

Hochschule Flensburg

B A C H E L O R – T H E S I S

Thema: Untersuchung von alternativen nachhaltigen Antriebskonzepten
im Regionalverkehr des Kreises Schleswig-Flensburg

Von: Morten Roßberg

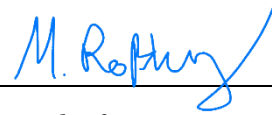
Matrikel-Nr.: 630491
Studiengang Energiewissenschaften
Betreuer/in und
Erstbewerter/in: Prof. Dr.-Ing. Holger Watter
Zweitbewerter/in: Prof. Dr.-Ing. habil. Claudia Werner
Ausgabedatum: 24.11.2021
Abgabedatum: 10.01.2022

Eidesstattliche Erklärung

„Ich versichere, dass ich die vorliegende Thesis ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen benutzt habe.“

Flensburg, den 10.01.2022

Ort, Datum

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'M. Rothung', is written above a horizontal line.

Unterschrift

Einverständniserklärung zur Veröffentlichung

„Hiermit erkläre ich mich einverstanden, dass die vorliegende Thesis veröffentlicht und weitergegeben werden darf.“

Flensburg, den 10.01.2022

Ort, Datum

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'M. Rofthun', is written above a horizontal line.

Unterschrift

Hinweis zur gendergerechten Sprache

„Das in dieser Arbeit gewählte generische Maskulinum bezieht sich zugleich auf die männliche, die weibliche und andere Geschlechteridentitäten. Zur besseren Lesbarkeit wird auf die Verwendung männlicher und weiblicher Sprachformen verzichtet. Alle Geschlechteridentitäten werden ausdrücklich mitgemeint, soweit die Aussagen dies erfordern.“

Inhaltsverzeichnis

I	Abbildungsverzeichnis	VII
II	Tabellenverzeichnis	VIII
III	Formelzeichen und Abkürzungen	IX
1	Einleitung	1
2	Methoden- und Vorgehensplanung	2
	2.1 Arbeitspakete und Projektstrukturplan	2
	2.2 Rahmenterminplan.....	5
3	Stand des Wissens und der Technik	6
	3.1 Energiebedarf eines Busses.....	6
	3.2 Charakteristische Unterschiede der Stadt- und Regionalbusse.....	10
	3.3 Politischer Rahmen auf EU- und Bundesebene.....	12
4	Ausgangslage im Kreis	14
5	Alternative Antriebsarten	17
	5.1 Diesel-Hybrid-Antrieb	17
	5.2 Batterieelektrischer-Antrieb	19
	5.3 Wasserstoffantrieb.....	22
	5.4 Gasantrieb.....	25
	5.5 Ergebnisse der Energiebedarfs- und Emissionsermittlung.....	27
6	Anforderungsanalyse	32
	6.1 Anforderung der Flottenbetreiber	32
	6.2 Anforderungen aus der Analyse der vorhandenen Linien.....	32
	6.3 Anforderungen des ÖPNV Betriebes.....	36
	6.4 Anforderungen der Kreispolitik	36
	6.5 Anforderungen aus dem Nahverkehrsplan.....	37
7	Konzeptentwicklung	38
	7.1 Funktionsstruktur	38
	7.2 Morphologischer Kasten.....	39
	7.3 Konzeptbeschreibung.....	41
8	Konzeptbewertung	43
	8.1 Festlegung der Kriterien	44
	8.2 Gewichtung	45
	8.3 Bewertung.....	46
	8.4 Auswertung.....	48
9	Machbarkeitsanalyse	50
	9.1 Marktrecherche.....	50
	9.2 Umsetzung im Kreis Schleswig-Flensburg	51
	9.3 Betriebskosten	55
10	Zusammenfassung und Fazit	57
	Literaturverzeichnis	59

Anhang	68
Anhang 1 Interview mit Herrn Thomas Jepsen.....	68
Anhang 2 Interview mit Frau Carmen Esche	70
Anhang 3 Anforderungen aus dem Regionalen Nahverkehrsplan 2017-2021	72
Anhang 4 Gewichtungstabellen des paarweisen Vergleichs.....	73
Anhang 5 Begründete Konzeptbewertung.....	75

I Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Projektstrukturplan.....	2
Abbildung 2-2: Rahmenterminplan.....	5
Abbildung 3-1: Nebenverbraucher eines batterieelektrischen Busses [3]	8
Abbildung 3-2: Die Durchschnittsgeschwindigkeit als Schlüsselparameter für den Energiebedarf nach [4]–[6]	8
Abbildung 3-3: Darstellung der Mindestquoten zur Beschaffung sauberer Fahrzeuge	13
Abbildung 4-1: Ausschnitt des Liniennetzplans im Kreis. Farbige Linien mit höherwertigem Angebot, braune Linien mit Basisangebot [19].....	14
Abbildung 5-1: Schematischer Vergleich des Depot- und Gelegenheitsladers [40]	20
Abbildung 5-2: Vereinfachte Prozesskette der Kombination von Biomethan-, E-Methan- und Wasserstoffherzeugung. Eigene Darstellung nach [31].....	26
Abbildung 5-3: Eigene Darstellung der Well-to-Wheel-Emissionen unter den Bedingungen im Kreis	30
Abbildung 6-1: Anzahl der täglichen Fahrten auf den Linien des Kreises	33
Abbildung 6-2: Summierte zurückgelegte Strecken auf den Linien des Kreises.....	34
Abbildung 6-3: Umlauflängen der Busse auf den einzelnen Linien.....	35
Abbildung 7-1: Funktionsgliederung der Regionalbus-Gesamtfunktion	38
Abbildung 8-1: Bewertungsergebnisse im Netzdiagramm	48
Abbildung 9-1: Übersicht über Biogasanlagen im Kreis [78]	51

II Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1:	Übersicht über die zufällige Stichprobe der Buslinien.....	11
Tabelle 3-2:	Charakteristischer Vergleich der Buslinien	11
Tabelle 4-1:	Übersicht der analysierten Regionalbuslinien inklusive ihrer Kennzahlen.....	16
Tabelle 5-1:	Verfahren zur Erzeugung von Wasserstoff und die resultierenden Emissionen.....	22
Tabelle 5-2:	Emissionsfaktoren zur Berechnung der Treibhausgasemissionen nach EN 16258 [32]	28
Tabelle 5-3:	Übersicht über Energieverbräuche und Emissionen der unterschiedlichen Antriebe	28
Tabelle 6-1:	Übersicht der analysierten wahrscheinlich linientreuen Regionalbuslinien inklusive ihrer Kennzahlen	33
Tabelle 6-2:	Mindestanzahl benötigter Busse pro Linie und die resultierende Umlauflänge	35
Tabelle 7-1:	Lösungsraum als morphologischer Kasten	40
Tabelle 8-1:	Übersicht der Bewertungskriterien	45
Tabelle 8-2:	Gewichtungsverteilung.....	46
Tabelle 8-3:	Bewertete Nutzwertanalyse	47
Tabelle 9-1:	Marktübersicht der Gasbusse in Deutschland	50
Tabelle 9-2:	Übersicht über den jährlichen Kraftstoffverbrauch und die Well-to- Wheel-Emissionen von 10 Fahrzeugen der jeweiligen Antriebsart	54
Tabelle 9-3:	Übersicht der Jahresbetriebskosten	55
Tabelle A-1:	Anforderung an Neubeschaffung aus dem Regionalen- Nahverkehrsplan 2017-2021	72
Tabelle A-2:	Gewichtungstabelle von Herrn Thomas Jepsen, Vorsitzender des Infrastrukturausschusses.....	73
Tabelle A-3:	Gewichtungstabelle von Frau Carmen Esche, ÖPNV Betrieb	74
Tabelle A-4:	Eigene Gewichtungstabelle mit Fokus auf Nachhaltigkeit.....	74
Tabelle A-5:	Begründete Konzeptbewertung zur Nutzwertanalyse Teil 1	75
Tabelle A-6:	Begründete Konzeptbewertung zur Nutzwertanalyse Teil 2	76

III Formelzeichen und Abkürzungen

Zeichen	Einheit	Beschreibung
a	-	Jahr („anno“)
A	m^2	Querschnittsfläche
A_{Bus}	-	Anzahl Busse
$A_{Bus,min}$	-	Mindestanzahl notwendige Busse
B_{Diesel}	$\frac{L}{d}$	Kraftstoffverbrauch des Dieselbusses pro Tag
$B_{DHybrid}$	$\frac{L}{d}$	Kraftstoffverbrauch des Diesel-Hybrid-Busses pro Tag
B_{Gas}	$\frac{kg}{d}$	Kraftstoffverbrauch des Gasbusses
$B_{Diesel,Jahr,10b}$	$\frac{kg}{a}$	Jährlicher Kraftstoffverbrauch von 10 Dieselbussen
$B_{Methan,Jahr,10b}$	$\frac{kg}{a}$	Jährlicher Kraftstoffverbrauch von 10 Methanbussen
$B_{S,Diesel}$	$\frac{L}{100 km}$	Streckenkraftstoffbedarf des Dieselbusses
c_R	-	Rollwiderstandsbeiwert
c_w	-	Luftwiderstandsbeiwert
d	-	Tag („day“)
$E_{Diesel,Jahr,10b}$	$\frac{MJ}{a}$	Jährlicher Energieverbrauch von 10 Dieselbussen
$E_{DHybrid,Jahr,10b}$	$\frac{MJ}{a}$	Jährlicher Energieverbrauch von 10 Diesel-Hybrid-Bussen
E_{Fahr}	J	Fahrzeugantriebsenergiebedarf
$E_{Methan,Jahr,10b}$	$\frac{MJ}{a}$	Jährlicher Energieverbrauch von 10 Methanbussen
E_{Re}	J	Theoretisch rekuperierbare Energie
$E_{S,i}$	$\frac{MJ}{100 km}$	Streckenenergieverbrauch des Antriebs i
$E_{S,BE,Depot}$	$\frac{MJ}{100 km}$	Mittlerer Streckenenergiebedarf des Depotladers pro 100 km
$E_{S,BE,Zwischen}$	$\frac{MJ}{100 km}$	Mittlerer streckenenergiebedarf des Zwischenladers pro 100 km
$E_{S,Diesel}$	$\frac{MJ}{100 km}$	Streckenenergieverbrauch des Dieselbusses

$E_{S,DHybrid}$	$\frac{MJ}{100 km}$	Streckenenergieverbrauch des Diesel-Hybrid-Busses
$E_{S,Gas}$	$\frac{MJ}{100 km}$	Streckenverbrauch des Gasbusses
$E_{S,BZ}$	$\frac{MJ}{100 km}$	Mittlerer Streckenenergieverbrauch des BZ-Busses
E_{S,VH_2}	$\frac{MJ}{100 km}$	Streckenverbrauch des Wasserstoffverbrennungsbusses
EM_{TTW}	kg	Tank-to-Wheel-Treibhausgas-Emissionen
EM_{WTW}	kg	Well-to-Wheel-Treibhausgas-Emissionen
$EM_{BZ-Prod,WTT}$	kg	Emissionen der Brennstoffzellenproduktion
$EM_{Dep-Prod,WTT}$	kg	Emissionen der Akkumulatorproduktion eines Depotladers
$EM_{Diesel,WTW}$	kg	Jährliche Well-to-Wheel-Emissionen der 10 Dieselbusse
$EM_{DHybrid,WTW}$	kg	Jährliche Well-to-Wheel-Emissionen der 10 Diesel-Hybrid-Busse
$EM_{Methan,WTW}$	kg	Jährliche Well-to-Wheel-Emissionen der 10 Methanbusse
$EM_{Zwisch-Prod,WTT}$	kg	Emissionen der Akkumulatorproduktion eines Zwischenladers
F_A	N	Antriebskraft
F_{Br}	N	Bremskraft
F_W	N	Widerstandskraft
F_R	N	Rollwiderstandskraft
F_L	N	Luftwiderstandskraft
F_S	N	Neigungskraft
F_B	N	Beschleunigungskraft
$F_{EM,TTW}$	-	Tank-to-Wheel-THG-Emissionsfaktor
$F_{EM,WTW}$	-	Well-to-Wheel-THG-Emissionsfaktor
g	$\frac{m}{s^2}$	Erdbeschleunigung
$GF_{Zwischen}$	-	Gewichtsfaktor für Zwischenlader
$H_{U,Methan}$	$\frac{MJ}{kg}$	Unterer Heizwert von Methan
m	kg	Masse

\dot{m}_{Methan}	$\frac{kg}{d}$	Massenstrom des Biomethans
RF	-	Rekuperationsfaktor
$S_{i,ges}$	km	Täglich zurückgelegte Strecke der Linie i
S_{Umlauf}	km	Theoretisch notwendige Reichweite der Busse
$Takt$	min	Takt der Linie
t_{Umlauf}	min	benötigte Zeit für einen Linienumlauf
TF_{BE}	-	Technologieverbesserungsfaktor für batterieelektrischen Bussen
TF_{BZ}	-	Technologieverbesserungsfaktor für Brennstoffzellen-Bussen
TF_{Diesel}	-	Technologieverbesserungsfaktor für Verbrauchseinsparungen bei Diesel-Bussen
t_{Wende}	min	Wendezeit an Endhaltestellen
\dot{V}_{Methan}	$\frac{Nm^3}{d}$	Volumenstrom des Methans
$VF_{BE,Depot}$	-	Verbrauchsfaktor eines Depotladers
VF_{BZ}	-	Verbrauchsfaktor eines BZ-Busses
VF_{Gas}	-	Verbrauchsfaktor eines Gasbusses
VF_{VH_2}	-	Verbrauchsfaktor eines Wasserstoffverbrennungsbusses
v	$\frac{m}{s}$	Geschwindigkeit
v_{Zyklus}	$\frac{km}{h}$	Durchschnittsgeschwindigkeit
\ddot{x}	$\frac{m}{s^2}$	Fahrzeugbeschleunigung
$\Delta_R H^0$	$\frac{kJ}{mol}$	Standardreaktionsenthalpie
η_{Laden}	-	Wirkungsgrad des Ladevorgangs
ρ_{Methan}	$\frac{kg}{Nm^3}$	Dichte von Methan unter Normalbedingungen
ρ_L	m^3	Dichte der Luft
ϕ	°	Steigungswinkel gegenüber der Horizontalen

AP	Arbeitspaket
BE	Batterieelektrisch
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BtL	Biomass-to-liquid
BZ	Brennstoffzelle
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CO _{2e}	Kohlenstoffdioxid-Äquivalent
CVD	Clean Vehicle Directive (Richtlinie für Saubere Fahrzeuge)
CNG	Compressed Natural Gas (komprimiertes Erdgas)
DVGW	Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V.
EE	Erneuerbare Energien
EEV	Enhanced Environmentally Friendly Vehicle
EU	Europäische Union
ICCT	International Council on Clean Transportation
KBA	Kraftfahrt-Bundesamt
LKW	Lastkraftwagen
LNG	Liquid Natural Gas (flüssiges Erdgas)
NO _x	Sammelbegriff für Stickstoffoxide
PEM	Proton Exchange Membran
PKW	Personenkraftwagen
PtG	Power-to-Gas
PtL	Power-to-Liquid
SORT	Standardised On Road Testcycles
THG	Treibhausgas
TTW	Tank-to-Wheel-(Emissionen)
UITP	International Association of Public Transport (Internationaler Verband für öffentliches Verkehrswesen)
UN	United Nations (Vereinte Nationen)
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e. V.
WTT	Well-to-Tank-(Emissionen)
WTW	Well-to-Wheel-(Emissionen)
ZOB	Zentraler Omnibus Bahnhof
ÖPNV	Öffentlicher Personen-Nahverkehr
ÖSNV	Öffentlicher Straßennahverkehr

1 Einleitung

Aufgrund des gesellschaftlichen und politischen Bedarfes für umweltfreundliche Mobilität zum Erreichen der Klimaschutzziele sollen Linienbusse auf nachhaltigere Betriebskonzepte umgestellt werden. Politisch propagiert ist dabei vor allem die Elektromobilität. Dies stellt Busunternehmen vor technologische und ökologische Herausforderungen. Dem Aufruf zur Antragseinreichung „*Zur Förderung von Machbarkeitsstudien zur Einsatzmöglichkeit von Bussen mit alternativen Antrieben (09/2021)*“ des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) folgend soll im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine technologieoffene Machbarkeitsstudien im Sinne einer technischen Produktentwicklung über die Anwendbarkeit verschiedener Antriebsarten in Regionalbussen im Kreis Schleswig-Flensburg vorgelegt werden.

Dazu ist

- (1) eine Methoden- und Vorgehensweisen-Planung im Sinne des Projektmanagements nach DIN 69901 vorzulegen (Projekt-Struktur-Plan, Rahmenterminplan mit Arbeitspaketen und Meilensteinen),
- (2) der aktuelle Stand des Wissens und der Technik darzustellen,
- (3) die Randbedingungen für unterschiedliche Kraftstoffe und Antriebskonzepte zu beschreiben sowie Energieverbräuche und Emissionen zu ermitteln,
- (4) geeignete Planungs- und Prognosewerkzeuge auszuwählen,
- (5) im Sinne der Konstruktionsmethodik der VDI-Richtlinie 2221 Nutzwertanalyse, VDI 2222 „Konstruktionsmethodik – Konzipieren technischer Produkte“ und/oder der VDI-Richtlinie 2225 „Technisch-wirtschaftliches Konstruieren“ eine Lösungsstrategie zu konzeptionieren, zu bewerten und zu beschreiben. Basierend auf diesen „Idealvorstellungen“
- (6) ist im Rahmen einer Marktrecherche die Machbarkeit und Umsetzbarkeit im Kreis zu untersuchen. Die Arbeit soll der Abteilung Regionalentwicklung des Kreises Schleswig-Flensburg zuarbeiten.

