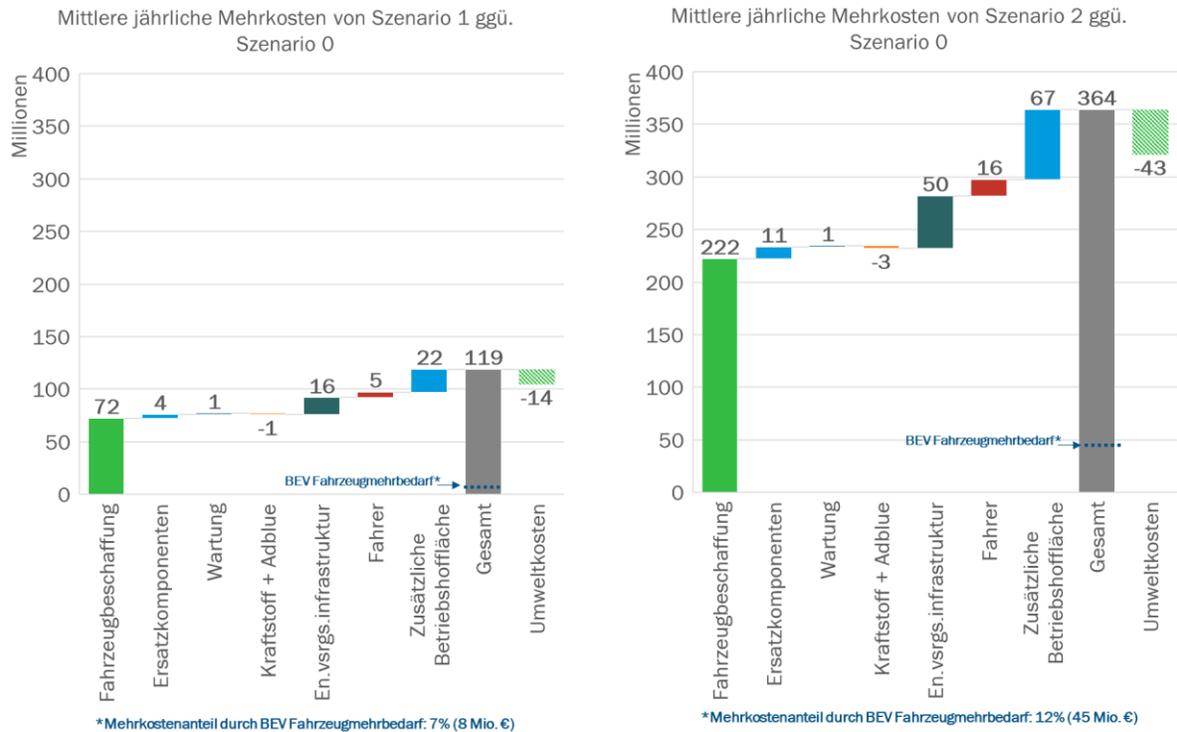


Abbildung 45: Mittlere jährliche Mehrkosten der Flotten in Szenarien 1 und 2 mit Flottenzuwachs

3.1.10 Zusammenfassung Teil A

TCO-Vergleich BEV und BZ gegenüber Dieselantrieb

- Für das Jahr **2030** werden TCO-Kosten für 12-m Dieselbusse von 3,5 €/km, für BEV-Busse von 4,3 €/km und für BZ-Busse von 4,3€/km erwartet → **Mehrkosten ZEV ggü. Diesel von 21 -22%**
- **Investitionskostenförderung** für Fahrzeuge und Infrastruktur mit aktuellen Förderkonditionen ermöglicht **Verringerung der Mehrkosten** von ZEV gegenüber Dieselfahrzeugen von über **50%** (verbleibende Mehrkosten ~10%)
- CO₂ Kosten von **180 €/t CO₂** verringern die Mehrkosten von ZEV gegenüber Dieselfahrzeugen um **~17% in 2030** (verbleibende Mehrkosten ~18%)
- Kombination von Fahrzeug- und Infrastrukturförderung mit erhöhten CO₂ Kosten ermöglicht eine Reduktion der ZEV-Mehrkosten um **~75% in 2030** (verbleibende Mehrkosten ~5%)
- Die **Kombination aller betrachteten Maßnahmen und Annahmen** (als best case) ermöglicht die Reduktion der ZEV-Mehrkosten in 2030 um **~90%** (verbleibende Mehrkosten ~2%)

Flottenszenarien für Baden-Württemberg

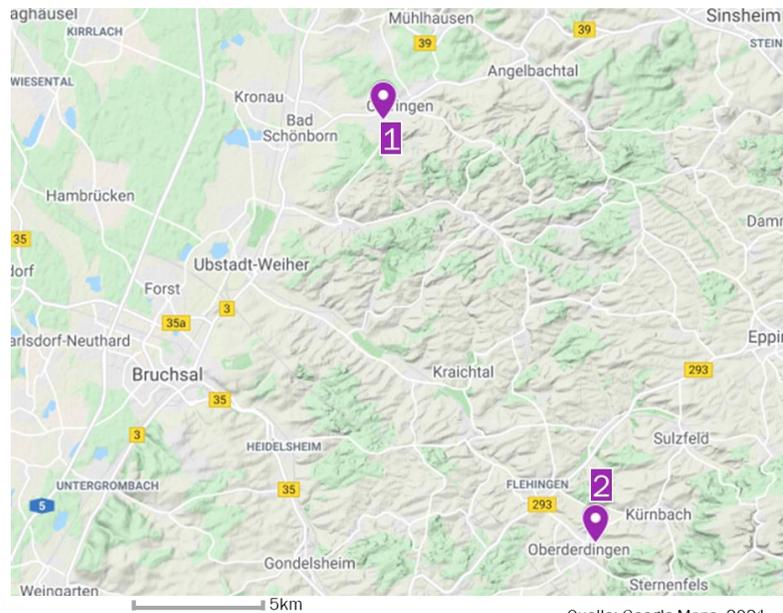
- **Erzielbare THG Einsparungen** (über gesamten Lebenszyklus):
Wird die CVD Richtlinie (**Szenario 1**) umgesetzt, können im Jahr 2032 **20 % der THG-Emissionen** unter Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus eingespart werden, mit einem ambitionierten Klimaschutzszenario (**Szenarios 2 und 3**) werden Einsparungen von **63 %** erreicht. Wird die Klimaneutralität bis zum Jahr 2040 angestrebt (**Szenario 4**), werden im Jahr 2032 Einsparungen von **28 %** umgesetzt und in 2040 von **67 %**.
- **Mittlere jährliche Mehrkosten:**
Die mittleren jährlichen Mehrkosten des CVD Szenarios (**Szenario 1**) gegenüber dem Dieselreferenzszenario betragen knapp **90 Mio.€**, beim ambitionierten Klimaschutzszenario (**Szenario 2**) entstehen jährliche Mehrkosten von rund **280 Mio.€**. Unter Annahme der aktuellen Förderkonditionen können diese Mehrkosten in **Szenario 3 mit Förderung** auf ca. **130 Mio.€** reduziert werden. Durch die zusätzliche Verlängerung des Betrachtungszeitraumes bis 2040 und unter Berücksichtigung aller im TCO-Vergleich betrachteten Maßnahmen und Annahmen (best case) verringern sich die Mehrkosten in **Szenario 4** auf **35 Mio.€**
- **Mittlere CO₂ Vermeidungskosten** im Vergleich zum Dieselreferenzszenario (**Szenario 0**):
Für den Zeitraum bis 2032 entsprechend Ambitionsgrad hinsichtlich ZEV-Anteil an Neubeschaffungen **Szenario 2** (1.492 €/t CO₂) mit 18% höheren Vermeidungskosten gegenüber **Szenario 1** (1.270 €/t CO₂), **Szenario 3** (788 €/t CO₂) aufgrund Förderung mit 38% niedrigeren Vermeidungskosten gegenüber **Szenario 1**, **Szenario 4** (625 €/t CO₂) mit nochmals niedrigeren Kosten (-51%) gegenüber **Szenario 1** aufgrund Förderung und der getroffenen Annahmen (erhöhter CO₂ Preis, verringerter Fahrzeugmehrbedarf, steigende Dieselbuskosten etc.) (best case), bei Betrachtung des Zeitraums bis 2040 in **Szenario 4** unter getroffenen Annahmen (Reduktion Investitionskosten ZEV Busse über die Zeit, steigende Dieselbuskosten) weitere Verringerung der Vermeidungskosten auf 347 €/t CO₂ (-73%)

3.2 Ergebnisse Teil B: Fallstudien private Busunternehmen (Bottom-Up)

3.2.1 Einsatzgebiete & Rahmenbedingungen

In den vorliegenden Fallstudien werden 13 verschiedene Busunternehmen in 2 Verkehrsräumen in Baden-Württemberg untersucht. Abbildung 46 bildet die Standorte der untersuchten Busunternehmen ab. Davon haben elf Busunternehmen einen Betriebshof und eines hat zwei Betriebshöfe. Fünf verschiedene Netzbetreiber versorgen diese Betriebshöfe derzeit mit Strom, wobei der Netzbetreiber bei 10 Betriebshöfen Netze BW ist.

**Verkehrsraum
Bretten**
(Nordöstlicher
Landkreis
Karlsruhe)



**Verkehrsraum
Bodensee-
Oberschwaben**
(Bodenseekreis,
Landkreis
Ravensburg und
Sigmaringen)

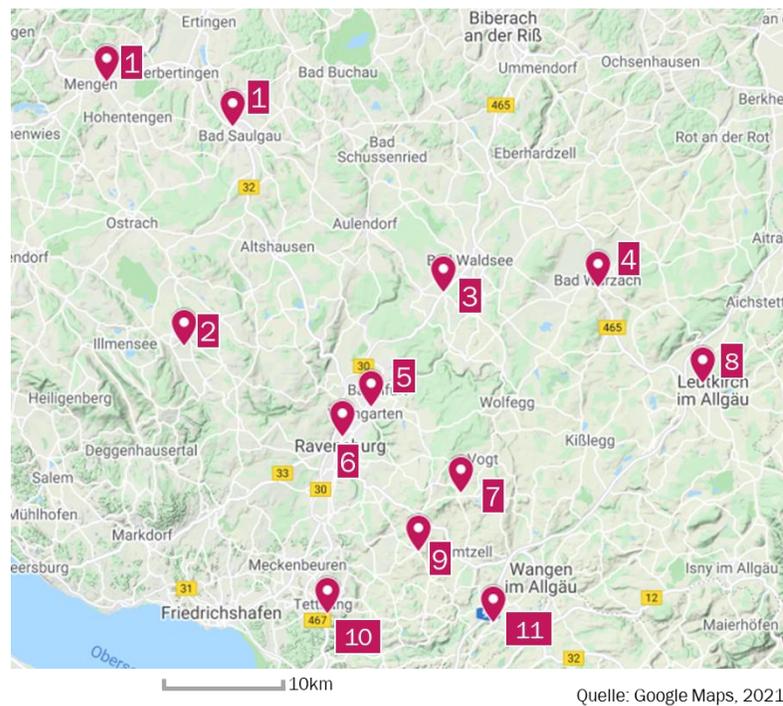


Abbildung 46: Untersuchte Busunternehmen

Die durchschnittliche Umlauflänge variiert dabei je nach Busunternehmen (siehe Abbildung 47, linke Grafik). Bei einem Busunternehmen werden Umläufe von unter 100 km befahren, wohingegen fünf Busunternehmen zwischen 200 und 250 km pro Umlauf bedienen. Im Durchschnitt setzen die 13 Busunternehmen die Busse auf mittleren Umläufen von 177 km ein. Für eine vollständige Umstellung auf elektrische Fahrzeuge ist auch die maximale Umlauflänge in den einzelnen Busunternehmen ausschlaggebend. Bei 2 Busunternehmen liegt diese über 400 km. Gemittelt über die 13 Busunternehmen liegt die maximale Umlauflänge im Durchschnitt bei 321 km.

Über das gesamte Jahr betrachtet liegt die mittlere Laufleistung der Busse bei 50.000 km. Die Haltedauer der Busse beträgt durchschnittlich rund 10 Jahre.

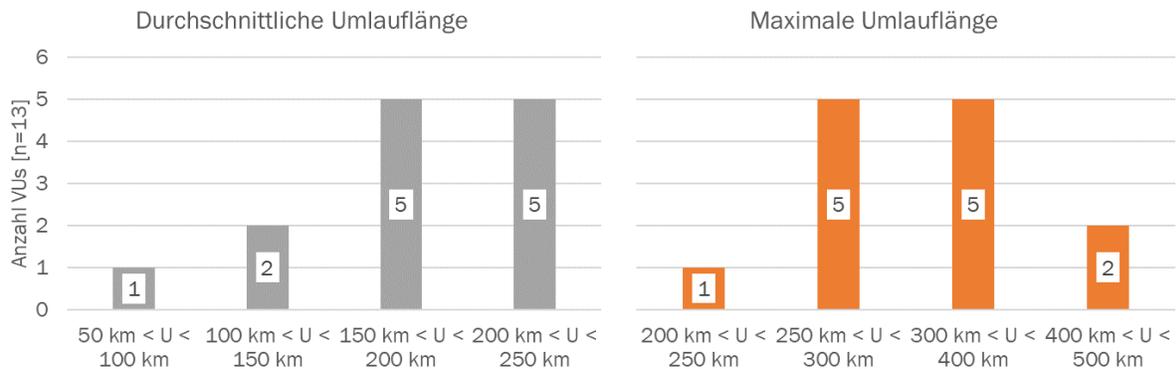


Abbildung 47: Umlaufängen

Für die Berechnung der individuellen Verbrauchswerte bei den einzelnen Busunternehmen vor Ort wurden die Neigungsverteilungen je nach Landkreis, wie in Tabelle 5 und Tabelle 6 aufgezeigt, angenommen¹⁵. In Kombination mit der Reisegeschwindigkeit vor Ort werden damit die Verbrauchswerte der einzelnen Technologien ermittelt.

Tabelle 5: Verteilung der Neigungsklassen im Landkreis Karlsruhe

Neigungsklasse	0 %	+/- 2 %	+/- 4 %	+/- 6 %
Anteil	52 %	27 %	12 %	8 %

Tabelle 6: Verteilung der Neigungsklassen im Landkreis Ravensburg

Neigungsklasse	0 %	+/- 2 %	+/- 4 %	+/- 6 %
Anteil	38 %	36 %	15 %	10 %

3.2.2 Untersuchte Technologien (Rahmendaten)

Busse

Entsprechend Abbildung 48 werden bei den betrachteten Busunternehmen zehn verschiedene Gefäßgrößen von 5,9 m bis 19 m eingesetzt. Dabei sind 12 m Busse mit einem Anteil von 71 % der dominante Fahrzeugtyp, 18 % der Busse sind außerdem größer als 12 m.

¹⁵ Datengrundlage sind die vom Regierungspräsidium Tübingen zur Verfügung gestellten Längsneigungsdaten aller Kreis-, Landes- und Bundesstraßen im jeweiligen Landkreis.

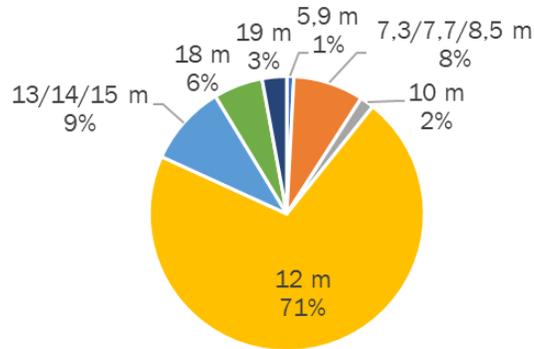


Abbildung 48: Flottenzusammensetzung über alle 13 untersuchten Busunternehmen

Verbrauch

In Abhängigkeit der Gefäßgröße und den in Kapitel 2 beschriebenen Faktoren (Neigung, Durchschnittsgeschwindigkeit) wird der Energieverbrauch je Busunternehmen und Gefäßgröße im Winterbetrieb als energetischer Worst Case ermittelt.

Da 12 m Busse einen Anteil von rund 70 % an der betrachteten Flotte haben, werden in Abbildung 49 beispielhaft die durchschnittlichen Energieverbräuche über die 13 BUs hinweg für 12 m ZEVs dargestellt. Pro km werden für den Betrieb eines BEVs mit Zusatzheizung 1,3 kWh und ohne Zusatzheizung 1,8 kWh benötigt. Maximal liegt der Verbrauch dabei bei BEVs mit Zusatzheizung bei 1,9 kWh und ohne Zusatzheizung bei 2,6 kWh.

Der Durchschnittsverbrauch der Brennstoffzellenbusse liegt bei 8 kg H₂/100 km. Dabei werden bei einem BU maximal 11,2 kg H₂/100 km benötigt. Der niedrigste zu erwartende Verbrauch liegt bei 6,9 kg H₂/100 km.

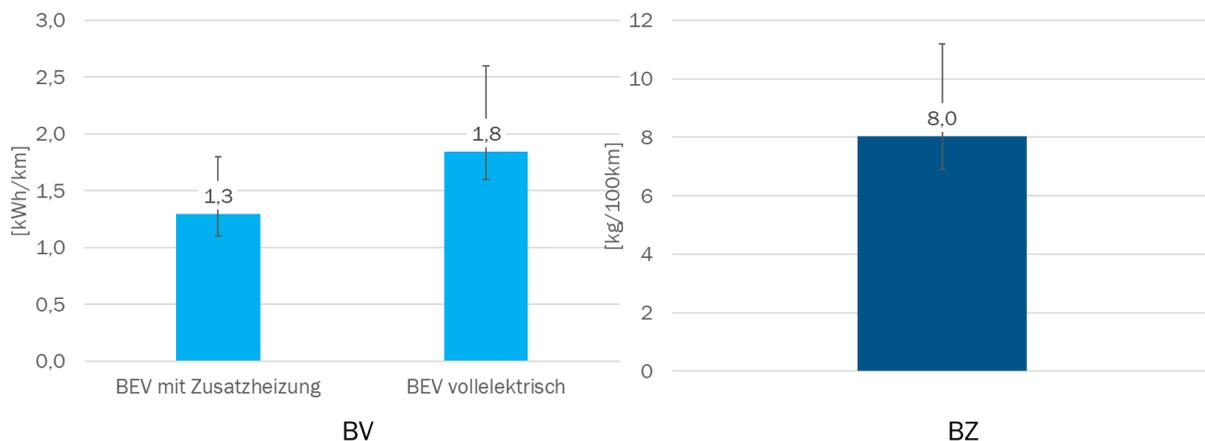


Abbildung 49: Mittlerer Energieverbrauch 12 m BEV und BZ-Bus inkl. Bandbreiten

Kapazität Energiespeicher BEV und BZ Busse

Für BEV-Busse werden insgesamt drei unterschiedliche Batteriekapazitäten untersucht, die die angebotenen Batteriekapazitäten verschiedener Hersteller („OEMs“) abbilden. OEM 1 und OEM 2 sind dabei bereits am Markt verfügbar (Ausnahme 8,5 m Kraftomnibusse: hier aktuell noch keine serienmäßig angebotenen BEV-Busse), OEM Zukunft dagegen bildet die zu erwartende zukünftige Steigerung der Batteriekapazität ab. Basierend auf Einschätzungen der Studienautoren und

Herstellerangaben wird in dieser Studie davon ausgegangen, dass die aktuellen Batteriekapazitäten bis 2024/25 nochmals um 35 % gesteigert werden können. Tabelle 7 listet die angenommenen Batteriekapazitäten auf. Da bei HV-Batterien zur Steigerung der Lebensdauer extreme Ladezustände (<10%, >90% SoC) vermieden werden sollten, entspricht die angegebene Nennkapazität nicht der tatsächlich nutzbaren Kapazität. Diese liegt üblicherweise im Bereich von 80 % der Nennkapazität (SoH), Abweichungen von einem zum anderen Hersteller sind hierbei möglich. Hinzu kommt eine kalendarische Alterung der Batterie, die ebenfalls zu berücksichtigen ist, damit auch am Lebensende der Batterie die benötigten Reichweiten noch zuverlässig erreicht werden. Das Lebensende einer HV-Batterie ist in der Regel erreicht, wenn die Restkapazität der HV-Batterie noch ca. 80% der ursprünglich Nennkapazität beträgt. Entsprechend wurde mit den in Tabelle 7 angegeben „nutzbaren“ Batteriekapazitäten gerechnet.

Tabelle 7: Übersicht angenommener Batteriekapazitäten je Gefäßgröße basierend auf verschiedenen Herstellern (OEMs) bzw. Zukunftsprognose

HV-Batterie- kapazität [kWh]	≥ 8,5 m		10 m		12 m		14-15 m		18 m	
	Installiert	Nutzbar								
OEM 1	80	51	210	134	396	253	475	304	553	354
OEM 2	100	64	296	189	480	307	560	358	640	410
OEM Zukunft	122	78	342	219	591	378	698	447	805	515

Anders als bei Batterien kann die spezifische Energiedichte von Wasserstofftanks nicht durch technische Weiterentwicklungen vergrößert werden, hier ist der verfügbare Bauraum ausschlaggebend. Außerdem ist das Angebot an BZ Bussen aktuell noch eingeschränkt, so sind derzeit noch keine 18 m BZ-Busse verfügbar. Diese sind für 2023/24 angekündigt. Entsprechend fällt die Bandbreite bei den Tankkapazitäten geringer aus im Vergleich zu den verfügbaren Batteriekapazitäten bei BEV-Bussen. Für 8,5 m Kraftomnibusse (KOM) sind aktuell ebenfalls noch keine BZ-Busse verfügbar, hier wurde eine Abschätzung auf Basis der Konzepte von Daimler (F-Cell Sprinter) und Renault (City Bus H2-TECH) getroffen. Tabelle 8 gibt eine Übersicht der angenommenen Werte. Da Wasserstofftanks nicht komplett entleert werden können, wird auch hier analog zu den HV-Batterien mit einem nutzbaren Tankinhalt gerechnet – dieser entspricht 95 % des Nennvolumens.

Tabelle 8: Übersicht der angenommenen Wasserstofftankgrößen je Gefäßgröße

H ₂ -Tank [kg]	≥ 8,5 m		10 m		12 m		14-15 m		18 m	
	Installiert	Nutzbar								
OEM 1	4,4	4,2	30	28,5	38	36,1	42	38	46	43,7

Für die Berechnung der Kosten für die Investition in die Busse wurden die bereits in Kapitel 3.1.2 beschriebenen Kostenannahmen genutzt.

Ladeinfrastruktur

Generell ist pro BEV-Bus ein Ladepunkt am Betriebshof vorzusehen, an dem das Fahrzeug über Nacht geladen werden kann. Dies gilt auch für Busse mit Gelegenheitsladung, welche tagsüber auf der Strecke nachgeladen werden. Pro Ladepunkt wurde für diese Betrachtung eine Ladeleistung von 30, 50 oder 75 kW angenommen. Für einige Umläufe ist es allerdings notwendig, in kürzeren Pausen zwischen Umläufen mit einer erhöhten Ladeleistung von 150 kW im Depot zu laden. Grundsätzlich wird empfohlen, mind. zwei regelbare Ladepunkte vorzusehen, an denen mit der erhöhten Ladeleistung von bis zu 150 kW geladen werden kann.