Zum Erreichen der genannten Ziele wird nachfolgend in Kapitel 2 bis 5 die Grundlagen geschaffen und Verbrauchs- und Emissionsrechnungen durchgeführt. In Kapitel 6 erfolgt eine Anforderungsanalyse für die Antriebskonzepte, welche in Kapitel 7 und 8 entwickelt und bewertet werden. Abschließend erfolgt eine Analyse zur Machbarkeit der Umsetzung im Kreis mittels Marktrecherche, Verbrauchseinsparungsrechnung und einer überschlägigen Betriebskostendarstellung.

2 Methoden- und Vorgehensplanung

Eine Vorgehensplanung im Sinne des Projektmanagements ist zur Bewältigung größerer Projekte sinnvoll. Für dieses Projekt werden mehrere Arbeitspakete definiert und diese in einem Projektstrukturplan übersichtlich und nachvollziehbar dargestellt. Anschließend erfolgt die Erstellung eines Rahmenterminplans, was zusätzlich eine zeitliche Einordnung ermöglicht. Ist die Vorgehensweise im Sinne des Projektmanagements geplant, erfolgt die Abarbeitung der Arbeitspakete.

2.1 Arbeitspakete und Projektstrukturplan

Zur Verringerung der Komplexität, wurden die fünf übergeordneten Arbeitspakete Projektplanung, Ermittlung der Grundlagen, Konzeptentwicklung, Konzeptbewertung und Machbarkeit in kleinere Arbeitsschritte aufgeteilt, im Projektstrukturplan (Abbildung 2-1) dargestellt und anschließend abgearbeitet.

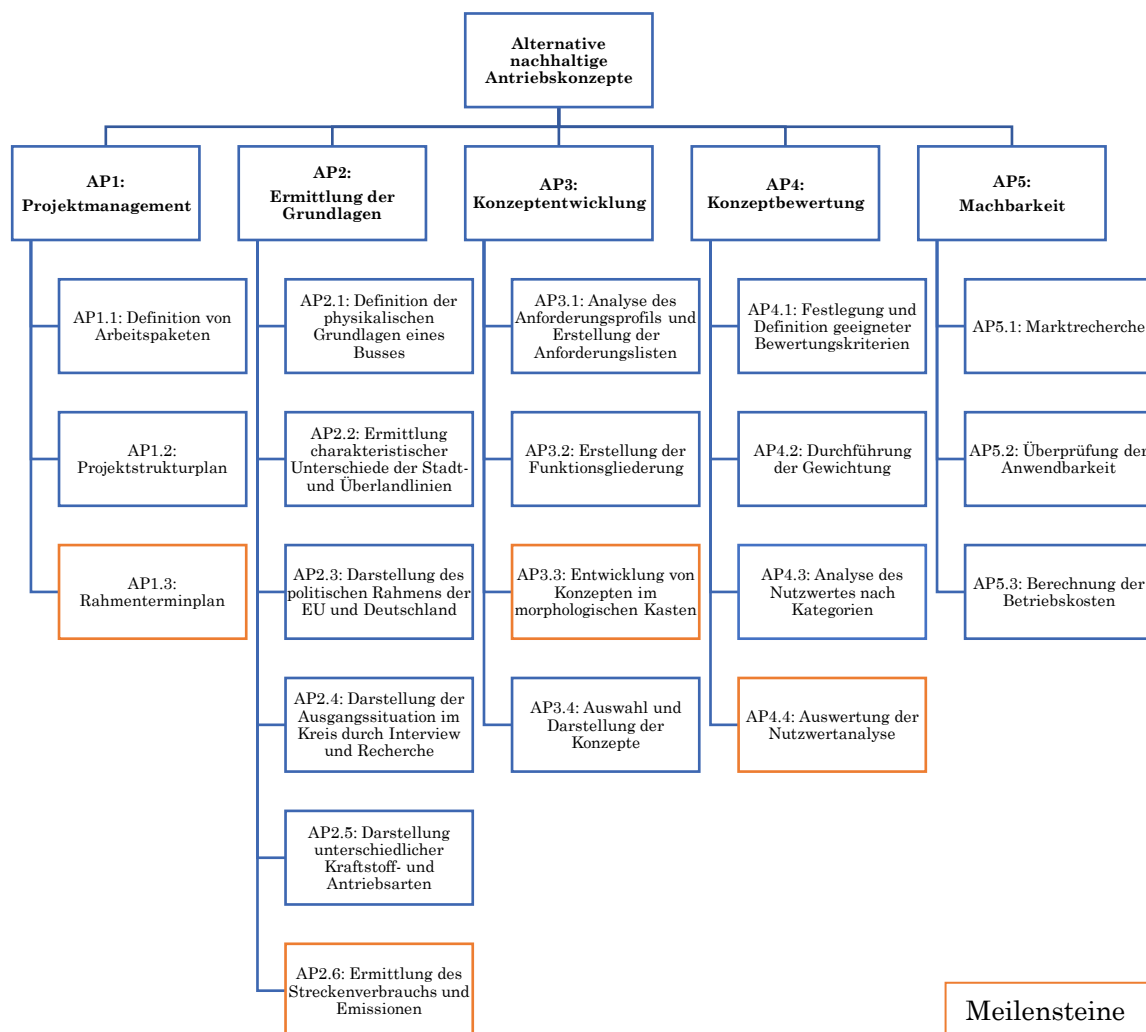


Abbildung 2-1: Projektstrukturplan

Zur besseren Nachvollziehbarkeit des Projektablaufs, werden die einzelnen Arbeitspakete (AP) nachfolgend erläutert.

AP1: Projektmanagement

- In der Planungsphase werden zum Erreichen der Ziele sinnvolle Arbeitspakete definiert und die Herangehensweise geplant.
- Anschließend werden aus den Arbeitspaketen der Projektstrukturplan und der Rahmenterminplan erstellt, welche eine Projektübersicht ermöglicht und eine zeitliche Einordnung gibt.

AP2: Ermittlung der Grundlagen

- Es werden die grundlegenden physikalischen Eigenschaften des Energieverbrauchs von Bussen, die Abhängigkeit des Kraftstoffverbrauchs von der Durchschnittsgeschwindigkeit dargestellt und die daraus resultierende Berechnungsmethode erklärt.
- Anschließend erfolgt die Untersuchung der grundlegenden charakteristischen Unterschiede der Regionalbusse zu Stadtbussen im Kreis (Fahrverhalten, Auslastung, Durchschnittsgeschwindigkeit, Entfernungen, Aufenthaltslänge etc.)
- Es werden aktuellen politischen Rahmenbedingungen für alternative Busantriebe in Deutschland und auf EU-Ebene aus der Clean Vehicle Directive dargestellt und geklärt.
- Zur Konzeptentwicklung wird zuerst die Ausgangslage im Kreis Schleswig-Flensburg analysiert. Dies erfolgt aus einer Kombination von Primärforschung in Form von Interviews mit Personen des kommunalen Infrastrukturausschusses und des Öffentlichen Personen-Nahverkehr (ÖPNV) Betriebes im Kreis und als Sekundärforschung durch Zusammenstellung und Auswertung von Informationen und Daten aus Literatur- und Internetrecherchen.
- In Kapitel 5 folgt die Darstellung alternativer „sauberer“ Antriebsarten (Verbrennungsmotoren, batterieelektrisch, Brennstoffzellen-elektrisch) und ihre Kraftstoffe inklusive Erzeugungspfade.
- Dabei wird der Streckenenergieverbrauch der jeweiligen Antriebe mittels der am Anfang vorgestellten Berechnungsmethoden in Abhängigkeit von der Durchschnittsgeschwindigkeit im Kreis berechnet und zusätzlich durch eine Well-to-Wheel-Analyse die resultierenden Emissionen im Betrieb und während der Kraftstoffherstellung berechnet und übersichtlich dargestellt.

AP3: Konzeptentwicklung

- Anschließend wird aufbauend auf die Ausgangslage im Kreis Anforderungslisten erstellt zur Produktentwicklung. Die Anforderungen stammen dabei von Busunternehmen, des Liniennetzes, des ÖPNV Betriebs des Kreises und der Kreispolitik.
- Zur Konzeptbildung wird die Gesamtfunktion „Regionalbus mit alternativen Antriebskonzept“ auf Grund der Komplexität in Form einer Funktionsgliederung aufgebrochen und in weniger komplexe Teilfunktionen aufgeteilt und dargestellt.
- Zur anschließenden Lösungsfindung wird mit Hilfe des Morphologischen Kasten die Teilfunktionen und ihre jeweiligen Lösungen übersichtlich dargestellt und unterschiedliche Lösungsstrategien geformt. Welche anschließend ausgewählt und beschrieben werden.

AP4: Konzeptbewertung

- Zur Bewertung der Lösungsstrategien werden geeignete Bewertungskriterien den Interviews entnommen und zusätzlich recherchiert. Darunter z. B. Anschaffungskosten, Reichweite, Kraftstoffverbrauch (Betriebskosten), CO₂-Emissionen, Fahrzeugverfügbarkeit, Zuverlässigkeit, politische Einflussfaktoren etc. Diese werden zusätzlich in sinnvolle Kategorien unterteilt.
- Die Gewichtung der Kriterien erfolgt durch die Methode des paarweisen Vergleichs in einer Matrix, welche im Anschluss an das Interview zusätzlich von den Interviewpartnern mit der Sicht aus der Politik und dem ÖPNV Betrieb des Kreises ausgefüllt wird. Eine eigene Gewichtung mit dem Fokus auf Nachhaltigkeit wird zusätzlich erstellt. Eine anschließende Mittelwertbildung erzeugt die verwendete Gewichtung.
- Die Analyse der Konzepte nach den definierten Kriterien wird in Tabellenform dargestellt. Punkte werden von 1 (unzureichend) bis 5 (sehr gut) vergeben, je nach Erreichungsgrad des Kriteriums. Die im Kreis eingesetzten Diesel-Mild-Hybrid-Busse bilden dabei den Referenzrahmen, an dem sich die alternativen Konzepte messen.
- Die Auswertung erfolgt durch grafische Darstellung der Kategorienbewertung in einem Netzdiagramm und das Konzept mit dem größten Nutzwert wird gefunden.

AP5: Machbarkeitsstudie

- Zur Analyse der Umsetzbarkeit erfolgt eine Marktrecherche zu Bussen des Konzeptes mit dem größten Nutzwert.

- Anschließend folgt eine Überprüfung der Anwendbarkeit des Konzeptes im Kreis durch Jahresverbrauchsvergleiche, Infrastrukturmaßnahmen und Betriebskostenrechnung.

2.2 Rahmenterminplan

Kalenderwoche:	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51
AP1: Projektmanagement												
AP1.1: Definition von Arbeitspaketen	█											
AP1.2: Projektstrukturplan	█											
AP1.3: Rahmenterminplan	█	M										
30 % Bericht							█					
70 % Bericht										█		
AP2: Ermittlung der Grundlagen												
AP2.1: Definition der physikalischen Grundlagen eines Busses		█										
AP2.2: Ermittlung charakteristischer Unterschiede der Stadt- und Überlandlinien		█										
AP2.3: Darstellung des politischen Rahmens der EU und Deutschland			█									
AP2.4: Darstellung der Ausgangssituation im Kreis durch Interview und Recherche			█									
AP2.5: Darstellung unterschiedlicher Kraftstoff- und Antriebsarten				█	█							
AP2.6: Ermittlung des Streckenverbrauchs und Emissionen				█	█	M						
AP3: Konzeptentwicklung												
AP3.1: Analyse des Anforderungsprofils und Erstellung der Anforderungslisten						█						
AP3.2: Erstellung der Funktionsgliederung						█						
AP3.3: Entwicklung von Konzepten im morphologischen Kasten							█	M				
AP3.4: Auswahl und Darstellung der Konzepte												
AP4: Konzeptbewertung												
AP4.1: Festlegung und Definition geeigneter Bewertungskriterien								█				
AP4.2: Durchführung der Gewichtung								█				
AP4.3: Analyse des Nutzwertes nach Kategorien									█			
AP4.4: Auswertung der Nutzwertanalyse										█	M	
AP5: Machbarkeit												
AP5.1: Marktrecherche											█	
AP5.2: Überprüfung der Anwendbarkeit											█	
AP5.3: Berechnung der Betriebskosten											█	
Abgabe												█
	Meilensteine: M											

Abbildung 2-2: Rahmenterminplan

3 Stand des Wissens und der Technik

In diesem Kapitel werden die grundlegenden Eigenschaften von Bussen und die charakteristischen Unterschiede zwischen Regionalbussen und Stadtbussen dargestellt und aktuelle Kennzahlen und politische Rahmenbedingungen in Deutschland beschrieben.

3.1 Energiebedarf eines Busses

Der Energiebedarf zur Fortbewegung eines Busses und der daraus resultierende Kraftstoffverbrauch und Emissionsausstoß lässt sich physikalisch als die Überwindung der Fahrwiderstände beschreiben. Die resultierende Widerstandskraft F_W besteht dabei vereinfacht bei längsdynamischer Fortbewegung aus der Luftwiderstandskraft F_L , der Rollwiderstandskraft F_R , der Neigungskraft F_S und der Beschleunigungskraft F_B und kann im Kräftegleichgewicht zwischen der Antriebskraft F_A und der Bremskraft F_{Br} wie folgt dargestellt werden [1]:

$$F_A - F_{Br} = F_W = F_R + F_L + F_S + F_B \quad (1)$$

Die Luftwiderstandskraft F_L nach Gl. (2) beschreibt die Widerstandskraft der Luft auf die frontale Fläche des Busses. Durch die Geschwindigkeit v in zweiter Potenz hat diese einen großen Einfluss auf die Größe der Kraft. Der Luftwiderstandsbeiwert c_w wird für jedes Fahrzeug experimentell ermittelt. Andere Studien geben einen Wert von 0,33 an [1], [2].

$$F_L = \frac{\rho_L}{2} \cdot v^2 \cdot A \cdot c_w \quad (2)$$

Darin ist:

ρ_L	Dichte der Luft
v	Fahrzeuggeschwindigkeit
A	Querschnittsfläche des Busses
c_w	Luftwiderstandsbeiwert

Die Rollwiderstandskraft F_R nach Gl. (3) wirkt den rollenden Rädern entgegen und ist abhängig von Straßenbelag und den Eigenschaften der Reifen, welche über den dimensionslosen Rollwiderstandsbeiwert c_R dargestellt wird [1]:

$$F_R = m \cdot g \cdot c_R \quad (3)$$

Darin ist:

m	Gesamtmasse des Busses inklusive Beladung
-----	---

g	Erdbeschleunigung
c_R	Rollwiderstandsbeiwert

Die Neigungskraft F_S nach Gl. (4) ist abhängig vom Höhenprofil der Fahrstrecke und kann positiv und negativ in die Berechnung einfließen je nachdem ob die Strecke bergab bzw. bergauf geht bzw. ob die potenzielle Energie benötigt oder abgegeben wird [1]:

$$F_S = m \cdot g \cdot \sin\phi \quad (4)$$

Darin ist:

ϕ	Steigungswinkel gegenüber der Horizontalen
--------	--

Die Beschleunigungskraft F_B nach Gl. (5) ergibt sich aus der Massenträgheit des Busses zu [1]:

$$F_B = \ddot{x} \cdot m \quad (5)$$

Darin ist:

\ddot{x}	Fahrzeugbeschleunigung
------------	------------------------

Der Energiebedarf lässt sich anschließend aus der Summe der Fahrwiderstände multipliziert mit der Geschwindigkeit v und durch Integration über die Zeit ermitteln:

$$E_{Fahr} = \int [(F_L + F_R + F_S + F_B) \cdot v] dt \quad (6)$$

Eine Methode zur Verringerung des Verbrauchs ist die Rekuperation der Bremsenergie. Sie kann von Fahrzeugen mit elektrischem Antriebstrang und auch von Verbrennungsmotoren in Hybrid-Ausführung genutzt werden. Bei der Rekuperation wird die kinetische Energie des Fahrzeugs im Bremsvorgang zurückgewonnen und in einen elektrischen Energiespeicher eingespeist. Der Energiespeicher kann anschließend das Bordnetz und die Nebenverbraucher versorgen und auch beim Anfahren unterstützen. Die theoretisch rekuperierbare Energie E_{Re} nach Gl. (7) ergibt sich während der Verzögerung aus der Beschleunigungswiderstand abzüglich der anderen Fahrwiderstände zu:

$$E_{Re} = \int [(F_B - F_R - F_L - F_S) \cdot v] dt \quad (7)$$

Zusätzlich zum Energiebedarf des Antriebes verfügt der Bus über eine Reihe von Nebenverbrauchern, die ebenfalls beachtet werden müssen, jedoch stark von der Art und Ausstattung des Busmodells abhängig ist. Abbildung 3-1 stellt dies beispielhaft dar.