Für die Investitionskosten wurde angenommen, dass zusätzlich zu den Ladepunkten pro BEV eine mobile Ladestation für die Werkstatt bzw. den Betriebshof vorgesehen wird, die flexibel einsetzbar ist.

Die mittleren Kosten für die Installation eines Ladepunkts mit 75 kW belaufen sich auf rund 70.000 €. Bei 50 kW liegen die Kosten um etwa 20.000 € darunter.

Die Netzübergabestation wurde ebenfalls berücksichtigt. Nicht berücksichtigt wurden ggf. erforderliche Netzertüchtigungsmaßnahmen durch den Netzbetreiber, diese sind auch nicht unmittelbar vom Busunternehmen zu tragen, sondern werden über den Baukostenzuschuss abgegolten. Hierbei ist allerdings zu berücksichtigen, dass hohe Netzertüchtigungskosten auf Seiten des Netzbetreibers dazu führen können, dass die Ertüchtigung begründet zurückgestellt oder ggf. wegen Unzumutbarkeit abgelehnt wird. Dies ist insbesondere im ländlichen Raum im Fall von größeren Betriebshöfen mit einem entsprechend höheren Anschlussbedarf relevant. Von daher ist bei der Planung des Einsatzes gerade von Batteriebussen eine enge und frühzeitige Abstimmung mit dem Netzbetreiber unerlässlich.

Wasserstoffinfrastruktur

Eine typische Wasserstofftankstelle besteht aus den Komponenten Wasserstoffspeicher (üblicherweise mit mehreren Druckstufen, sogenannten „Druckbänken“), Kompressor und Dispenser. Der Wasserstoff wird in der Regel in 200 oder 300 bar-Trailern angeliefert, wobei der volle Trailer auf dem Betriebshof verbleibt und gegen den leeren Trailer ausgetauscht wird („Swap-Verfahren“). Der Kompressor verdichtet den Wasserstoff aus den Trailern in die Hochdrucktanks. Von dort strömt der Wasserstoff beim Tankvorgang aufgrund des Druckgefälle in den Tank des Busses über. Erfolgt der Druckausgleich bzw. sinkt die Durchflussgeschwindigkeit unter einen festgelegten Wert wird auf die nächste Druckbank umgeschaltet.

Neben der Anlieferung des Wasserstoffes kann auch eine Vor-Ort-Herstellung durch Elektrolyse von Wasser erfolgen. Dafür sind zusätzlich ein Elektrolyseur, ein weiterer Druckspeichertank (dieser kann stationär oder auch mobil in Form eines H₂ Trailers ausgeführt werden) sowie ein weiterer Kompressor notwendig. Der Kompressor komprimiert den im Elektrolyseur erzeugten Wasserstoff in den Speichertank, meist bei niedrigeren Drücken (< 100 bar).

Kompressoren und Dispenser sollten generell redundant ausgelegt sein, um eine durchgehende Verfügbarkeit der H₂ Tankinfrastruktur zu gewährleisten. Für Kompressoren und Dispenser ist ein Redundanzfaktor von n+1 sinnvoll (bspw. 3 Kompressoren, wenn nur 2 benötigt werden oder 2 Dispenser bei 1 benötigtem).

Der Hochdruckspeicher muss größer als der Tagesspitzenbedarf sein, da er aufgrund des üblicherweise zur Betankung eingesetzten Überströmverfahrens mit mehreren Druckbänken zur Erreichung des Speicherdrucks, der üblicherweise bei 350 bar liegt, nicht komplett entleert werden kann. Er wird hinsichtlich der nutzbaren Kapazität generell so ausgelegt, dass er die Busse mindestens einen Tag lang mit Wasserstoff versorgen kann, sollten die Kompressoren ausfallen.

Die Kompressoren wiederum werden so ausgelegt, dass sie die entnommene Wasserstoffmenge pro Tag in der Zeit, in der keine (bzw. sehr wenige) Tankvorgänge stattfinden, komplett füllen können.

Folglich unterscheiden sich die Investitionen und Betriebskosten je nach Anzahl der zu betankenden Busse. Aufgrund des erhöhten Planungs- und Investitionsaufwandes wird eine eigene Betriebshoftankstelle ab einer BZ Flottengröße von 10 Bussen empfohlen. Für kleinere Flotten ist zu eruieren, ob ggf. öffentliche H₂ Tankstellen in näherer Umgebung genutzt werden können, wobei hier idealerweise Vereinbarungen bezüglich einer garantierten Verfügbarkeit zu treffen sind, um der Betriebspflicht eines Busunternehmens Rechnung zu tragen.

Die Kosten für eine Tankstelle für 10 Busse inklusive Planung, Genehmigung und Installation liegen in der Größenordnung von 2 Mio. €.

3.2.3 Annahmen/Szenarien

a) Ermittlung umstellbare Umläufe anhand Analyse der technisch-betrieblichen Machbarkeit

Um zu ermitteln, welche Umläufe sich bei den betrachteten Busunternehmen aus technisch-betrieblicher Sicht umstellen lassen, wurden je Busunternehmen für jeden einzelnen Umlauf der Energiebedarf in kWh elektrischer Energie bzw. kg H₂ ermittelt. Betrachtet wurde der für die Auslegung relevante Worst Case Fall, d.h. es wird der energetische ungünstigste Fall (Einsatz im Winter bei niedrigen Außentemperaturen) herangezogen. Dazu wurden die jeweiligen Umlauflängen, und die sich aus der gegebenen mittleren Reisegeschwindigkeit und Topografie ergebenden km bezogenen Verbräuche ermittelt und miteinander multipliziert. Die Analyse wurde jeweils für die drei betrachteten emissionsfreien Antriebstechnologien:

- BEV mit elektrischer Zusatzheizung
- BEV mit brennstoffbasierter Zusatzheizung
- BZ

durchgeführt. Um Technologie bezogene Ergebnisse zu erhalten, wurde eine Mischung der Technologien nicht betrachtet. Anhand der Analyseergebnisse der Fallstudien ergibt sich für die 13 Busunternehmen ein Überblick, in welchem Umfang die einzelnen Flotten auf emissionsfreie Antriebe umgestellt werden können (siehe Kapitel 3.2.4).

Die zwei Detailstudien (Detaillevel) dienen zusätzlich zur Ermittlung der umstellbaren Umläufe, der Analyse wie die Lade- bzw. Tankinfrastruktur hinsichtlich Anzahl Ladepunkte, Ladeleistung bzw. Anzahl Tankspuren, H₂ Verdichter und H₂ Speicherkapazität im Zusammenspiel mit der Aufenthaltsdauer auf dem Betriebshof auszulegen ist. Dabei wurde dezidiert geprüft, ob bei mehreren Umläufen pro Bus im Tageseinsatz der jeweils folgende Umlauf auch noch aus energetischer Sicht bedient werden kann. Dies beinhaltet, ob in der planmäßigen Betriebspause bis zum nächsten Einsatz genügend Energie nachgeladen bzw. getankt werden kann, wobei dies vornehmlich für BEV Busse relevant ist. Weiterhin wurde analysiert, in welchem Umfang sich die Anzahl der umstellbaren Umläufe bei den BEV's durch die Bereitstellung der Möglichkeit zur Gelegenheitsladung an 1-2 strategisch günstig gelegenen Punkten im Routennetz erhöhen lässt. Dies ist vor allem für die im Winter reichweitenlimitierten BEVs mit elektrischer Zusatzheizung relevant.

b) Abgleich mit CVD-Umsetzung

In einem zweiten Untersuchungsschritt wurde analysiert, inwiefern die Quotenvorgaben der CVD erfüllt werden können. Da Neuvergaben bei den betrachteten Busunternehmen erst im Zeitraum ab 2025/26 in relevantem Umfang anstehen, wurde hierzu die Quote der zum 1.1.2026 beginnenden zweiten Phase der CVD Richtlinie mit mindestens 32.5% emissionsfreien Bussen zugrunde gelegt.

3.2.4 Ergebnisse Machbarkeitsanalysen

Jede der untersuchten Technologien weist spezifische Vor- und Nachteile auf. Während bei den batterieelektrischen Bussen das gewählte Heizungskonzept hinsichtlich Emissionsverhalten und Reichweite eine zentrale Rolle spielt, ist die aufwendigere und kostenintensivere Infrastruktur der BZ-Busse ein entscheidungsrelevanter Faktor. Diese Vor- und Nachteile fallen, wie die nachfolgenden Ergebnisse zeigen, abhängig vom jeweiligen Einsatzkontext unterschiedlich ins Gewicht. Daher ist die Einzelfallanalyse zur Ermittlung der Eignung der verfügbaren Technologien für das jeweilige Busunternehmen mit seinen betrieblichen Einsatzrandbedingungen zwingend erforderlich.

Energiebedarf und Ladezeit

Abbildung 50 zeigt eine beispielhafte Analyse von drei Umläufen eines Busunternehmens für BEV mit elektrischer Zusatzheizung.

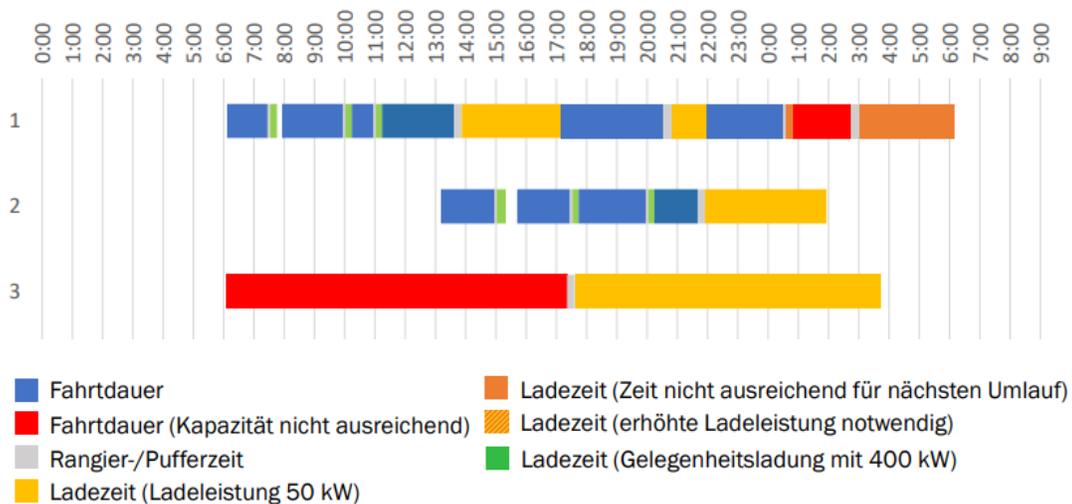


Abbildung 50: Beispiel für Umlaufanalyseergebnisse für BEV mit elektrischer Zusatzheizung, Umläufe 1 und 2 mit Möglichkeit zur Gelegenheitsladung unterwegs, Umlauf 3 nur mit Depotladung

Anhand des vorliegenden Beispiels ist zu erkennen, dass nur Bus 2 seine Tagesstrecke schaffen kann. Trotz möglicher Gelegenheitsladungen unterwegs, ist es Bus 1 nichtmöglich, den gesamten 3. Umlauf zu fahren, da in vorherigen Pausen zwischen 1. und 2. sowie 2. und 3. nicht genug Ladezeit vorhanden ist bzw. die gewählte Ladeleistung von 50 kW zu gering ist. Weiterhin reicht die zur Verfügung stehende Ladezeit nach Dienstende bei der aktuell gewählten Ladeleistung nicht aus um die HV Batterie ausreichend für den nächsten Umlauf am Folgetag aufzuladen. Bei Bus 3 übersteigt der Energiebedarf für den gezeigten Umlauf die Kapazität der installierten Hochvoltbatterie und kann daher nicht von einem BEV Bus mit elektrischer Zusatzheizung bedient werden. Dieser kleine Ausschnitt der Analyse zeigt also bereits die Erforderlichkeit der Einzelfallanalyse, da sich nicht jeder Umlauf für jede Bustechnologie eignet.