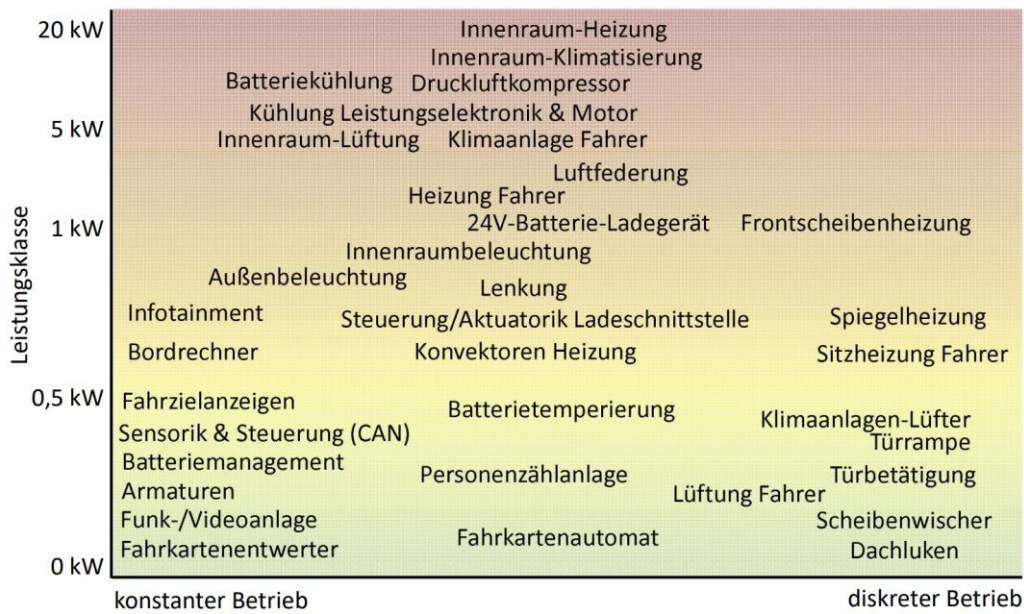


Abbildung 3-1: Nebenverbraucher eines batterieelektrischen Busses [3]

Der gesamte Streckenverbrauch eines Linienbusses im Betrieb kann mit Hilfe von Datenloggern aufgenommenen Daten berechnet werden. Ist dies nicht möglich, sollte nicht pauschal auf Herstellerangaben und Literaturwerte zurückgegriffen werden, da der Streckenverbrauch sehr individuell von den betrieblichen Gegebenheiten, darunter Verkehrsaufkommen, Anzahl an Haltestellen, Streckentopografie, Fahrgastaufkommen und die Durchschnittsgeschwindigkeit des Einsatzes abhängt [4].

Nach Untersuchungen der UITP (Internationale Association of Public Transport) mit standardisierten Fahrzyklen kann die Durchschnittsgeschwindigkeit des Zyklus als Schlüsselparameter herangezogen werden [5]. Zusätzlich wird die Rekuperationsfähigkeit (teil-)elektrischer Fahrzeuge berücksichtigt [4].

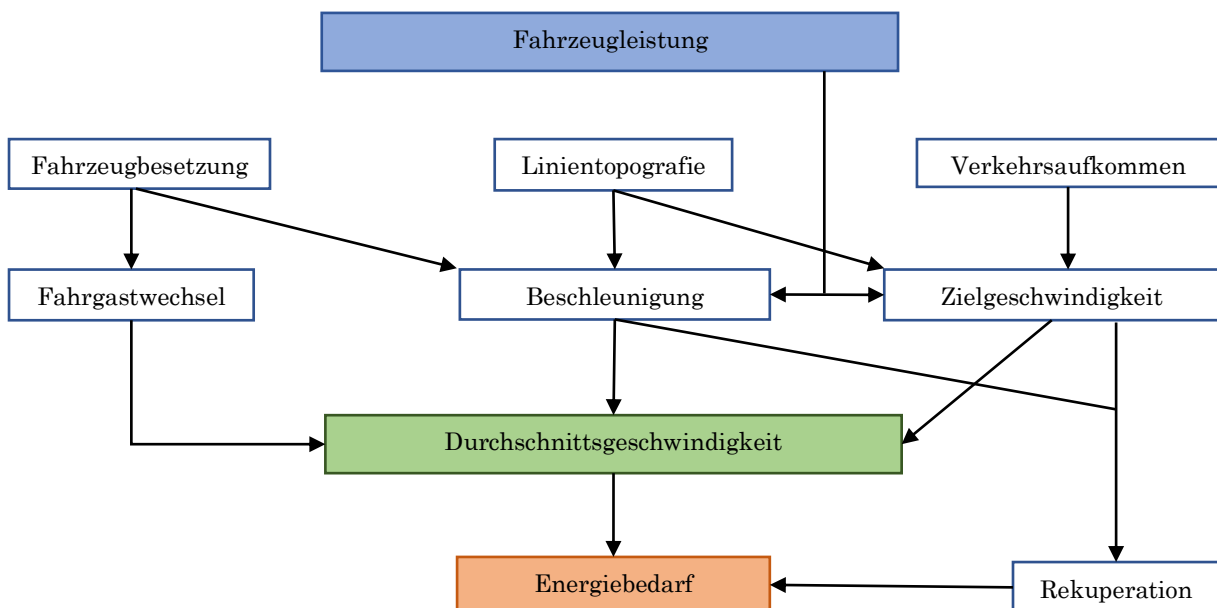


Abbildung 3-2: Die Durchschnittsgeschwindigkeit als Schlüsselparameter für den Energiebedarf nach [4]–[6]

Weitere Studien [6] haben die Abhängigkeit des Kraftstoffverbrauches von der Durchschnittsgeschwindigkeit untersucht und Verbrauchsfunktionen für unterschiedliche Antriebstechnologien hergeleitet. Bei steigender Durchschnittsgeschwindigkeit sinkt dabei der Kraftstoffbedarf. Diese umgekehrte Proportionalität ist auch als „das Paradoxon des ÖPNV“ bekannt [7].

Der Jahresmittelwert des Streckenverbrauchs eines Diesel-Standardbusses $B_{S,Diesel}$ nach Gl. (8) mit der Abgasgrenzwertstufe EEV, bei einer Zuladung von 1,5 t (entspricht 25 % Besetzung) und im Durchschnittsgeschwindigkeitsbereich von 15 bis 40 km/h lässt sich wie folgt berechnen [6]:

$$B_{S,Diesel} = \left((-10,03 \cdot \ln\left(\frac{v_{Zyklus}}{km/h}\right) + 66,58) \cdot \left(1 + \frac{3,8 km/h}{v_{Zyklus}}\right) \right) \cdot \frac{L}{100 km} \cdot TF_{Diesel} \quad (8)$$

Darin ist:

$B_{S,Diesel}$	Streckenkraftstoffbedarf des Dieselbusses in $\frac{L}{100 km}$
v_{Zyklus}	Durchschnittsgeschwindigkeit in $\frac{km}{h}$
TF_{Diesel}	Technologieverbesserungsfaktor für Verbrauchseinsparungen

Da moderne Euro VI-Dieselmotore etwas sparsamer als vergleichbare EEV-Dieselmotore sind, wurde die Formel durch einen Technologieverbesserungsfaktor TF ergänzt [4]. Die Technologieverbesserungsfaktoren werden durch den Vergleich des Modells mit realen Verbräuchen eines Busses mit der gleichen Zuladung und Durchschnittsgeschwindigkeit ermittelt. Massenbezogene Unterschiede werden mit einem mittleren Mehrverbrauch von 4 % pro t Zuladung in die Berechnung berücksichtigt. Die relative Streuung dieser Streckenverbräuche in Abhängigkeit der Durchschnittsgeschwindigkeit liegt dabei im Bereich zwischen 2-7 % [6].

Um auch die Energieverbräuche alternativer Antriebstechnologien zu ermitteln, können mit Hilfe von in der Herleitung definierten Verbrauchsfaktoren VF Relationen zum Dieselmotore hergestellt werden [6]. Diese werden in Kapitel 5 für die jeweilige Antriebsart vorgestellt und angewandt.

Zu bedenken ist, dass es sich hier um Jahresmittelwerte handelt. Bei widrigen Verkehrsbedingungen mit niedrigen Umgebungstemperaturen kann je nach Konzept der Energieverbrauch zum Heizen des Busses bis zu 50 % des gesamten Energiebedarfs ausmachen [4]. Dies tritt vor allem bei den batterieelektrischen Bussen auf, da die Verbrennungsmotoren die Abwärme des Motors nutzen können.

3.2 Charakteristische Unterschiede der Stadt- und Regionalbusse

Stadt- und Regionalbusse werden beide im Artikel 4 der Verordnung (EU) 2018/858 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2018 in Klasse M3 klassifiziert, welche diese als „Kraftfahrzeuge mit mehr als acht Sitzplätzen zusätzlich zum Fahrersitz und mit einer Gesamtmasse über 5 Tonnen“ einordnet.

Durch die UN-Regelung 107 [8] werden Kraftomnibusse, die zusätzlich zum Fahrer mehr als 22 Fahrgäste befördern können, in drei weitere Klassen eingeteilt, welche dabei dem typischen Stadtbus, Überlandbus und Reisebus entspricht [8]:

- **Klasse 1:**
Fahrzeuge mit Stehplätzen, die die Beförderung von Fahrgästen auf Strecken mit zahlreichen Haltestellen ermöglichen.
- **Klasse 2:**
Fahrzeuge, die hauptsächlich zur Beförderung sitzender Fahrgäste gebaut und so ausgelegt sind, dass die Beförderung stehender Fahrgäste im Gang und/oder in einem Bereich, der nicht größer ist, als der Raum von zwei Sitzbänken möglich ist.
- **Klasse 3:**
Fahrzeuge, die ausschließlich für die Beförderung sitzender Fahrgäste gebaut sind.

Ein Fahrzeug kann dabei auch zu mehr als einer Klasse gehören und dementsprechend für jede der Klassen genehmigt werden [8].

Regionalbusse sind somit in der Regel mit einem höheren Sitzplatzanteil, bequemeren Sitzen und in Fahrtrichtung ausgerichteten Sitzen ausgestattet [9]. Zudem sind größere Gepäckablagemöglichkeiten vorhanden bzw. Stellplätze für Kinderwagen und Rollstuhlfahrer. Eine bildliche Darstellung bietet beispielsweise der Internetauftritt des Herstellers MAN [10].

Auch den Einsatz von Niederflurfahrzeugen mit ebenen und stufenlosen Bodenverlauf zur barrierefreien Nutzung im Stadtverkehr hatte sich bis zum Jahre 2000 bereits fast vollständig durchgesetzt (98,0 %) [7]. Im Regionalverkehr wird dagegen oft die Low-Entry-Busvariante eingesetzt, eine Kombination aus Nieder- und Hochflurtechnik, bei der der vordere Teil des Busses niederflurig ausgebildet ist, während der hintere Teil des Fahrzeugs nur über Stufen erreichbar ist. Dies ermöglicht weiterhin einen barrierefreien Beitritt, hat jedoch gleichzeitig den Vorteil der Verwendung von Großserienkomponenten aus dem LKW-Bereich [7] und die damit einhergehenden Kosteneinsparungen. Low-Entry-Busse sind dabei nach der EU-Busrichtlinie 2001/85/EG [11] auch als Niederflurtechnik klassifiziert.

Zur Überprüfung der charakteristischen Eigenschaften der Stadt- und Überlandlinien im Kreis Schleswig-Flensburg werden nachfolgend einige zufällig gewählte Linien im Stadt- und Regionalverkehr miteinander verglichen und in Tabelle 3-1 und 3-2 dargestellt. Die

Stichprobe besteht aus drei Stadtlinien und drei Regionallinien. Die Daten wurden mit Hilfe von Linienplänen und Distanzmessungen in GOOGLE EARTH berechnet.

Tabelle 3-1: Übersicht über die zufällige Stichprobe der Buslinien

Regionalbuslinien	Stadtbuslinien
Linie 640 Schleswig – Flensburg	Linie 2 in Schleswig ZOB – Haydnweg – ZOB
Linie 600 Schleswig – Kappeln	Linie 5A in Flensburg ZOB – Hesttoft - ZOB
Linie R1 Flensburg – Niebüll	Linie 3 in Flensburg Marienhölungsweg – Solitude

Tabelle 3-2: Charakteristischer Vergleich der Buslinien

Buslinien	Linie 640	Linie 600	Linie R1	Linie 2 SL	Linie 5A FL	Linie 3 FL
Dauer in Minuten	54	78	65	26	36	37
Entfernung in km	34,3	43,2	46,6	8,1	12,0	11,8
Anzahl Haltestellen	38	49	31	25	24	36
Haltestellen pro km	1,1	1,1	0,7	3,1	2	3,1
Durchschnittsgeschwindigkeit in km/h	38,8	33,2	43,0	18,7	20	19,1

Aus Tabelle 3-2 werden die unterschiedlichen Eigenschaften der Linienarten ersichtlich. Mit einer ergänzenden Recherche lassen sich folgende Charakteristiken ableiten [12]:

Für Buslinien im Stadtverkehr typisch sind

- kurze Haltestellenabstände mit mehreren Haltestellen pro Kilometer,
- viele Zu- und Ausstiege von Personen, was zu längeren Haltezeiten führt,
- Abhängigkeit von anderen Verkehrsteilnehmern im Straßenverkehr und häufige verkehrsbedingte Verspätung,
- niedrige bis mittlere Durchschnittsgeschwindigkeit mit daraus resultierendem erhöhtem Verbrauch.

Im Gegensatz dazu sind für Buslinien im Regionalverkehr typisch

- große Abstände zwischen Haltestellen mit maximal 1,5 Haltestelle pro Kilometer,
- weniger starke Besetzung der Busse außerhalb von Spitzenzeit (Schulbeginn und -schluss),
- andere Verkehrsteilnehmer spielen eine geringere Rolle, da auf dem Land meist ein geringes Verkehrsaufkommen herrscht,
- eine höhere Durchschnittsgeschwindigkeit und daraus resultierendem geringerem Verbrauch,
- weniger Aufenthalte an Endhaltestellen, dafür längere Wendezeit,
- größere Wegstrecken.

3.3 Politischer Rahmen auf EU- und Bundesebene

Mit der Veröffentlichung des Saubere-Fahrzeuge-Beschaffungs-Gesetz (SaubFahrzeug-BschG) zur Umsetzung der EU-Richtlinie (EU) 2019/1161 der „Clean Vehicle Directive“ (CVD, Richtlinie für Saubere Fahrzeuge) im Juni 2021 werden bei öffentlichen Auftragsvergaben verbindliche Mindestziele für emissionsarme bzw. emissionsfreie Busse im ÖPNV für die Beschaffung vorgegeben [13].

Das Gesetz gibt dabei die Definition für „saubere Fahrzeuge“ vor, als die mit alternativen Kraftstoffen angetriebene Fahrzeuge. Der Begriff „Alternative Kraftstoffe“ umfasst erdöl-freie und zur Reduktion von Treibhausgasen beitragende Kraftstoffe wie [13]:

- Elektrische Energie
- Wasserstoff
- Erdgas, einschließlich Biomethan, gasförmig und flüssig
- synthetische Kraftstoffe*
- Biokraftstoffe*
- Plug-In-Diesel-Hybrid

**Ohne Beimischung von konventionellen, fossilen Kraftstoffen*

Zusätzlich zu den saubereren Antrieben erfolgt eine weitere Einteilung in emissionsfreie Antriebe. Nach der Richtlinie (EU) 2019/1161 „zur Änderung der Richtlinie 2009/33/EG über die Förderung sauberer und energieeffizienter Straßenfahrzeuge“ [14] ist ein Bus „emissionsfrei“, wenn „dieser keinen Verbrennungsmotor enthält oder der Verbrennungsmotor den extrem niedrigen Grenzwert von 1 g CO₂/km bzw. 1 g CO₂/kWh einhält“.

Darunterfallende Antriebe sind:

- Batterieelektrische Busse (Batterie und Oberleitungsbus)
- Wasserstoffbrennstoffzellenbusse und Wasserstoffverbrennungsmotoren

Diese Klassifizierung bewertet dementsprechend nur die lokal anfallenden Emissionen. Experten kritisieren die Sinnhaftigkeit dieser Richtlinie, welche „völlig falsche ökologische Maßstäbe setzt“ [15]. Eine mögliche Emissionsverschiebung wird bei der Darstellung der nachhaltigen Antriebe, ihrer Kraftstoffe und der Verbrauchsermittlung im nachfolgenden Kapitel berechnet.

Die Mindestziele für emissionsarme und -freie Neuanschaffungen von Bussen im ÖPNV werden in zwei Referenzzeiträumen eingeführt. Im ersten Zeitraum (2021-2025) müssen 45 % der Busse emissionsarm sein, wovon zusätzlich 50 % emissionsfrei sein sollen und

im zweiten Zeitraum (2026-2030) 65 % emissionsarm und davon weiterhin 50 % emissionsfrei sein.