Können einzelne Umläufe mit der ausgewählten Technologie nicht bedient werden, gibt es weitere Optionen. So kann eine andere emissionsfreie Bustechnologie (BEV mit Zusatzheizung, BZ) gewählt werden, im Falle von BEV-Bussen kann die Möglichkeit geprüft werden, eine weitere Gelegenheitslademöglichkeit aufzubauen oder schlicht einen zusätzlichen Bus einzusetzen, d.h. den Umlauf zu teilen. Schließlich besteht eine weitere Möglichkeit in einer von Grund auf neuen Umlaufplanung, die die Spezifika der betrachteten Technologie berücksichtigt. Während die zuletzt genannte Option mit erheblichem Planungsaufwand verbunden ist, ist die Option eines zusätzlichen

Fahrzeugs aufgrund der damit verbundenen Themen Kosten, Abstellfläche, Ladeinfrastruktur, Wartung ebenfalls nicht attraktiv. Die Technologieoption BEV mit Brennstoffzusatzheizung würde im vorliegenden Fall den Umlauf 3 ermöglichen, mit BZ Bussen sind alle 3 Umläufe möglich.

Energieversorgung

Ein weiterer relevanter Bereich neben der Analyse des umlaufbezogenen Energiebedarfs ist die Analyse der Energieversorgung der Fahrzeuge. Die Energieversorgung kann auf dem Betriebshof (Lade-/Tankinfrastruktur) oder auf Strecke/ im öffentlichen Raum (Ladeinfrastruktur/ öffentliche H₂ Tankstelle) erfolgen. Hierbei geht es um das Zusammenspiel mit der gewählten Betriebs- bzw. Energieversorgungsstrategie sowie mit verschiedenen meist technischer Parameter wie Ladeleistung/ Betankungsgeschwindigkeit, Anzahl Lade-/Tankpunkte, Gleichzeitigkeitsfaktor etc. und deren Rückkopplung auf die Anzahl umstellbarer Umläufe, Dies soll am nachfolgenden Beispiel veranschaulicht werden.

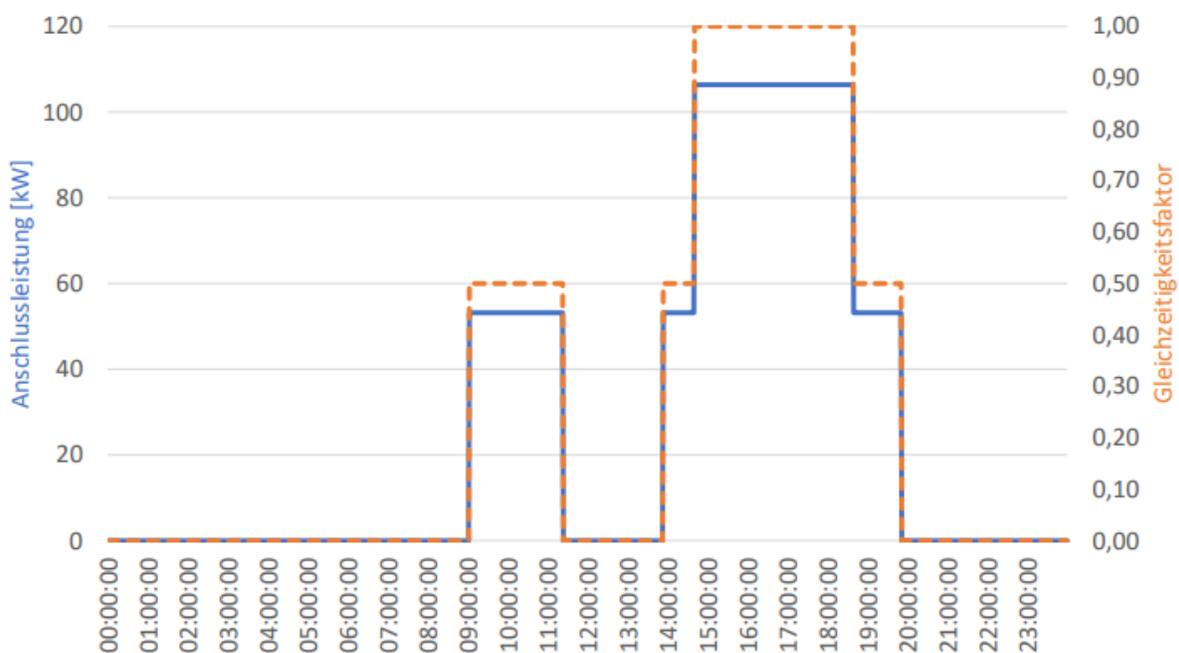


Abbildung 51 Ladeleistung Betriebshof über den Tag verteilt (Depotladung)

Abbildung 51 zeigt die Ladekurve eines der betrachteten Busunternehmens bei Einsatz von BEV Bussen mit elektrischer Zusatzheizung. Aufgrund des mit dieser ZEV Technologie verknüpften erhöhten Energiebedarfs können lediglich 3 Umläufe bzw. 2 Busse umgestellt werden. Dies bedeutet, dass nur eine relativ geringere Anschlussleistung benötigt wird, um die Busse auf dem Depot zu laden.

Um der geringeren Reichweite der Batteriebusse mit elektrischer Zusatzheizung entgegenzuwirken, ist eine verfügbare Maßnahme eine (oder mehrere) Möglichkeiten zur Gelegenheitsladung auf der Strecke zu schaffen. Dies führt im vorliegenden Fall dazu, dass mit nun 9 umstellbaren Bussen deutlich mehr ZEV-Busse eingesetzt werden können und somit auch eine höhere Anschlussleistung auf dem Depot vorgehalten sein muss (siehe Abbildung 52), um den erhöhten Bedarf decken zu können (hier 160kW im Maximum vs. knapp 110 kW bei reiner Depotladung (siehe Abbildung 51):

Ladedynamik über den Tag (Betriebshof):

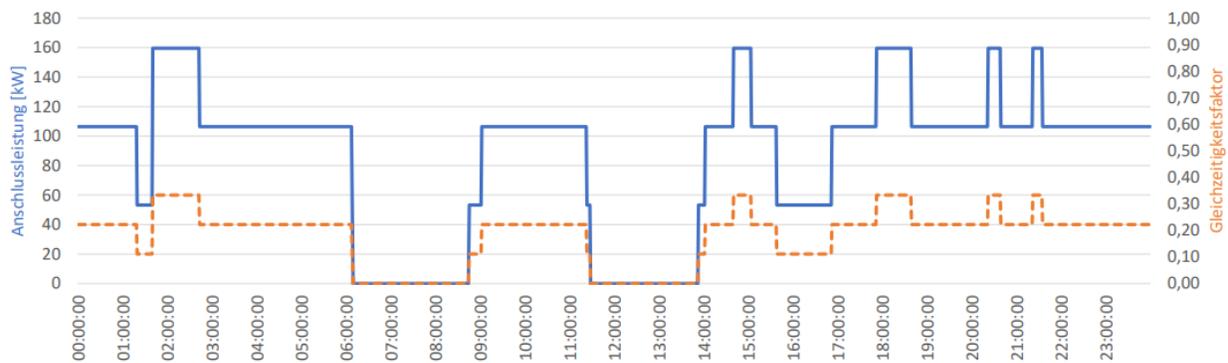


Abbildung 52: Ladeleistung Betriebshof (inkl. Gelegenheitsladung) zur Versorgung von 9 Bussen mit elektrischer Zusatzheizung

Ergebnisse

Wird die technische Machbarkeit über alle untersuchten Verkehrsbetriebe betrachtet, zeigen sich zum Teil große Unterschiede bei den umstellbaren Flottenanteilen¹⁶, die sich aus der gewählten ZEV Technologie im Zusammenspiel mit den eingesetzten Gefäßgrößen, den spezifischen Verbräuchen und Umlauflängen ergeben.

Von den 241 bei den 13 Busunternehmen eingesetzten Bussen können im Mittel je nach Technologie 60 (25%) – 227 Busse (94%) auf ZEV-Busse umgestellt werden. Bei den batterieelektrischen Fahrzeugen mit Brennstoffzusatzheizung können im Durchschnitt 51% bis 83% der eingesetzten Busse umgestellt werden, während bei den BEV mit elektrischer Zusatzheizung nur 25% bis 43% im Durchschnitt umgestellt werden können. Hier wird ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden Technologien ersichtlich, ausgelöst durch die Unterschiede im elektrischen Energiebedarf und damit in der Reichweite für den Auslegungsfall (Winterbetrieb).

Die Bandbreite der Machbarkeit (siehe Tabelle 9) ist jedoch nicht nur beeinflusst von der Fahrzeugheizung, sondern auch stark abhängig vom Einsatzgebiet und den Rahmenbedingungen vor Ort (Topografie, mittlere Reisegeschwindigkeit, eingesetzte Gefäßgrößen). Während die Machbarkeit der BEV-Busse mit Brennstoffzusatzheizung über die einzelnen Busunternehmen hinweg im Minimum¹⁷ bei 30-78% liegt bzw. bei 57-100% im Maximum¹⁷, liegt sie bei den BEV-Bussen mit elektrischer Zusatzheizung mit 0-44% im Minimum und 15-67% im Maximum deutlich unter den BEV-Bussen mit Brennstoffzusatzheizung.

Im Vergleich dazu ist die Machbarkeit der BZ-Busse mit durchschnittlich 90% (Minimum) bis 94% (Maximum) im Schnitt höher als bei den BEV-Bussen.

Aber auch hier gibt es lokale Unterschiede, sodass das Busunternehmen mit der geringsten Umsetzungsquote im Minimum 76% der Busse auf BZ-Busse umstellen kann, während 4 Busunternehmen 100% der Flotte umstellen können. Im Maximalszenario können 6 der untersuchten 13 Unternehmen ihre gesamte, eingesetzte Flotte auf BZ-Busse umstellen, das Busunternehmen mit der geringsten Quote kommt auf 78%.

¹⁶ Basis Machbarkeit: Batteriekapazität BEV OEM 2

¹⁷ Minimum bezieht sich auf den Anteil umstellbarer Busse an den eingesetzten Bussen unter den ungünstigsten Randbedingungen (max. Verbrauch, bei BEV minimale Ladeleistung), während sich die Maximumwerte unter den günstigsten Randbedingungen (Kombination minimale Verbrauchswert und bei BEV maximale Ladeleistungen) ergeben.

Tabelle 9: Übersicht technische Machbarkeit nach Antriebstechnologien (Gesamtbetrachtung über alle untersuchten Busunternehmen); Anteile der machbaren KOMs

Technologie	Minimal umstellbar			Maximal umstellbar		
	Min	Max	Durchschnitt	Min	Max	Durchschnitt
BEV mit elektr. Zusatzheizung	0%	44%	25%	15%	67%	43%
BEV mit Brennstoffzusatzheizung	30%	78%	51%	57%	100%	83%
Brennstoffzellenbusse	76%	100%	90%	78%	100%	94%

Ergebnisse nach Gefäßgröße

Abbildung 54 zeigt die ermittelten Bandbreiten der umstellbaren Busse für 3 beispielhafte Gefäßgrößen. Für die gezeigte Analyse wurde als Bezugspunkt die ab 2026 geltende CVD Quote (32.5%) mit aufgenommen.