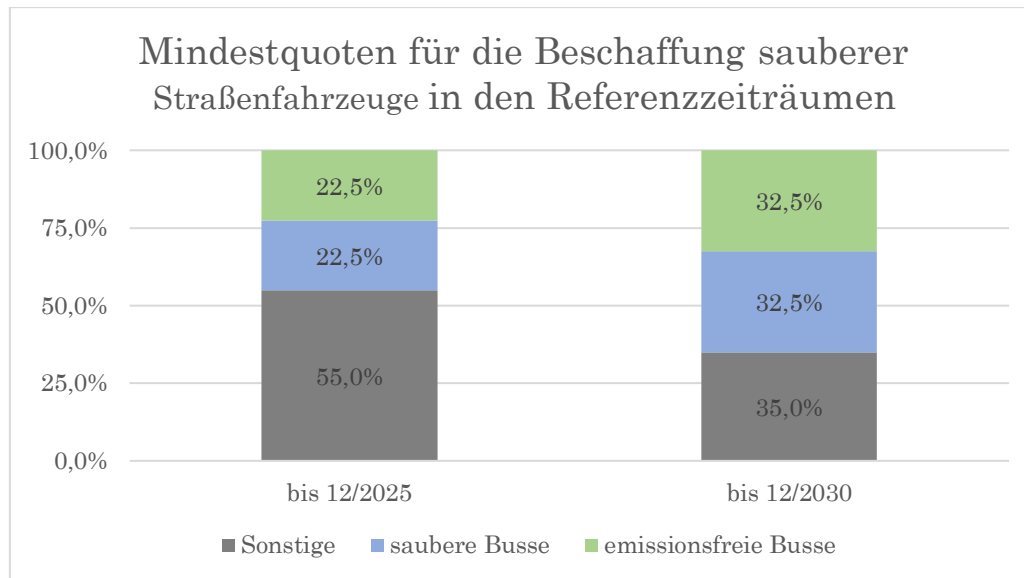


Abbildung 3-3: Darstellung der Mindestquoten zur Beschaffung sauberer Fahrzeuge

Diese Mindestziele gelten jedoch nur in den Fahrzeugen der Kategorie M3 Klasse 1 und somit die in Kapitel 3.2 genannten typischen Stadtbusse.

Überlandbusse der Kategorie M3 Klasse 2 sind vom Gesetz befreit, was jedoch grundsätzlich nicht gegen eine fortschreitende Entwicklung zu alternativen Antrieben auch in dieser Kategorie sprechen sollte. Der Bundesverband deutscher Omnibusunternehmer e. V. (BDO) empfiehlt zur Unterstützung der Umsetzung des Gesetzes im Stadtverkehr im Regionalverkehr auf die Überlandbusse der Klasse 2 zurückzugreifen [9].

Einer Nachfrage beim ÖPNV Betrieb des Kreises ergab, dass für den Regionalverkehr im Kreis reine Überlandbusse „so gut wie gar nicht im Linienverkehr eingesetzt“ [16] werden. Es werden dementsprechend die gleichen Busse für Stadt- und Regionalverkehr genutzt, sodass das SaubFahrzeugBeschG auch hier umgesetzt werden muss.

4 Ausgangslage im Kreis

Das Regionalbusnetz des Kreises Schleswig-Flensburg umfasst 106 Buslinien [17] und wird von den beiden Verkehrsunternehmen AUTOKRAFT GmbH und die VSF Verkehrsbetriebe Schleswig-Flensburg GmbH bedient.

Der ÖSPV (Öffentliche Straßenpersonennahverkehr) im Kreis Schleswig-Flensburg wird dabei in die Teilnetze West, Ost und Süd unterteilt. Bis zum Ende des Jahres 2028 wird Teilnetz West von der VSF eigenwirtschaftlich betrieben [18], und finanziert sich durch die Fahrgeldeinnahmen¹.

Die Teilnetze Süd und Ost werden von der AUTOKRAFT bedient, die sich in einer europaweiten Ausschreibung durchgesetzt hat. Das Verkehrsunternehmen ist in beiden Teilnetzen durch einen Bruttoverkehrsvertrag beauftragt die geforderten Linienkilometer gemeinwirtschaftlich zu bedienen und bekommt dafür eine Vergütung pro Kilometer¹ [18].



Abbildung 4-1: Ausschnitt des Liniennetzplans im Kreis. Farbige Linien mit höherwertigem Angebot, braune Linien mit Basisangebot [19]

Der ÖSPV im Kreis Schleswig-Flensburg konnte im Jahr 2021 einen mehrjährigen Neugestaltungs- und Erweiterungsprozess abschließen. Mit Betriebsstart des Teilnetz Ost am 01.07.2021 konnte die jährliche Fahrleistung von 7,4 Mio. Fahrplankilometer auf ca. 10 Mio. Fahrplankilometer erhöht werden. Zusätzlich wurde Liniennetze neu strukturiert

¹ Vgl. Interview mit Frau Carmen Esche, ÖPNV Betrieb, Anhang 2

und ein verdichtetes Fahrangebot mit 60 bzw. 120 Min.-Takt auf den jeweiligen Netzebenen eingeführt² [20]–[22].

Die Größe der Fahrzeugflotte der zuständigen Verkehrsunternehmen sind nicht öffentlich zugänglich, weshalb in dieser Arbeit Verbrauchs- und Emissionsrechnungen lediglich an einzelnen Bussen bzw. an einer beispielhaften Busflottengröße von zehn Bussen erfolgen. Im Rahmen des neuen Verkehrskonzeptes im Teilnetz Ost hat die AUTOKRAFT laut eigenen Pressemitteilung zusätzlich [23] 90 Busse im Einsatz, wovon 31 Fahrzeuge neue Mild-Hybridbusse des Herstellers MAN sind. Diese sind umweltfreundlicher als der reine Dieselantrieb, jedoch nicht emissionsfrei bzw. -neutral. Eine genauere Darstellung erfolgt im nächsten Kapitel.

Zur genaueren Untersuchung der Regionallinienbusse im Kreis erfolgt eine Analyse der Buslinien. Als Datengrundlage werden dabei die freizugänglichen Fahrpläne, Liniennetzpläne und Übersichtslisten der Linien genutzt, da die genauen Verbrauchs- und Kennzahlenaufschlüsselungen der Verkehrsunternehmen im Kreis als „Betriebsinterna“ gehandelt und deshalb auch nicht für wissenschaftliche Zwecke veröffentlicht werden.

Die Ermittlung der Linienlänge erfolgt dabei mit Hilfe des in Liniennetzplänen angegebenen Verlaufs und durch die Rekonstruktion und Nachmessungen in GOOGLE EARTH. Die ermittelten Entfernungen und die daraus resultierenden Durchschnittsgeschwindigkeiten und anderen Kennzahlen haben dementsprechend nicht den Anspruch auf Genauigkeit wie die Datenerfassung mittels Datenlogger der Verkehrsunternehmen. Die Verwendung als Anhaltswerte scheint dennoch sinnvoll.

Beachtet werden alle Linienfahrten (wochentags an Schultagen) von 14 Regionalbuslinien im ganzen Kreis aus dem im Nahverkehrsplan beschriebenen „höherwertigen Angebot“. Eine Übersicht ist in Tabelle 4-1 dargestellt.

² Vgl. Interview mit Herrn Thomas Jepsen, Vorsitzender des Infrastrukturausschusses, Anhang 1

Tabelle 4-1: Übersicht der analysierten Regionalbuslinien inklusive ihrer Kennzahlen

Liniennummer	Start	Ziel	Anzahl Haltestellen	Entfernung in km	Dauer in Minuten	Haltestellen pro km	Durchschnitts-Geschwindigkeit in km/h	Anzahl Fahrten pro Tag*
600	Schleswig	Kappeln	49	43,2	78	1,1	33,2	33
605	Schleswig	Süderbrarup	32	30,0	50	1,1	36,0	18
610	Kappeln	Süderbrarup	26	19,8	45	1,3	26,4	12
620	Kappeln	Satrup	27	28,2	52	1,0	32,5	15
630	Schleswig	Satrup	17	31,0	49	0,5	38,0	23
640	Schleswig	Flensburg	38	34,3	53	1,1	38,8	29
650	Schleswig	Eggebek	32	25,1	56	1,3	26,9	16
800	Flensburg	Kappeln	37	47,4	67	0,8	36,7	46
810	Flensburg	Dollerup	22	22,5	42	1,0	32,1	16
830	Flensburg	Sörup	35	31,8	51	1,1	37,4	20
840	Flensburg	Sörup	38	32,1	59	1,2	32,6	15
855	Flensburg	Schleswig	48	42,7	65	1,1	39,4	15
860	Flensburg	Eggebek	31	26,4	50	1,2	31,6	39
880	Nordhackstedt	Handewitt	12	14,1	20	0,9	42,3	26

*Eine Fahrt entspricht hierbei einer Einzelfahrt von Start-Ziel bzw. Ziel-Start.

Da die in Kapitel 3 beschriebene Durchschnittsgeschwindigkeit v_{Zyklus} zur Ermittlung des Energieverbrauchs entscheidend ist, wird stellvertretend zur Darstellung des gesamten Kreisgebietes ein Mittelwert gebildet. Die gemittelte Durchschnittsgeschwindigkeit beträgt:

$$v_{Zyklus} = \frac{\sum v_{Zyklus,i}}{14} = 34,6 \text{ km/h}$$

Diese Geschwindigkeit wird zur nachfolgenden Antriebsartendarstellung in der Berechnung des Streckenverbrauchs und die daraus resultierenden Emissionen verwendet.

5 Alternative Antriebsarten

Nachfolgend werden unterschiedliche Antriebsarten und ihre Kraftstoffalternativen dargestellt und mittels der berechneten Kreis-spezifischen Durchschnittsgeschwindigkeit die Streckenenergieverbräuche und die daraus resultierenden Treibhausgasemissionen ermittelt und gegenübergestellt.

5.1 Diesel-Hybrid-Antrieb

Dieselbetriebene Busse und deren Hybrid-Varianten haben derzeit einen Marktanteil von 97 % [24]. Dieselmotoren gelten als ausgereifte Technik, der Verbrennungsmotor mit dem höchsten Wirkungsgrad im konventionellen Bereich und mit einer hohen resultierenden Reichweite [7]. Weiterentwicklungen und Optimierungen wie die Turbo-Aufladung und Partikelfilter haben neben Leistungssteigerungen auch zu einer Reduzierung der Emissionen geführt [25].

Als eine Alternative zum konventionellen Diesel wird insbesondere Biodiesel (Fettsäuremethylester FAME) genutzt. Dabei werden pflanzliche und tierische Öle und Fette mit Hilfe von Alkoholen durch Umesterung zu Methylester. Jedoch wird bei der Herstellung häufig auf Anbaupflanzen wie Raps gesetzt und nicht aus Abfall- und Reststoffen und stehen dadurch schnell in Konkurrenz zur Nahrungsmittelerzeugung [26].

Biodiesel wird als Reinkraftstoff vermarktet. Die Hauptabnehmer sind die Mineralölkonzerne, die ihrem Diesel bis zu 7 % Biodiesel beimischen. Dieses Verhältnis können alle Motoren problemlos vertragen. Je nach prozentualem Anteil entstehen dabei die Bezeichnungen B5, B7, B20 oder auch B100 [27], [28].

Weitere Dieselalternativen in Form von synthetischen Kraftstoffen, welche zukünftig eine größere Rolle spielen könnten, sind BtL-Kraftstoffe (Biomass-to-Liquid, Biomasseverflüssigung), die aus Biomasse mittels Fischer-Tropsch-Synthese erzeugt werden und PtL-Kraftstoffe (Power-to-Liquid), die aus erneuerbaren Quellen elektrolysierten Wasserstoff durch Zugabe einer Kohlenstoffquelle hergestellt und deshalb auch „E-Fuels“ genannt werden [28], [29].

Zur Einhaltung der CVD dürfen diese zukünftig nicht konventionellem Diesel beigemischt werden, sondern müssen in Reinform eingesetzt werden³.

³ Vgl. Kapitel 3.3

Die Kombination des Verbrennungsmotors mit einem Elektromotor in Form eines Hybrid-Antriebs ist eine Option, um darüber hinaus Kraftstoff und Emissionen einzusparen. Das Mild-Hybrid-Konzept spart Energie durch die Rekuperation der Bremsenergie und mittels Start-Stopp-Automatik. Die Einsparpotenziale liegen zwischen 4 und 25 %, wobei Überlandlinien am unten Ende liegen [6]. Der Hersteller MAN, der im Kreis eingesetzten Hybrid-Busse, gibt für seine „EfficientHybrid“-Technologie eine Kraftstoffersparnis von bis zu 16 % im Stadtverkehr an [30]. Der Rekuperationsfaktor RF wird in dieser Arbeit auf Grund des Fokus auf den Regionalverkehr auf einen Wert von 10 % festgelegt.

Zur Ermittlung des Streckenverbrauchs $B_{S,Diesel}$ eines Euro VI Dieselbusses wird nachfolgend Gl. (8) angewandt:

$$B_{S,Diesel} = \left(\left(-10,03 \cdot \ln \left(\frac{v_{Zyklus}}{km/h} \right) + 66,58 \right) \cdot \left(1 + \frac{3,8}{v_{Zyklus}} km/h \right) \right) \cdot \frac{L}{100 km} \cdot TF_{Diesel}$$

Mit

$$v_{Zyklus} = 34,6 \frac{km}{h}$$

$$TF_{Diesel} = 0,92 \text{ nach [31]}$$

Berechnet sich der Streckenverbrauch zu:

$$B_{S,Diesel} = \left((-10,03 \cdot \ln(34,6) + 66,58) \cdot \left(1 + \frac{3,8}{34,6} \right) \right) \cdot \frac{L}{100 km} \cdot 0,92 = 31,7 \frac{L}{100 km}$$

Der Streckenenergieverbrauch $E_{S,Diesel}$ berechnet sich anschließend durch die Multiplikation mit dem Heizwert $H_{U,Diesel} = 35,7 MJ/L$ [32] zu:

$$E_{S,Diesel} = 31,7 \frac{L}{100 km} \cdot 35,7 \frac{MJ}{L} = 1.132 \frac{MJ}{100 km}$$

Bei Berücksichtigung des Rekuperationsfaktors RF ergibt sich für die Diesel-Hybrid-Variante einen Energieverbrauch von:

$$E_{S,DHybrid} = E_{S,Diesel} \cdot (1 - RF) \tag{9}$$

$$E_{S,DHybrid} = 1.132 \frac{MJ}{100 km} \cdot (1 - 0,1) = 1.018 \frac{MJ}{100 km}$$

5.2 Batterieelektrischer-Antrieb

Batterieelektrische (BE) Busse sind Busse, die von einem oder mehreren Elektromotoren angetrieben werden, welche die notwendige Energie ausschließlich aus einem Batteriespeicher beziehen. Im Gegensatz zum konventionellen Antrieb ist der Betrieb eines BE-Busses lokal emissionsfrei. China gilt als Vorreiter der Buselektrifizierung und hatte 2019 99 % der 400.000 auf der Welt im Einsatz befindlichen Elektrobusse in ihren Großstädten im Betrieb. Ziel dabei ist die Befreiung der Großstädte von der Luftverschmutzung, mit denen die Chinesen seit Jahren Probleme haben [33].

Die Emissionsproblematik entsteht jedoch bei Elektrobussen nicht im Betrieb, sondern bei der Herstellung der Akkumulatoren und der Wiederaufladung mit Strom aus dem deutschen Strommix, welcher derzeit nur zu 47,9 % [34] aus erneuerbarer Energieerzeugung besteht. Das Umweltbundesamt gibt eine Schätzung für den deutschen Strommix für den CO₂-Emissionsfaktor der Stromerzeugung des Jahres 2020 von 366 g/kWh an [35].

Einer aktuellen Studie [36] des ICCT (International Council on Clean Transportation) nach entstehen bei der Herstellung des Akkumulators eines PKWs spezifische Emissionen von 60 bis 68 kg CO₂e/kWh. Angewendet auf die Speicherkapazität eines Busses von z. B. 200 kWh entspricht dies einer Emissionsmenge von 12 bis 13,6 t CO₂e.

Reichweitentechnisch sind BE-Busse mit einer realistischen Reichweite von 100 bis 300 km je nach Modell und Ausführung ausgestattet [37] und hängen deshalb zurück im Vergleich zu anderen Antriebstechnologien. Einige Hersteller haben mit Leichtbauweisen und anderen Innovationen jedoch auch schon Busse mit Reichweiten von 400 bis über 500 km angekündigt und hergestellt [38].

Die benötigte Reichweite kommt dabei nicht nur auf die Umlauflänge und dessen Begebenheiten an, sondern ist auch abhängig vom gewählten Nachladekonzept, Art der Batterie und den Witterungsverhältnissen.

Für den Betrieb von Elektrobussen sind hauptsächlich drei Nachladekonzepte in Anwendung. Die eine Variante ist die Depotladung oder auch Übernachtladung, bei dem die Busse üblicherweise über Nacht im Betriebshof langsam und vollständig aufgeladen werden. Es werden derzeit Akkumulatoren mit einer Kapazität von 250-400 kWh eingesetzt, wovon durch Wirkungsgradverluste und voranschreitender Abnutzung rund 80 % nutzbar sind [39].

Die Vor- und Nachteile dieses Ladekonzeptes sind [4], [12], [40], [41]:

- die Ladeinfrastruktur, welche lediglich im Betriebshof errichtet werden muss,
- ein schonenderer Ladevorgang, auf Grund der geringeren Ladeleistung (unter 100 kW),
- die größere Flexibilität des Fahrzeugs, welche eine größere Einsatzmöglichkeit innerhalb der maximalen Reichweite gestattet,
- die Unabhängigkeit von Ladesäulen unterwegs,
- eine große, jedoch limitierte Reichweite, mit zusätzlicher Reichweiteneinschränkung bei elektrischer Heizung,
- ein möglicher Fahrzeugmehrbedarf auf Grund der maximalen Fahrreichweite,
- große und kostenintensive Akkumulatoren.

Die zweite Variante ist die Gelegenheitsladung, bei der das Fahrzeug entlang der Strecke oder an Endhaltestellen während der Wendezeit aufgeladen wird. Zur Gewichtseinsparung wird eine kleinere Speichergröße (125 kWh) verwendet, da die Ladungspunkte auf der Strecke die regelmäßige Nachladung ermöglichen [39].

Vor- und Nachteile dieses Ladekonzeptes sind [12], [40], [41]:

- die Wirtschaftlichkeit der Verwendung von kleineren Akkumulatoren,
- die leichtere Integration einer vollelektrischen Heizung,
- eine unbegrenzte Reichweite durch kurze Nachladestopps an den Haltestellen,
- ein ladeinfrastruktureller Mehraufwand durch nötige Integration in öffentlichen Straßenraum inklusive erhöhten Kosten,
- weniger Flexibilität, da das Fahrzeug auf Nachladestellen auf der Linienführung angewiesen ist.

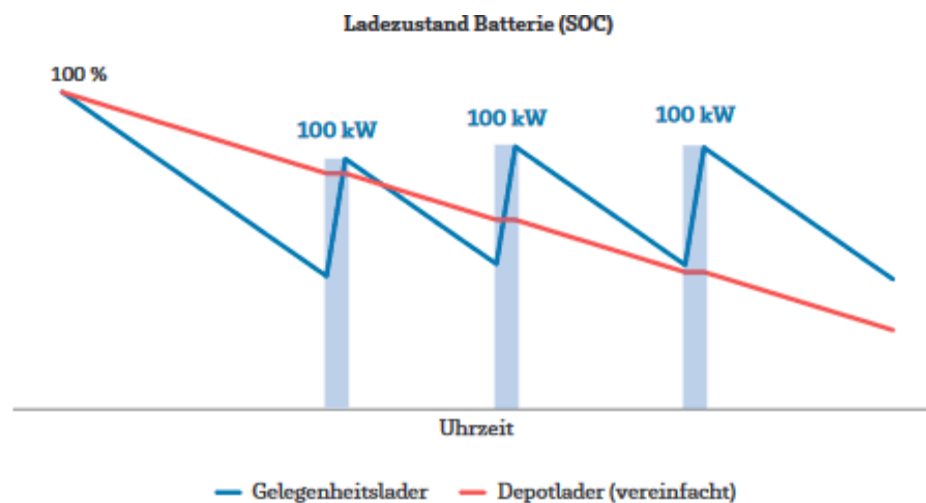


Abbildung 5-1: Schematischer Vergleich des Depot- und Gelegenheitsladers [40]

Die dritte Variante ist die Oberleitungsladung. Dieser Bustyp wird auch Trolleybus genannt und ist im Stadtverkehr eine bereits erprobte Technologie. Konventionelle Oberleitungsbusse setzen Oberleitungen entlang der gesamten Strecke und auch auf den wegen zum Betriebshof voraus. Hybride Oberleitungsbusse verfügen über eine größere Batterie, um längere Distanzen ohne Oberleitung zu erreichen. Ein sinnvoller Einsatz von Trolleybussen liegt vor allem im Stadtverkehr mit vielen Linienüberschneidungen, sodass die Oberleitungsladeinfrastruktur von mehreren Linien gleichzeitig genutzt werden kann [41].

Der Einsatz im Regionalverkehr ist dementsprechend auf Grund von fehlender Infrastruktur und wenigen Linienüberschneidungen weniger zu empfehlen und wird aus diesem Grund in Berechnungen nicht beachtet.

Den mittleren Streckenenergieverbrauch der BE-Busse lässt sich aus Relation zu Gl. (8) herleiten [6]:

$$E_{S,BE,Depot} = E_{S,Diesel} \cdot VF_{BE} \cdot TF_{BE,Depot} \cdot \frac{1}{\eta_{laden}} \quad (10)$$

$$E_{S,BE,Zwischen} = E_{S,BE,Depot} \cdot GF_{Zwischen} \quad (11)$$

Darin ist:

$E_{S,BE,Depot}$	Mittlerer Streckenenergieverbrauch des Depotladers pro 100 km
$E_{S,BE,Zwischen}$	Mittlerer Streckenenergieverbrauch des Zwischenladers pro 100 km
$VF_{BE,Depot}$	Verbrauchsfaktor eines Depotladers
TF_{BE}	Technologieverbesserungsfaktor für Verbrauchseinsparung
$GF_{Zwischen}$	Gewichtsfaktor für Zwischenlader
η_{Laden}	Wirkungsgrad des Ladevorgangs

Mit

$$VF_{BE,Depot} = 0,45 \text{ entspricht dem Faktor aus der Formelherleitung aus [6]}$$

$$TF_{BE} = 0,65 \text{ nach [31] durch den Vergleich mit Realverbräuchen}$$

$$\eta_{Laden} = 0,95 \text{ nach [42]}$$

ergibt sich:

$$E_{S,BE,Depot} = 1.132 \frac{MJ}{100 km} \cdot 0,45 \cdot 0,65 \cdot \frac{1}{0,95} = 348,6 \frac{MJ}{100 km}$$

Der Energieverbrauch des Zwischenladers ergibt sich anschließend durch Multiplikation mit dem Gewichtsfaktor, welcher sich aus den Leergewichtsunterschieden ermitteln lässt.

Mit

$$GF_{Zwischen} = 0,97 \text{ nach [31]}$$

Ergibt sich:

$$E_{S,BE,Zwischen} = 348,6 \frac{MJ}{100 km} \cdot 0,97 = 338,1 \frac{MJ}{100 km}$$

5.3 Wasserstoffantrieb

Wasserstoff kann auf unterschiedliche Art und Weise produziert werden. Die bisher ausgereifteste und am weitesten verbreitete Art (~90 % [28], [43]) der Wasserstofferzeugung ist das Dampfreformierungsverfahren, bei dem der Wasserstoff aus Kohlenwasserstoffe (z. B. Erdgas) gewonnen wird. Die Herstellung ist dabei nicht frei von Emissionen, es entstehen ca. $10 \text{ kg}_{CO_2}/\text{kg}_{H_2}$ [44], weshalb dieser als grauer Wasserstoff bezeichnet wird. Auch bei der Gewinnung als Bei- oder Abfallprodukt (z. B. Chemieindustrie) wird dieser als grau bezeichnet.

Wasserstoff kann auch durch die Elektrolyse von Wasser gewonnen werden. Hier ist die Herkunft des Stroms von Bedeutung. Bei der Erzeugung aus erneuerbaren Energien (z. B. per Direktabnahme aus einem Windpark) wird dieser als „grün“ und emissionsfrei bezeichnet. Wird Strom aus dem deutschen Strommix zur Erzeugung genutzt, kann auf Grund der Zusammensetzung des Mix nicht von emissionsfreier Erzeugung gesprochen werden. Auch hier wird die Schätzung für den CO_2 -Emissionsfaktor der Stromerzeugung des Jahres 2020 des Umweltbundesamtes zur Ermittlung verwendet, welche bei $366 \text{ g}/\text{kWh}$ liegt [35]. Aus der Standardreaktionsenthalpie der Elektrolyse

$$\Delta_R H^0 = 286 \frac{kJ}{mol}$$

und unter der Annahme eines Systemwirkungsgrades von $72 \%^4$ ergibt sich die benötigte elektrische Energie zu $55,17 \text{ kWh}/\text{kg}_{H_2}$. Daraus ergibt sich unter Berücksichtigung des Emissionsfaktors die Menge an freigesetztem CO_2 zu $20,2 \text{ kg}_{CO_2}/\text{kg}_{H_2}$.

Tabelle 5-1: Verfahren zur Erzeugung von Wasserstoff und die resultierenden Emissionen

Verfahren	CO_2 -Emissionen in $\frac{kg_{CO_2}}{kg_{H_2}}$
Dampfreformierung	~10,0
Elektrolyse (Strommix 2020)	20,2
Elektrolyse aus EE	~0,0

⁴ Systemwirkungsgrad eines Elektrolyseurs aus eigenem vorangegangenen Projekt im Kreis [45]

Der erzeugte Wasserstoff kann anschließend gespeichert bzw. transportiert werden, um in Verbrennungs- und Brennstoffzellenfahrzeugen eingesetzt zu werden.

Brennstoffzellenfahrzeuge (BZ) verfügen üblicherweise über eine PEM-Brennstoffzelle (Proton Exchange Membrane) inklusive Wasserstoffdrucktank, in dem Wasserstoff in der Regel auf 350 bar verdichtet ist. In der Brennstoffzelle läuft dabei der umgekehrte Elektrolyse Prozess ab, bei dem aus Wasserstoff in Kombination mit Sauerstoff Wasser entsteht und Energie freigesetzt wird, welche im Elektromotor genutzt oder in die Batterie eingespeist wird. Die Vorteile des Elektromotors gegenüber dem Diesel sind dadurch auch hier präsent. Wie auch die batterieelektrischen Busse, fahren die Brennstoffzellenbusse lokal emissionsfrei und leise. Die Brennstoffzelle erreicht Wirkungsgrade von 45-55 % und das gesamte Antriebssystem liegt bei 38-50 % [46].

Die Reichweite der BZ-Busse ist abhängig von den Eigenschaften des Busses und der Umlaufcharakteristik. Reichweiten von 300 bis 400 km sind möglich [47]. Zukünftig sind Reichweiten von 400-800 km denkbar [48].

Der Streckenverbrauch $E_{S,BZ}$ im Regionalverkehr kann analog zum Dieselbus nach Gl. (8) bei Hinzufügung eines Verbrauchsfaktors ermittelt werden [6]:

$$E_{S,BZ} = E_{S,Diesel} \cdot VF_{BZ} \cdot TF_{BZ} \quad (12)$$

Darin ist:

$E_{S,BZ}$	Mittlerer Streckenenergieverbrauch des BZ-Busses pro 100 km
VF_{BZ}	Verbrauchsfaktor eines BZ-Busses
TF_{BZ}	Technologieverbesserungsfaktor des BZ-Busses

Mit

$VF_{BZ} = 0,8$	entspricht dem Faktor aus der Formelherleitung aus [6]
$TF_{BZ} = 0,82$	festgelegter „optimistischer“ Faktor nach [31]

ergibt sich:

$$E_{S,BZ} = 1.132 \frac{MJ}{100 km} \cdot 0,8 \cdot 0,82 = 742,7 \frac{MJ}{100 km}$$

Der Wasserstoffverbrennungsmotor ist ein Gasmotor und verfügt über die gleichen Charakteristiken wie konventionelle Verbrennungsmotoren. Derzeit ist auf dem deutschen Markt nur ein Hersteller aktiv. Der Hersteller KEYOU betreibt ausgeweitete Forschungen dieser Technologie und gibt für seine Wasserstoffmotoren Wirkungsgrade bis 44,5 % an [46].

Da sich die Motoren des Herstellers KEYOU gerade erst in der Markteinführung befinden, kann die Streckenverbrauchsermittlung nicht auf eine große Datenmenge und einen genauen Verbrauchsfaktor bezogen werden. Stattdessen wird auf die Herstellerangaben für Stadtverkehr unter SORT-2-Bedingungen zurückgegriffen und daraus der Verbrauchsfaktor gegenüber der Dieselsebuse abgeleitet. KEYOU gibt einen Verbrauch von $10,8 \text{ kg}_{\text{H}_2}/100 \text{ km}$ bzw. $1.295 \text{ MJ}/100 \text{ km}$ an bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von $18,6 \text{ km/h}$ [49].

Für den Dieselsebus ergeben sich nach Gl. (8) mit angepasster Durchschnittsgeschwindigkeit und dem gleichen Technologieverbesserungsfaktor ein Streckenverbrauch von $41,3 \frac{\text{L}}{100 \text{ km}}$ bzw. $1.474 \frac{\text{MJ}}{100 \text{ km}}$.

Der in dieser Arbeit angewandte Verbrauchsfaktor VF_{VH_2} ergibt sich anschließend aus dem Verhältnis:

$$VF_{\text{VH}_2} = \frac{E_{S,\text{VH}_2,18,6 \text{ km/h}}}{E_{S,\text{Diesel},18,6 \text{ km/h}}} \quad (13)$$

$$VF_{\text{VH}_2} = \frac{1.295 \frac{\text{MJ}}{100 \text{ km}}}{1.474 \frac{\text{MJ}}{100 \text{ km}}} = 0,8790$$

Der Streckenenergieverbrauch E_{S,VH_2} des Wasserstoffverbrennungsmotors unter den Bedingungen des Kreises ergibt sich anschließend zu:

$$E_{S,\text{VH}_2} = E_{S,\text{Diesel}} \cdot VF_{\text{VH}_2} \quad (14)$$

$$E_{S,\text{VH}_2} = 1.132 \frac{\text{MJ}}{100 \text{ km}} \cdot 0,8790 = 995,2 \frac{\text{MJ}}{100 \text{ km}}$$

Die Betankung von Wasserstoffbussen erfolgt an Wasserstoff-Tankstellen an bestimmten Standorten oder im Betriebshof. Die Betankungszeit für einen vollen Tank beträgt dabei ungefähr 5-15 Minuten pro Bus [47] und ist zeitlich vergleichbar mit der Dieselsebetankung konventioneller Busse [40].

Zur wirtschaftlichen Gestaltung der Wasserstoffinfrastruktur ist es sinnvoll, den Standort der Tankstelle in der Nähe des Elektrolysestandortes und in möglichst guter Erreichbarkeit zur Minimierung der Leerfahrten zu errichten. Grundsätzlich muss zwischen Bus-leerfahrten, Anschlusskosten und Transportkosten des Wasserstoffs abgewogen werden [50].

5.4 Gasantrieb

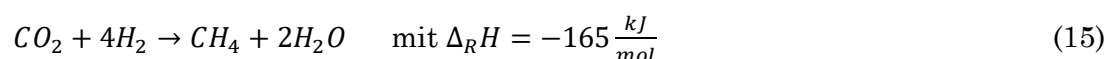
Gasbetriebene Busse sind mit einem Gasmotor ausgestattet, die zu den Verbrennungsmotoren gehören. Statt mit einem Kraftstoff-Ölgemisch werden sie mit einem Erdgas-Luftgemisch betrieben. Da bei atmosphärischem Druck die Energiedichte des Gases deutlich unter der Energiedichte von Diesel liegt, wird es auf 200 bar komprimiert (CNG, Compressed Natural Gas) oder durch starke Kühlung verflüssigt (LNG, Liquid Natural Gas), um eine ausreichende Energiemenge im Fahrzeug mitzuführen [6]. Neben dem konventionellen Erdgas kann auch Biomethan oder erneuerbares Methan (E-Methan) verwendet werden. Sie unterscheiden sich maßgeblich im Herstellungsprozess, der Wertschöpfungskette und der Klimabilanz [31].

Erdgas ist ein weitverbreitetes fossiles Gasgemisch, welches sich aus verschiedenen Komponenten zusammensetzt. Der Hauptbestandteil ist dabei Methan mit 75 bis 98 %, weitere Bestandteile sind Stickstoff, Kohlendioxid, Ethan, Propan und Butan [31], [51].

Biomethan entsteht durch die Aufbereitung des in Biogasanlagen erzeugten Biogases. Dort wird aus organischen Abfällen, Gülle und nachwachsenden Rohstoffen in Gärungsprozessen Biogas erzeugt. Dieses Biogas wird anschließend in mehreren Aufbereitungsschritten von Verunreinigungen durch Schwefelwasserstoffe und Ammoniak befreit mit zusätzlicher CO₂ Abscheidung [28].

In verdichteter Form kann das Biomethan direkt als Kraftstoff verwendet werden oder ins Erdgasnetz eingespeist werden. Biomethan gilt als Emissions-neutral, da die Menge CO₂, die bei der Verbrennung freigesetzt wird, vorher in der Wachstumsphase der Biomasse aus der Luft aufgenommen wurde [31].

Erneuerbares Methan kann aus dem in PtG-Anlagen erzeugten Wasserstoff umgewandelt werden. Die PtG-Anlagen erzeugen dabei aus erneuerbarer elektrischer Energie durch Elektrolyse Wasserstoff. Mittels des SABATIER-Prozesses wird Wasserstoff mit CO₂ oder CO zur Methanbildung synthetisiert [52]:



Dies ist besonders interessant, da eine CO₂-Quelle benötigt wird, welche z. B. in industriellen Prozessen und auch in Biogasanlagen als Abfallprodukt anfällt und somit recycelt werden kann. Auch die Abtrennung aus der Luft ist möglich [53].

Viele Projekte nutzen diese Synergien zur weiteren Vermeidung von CO₂-Emissionen bereits, wie BIOCO2NVERT [54], HYCAUNAIIS [55] und BIOPOWER2GAS [56].

Eine Übersichtliche Darstellung der Biomethan- und E-Methan-Erzeugung und die mögliche Kombination beider ist in Abbildung 5-2 dargestellt.