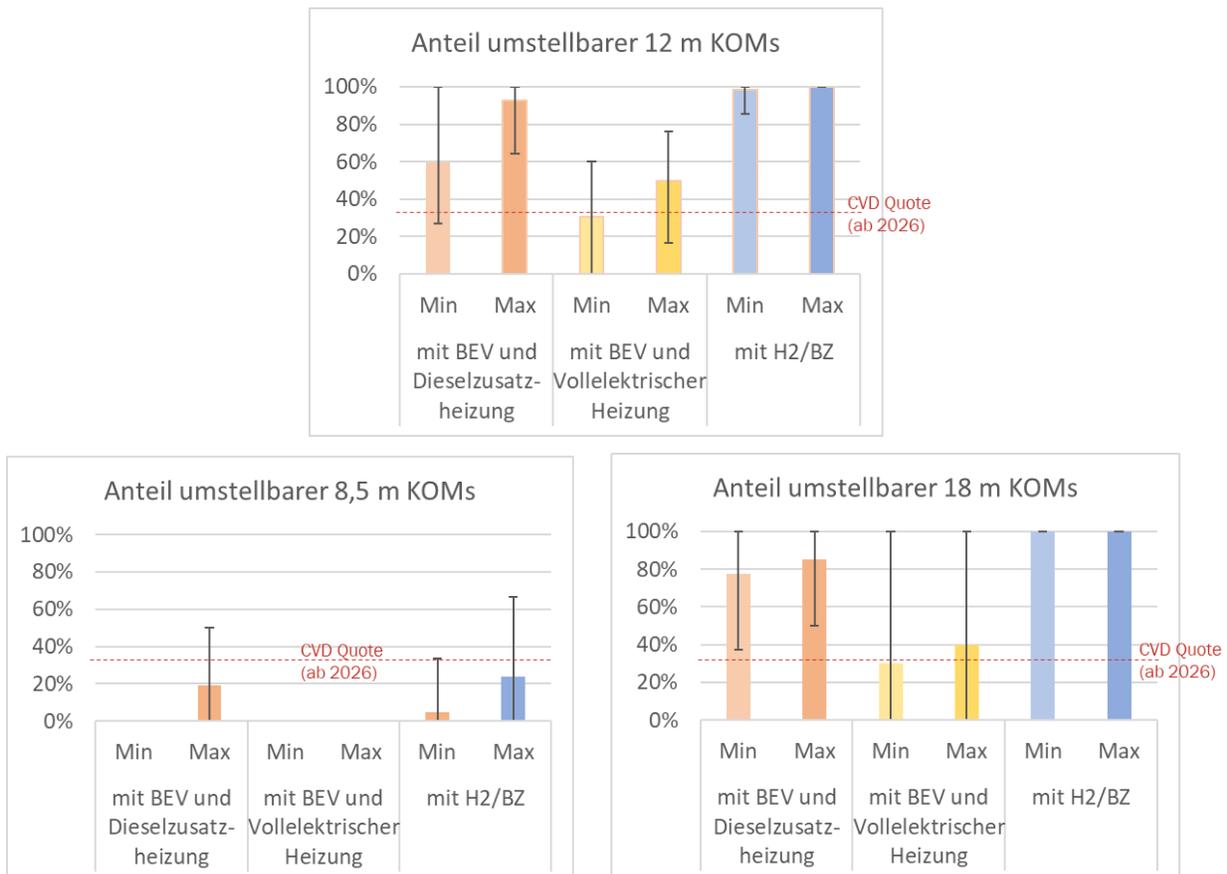


Abbildung 53: Anteil umstellbare Busse für 3 Gefäßgrößen (12, 8,5 und 18 m Bus)

Erwartungsgemäß ergibt sich hier ebenfalls ein heterogenes Bild:

- 12 m Bus: Diese Gefäßgröße stellt die mit Abstand am meisten verwendete Gefäßgröße dar (71% der bei den 13 untersuchten Busunternehmen eingesetzten Busse, siehe

Abbildung 48). Die Einhaltung der CVD ist für diese Gefäßgröße heute bereits weitgehend machbar, mit den bereits zuvor beschriebenen deutlichen Unterschieden zwischen den Heizungskonzepten

- BEV mit Dieselzusatzheizung 60% - 93% im Mittel über die untersuchten Busunternehmen umstellbar, (Bandbreite Min/Max 27% - 100%),
 - BEV mit vollelektrischer Heizung: im Mittel 30-50% umstellbar (Bandbreite 0% - 76%)
 - H2/BZ ermöglicht Vollumstellung (Bandbreite 86% - 100%)
- 8,5 m Bus: sowohl BEV als auch H2/BZ-Modelle auf Basis aktueller Informationen zu möglichen Spezifikationen voraussichtlich noch stark Reichweiten limitiert, derzeit keine Modelle am Markt verfügbar
 - 18 m Bus: CVD Richtlinien Einhaltung heute mit BEV mit Dieselheizung bereits machbar, mit H2/BZ Vollumstellung machbar (Fahrzeugverfügbarkeit ab 2023/24), hohe Bandbreiten gerade bei BEV mit vollelektrischer Heizung aufgrund geringer Fahrzeuganzahl

3.2.5 Einsparpotentiale THG-Emissionen

Im Folgenden werden die Einsparpotentiale an Treibhausgasen (THG) durch den Einsatz von ZEV dargestellt. Dafür wurde für die Gefäßgrößen 8,5m, 10m, 12m, 14/15m sowie 18m der Mittelwert über alle Busunternehmen je Gefäßgröße gebildet, um repräsentative Werte zu erhalten. Tabelle 10 zeigt die in die Berechnung eingegangenen Daten:

Tabelle 10: Eingangsdaten der Berechnung der THG-Einsparpotentiale (Mittelwerte über alle BUS)

	8,5 m	10 m	12 m	14/15 m	18 m
Verbrauch Dieselbus [l/100 km]	13,7	29,4	31,5	35,5	47
Verbrauch BEV el. Heizung [kWh/100 km]	79,9	151,5	150,9	175,4	204,8
Verbrauch BEV Zusatzheizung (Strom [kWh/100 km] bzw. Diesel [l/100 km])	65,3 1,6	125 2,3	123,6 2,9	139,1 3,3	182,3 4,9
Verbrauch BZ-Bus [kg H ₂ /100 km]	4,2	7,8	7,6	8,5	11
Haltedauer [a]	7,6	6,7	10,3	10,3	11,3
Jahresfahrleistung (Diesel- & BZ-Bus) [km]	43.900	39.900	52.300	49.900	33.700
Jahresfahrleistung (BEV) [km] ¹⁸	29.500	26.800	35.100	33.500	22.600

Weiter wird Strom aus erneuerbaren Energien gemäß dem Mix in Baden-Württemberg im Jahr 2026 (vgl. Kapitel 3.1.8) für das Laden der BEV sowie die Herstellung des Wasserstoffes eingesetzt. Entsprechend werden auch die im Jahr 2026 voraussichtlich verfügbaren Batteriekapazitäten des OEM „Zukunft“ angenommen. Einmalig auftretende Emissionen wie bspw. durch die Buserstellung werden anhand der Haltedauer und gefahrenen Jahreskilometer auf einen gefahrenen Kilometer umgelegt.

¹⁸ Da mit BEV tendenziell nur kürzere Umläufe bedienbar sind, ist ihre jährliche Laufleistung meist geringer als Diesel- oder BZ-Busse. Dies ist jedoch stark vom tatsächlichen Einsatz abhängig. Hier wurde ein Reduktionsfaktor auf Basis der zur Verfügung stehenden Umlaufpläne ermittelt.

Da der 12 m Solobus die mit Abstand am häufigsten verwendete Gefäßgröße darstellt, soll er stellvertretend näher beschrieben werden. Die Aussagen lassen sich aber prinzipiell auch auf alle anderen Gefäßgrößen übertragen. Wie Abbildung 54 zeigt, lassen sich mit einem BEV mit elektrischer Heizung 48 % THG im Vergleich zum Dieselbus einsparen, bei Verwendung einer Diesel-Zusatzheizung sind es noch 40 %. Der BZ-Bus kann 45 % der THG Emissionen pro gefahrenem Kilometer einsparen und weist damit zum BEV Bus vergleichbare Treibhausgaseinsparungen auf.

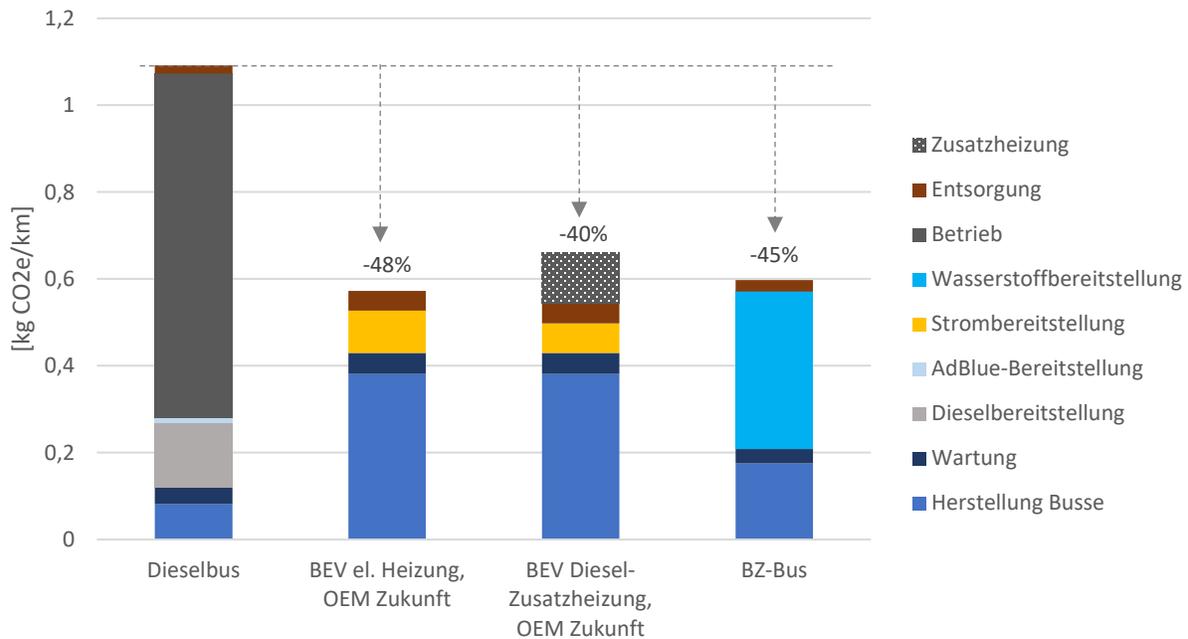


Abbildung 54: THG-Emissionen pro gefahrenem Kilometer (12 m Solobus, OEM Zukunft, Bezugsjahr 2026)

Deutlich zu erkennen ist, dass beim Dieselbus der Großteil der Emissionen aus der Dieselverbrennung, also den direkten Betriebsemissionen, stammt. Der BZ-Bus hat etwas höhere Emissionen in der Herstellung im Vergleich zum Dieselbus, den größten Teil macht bei dieser Antriebstechnologie die Wasserstoffher- bzw. -bereitstellung aus. Direkte Betriebsemissionen, außer Wasserdampf, gibt es prinzipbedingt keine. Bei den BEV-Bussen hingegen ist die Busherstellung (und hierbei die HV-Batterieherstellung) der größte Verursacher von Treibhausgasen, die Strombereitstellung fällt nur relativ gering ins Gewicht. Direkte Emissionen gibt es beim BEV mit elektrischer Heizung ebenfalls keine, beim BEV mit Diesel-Zusatzheizung hingegen tragen die direkten Emissionen der Heizung über das Jahr bzw. den Lebenszyklus gemittelt 17 % zu den Gesamtemissionen bei. Anzumerken ist, dass die BEV-Busse mit einer im Vergleich zum Dieselbus geringeren Fahrleistung angenommen wurden (siehe dazu Erläuterungen in Tabelle 10). Daher ergeben sich pro Kilometer höhere THG Emissionen, als wenn sie die gleiche Fahrleistung wie der Diesel- oder BZ-Bus erbringen. Dies ist bedingt durch die Umlegung der in der Busherstellung und -verwertung entstehenden THG-Emissionen auf die über den Lebenszyklus im Vergleich zum Dieselbus um 33% geringere Laufleistung. In diesem Fall würde die Einsparung der BEV bei 71 % (elektrische Heizung) bzw. 65 % (Diesel-Zusatzheizung) liegen, und würden damit ein nochmals höheres Einsparpotential bieten, auch im Vergleich zu BZ-Bussen.