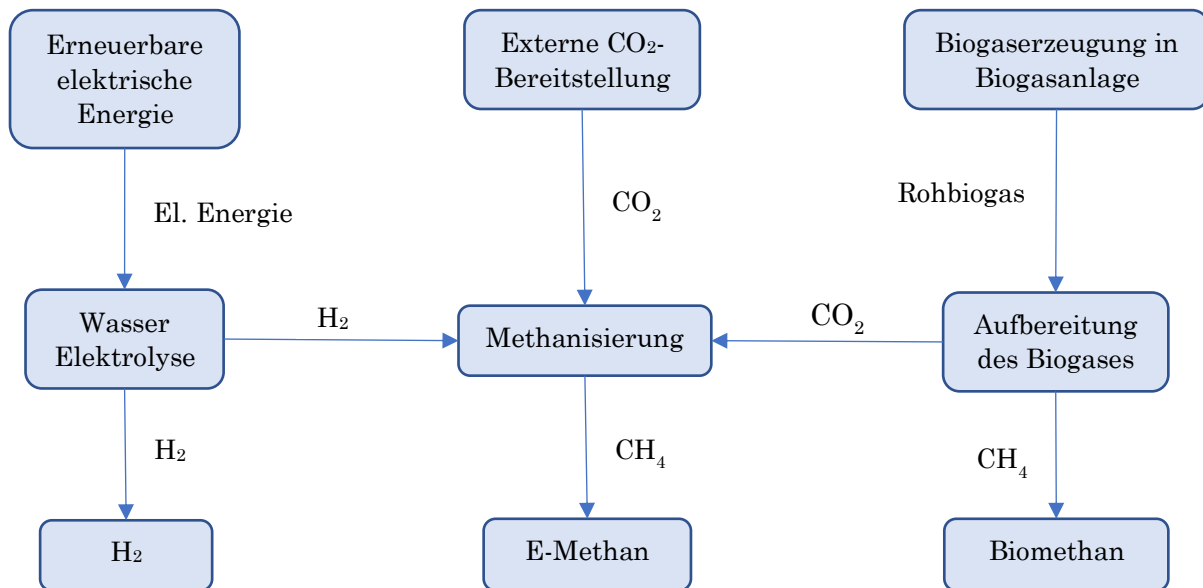


Abbildung 5-2: Vereinfachte Prozesskette der Kombination von Biomethan-, E-Methan- und Wasserstoffherzeugung. Eigene Darstellung nach [31]

Rein äußerlich unterscheiden sich die gasbetriebenen Busse von traditionellen Dieselbussen durch einen Dachaufbau, in dem sich die Drucktanks befinden.

Gasbetriebene Busse erreichen je nach Umlaufcharakteristik und Modell 400-600 km an Reichweite mit einer Tankladung. Damit liegen sie reichweitentechnisch nah an den konventionellen Dieselbussen [57].

Die Betankung von Gasbussen kann an eigener Tankstelle im Betriebshof oder an öffentlichen Tankstellen geschehen, wobei diese eher für die Betankung von PKW ausgelegt sind. Tankvorgang und Zeit unterscheidet sich dabei nur geringfügig vom konventionellen Dieselbus (~5 Min.). Sicherheitstechnisch ist die Verwendung von Gas als Treibstoff nicht gefährlicher als die Verwendung von Diesel- und Benzinkraftstoffen [31].

Der Streckenverbrauch eines Gasbusses $E_{S, Gas}$ lässt sich in Relation zu den Dieselbussen berechnen zu:

$$E_{S, Gas} = E_{S, Diesel} \cdot VF_{Gas} \quad (16)$$

Darin ist:

$E_{S, Gas}$	Streckenenergieverbrauch des Gasbusses
VF_{Gas}	Verbrauchsfaktor eines Gasbusses

Der Verbrauch eines Gasbusses liegt dabei leicht über dem Wert von vergleichbaren Dieselnbussen.

Mit

$$VF_{Gas} = 1,17 \text{ nach Annahmen von [31]}$$

Ergibt sich:

$$E_{S,Gas} = 1.132 \frac{MJ}{100 km} \cdot 1,17 = 1.325 \frac{MJ}{100 km}$$

5.5 Ergebnisse der Energiebedarfs- und Emissionsermittlung

Nach der Darstellung der Kraftstoff und Antriebsalternativen und der Ermittlung des Streckenenergieverbrauchs erfolgt in diesem Kapitel eine Gegenüberstellung der Verbräuche samt ihren Emissionen.

Dabei kommt es zur Unterscheidung von den Emissionen, die während des Betriebes anfallen (TtW, Tank-to-Wheel) und denen, die in der Vorkette bei der Energiegewinnung, Transport und Bereitstellung anfallen (WtT, Well-to-Tank). Die Summe aus beiden ergibt die gesamte Menge an Emissionen (WtW, Well-to-Wheel).

Zur Berechnung der Treibhausgasemissionen wird nachfolgend der Leitfaden für die europäische Norm EN 16258 zur „Berechnung des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen des ÖPNV“ [32] angewendet:

$$EM_{TTW} = E_i \cdot F_{EM,TTW} \quad (17)$$

$$EM_{WTW} = E_i \cdot F_{EM,WTW} \quad (18)$$

Darin ist

EM_{TTW}	Tank-to-Wheel-THG-Emissionen in kg_{CO_2e}
EM_{WTW}	Well-to-Wheel- THG-Emissionen in kg_{CO_2e}
$E_{S,i}$	Ermittelter Streckenenergieverbrauch des Antriebs i
$F_{EM,TTW}$	Tank-to-Wheel-THG-Emissionsfaktor
$F_{EM,WTW}$	Well-to-Wheel-THG-Emissionsfaktor

Die Emissionsfaktoren sind dabei der Norm entnommen und in Tabelle 5-2 dargestellt.

Tabelle 5-2: Emissionsfaktoren zur Berechnung der Treibhausgasemissionen nach EN 16258 [32]

	Heizwert	Tank-to-Wheel-Emissionen		Well-to-Wheel-Emissionen	
	MJ / kg	CO _{2e} in kg/kg	CO _{2e} in kg/L	CO _{2e} in kg/kg	CO _{2e} in kg/L
Diesel (D7)	42,7	2,97	2,48	3,76	3,15
Erdgas (CNG)	45,1	2,68	-	3,07	-
Biomethan	50,0	-	-	0,60 ⁵	-

In Kombination mit den angenommenen Emissionen zur Stromerzeugung von 366 g/kWh [35] sind nachfolgend in Tabelle 5-3 die unterschiedlichen Antriebe und ihre Kraftstoffarten dargestellt.

Tabelle 5-3: Übersicht über Energieverbräuche und Emissionen der unterschiedlichen Antriebe

Kraftstoff-/Antriebsart	Ermittelter Energiebedarf in MJ/100 km	Art der Energiebereitstellung	WtT-Emissionen CO _{2e} in kg/100 km	TtW-Emissionen CO _{2e} in kg/100 km
Diesel	1.132		21,2	99,9
*Hybrid	*1.019		*19,1	*89,9
Erdgas	1.325		11,5	78,7
*Hybrid	*1.192		*10,3	*70,8
Biomethan			15,9	0,00
E-Methan		EE	0,0	0,00
Batterie	348,6	Strommix	35,4	0,00
Depotlader		EE	0,0	0,00
Batterie	338,1	Strommix	34,4	0,00
Zwischenlader		EE	0,0	0,00
Brennstoff-Zellenbus (FC)	742,7	Dampfpref.	61,9	0,00
		Elektrolyse	124,4	0,00
		Strommix		
Wasserstoff-Verbrenner	995,2	Elektrolyse EE	0,0	0,00
		Dampfpref.	82,9	**0,02
		Elektrolyse	166,7	**0,02
		Strommix		
		Elektrolyse EE	0,00	**0,02

*Hybrid-Variante des Antriebs; **Herstellerangabe [49]

Gut dargestellt ist dabei die deutlich höhere Antriebsstrangeffizienz der batterieelektrischen Busse gegenüber den Verbrennern und der Brennstoffzellenbusse. Mit derselben Energiemenge kann der Elektrobus dementsprechend theoretisch 3,2-mal so weit fahren wie ein Dieselbus.

Da die Well-to-Wheel-Emissionen die erzeugte Emissionsmenge von der Energieerzeugung bis zur Fortbewegung des Fahrzeugs darstellen, fehlt im Rahmen der Debatte um Klimabilanzen die Berücksichtigung der Batterie- und Brennstoffzellenherstellung.

Im Kapitel zum Batterieelektrischen Antrieb wurden die spezifischen Emissionen zur Herstellung der Akkumulatoren für PKWs auf 60 bis 68 kg_{CO_{2e}}/kWh [36] festgelegt. Ein

⁵ Die Norm enthält für Biomethan keine Umrechnungsfaktoren. Im Leitfaden wird auf die EU-Richtlinie 2009/30/EC verwiesen, welche einen Emissionsfaktor von 0,6 kg CO_{2e}/kg angibt.

starker Trend in der Entwicklung lässt sich dabei feststellen, da der Emissionswert 2017 noch mit 150-200 kg_{CO_2e}/kWh angegeben wurde [58].

Der aktuelle spezifische Emissionswert entspricht bei einer beispielhaften Batteriekapazität von 300 kWh (Depotlader) und 125 kWh (Zwischenlader) einem Emissionsausstoß von 18.000 bzw. 7.500 kg_{CO_2e} pro Akkumulator.

Unter der vereinfachten Annahme, dass die Fahrzeugnutzungsdauer 12 Jahre beträgt und ein Batteriewechsel nach 6 Jahren [31] nötig ist, ergeben sich bei den angegebenen spezifischen Emissionen und einer jährlichen Fahrleistung von 60.000 km für den Depotlader umgerechnet:

$$EM_{Dep-Prod,WTT} = \frac{2 \cdot 18.000 \text{ } kg_{CO_2e}}{12 \cdot 60.000 \text{ } km} = 0,05 \frac{kg_{CO_2e}}{km} = 5 \frac{kg_{CO_2e}}{100 \text{ } km}$$

Und für den Zwischenlader:

$$EM_{Zwisch-Prod,WTT} = \frac{2 \cdot 7.500 \text{ } kg_{CO_2e}}{12 \cdot 60.000 \text{ } km} = 0,021 \frac{kg_{CO_2e}}{km} = 2,1 \frac{kg_{CO_2e}}{100 \text{ } km}$$

Die größere Batteriekapazität wirkt sich dementsprechend negativ auf die Klimabilanz aus.

Für die Brennstoffzelle ermittelt eine Studie [59] des Fraunhofer Instituts 2019 einen Emissionswert in der Brennstoffzellenherstellung von 30 kg_{CO_2e}/kW .

Bei einer beispielhaften Leistung von 200 kW entspricht dies einer Emissionsmenge von 6.000 kg_{CO_2e} . Zusätzlich kommt in Brennstoffzellenfahrzeugen eine kleine Batterie zum Einsatz. Hier wird eine Kapazität von 30 kWh angesetzt. Mit den oben angegebenen spezifischen Emissionen zur Herstellung von Akkumulatoren ergibt dies eine Emissionsmenge von 1.800 kg_{CO_2e} .

Die Mehremission aus Brennstoffzellen- und Batterieproduktion ergeben sich unter der Annahme, dass die Brennstoffzelle alle 4 Jahre gewechselt wird, der Fahrzeugnutzungsdauer von 12 Jahren und der jährlichen Fahrleistung von 60.000 km zu:

$$EM_{BZ-Prod,WTT} = \frac{3 \cdot 6.000 \text{ } kg_{CO_2e} + 2 \cdot 1.800 \text{ } kg_{CO_2e}}{12 \cdot 60.000 \text{ } km} = 0,03 \frac{kg_{CO_2e}}{km} = 3 \frac{kg_{CO_2e}}{100 \text{ } km}$$

In Abbildung 5-3 sind die ermittelten Werte aus Tabelle 5-3 inklusive der Produktionskosten der Akkumulatoren und der Brennstoffzelle grafisch dargestellt.

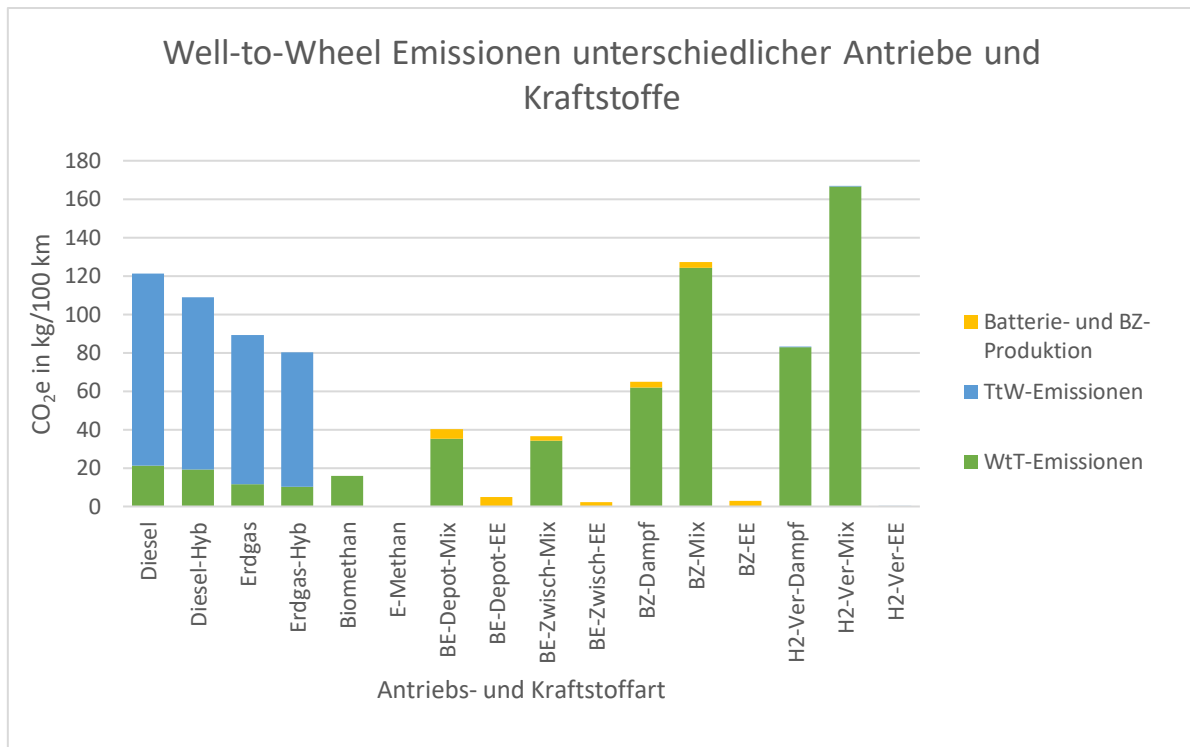


Abbildung 5-3: Eigene Darstellung der Well-to-Wheel-Emissionen unter den Bedingungen im Kreis

Abbildung 5-3 zeigt die Well-to-Wheel-Emissionen konventioneller Diesel- und Erdgasantriebe und mögliche alternative Antriebskonzepte im Betrachtungsrahmen dieser Arbeit. Daraus geht hervor, dass verschiedene alternative Antriebskonzepte sinnvolle Optionen zur Gestaltung eines emissionsneutralen bzw. emissionsfreien ÖPNV darstellen.

Gasbusse mit Biomethan als Kraftstoff stellen dabei eine Möglichkeit dar, den Emissionsausstoß um 86 % gegenüber dem konventionellen Dieselantrieb zu senken und durch das CO₂-Recycling einen nahezu klimaneutralen Betrieb zu ermöglichen.

Die Emissionsmenge der batterieelektrischen Busse ist stark abhängig von der Zusammensetzung des deutschen Strommix. Je größer der Anteil erneuerbarer Energien und je kleiner der Anteil an Strom aus Kohleverbrennung, desto besser ist die daraus resultierende Klimabilanz. Mit dem Emissionsfaktor des Strommix von 2020 ergeben sich gegenüber Diesel unter Berücksichtigung der Batterieproduktion eine Emissionseinsparung von 66 %. Durch den sinkenden Emissionsfaktor und der weniger emissionsintensiven Herstellung der Batterien im Vergleich zu den letzten Jahren konnten die gesamten Well-to-Wheel-Emissionen sukzessiv gesenkt werden.

Brennstoffzellenbusse sind in ihrer Emissionsbilanz stark abhängig von der Produktionsart des Wasserstoffs. In diesem Szenario erreicht der via Dampfreformierung hergestellte Wasserstoff eine CO₂e-Einsparung gegenüber Diesel von 46 %. Eine

Wasserstoffherzeugung mittels der Elektrolyse aus dem deutschen Strommix ist dagegen nicht zu empfehlen, da sogar eine Mehremission von 6 % entsteht.

Auch beim Wasserstoffverbrennungsmotor kommt es, bezogen auf die Emissionen, stark auf die Erzeugungsart des Wasserstoffs an. Ein Betrieb mit aus Dampfreformierung erzeugtem Wasserstoff ergibt eine Emissionseinsparung gegenüber Diesel von 30 % auf dem gleichen Niveau wie Erdgas-Hybrid-Busse. Auch hier kann keine Empfehlung für den Betrieb mit aus der Elektrolyse des Strommix erzeugten Wasserstoff gegeben werden, da diese Antriebsoption die schlechteste Emissionsbilanz im Szenario hat, mit Mehremissionen von 40,5 % gegenüber des Dieselantriebs.

Die Darstellung zeigt, dass „saubere Fahrzeuge“ nach der CVD, die „emissionsfrei“ mit einem Grenzwert von $1 \text{ g}_{\text{CO}_2\text{e}}/\text{km}$ bzw. $1 \text{ g}_{\text{CO}_2\text{e}}/\text{kWh}$ betrieben werden, bei Betrachtung der gesamten Wertschöpfungskette, nur bei der Energie- und Kraftstoffherzeugung aus erneuerbaren Quellen nahezu emissionsfrei sind und es ansonsten zu einer Emissionsverschiebung kommt. Bei Nutzung der Energie aus nicht erneuerbaren Quellen, dem deutschen Strommix oder Industrieprozessen, steht das nahezu emissionsneutrale Biomethan bilanziell deutlich besser da.

6 Anforderungsanalyse

Ziel dieser Arbeit ist die Konzeptionierung und Bewertung möglicher Antriebstechnologien für Busse im Regionalverkehr des Kreises mit dem Fokus auf Nachhaltigkeit und Energieeffizienz

Zur späteren Bewertung der Varianten erfolgt eine Analyse der Anforderungen. Dabei wurden Anforderungen der Flottenbetreiber, der Politik und des ÖPNV-Betriebes des Kreises analysiert.

6.1 Anforderung der Flottenbetreiber

Die Anforderungen der Flottenbetreiber gehen aus einem kurzen Schriftwechsel mit einem der Buslinienbetreiber im Kreis hervor.

So ist der größte Faktor bei der Anschaffung von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben die Finanzierbarkeit. Gerade für kleinere private Verkehrsunternehmen sind demnach die Mehrkosten gegenüber den konventionellen Bussen nicht zu stemmen.

Um der Nicht-Finanzierbarkeit entgegenzuwirken, sind deshalb

- gute Fördermöglichkeiten zur Beschaffung der Busse inklusive der notwendigen Infrastruktur und
- eine langfristige Kostenreduktion im Betrieb nötig.

6.2 Anforderungen aus der Analyse der vorhandenen Linien

Die Anforderungen der vorhandenen Linien ergeben sich aus einer Analyse der Regionalbuslinien im Kreis. In Kapitel 4 wurden einige Linien im Kreis bereits untersucht und dargestellt. Im Nachfolgenden erfolgt eine tiefere Analyse einzelner Linien. Die ausgewählten Linien in Tabelle 6-1 wurden zur Ermittlung der Umlauflängen ausgewählt, da die regelmäßige Wendezeit auf eine Linientreue hindeutet. Der tägliche Umlauf eines nicht-linientreuen Busses kann auf Grund der nicht zur Verfügung stehenden Daten zum Linienwechsel nur schwer nachvollzogen werden, weshalb diese nicht betrachtet werden.

Tabelle 6-1: Übersicht der analysierten wahrscheinlich linientreuen Regionalbuslinien inklusive ihrer Kennzahlen

Liniennummer	Start	Ziel	Anzahl Haltestellen	Entfernung in km	Dauer in Min.	Durchschnittliche Wendezeit in Min.	Anzahl Fahrten*	Takt in Min.
600	Schleswig	Kappeln	49	43,2	78	13	33	60
605	Schleswig	Süderbrarup	32	30,0	50	9	18	120
620	Kappeln	Satrup	27	28,2	52	8	15	120
640	Schleswig	Flensburg	38	34,3	53	5	29	60
650	Schleswig	Eggebek	32	25,1	56	5	16	120
800	Flensburg	Kappeln	37	47,4	67	3	46	30/60
810	Flensburg	Dollerup	22	22,5	42	17	16	60/120
860	Flensburg	Eggebek	31	26,4	50	10	39	60
880	Nordhackstedt	Handewitt	12	14,1	20	9	26	60

*Eine Fahrt entspricht hierbei einer Einzelfahrt von Start-Ziel bzw. Ziel-Start.

In Abbildung 6-1 wird die Anzahl der Fahrten pro Tag auf den jeweiligen Linien dargestellt. Daraus geht hervor, dass die Ober- und Mittelzentren verbindenden Linien zwischen Flensburg, Kappeln und Schleswig (Linie 600, 640 und 800) und zusätzlich die Verbindung von Flensburg zu den Unterzentren Tarp und Eggebek (Linie 860) die höchsten Fahrtenanzahl aufweisen.

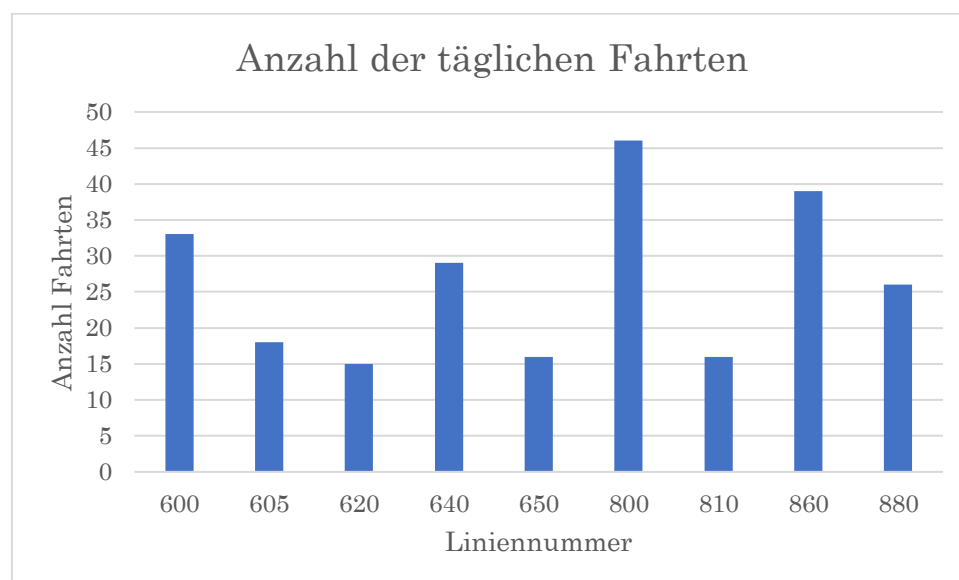


Abbildung 6-1: Anzahl der täglichen Fahrten auf den Linien des Kreises

Vergleicht man die Fahrtenanzahl zusätzlich mit der zurückgelegten Strecke der jeweiligen Linien, erhält man ein ähnliches Bild. Lediglich bei der Verbindung zwischen

Handewitt und Nordhackstedt (Linie 880) wird deutlich, dass die vielen Anzahl Fahrten einem sehr kurzen Umlauf (14,1 km) geschuldet ist.

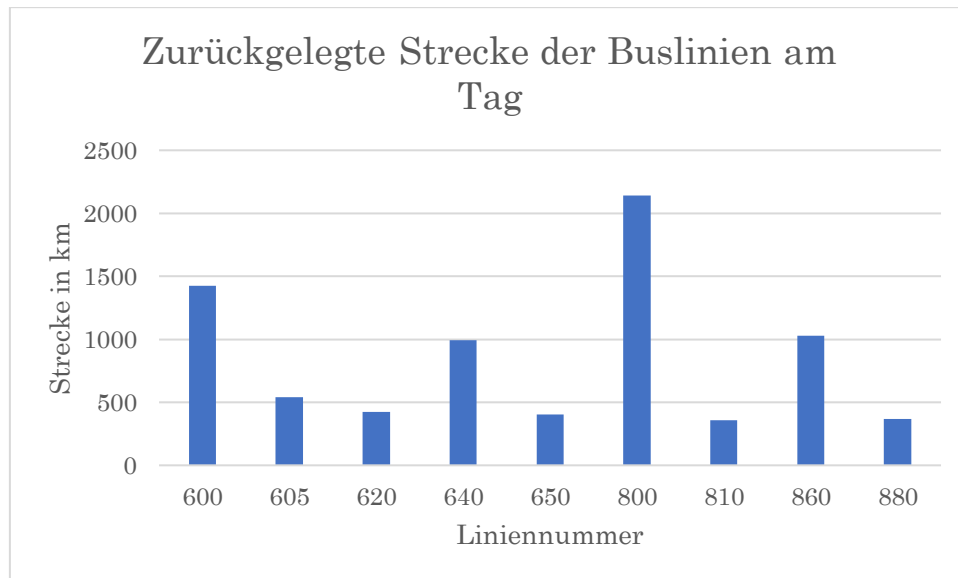


Abbildung 6-2: Summierte zurückgelegte Strecken auf den Linien des Kreises

Die theoretische Mindestanzahl eingesetzter Busse auf jeder Linie $A_{Bus,min}$ ergibt sich aus der Umlauf- und Wendezeit geteilt durch den allgemeinen Takt bzw. den Takt zu Stoßzeiten und kann durch folgende Gleichung dargestellt werden:

$$A_{Bus,min} = \frac{t_{Umlauf} + t_{Wende}}{Takt} \quad (19)$$

Darin ist:

t_{Umlauf}	benötigte Zeit für einen Linienumlauf (Hin- und Rückweg)
t_{Wende}	Wendezeit an Endhaltestellen
$Takt$	Takt der Linie

Wird die täglich zurückgelegte Strecke auf den jeweiligen Linien durch die Mindestanzahl Busse geteilt, ergibt sich die theoretische notwendige Reichweite der Busse S_{Umlauf} zur Bedienung der Linien:

$$S_{Umlauf} = \frac{s_{i,ges}}{A_{Busse,min}} \quad (20)$$

Darin ist:

$s_{i,ges}$	täglich zurückgelegte Strecke der Linie i
-------------	---

Diese Mindestzahl ist jedoch nur ein Anhaltswert, da zusätzlicher Schülerverkehr zum Takt und die vorausgesetzte „Linientreue“ die ermittelten Zahlen verfälschen können.

Tabelle 6-2: Mindestanzahl benötigter Busse pro Linie und die resultierende Umlauflänge

Linie	Min. Anzahl Busse	Strecke pro Bus in km
600	3	470
605	1	549
620	1	423
640	2	515
650	1	395
800	5	406
810	1	366
860	2	514
880	1	379

Durch Nachhaken beim Verkehrsunternehmen, konnte der ÖPNV Betrieb des Kreises eine dienstplan- und umlaufbedingte Reichweite von ca. 330 km im Regionalverkehr nennen. Eine Darstellung der Reichweiten ist in Abbildung 6-3 zu sehen.

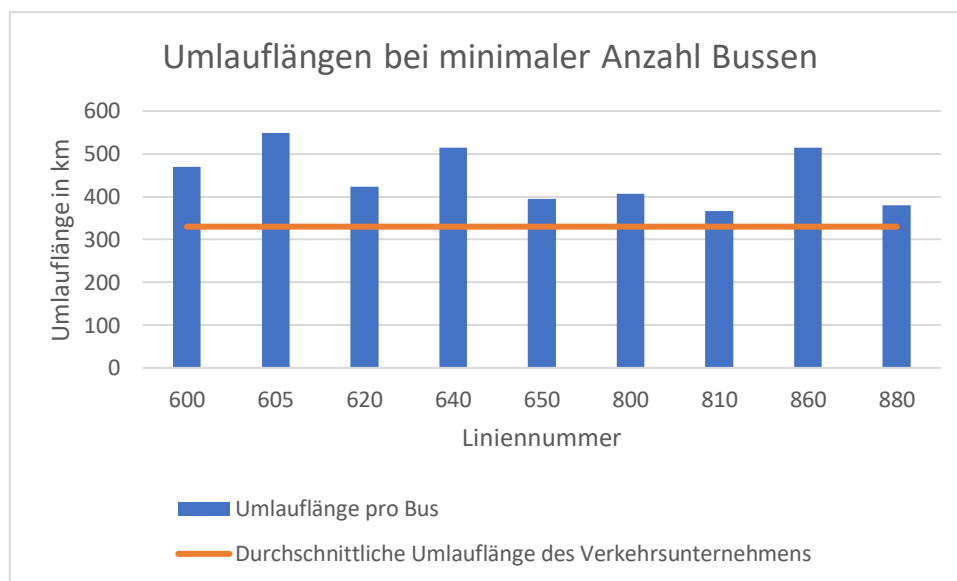


Abbildung 6-3: Umlauflängen der Busse auf den einzelnen Linien

Die zurückgelegten Kilometer pro Umlauf geben auf Grund der unterschiedlichen maximalen Reichweiten der Busantriebskonzepte Rückschlüsse auf die Anzahl einzusetzender Fahrzeuge. Eine reichweitenbedingte höhere Anzahl benötigter Busse wird sich dementsprechend in höheren Anschaffungskosten und einer höheren Anzahl an Leerfahrten zum Betriebshof widerspiegeln.

6.3 Anforderungen des ÖPNV Betriebes

Die Anforderungen des ÖPNV Betriebs des Kreises gehen aus einem geführten Interview mit Frau Carmen Esche hervor⁶.

Anforderungen vom Kreis sind im Kreisgebiet Ost und Süd in den Verkehrsverträgen mit dem Verkehrsunternehmen AUTOKRAFT festgehalten. Technische Anforderungen werden dabei nicht gestellt. Es sei die Entscheidung des Verkehrsunternehmens, welche Busse eingesetzt werden. In Sachen Nachhaltigkeit gilt lediglich die Vorgabe, dass Neufahrzeuge mindestens dem im Baujahr gültigen höchsten Umweltstandard entsprechen.

Weitere Anforderungen aus dem Verkehrsvertrag sind die Themen Barrierefreiheit und Ausstattung (z. B. Niederflurigkeit, Vollklimatisierung und USB-Steckdosen).

Zusätzlich wurde eine „Innovationsklausel“ in den Verkehrsvertrag integriert, welche die Möglichkeit eröffnet, die technischen Anforderungen der Ausstattung zu verschärfen und z. B. auf alternative Antriebe umzustellen. Dies müsse mit einer Vorlaufzeit und in einem umsetzbaren Rahmen geschehen und die Mehrkosten übernommen werden.

Probleme werden vor allem bei der Infrastruktur alternativer Antriebsarten (bezogen auf batterieelektrische und Wasserstofffahrzeuge) gesehen und die mögliche Zunahme von Leerkilometern, woraus weitere Kosten resultieren würden.

6.4 Anforderungen der Kreispolitik

Anforderungen für alternative Antriebe aus kreispolitischer Sicht gehen aus einem Interview mit dem Vorsitzenden des Infrastrukturausschusses, Herrn Thomas Jepsen, hervor⁷.

Anforderungen der Kreispolitik sind übereinstimmend mit den im Verkehrsvertrag genannten Anforderungen z. B. zur aktuellen Euro Abgasnorm. Zusätzlich wird im größeren politischen Rahmen auf das Saubere-Fahrzeuge-Beschaffungs-Gesetz zur Umsetzung der CVD verwiesen.

Fragen gäbe es neben der preislichen Gestaltung vor allem bei der Klimabilanz und der energetischen Betrachtung. Eine Analyse der tatsächlichen Emissionseinsparungen entlang der gesamten Wertschöpfungskette und die damit verbundene Energieeffizienz des Antriebskonzeptes sollte grundlegend von Bedeutung zum Einsatz alternativer Konzepte

⁶ Transkript des Interviews mit Herrn Thomas Jepsen im Anhang 2

⁷ Transkript des Interviews mit Frau Carmen Esche im Anhang 1

sein. Auch die Systemsicherheit und die Gewährleistung des Betriebes ist ein wichtiges Thema.

6.5 Anforderungen aus dem Nahverkehrsplan

Im „1. Regionalen Nahverkehrsplan des Planungszeitraums 1 für den Zeitraum 2017-2021“ [21], [22], der gemeinsam mit dem Kreis Nordfriesland und der Stadt Flensburg entworfen wurde, sind Anforderungen gelistet, die für bestehende und neuangeschaffte Busse gelten. Die gesamte Anforderungsliste ist im Sinne des Leseflusses in den Anhang verschoben. Die für die Antriebskonzeptionierung relevanten Anforderungen sind nachfolgend gelistet. Sie wurden bereits teilweise bei den Anforderungen des Kreises und der Kreispolitik genannt.

- Einhaltung des Geräuschgrenzwertes gemäß EU-Richtlinie EG/92/97/EWG
- Klimafreundliche alternative Antriebe werden im Rahmen der finanziellen Möglichkeit unterstützt
- Als Emissionsgrenzwert müssen Neufahrzeuge die im Beschaffungsjahr geltende Abgasnorm einhalten.
- Der Einsatz von modernen, technisch und optisch einwandfreien Fahrzeugen mit zusätzlichen Qualitätsmerkmalen (USB-Steckdosen, WLAN, Klimatisierung etc.) ist erwünscht.

Da der Nahverkehrsplan 2017 aufgesetzt wurde und dementsprechend bereits fünf Jahre alt ist, erfolgt derzeit eine Fortschreibung für den nächsten Zeitraum bis 2026. Ein erster Entwurf wurde dabei im Infrastrukturausschuss des Kreises am 16.11.2021 vorgestellt [60].

Zur Dekarbonisierungsstrategie für den ÖPNV erfolgt dabei ein Vorschlag zum Ersatz konventioneller Kraftstoffe durch Alternativen und eine schrittweise Reduktion der Emissionen durch [60]:

- eine bilanziell CO₂-neutrale Fahrzeugflotte bis 2030 und
- eine lokal CO₂-neutrale Fahrzeugflotte bis 2040.

Der Umsetzungspfad ist dabei nicht fest, sondern abhängig von möglichen Fördermitteln.