Tabelle 11 gibt einen Überblick über die mittleren Einsparpotentiale aller von den in Teil B dieser Studie untersuchten Busunternehmen eingesetzten Gefäßgrößen. Die Grafiken zu den übrigen Gefäßgrößen finden sich im Anhang.

Tabelle 11: Übersicht Einsparpotentiale der verschiedenen Technologien und Gefäßgrößen pro gefahrenem Kilometer

	8,5 m	10 m	12 m	14/15 m	18 m
BEV elektrische Heizung (Annahme gleiche Laufleistung wie Dieselbus)	58 % (82 %)	51 % (77 %)	48 % (71 %)	50 % (70 %)	52 % (66 %)
BEV Diesel-Zusatzheizung (Annahme gleiche Laufleistung wie Dieselbus)	50 % (72 %)	46 % (73 %)	40 % (65 %)	42 % (64 %)	44 % (60 %)
BZ-Bus	51 %	52 %	45 %	54 %	58 %

3.2.6 Investitionskosten Umstellung der Busflotten

Bei der Umstellung der einzelnen Busflotten wurden analog zur den Machbarkeitszwei Szenarien für die Verkehrsbetriebe betrachtet: welche Umläufe machbar sind auf Grund der Verbrauchs- und Lade- bzw. Tankzeiten und welche Umstellungen auf Basis der CVD notwendig sind, um die Quoten ab 2026 zu erfüllen (Beginn Phase 2).

Busbeschaffung

Die reinen Investitionskosten zur Beschaffung der zur Erfüllung der CVD-Quoten benötigten ZEV Busanzahl schwanken abhängig von der eingesetzten Antriebstechnologie und der Flottengröße bei den hier untersuchten Verkehrsbetrieben zwischen 1,4 Mio. und 7,2 Mio. Euro für eine Flotte von 3 bzw. 15 BEV-Bussen. Bei den BZ-Bussen sind die anfänglichen Investitionskosten nur geringfügig höher und liegen bei 1,5 Mio. bzw. 7,4 Mio. Euro. Die Mehrkosten zur Beschaffung von ZEV Bussen belaufen sich gegenüber der Beschaffung der gleichen Anzahl neuer Dieselbusse als Referenztechnologie bei den kleinsten Flotten auf etwa 750.000 Euro und bei der größten Flotte auf etwa 3,8 Mio. Euro für emissionsfreie Busse

Im Durchschnitt der untersuchten Busunternehmen ergeben sich daher erwartete Mehrkosten von 1,9 Mio. Euro (BEV-Busse) bzw. 2 Mio. Euro (BZ-Busse).

Hierbei wurde außerdem berücksichtigt, dass zunächst -sofern möglich- Gefäßgrößen von 12m und kleiner ausgetauscht werden und erst danach auch die größeren Gefäßgrößen ausgetauscht werden.

Die Einhaltung der CVD im Jahr 2026, sprich, die Ersetzung von 32,5% der bestehenden Dieselflotten mit BEV- bzw. BZ-Bussen generiert in Summe für die hier untersuchten Verkehrsbetriebe Mehrinvestitionskosten für die Busse von ca. 46 Mio. Euro (BEV) bzw. 48 Mio. Euro (BZ-Busse), rein auf die Investitionskosten bezogen.

Infrastrukturerrichtung

Bei den Investitionskosten für die erforderliche Infrastruktur gibt es zum einen größere Unterschiede zwischen einer Ladeinfrastruktur und einer Wasserstofftankstelle, zum anderen aber auch mehrere Variablen, die Einfluss auf die Investitionskosten haben. Während bei den Ladeinfrastrukturen vor allem auch der benötigte Netzanschluss eine wichtige Variable ist und eher bei einer größeren benötigten Ladeleistung zu Herausforderungen führen kann, so ist nach Einschätzungen der Autoren die Errichtung einer Wasserstofftankstelle hingegen aufgrund der erhöhten Aufwendungen für Planung, Genehmigung und Errichtung, erst ab einer minimal zu versorgende Flottengröße von ca. 10 Brennstoffzellenbussen sinnvoll

Ein weiterer Aspekt bei der Infrastruktur sind auch öffentliche Lade- bzw. Tankmöglichkeiten, bei denen Kosten gebündelt bzw. geteilt werden können. Bei der Ladeinfrastruktur wird dies jedoch

aktuell ausschließlich zur Gelegenheitsladung auf der Strecke genutzt, die eigentliche Regelladung findet generell auf dem Betriebshof statt und erfordert daher eine eigene Infrastruktur.

Die Investitionskosten für eine Ladeinfrastruktur mit 75kW der hier untersuchten Betriebshöfe belaufen sich auf etwa 500.000 Euro im Durchschnitt (Flotte von 7 ZEV-Bussen), wobei die kleinste Infrastruktur für 3 Fahrzeuge bei knapp 300.000 Euro liegt und die größte mit 15 Ladepunkten bei knapp 850.000 Euro. Wird eine Ladeleistung von 50kW unterstellt, dann entstehen geringere Investitionskosten von im Durchschnitt 365.000 Euro, bei der kleinsten Infrastruktur von 180.000 Euro und der größten 640.000 Euro.

Bei den Infrastrukturkosten für die Ladeinfrastruktur wurden folgende Komponenten berücksichtigt:

- Hardware & Software
- Netzanschluss
- Trafostation
- 1 Ladepunkt pro BEV plus 1 mobile Ladestation für Werkstatt/Betriebshof
- Projektplanung (Tiefbau, Elektroplanung)
- Elektroarbeiten/Bauarbeiten
- Projektsteuerung und Dokumentation
- Inbetriebnahme

Werden die Kosten der Ladeinfrastruktur mit den Kosten der Wasserstofftankstellen verglichen, sind hier deutlich höhere Anfangsinvestitionen zu sehen. In der Spitze liegen die Investitionskosten bei etwa 2,8 Mio. Euro, während die kleinste Tankstelle etwa 1,4 Mio. Euro kostet. Im Durchschnitt werden ca. 1,9 Mio. Euro für die Investition bei den betrachteten Betriebshöfen benötigt.

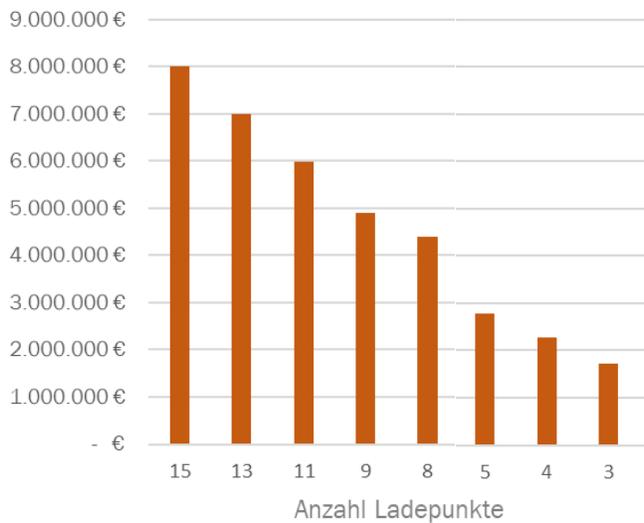
Bei den Wasserstofftankstellen sind folgende Kosten in der Investitionskostenrechnung inkludiert:

- Auslegung auf Basis max. Tagesbedarf Wasserstoff
- H₂-Anlieferung per Trailer
- Planung, Genehmigungen, Installation
- Verdichtung
- Hochdruckspeicher
- Redundanz (Kompressor)

Die Redundanz des Kompressors ist nicht zwingend notwendig. Auf Basis der Erkenntnisse von anderen Verkehrsbetrieben ist dies jedoch eine Empfehlung, um die Verfügbarkeit der Tankstelle zu erhöhen und damit den Betrieb der Busse zu gewährleisten.

Um die Bandbreite der individuellen Lösungen zu sehen, werden in der folgenden Abbildung beispielhaft die Investitionskosten für die Umstellung der Busflotte nach CVD auf BEV-Fahrzeuge und die entsprechend benötigte Infrastruktur für 75kW Ladeleistung dargestellt. Bei den Kosten für die Ladeinfrastruktur werden in nachstehendem Beispiel neben den reinen Investitionskosten auch die Kosten für den Netzanschluss berücksichtigt.

Abhängig von der Anzahl der Ladepunkte und damit der Anzahl der zu versorgenden Busse, ergeben sich Differenzen bei den Infrastrukturkosten. Besonders die Themen Netzanschluss und Größe und Anzahl der zu installierenden Trafos sind hier entscheidend. Abhängig vom bestehenden Betriebshof können aber auch die Baukosten einen gewissen Aufwand generieren.



■ Investitionskosten BEV-Busse +LIS pro Verkehrsunternehmen (75kW LIS)

Abbildung 55 Investitionskosten BEV-Busse +LIS (75 kW) pro Busunternehmen (Jahr 2026)

Betrachtet man ausschließlich die Kosten der Ladeinfrastruktur, so fällt auf, dass hier erhebliche Skaleneffekte zum Tragen kommen, wenn die Infrastruktur größer zu dimensionieren ist.

Dies wird deutlich, wenn man sich die Kosten der Infrastruktur pro Ladepunkt betrachtet: Während sich die Investitionskosten für die Ladeinfrastruktur inkl. Netzanschluss pro Ladepunkt bei 15 Ladepunkten auf etwa 50.000-65.000 Euro belaufen, steigen die spezifischen Investitionskosten pro Ladepunkt bei lediglich 3 Ladepunkten auf knapp 90.000-105.000 Euro (siehe Abbildung 56).

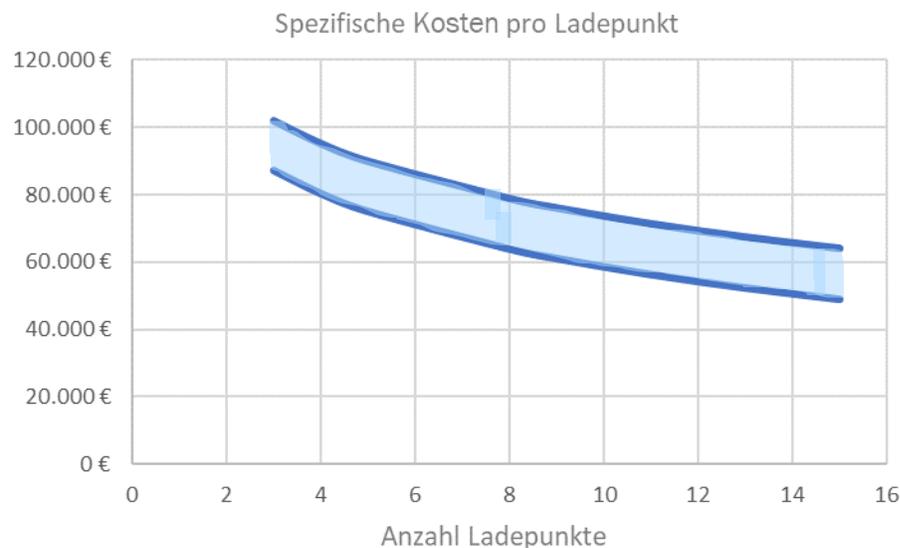


Abbildung 56 Spezifische Investitionskosten pro Ladepunkt (eigene Berechnungen)

Bei den Investitionskosten für die Infrastruktur gibt es vielfältige Einflussgrößen, die sich auf die Kosten auswirken, sodass die hier dargestellten Kosten als Richtwerte zu verstehen sind. Vor allem bei notwendigen Baukosten, aber auch die Rahmenbedingungen bezüglich des Netzanschlusses, gilt es, die individuelle Situation vor Ort zu berücksichtigen und zu erörtern. Es wird aus den Untersuchungen jedoch deutlich, dass sowohl für die Lade- als auch die Tankinfrastruktur für Batterie- bzw. BZ-Busse eine gewisse „kritische“ Flottengröße sinnvoll ist.

3.2.7 Zusammenfassung Teil B

- **Umsetzbarkeit CVD bei den 13 untersuchten Busunternehmen** (unter den getroffenen Annahmen):
 - **mit H₂/BZ voll umfänglich möglich**
Ausnahme Gefäßgrößen <10 m, bei diesen ist auf Basis der aktuell hinterlegten Fahrzeugspezifikationen eine Umstellung noch nicht/ nur sehr eingeschränkt möglich (siehe auch Punkt Gefäßgrößen unten zu Verfügbarkeit einzelner Busgrößen)
 - **mit BEV Depotlader mit vollelektrischer Heizung nur teilweise möglich.**
Abhängig von gewählten Randbedingungen zu Ladeleistung und Verbrauch können 4 bzw. 6 von 13 BU CVD-Vorgaben aktuell nicht erfüllen, für 3 von 6 mit zukünftig erwarteter Kapazitätssteigerungen bei HV Batterie Erfüllung möglich, Nachladung auf Strecke an 1-2 strategischen Punkten ermöglicht Umsetzung CVD bzw. deutlich weitergehende Umstellung bei allen untersuchten Busunternehmen
 - **mit BEV Depotlader mit Brennstoffzusatzheizung heute bereits möglich.**
Einschränkung: bei 2 BU mit heute verfügbarer Technologie bei „Worst Case“ Annahmen (hoher Verbrauch, niedrige Ladeleistung) noch nicht machbar.
- **Gefäßgrößen:** Unterschiedliche Marktverfügbarkeit
 - Kleinere Fahrzeuge (< 10 m) wegen geringer Energiespeicherkapazitäten derzeit schwierig auf ZEV umzustellen und auch noch nicht am Markt verfügbar
 - 18 m BZ KOM für 2023/24 angekündigt
- **Ökologie:** BEV und BZ mit **vergleichbarem THG Einsparpotenzial** unter der Grundvoraussetzung, dass Strom aus erneuerbaren Energien eingesetzt wird
- **Kosten:** ZEV mit **Mehrkosten**
 - bei **Erfüllung CVD-Quote in 2026** durchschnittlich **2 Mio. Euro Mehrkosten** durch **Beschaffung der benötigten ZEV-Busse**
 - **Ladeinfrastrukturkosten** bei Erfüllung CVD im Durchschnitt 500.000 Euro (75 kW Ladeleistung) bzw. 365.000 Euro (50 kW Ladeleistung), alternativ **H₂ Tankstellenkosten** von durchschnittlich etwa 1,9 Mio. €
- **Auslegung Ladeinfrastruktur:** Empfehlung **mind. 50 kW Ladeleistung** je Ladepunkt wegen erwarteter Steigerung der HV Batteriekapazität. Weiterhin **1 - 2 regelbare Ladepunkte** mit bis zu **150 kW Ladeleistung** zur Wahrung der betrieblichen Flexibilität.
- **Auslegung H₂ Tankinfrastruktur:** Berücksichtigung erhöhter Investitions- und Planungsaufwand
 - Errichtung eigener Betriebshoftankstelle aufgrund erhöhtem planerischen und finanziellen Aufwand erst ab **ca. 10** zu versorgenden H₂/BZ Bussen sinnvoll
 - Gemeinsame Nutzung z.B. mit Spediteuren (öffentliche Tankstelle) bietet Einsparpotentiale und ermöglicht besser Auslastung, gerade auch bei Flottengröße <10 BZ-Busse
 - Gewährleistung H₂-Versorgung ist technisch/ vertraglich abzusichern (Erfüllung Betriebspflicht)
- **Vorlaufzeit:** frühzeitiger Planungsbeginn essentiell für erfolgreiche Einführung von ZEV-Bussen (mind. 24 Monate)
 - Aufgabenträger: **Festlegung ZEV-Zielquote** für kommende Ausschreibungen; ggf. Bereitstellung diskriminierungsfrei zugängliche Energieversorgungsinfrastruktur, gerade wenn höhere Umstellungsquoten angedacht sind
 - Busunternehmen: **Planungsbeginn frühzeitig** (inkl. Berücksichtigung möglicher Fördermittelbeantragung, Errichtung Energieversorgungsinfrastruktur/Netzanschluss)

4. Ausblick und Empfehlungen

Der Umbau der Busflotten hinzu emissionsfreien Antriebstechnologien ist mit Chancen und Risiken verbunden.

So ist die Umstellung der Busflotten häufig getrieben von politischen bzw. gesetzlichen Rahmenbedingungen. Eine frühzeitige Nutzung zukunftsweisender Technologien kann jedoch zu vielfältigen Vorteilen für die Verkehrsbetriebe führen. Als Beispiele können hier der frühe Know-How-Aufbau genannt werden, die positiven Umwelteffekte, die Positionierung als attraktiver ÖPNV-Anbieter und Arbeitgeber sowie nicht zuletzt die Wahrnehmung als Treiber der Verkehrswende. Den Vorteilen der frühen Adaption einer neuen Technologie stehen naturgemäß auch gewisse Risiken gegenüber: So wurden in den Untersuchungen vor allem die vergleichsweise hohen Kosten gegenüber der etablierten Dieselschnologie (ohne Berücksichtigung weiter erhöhter CO₂-Kosten) und die Herausforderungen der geringeren Reichweite gerade bei BEV Bussen mit elektrischen Antrieben, bei gleichzeitig vollständig lokal emissionsfreien Betrieb, deutlich.

Ein weiterer wesentlicher Faktor für die Akzeptanz der neuen Technologie als Grundvoraussetzung für eine erfolgreiche Integration der neuen Technologien in die Flotten der Busunternehmen ist eine hohe Verfügbarkeit. Im Rahmen der von den Studienautoren im Auftrag des BMVI durchgeführten Begleitforschung ‚Alternative Antriebe Bus‘ zeigt sich, dass die ZEV Technologien bereits heute eine relativ hohe Verfügbarkeit erreichen (BZ-Busse 78%, Batteriebusse 87% (Depotlader), respektive 88% Gelegenheitslader)¹⁹.

Auf Basis der Studienergebnisse von Teil A und B ergeben sich folgende Empfehlungen der Studienautoren:

Insgesamt ist die Umstellung auf klimaneutrale Flotten bis 2040 anzustreben. Dies steht im Einklang mit den Klimaschutzzielen der Landesregierung Baden-Württemberg, die eine „Klimaneutralität“ bis 2040 anstreben (s. Klimaschutzgesetz Baden-Württemberg²⁰).

Um diese klimaneutrale Flotte zu erreichen, schlagen die Studienautoren das folgende Zwischenziel für das Jahr 2030 vor: 40% CO₂-Einsparung gegenüber dem Basisjahr 2020. Dies entspricht einem ZEV-Anteil der Bestandsflotte in 2030 von 45%. Um dieses Ziel zu erreichen, müssten ab 2024 durchschnittlich ~60% der Neubeschaffungen ZEV sein, was in etwa dem Faktor 2 der CVD-Quote entspricht. Die Erreichbarkeit eines solchen ZEV Anteils wird mit Blick auf die Ergebnisse der durchgeführten Fallstudien unter den richtigen Rahmenbedingungen (z.B. Beibehaltung der aktuellen Förderkulisse, erhöhte CO₂ Bepreisung Dieselschnstoff) als ambitioniert, aber machbar angesehen.

In Szenario 4 der vorliegenden Studie wurden bis 2030 ZEV-Busse entsprechend der CVD-Quote von 32,5% neubeschafft, und ab 2031 die Beschaffungsquote für ZEV Busse bei 100% liegt, um das Ziel klimaneutrale Flotte in 2040 zu erreichen.

Die hier empfohlene frühzeitigere Verfolgung eines gegenüber den Vorgaben der CVD Richtlinie ambitionierterem, dafür aber auch stabilen, ZEV-Beschaffungsquote führt zu einer früheren Etablierung der neuen Technologien und damit einhergehend bereits ab Mitte des Jahrzehnts zu einer stärkeren Treibhausgasminderung für die ÖPNV Flotte in Baden-Württemberg. Zum anderen kann das Risiko vermieden werden, dass ab 2031 ZEV-Busse mit einer Quote von 100% erworben werden müssen und damit eine nochmals deutlich höhere Quote umgesetzt werden muss. Die frühzeitige

¹⁹ „Programmbegleitforschung Innovative Antriebe und Fahrzeuge: Innovative Antriebe im straßengebundenen ÖPNV“ (BMVI, 2021) Datengrundlage Betriebsdaten für mehr als 260 Batteriebusse und 35 BZ Busse.

²⁰ <https://um.baden-wuerttemberg.de/de/klima/klimaschutz-in-baden-wuerttemberg/klimaschutzgesetz/> (letzter Abruf am 12.01.2022)

Umsetzung einer ambitionierten Quote verschafft weiterhin Spielräume, sollte in den ersten Jahren diese Quote nicht ganz erfüllt werden. So ist auch eine gestaffelte, über z.B. 2 oder 3 Jahre ansteigende Zielvorgabe für die zu erfüllenden ZEV Beschaffungsquoten denkbar, um hier allen beteiligten Akteuren die Umsetzung der Ziele weiter zu erleichtern. Wird hingegen über einen längeren Zeitraum eine niedrigere Quote, z.B. auf dem Niveau der CVD-Quote beibehalten, bedeutet dies automatisch, dass in den Folgejahren höhere, über den hier vorgeschlagenen Wert von 60% ZEV-Quote hinausgehende ZEV Quoten umzusetzen sind, um das gesetzte Ziel einer klimaneutralen ÖPNV Busflotte bis 2040 zu erreichen.

Zur Erfüllung dieser Quote empfiehlt es sich, entsprechende Rahmenbedingungen für die erforderlichen Investitionen in Fahrzeuge und Infrastruktur bei den Verkehrsunternehmen zu schaffen. Eine Möglichkeit ist hierbei die Fortführung der bestehenden Förderkulisse bis mindestens 2030 (70 - 80% Mehrkosten Fahrzeuge, 70 - 75% Kosten Energieversorgungsinfrastruktur)²¹, um die Mehrkosten für die Verkehrsunternehmen abzufedern und ihnen gleichzeitig eine gewisse Planungssicherheit zu geben. Neben der Förderung von Investitionskosten durch Bund und Land ist auch der Einsatz von Drittmitteln, z.B. in Form von Einnahmen über die Einführung des vom Land vorgeschlagenen Mobilitätspasses, eine Möglichkeit für Städte und Gemeinden, die erhöhten Investitionskosten für die Verkehrsunternehmen weiter zu verringern. Weitere Finanzierungs- bzw. Fördermöglichkeiten durch die Aufgabenträger sind zu prüfen.

Die Übererfüllung der CVD dient gleichzeitig als politische Botschaft, um einen höheren Ambitionsgrad für die Folgejahre vorzubereiten.

Für die Aufgabenträger ergibt sich die Aufgabe, die operative Umsetzung der Flottenumstellung zusammen mit den Betreibern anzugehen. Durch definierte Zielquoten kann außerdem den Busunternehmen eine gewisse Planungssicherheit gegeben werden, um Investitionsentscheidungen zu erleichtern.

Die erarbeiteten Studienergebnisse, insbesondere zur Machbarkeit der Linienumstellungen, können herangezogen werden, um Technologieentscheidungen zu treffen und Planungen für mögliche notwendige öffentliche Infrastrukturen (z.B. zur Zwischenladung) anzugehen. Hierbei kann auch die Bildung von Clustern zur Planung und zum Betrieb der Energieversorgungsinfrastruktur sinnvoll sein um Synergien schaffen, gerade im Bereich H2 Tankinfrastruktur.

Auch dem Know-How-Aufbau bei den beteiligten Unternehmen und Behörden hinsichtlich Planung, Errichtung, Betrieb, rechtliche Aspekte, Abrechnungswesen, Versicherung etc. der Energieversorgungsinfrastruktur sollte Beachtung geschenkt werden und ein entsprechender Austausch gefördert werden. Dieser kann beispielsweise über die Umsetzung erster Leuchtturmprojekte, die bewusst außerhalb der Oberzentren, die aktuell überwiegend bereits über erste Erfahrungen zum Thema ZEV-Antriebe verfügen, angesiedelt werden könnten, um den Erfahrungsaufbau bei den dort zuständigen Akteuren (untere Verwaltungsbehörden, Busunternehmen, etc.) zu initiieren. Denn nur wenn Busse mit ZEV Antrieben auch in der Fläche etabliert werden und alle involvierten Akteure zusammenarbeiten, lässt sich das Ziel eines klimaneutralen ÖPNV mit Bussen bis 2040 erreichen.

²¹ Annahme der aktuell bestehenden Förderkulisse: Förderung der Mehrkosten von Bussen mit alternativen Antrieben durch BMDV von bis zu 80% (Förderrichtlinie läuft bis 2025) und Förderung der Infrastrukturinvestitionskosten von bis zu 75% durch das Land Baden-Württemberg (LGVFG). Der Bund vertreten durch das BMDV fördert die Infrastruktur (Lade-, Tank-, Wartungsinfrastruktur) mit bis zu 40 % (zuzüglich bis zu 20 Prozentpunkte für KMU) der Mehrausgaben, die durch die Beschaffung von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben gegenüber dem Einsatz konventioneller Technologie bedingt sind. Siehe dazu auch Seite 17.

5. Anhang

Weitere Ergebnisse Teil B: Einsparpotentiale THG-Emissionen

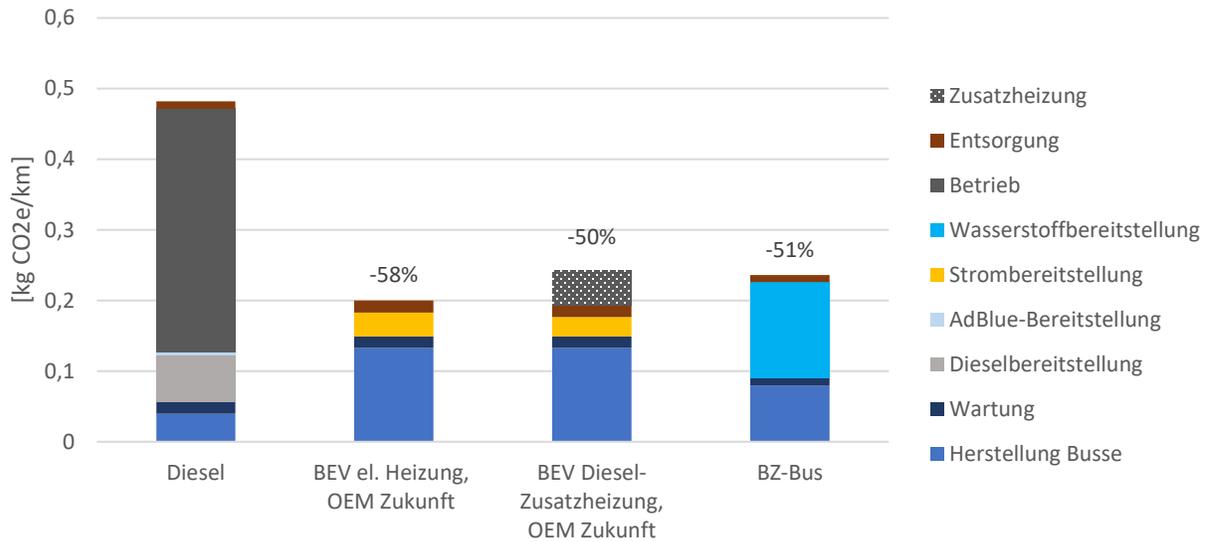


Abbildung 57: THG-Einsparpotentiale 8,5 m Bus

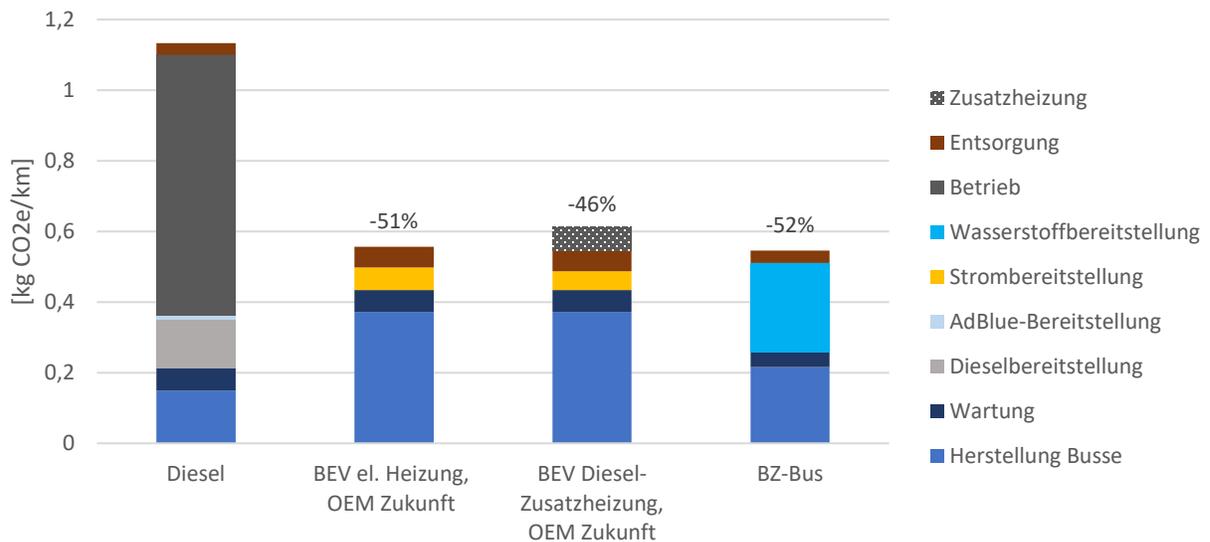


Abbildung 58: THG-Einsparpotentiale 10 m Bus

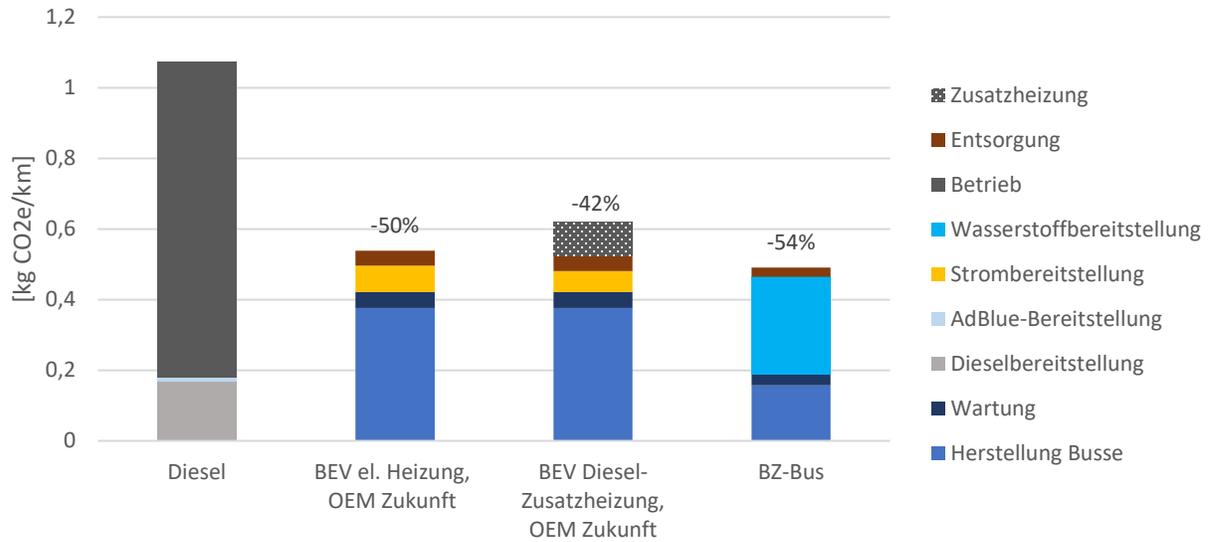


Abbildung 59: THG-Einsparpotentiale 14/15 m Bus

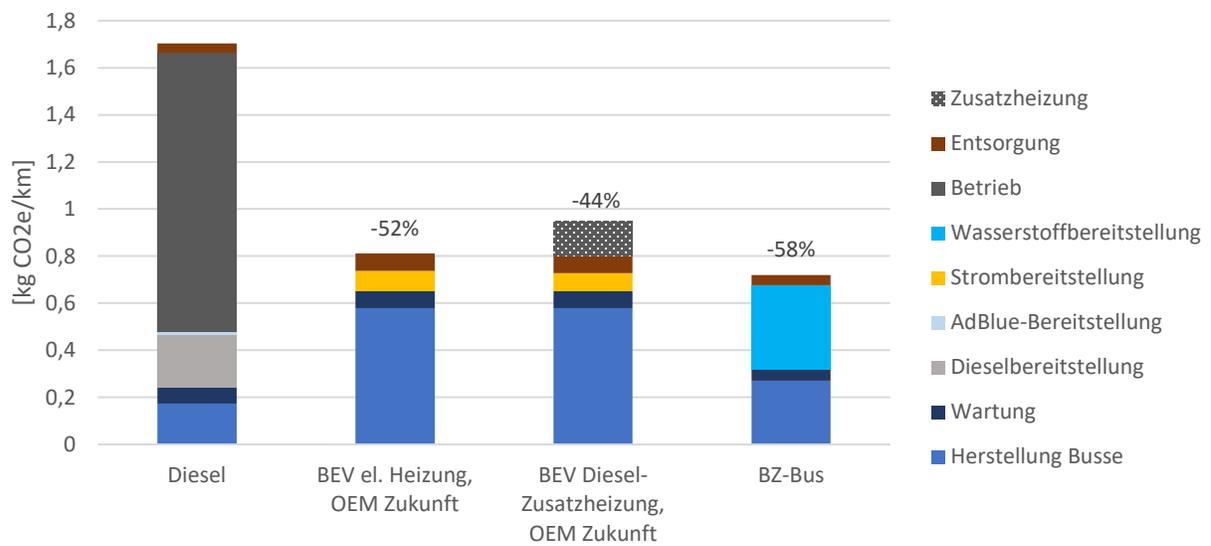


Abbildung 60: THG-Einsparpotentiale 18 m Bus