7 Konzeptentwicklung

Nach der Analyse der Anforderungen werden im nächsten Schritt Fahrzeugkonzepte erarbeitet, die den Anforderungen entsprechen. Die dazu verwendeten Werkzeuge sind dabei die Funktionsstruktur und der morphologische Kasten. Diese Kreativwerkzeuge geben eine gute Übersicht über Funktionen und können alle möglichen Lösungen im Lösungsraum darstellen.

7.1 Funktionsstruktur

Zur Darstellung des möglichen Lösungsraum und zur Herunterbrechung der Komplexität der Gesamtlösung wird die Gesamtfunktion zuerst in sinnvolle Teilfunktionen aufgeteilt und anschließend nach Lösungen für diese weniger komplexen Teilfunktionen gesucht [61].

Die zu lösende Gesamtfunktion „Regionalbus mit alternativem Antrieb“ lässt sich dabei in mehrere Teilfunktionen unterteilen. Für diese Arbeit von Relevanz ist nur die Teilfunktion „Fahrzeug fortbewegen“. Die Unterscheidung der verschiedenen Bustypen (z. B. Standard oder Gelenkbus), verschiedene Lösungen zur Barrierefreiheit etc. wurde in dieser Konzeptionierung bewusst nicht inkludiert, da der Fokus auf der Antriebsart liegt.

Es folgen weitere Unterteilungen, bis die Unterfunktionen eine überschaubare Komplexität erreicht haben, welche die Teillösungssuche erleichtert. Wichtig ist dabei jedoch auch die Allgemeinheit der Teilfunktionen, um den Lösungsraum nicht bereits im Voraus einzuschränken.

Die grafische Darstellung der Aufgliederung der Gesamtfunktion ist in einer Funktionsgliederung in Abbildung 7-1 nachfolgend dargestellt.

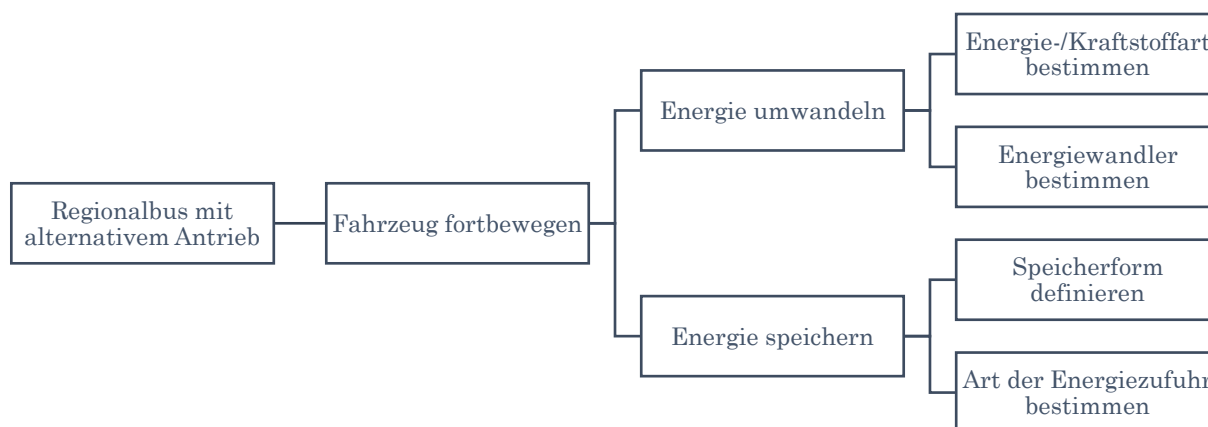


Abbildung 7-1: Funktionsgliederung der Regionalbus-Gesamtfunktion

7.2 Morphologischer Kasten

Als sinnvolles kreativ Werkzeug zur Konzepterarbeitung wird in dieser Arbeit auf den morphologischen Kasten zurückgegriffen. Er ermöglicht die Darstellung eines allgemeinen Lösungsraums, welcher alle denkbaren Lösungen abdecken kann [62].

Der Aufbau des morphologischen Kastens erfolgt nach einfachen Regeln [61], [62]:

- Die zuvor ermittelten Teilfunktionen werden auf der linken Seite dargestellt.
- Rechts daneben werden alle möglichen Lösungen für die jeweilige Teilfunktion notiert.
- Es folgt die Analyse der möglichen Lösungen und die Auswahl einer Teillösung aus jeder Zeile zu einem Lösungskonzept. Dieses wird graphisch mit Linien im morphologischen Kasten dargestellt.

In Tabelle 7-1 ist der morphologische Kasten inklusive der Lösungspfade dargestellt.

Tabelle 7-1: Lösungsraum als morphologischer Kasten

Teilfunktionen	Teillösungen						
1 Energie-/ Kraftstoffart bestimmen	Diesel (B7)	Wasserstoff	Elektrische Energie	Biomethan	E-Methan	Biodiesel	BtL-/PtL-Kraft- stoff
2 Energiewandler bestimmen	Verbrennungsmotor		Brennstoffzelle mit Elektromotor		Elektromotor		
3 Art der Energie- zufuhr festlegen	Betanken	elektrisch Über- nachladen im Depot	elektrisch unter- wegs laden an Haltestellen	elektrisch unter- wegs laden mit Oberleitung	elektrisch unter- wegs laden mit Schiene	elektrisch unter- wegs laden mit Solarzelle	Wechselbatterie an Stationen
4 Speicherform definieren	Kraftstofftank - flüssig		Kraftstofftank - gasförmig		Akkumulator		
5 Sekundärspei- cherform definieren	-		Kraftstofftank	Akkumulator	Kondensator		

7.3 Konzeptbeschreibung

Aus der Lösungsmatrix sind fünf verschiedene Lösungsvariante entstanden, die im Nachfolgenden beschrieben und anschließend bewertet werden.

Variante 0: Referenz Diesel-Hybrid-Bus

Variante 0 stellt einen Diesel-Mild-Hybrid-Bus dar. Dies soll als Referenzdesign gelten, da es die Anforderungen eines „sauberen“ Antriebs nach der CVD nicht einhält, jedoch in dieser Variante bereits im Kreis von der AUTOKRAFT eingesetzt wird und den anderen Varianten als Maßstab in der Bewertung dienen soll. Ausgestattet mit einem Dieselmotor, Tank und UltraCap-Kondensatoren zur Aufnahme und Nutzung der Bremsenergie inklusive Start-Stopp-Automatik stellt dies eine etwas effizientere und klimafreundlichere Option als der Standard-Dieselsbus dar mit einer Reichweite von über 600 km bei dem kreisspezifischen Energieverbrauch.

Variante 1: Biomethan/E-Methan Bus

Variante 1 ist ein mit Biomethan oder E-Methan betriebener Gasbus. Die Zusammenlegung zu einer Variante ist auf Grund der Ähnlichkeit der Kraftstoffe und das Nutzen des gleichen Bustyps sinnvoll. Das Methanbus-Konzept soll dabei den konventionellen Erdgasbus fast emissionsneutral ersetzen und so den Zielen des Kreises, bis 2030 emissionsneutral zu fahren, vorantreiben. Dabei kann gegebenenfalls auf vorhandene Gasbusse zurückgegriffen werden. Ausgerüstet mit Drucktanks, in denen das auf 250 bar verdichtete Methan gespeichert wird, können Reichweiten von über 500 km erreicht werden. Betankungen wären an der eigenen Tankstelle im Betriebshof oder an Drittanbieter Tankstellen möglich.

Variante 2: Batterieelektrischer Depotlader

Die zweite Variante stellt einen batterieelektrischen Bus mit großem Akkumulator zur Bewältigung des Umlaufes ohne notwendige Nachladung dar. Eine kürzere Zwischenladung an Endhaltestellen ist optional. Die Speicherkapazität wird dabei auf 400 kWh angesetzt. Die mögliche Reichweite wird zwischen 180 und 330 km, je nach Umgebungstemperatur und resultierender benötigter Heizenergie angesetzt. Eine Mehrbeschaffung an Bussen gegenüber dem Referenzkonzept ist auf Grund der durchschnittlichen Umlauflänge nötig. Die Nachladung wird vorrangig

im Betriebshof stattfinden. Dafür muss die Infrastruktur zur Ladung mehrerer Busse gleichzeitig gegeben sein.

Variante 3: Batterieelektrischer Zwischenlader

Die dritte Variante ist ein weiterer batterieelektrischer Bus mit einer mittelgroßen Speicherkapazität. Die Wendezeit an Endhaltestellen wird zur Zwischenladung der Energiespeicher genutzt und zusätzliche Ladestopps an Haltestellen an zentralen Orten sorgen für eine Reichweitenverlängerung. Eine Option ist die weitere Ladeinfrastruktur im Betriebshof. Eine entsprechende Fahrplananpassung zur Rücksichtnahme der Ladezeit ist nötig.

Variante 4: Brennstoffzellenbus

Die vierte Variante stellt der Brennstoffzellenbus inklusive Wasserstofftank und kleiner Batterie dar. Die Brennstoffzelle erzeugt aus dem Wasserstoff elektrische Energie, welche in die Batterie gespeist wird. Die Batterie wiederum versorgt damit den Antrieb und das Bordnetz. Die Tankinfrastruktur wird im Betriebshof errichtet und ggf. zusätzlich an Endhaltestellen bzw. zentralen Orten. Dabei sind durch den schnellen Tankvorgang nicht mehrere Tanksäulen notwendig. Bei einer Speichergröße von 40 kg bei 350 bar und einer Akkumulatorkapazität von 50 kWh sind Reichweiten von 350-500 km möglich, sodass der tägliche Umlauf mit einer Tankfüllung gewährleistet ist.

Variante 5: H₂-Verbrenner

Das Wasserstoffverbrennungsmotor-Buskonzept stellt die fünfte Variante dar. Ausgestattet mit Verbrennungsmotor und Wasserstofftank wird ein nahezu emissionsfreier Betrieb möglich. Der Verbrennungsmotor hat den Vorteil der Nutzbarkeit der Verbrennungsabwärme zur Beheizung des Fahrzeugs. Durch den im 40 kg Druckspeicher bei 350 bar gespeicherten Wasserstoff können Reichweiten von 300 bis 450 km erreicht werden, sodass auch bei diesem Konzept eine Tankfüllung am Tag ausreichend ist.

8 Konzeptbewertung

Zur Konzeptbewertung wird in dieser Arbeit die Methode der Nutzwertanalyse genutzt. Sie stellt dabei ein nützliches Werkzeug zur systematischen Entscheidungsvorbereitung dar. Der Entscheidungsprozess setzt dabei eine Reihe von Schritten voraus [63]:

Schritt 1: Bewertungskriterien festlegen

Es werden projektspezifische relevante Bewertungskriterien gesammelt. Diese gehen zum einen aus den geführten Interviews und der Anforderungsanalyse hervor und werden zusätzlich durch eine Literatursuche ergänzt.

Schritt 2: Gewichtung der Kriterien

In diesem Schritt werden die festgelegten Kriterien nach ihrer Wichtigkeit priorisiert. Da bei steigender Anzahl Kriterien auch die Komplexität der Gewichtung steigt, kommt die Methode des „paarweisen Vergleichs“ zum Einsatz, bei der die Kriterien paarweise miteinander verglichen werden („Kriterium 1 ist wichtiger/weniger wichtig als Kriterium 2“) und daraufhin mit 0 Punkten (weniger wichtig), 1 Punkt (gleichwichtig) oder 2 Punkten (wichtiger) bewertet werden. Dies geschieht in einer übersichtlichen Matrix, welche nach der Durchführung die ermittelte Gewichtung der Kriterien ausgibt. Diese Gewichtungsmatrix wurden zusätzlich von den Interviewten ausgefüllt und anschließend gemittelt, um eine möglichst objektive Gewichtung zu gewährleisten.

Schritt 3: Konzepte Bewerten

Es folgt die Nutzwertanalyse der alternativen Konzepte anhand der festgelegten Kriterien und der ermittelten Gewichtung. Dabei werden an die Konzepte nach jedem Kriterium Punkte vergeben, die dem Erreichungsgrad bzw. dem Abschneiden gegenüber des Diesel-Hybrid-Bus-Konzeptes gerecht wird. Das Konzept des Diesel-Hybrid-Busses wird aus diesem Grund in jeder Kategorie mit 3 Punkten bewertet. Schneidet ein alternatives Konzept besser ab, werden mehr Punkte (4-5) vergeben, schneidet es schlechter ab, weniger (1-2) und bei gleichwertigem Abschneiden erfolgt die Bewertung auch mit 3 Punkten. Der resultierende Nutzwert ergibt sich anschließend aus der Summe der Produkte aus Punktzahl und der Gewichtung und ist als Formel ausgedrückt:

$$\text{Nutzwert} = \sum(\text{Gewichtungsfaktor} \cdot \text{Erreichungsgrad}) \quad (21)$$

8.1 Festlegung der Kriterien

Ziel der Kriterienwahl ist die ganzheitliche Bewertung der alternativen Antriebstechnologien bezogen auf die herrschenden Bedingungen im Kreis. Zur besseren Übersichtlichkeit wurden die Bewertungskriterien in fünf Oberkategorien eingeteilt:

- Technologie
- Betrieb
- Nachhaltigkeit
- Wirtschaftlichkeit
- Sonstiges

Dies ermöglicht zusätzlich in der Auswertung auch die Darstellung von „Gewinnern und Verlierern“ der jeweiligen Kategorien und nicht nur für jedes Kriterium einzeln.

Die Bewertungskategorie Technologie umfasst systembezogene Kriterien wie die maximale Reichweite, Fahrzeugsicherheit, Marktreife des Antriebskonzeptes und die Lebensdauer der Komponenten. Darüber hinaus wird im Sinne der Effizienz auch der energetische Wirkungsgrad des Antriebskonzeptes bewertet.

Die Kategorie Betrieb stellt den größten Block mit Kriterien, welche für den ÖPNV Betrieb und vor allem für die Flottenbetreiber von Interesse ist. Im Betriebsablauf ist die außerplanmäßige Flexibilität der Streckenplanung und die Fahrzeug- und Ladeinfrastrukturverfügbarkeit wichtige Kriterien. Zusätzlich dazu wird der Einführungsaufwand der neuen Antriebstechnologie und eine notwendige erweiterte Mitarbeiterschulung und -ausbildung, bezogen auf die Fahrer und auch Werkstattpersonal, betrachtet.

Die dritte Kategorie umfasst die in dieser Arbeit fokussierte Nachhaltigkeit. Dabei wird die in der CVD, dem SaubFahrzeugBeschG und dem 2. Regionalen Nahverkehrsplan beschriebene lokale CO₂-Emissionsfreiheit bewertet, aber auch die globalen CO₂-Emissionen die z. B. bei der Kraftstoffherstellung entstehen. Auch der Ausstoß von Stickoxiden und Lärmemissionen werden in dieser Kategorie bewertet.

Die Kategorie Wirtschaftlichkeit enthält die ökonomischen Kriterien. Aus den Anforderungen des Flottenbetreibers gelten neben den Anschaffungskosten der Fahrzeuge vor allem die Betriebskosten als wichtigster Faktor zur Umstellung auf alternative Antriebe hervor. Zusätzlich wird der finanzielle Aufwand zur Errichtung der Infrastruktur bewertet.

Die Kategorie Sonstiges umfasst das Vorhandensein möglicher politischer Fördermöglichkeiten zur Umsetzung der Fahrzeugumrüstung und Infrastrukturaufbau in Form von

Kredit und Zuschüssen samt Einflussfaktoren, die in den nächsten Jahren die Antriebskonzeptwahl beeinflussen könnten. Zu nennen sind dabei steigende bzw. sanktionierte Kraftstoffpreise und der Ausbau der erneuerbaren Energien und einer Wasserstoffinfrastruktur. Darüber hinaus wird im Sinne der Imageförderung die Akzeptanz der Fahrgäste, Fahrer und Werkstattmitarbeitern gegenüber alternativen Antriebskonzepten bewertet.

Eine Übersicht der Bewertungskriterien ist in Tabelle 8-1 gegeben.

Tabelle 8-1: Übersicht der Bewertungskriterien

Technologie	Betrieb	Nachhaltigkeit	Wirtschaftlichkeit	Sonstiges
<ul style="list-style-type: none"> • Reichweite • Sicherheit • Lebensdauer • Marktreife • Energetischer Wirkungsgrad 	<ul style="list-style-type: none"> • Flexibilität der Streckenplanung • Fahrzeugverfügbarkeit • Verfügbarkeit der Ladeinfrastruktur • Notwendigkeit von Mitarbeiterschulung • Einführungsaufwand 	<ul style="list-style-type: none"> • CO₂ lokal • CO₂ global • Sonstige Schadstoffe • Lärm 	<ul style="list-style-type: none"> • Anschaffungskosten • Betriebskosten • Infrastrukturkosten 	<ul style="list-style-type: none"> • Politische Fördermöglichkeit • Politische Einflussfaktoren • Imageförderung

8.2 Gewichtung

Die Gewichtung der Kriterien wurde durch die Interviewpartner aus der Politik und dem ÖPNV Betrieb des Kreises durchgeführt. Dabei sollten die Interviewten die Gewichtung im Sinne der Politik bzw. im Sinne des ÖPNV Betriebes vornehmen. Eine zusätzliche eigene Gewichtung hatte unabhängig davon einen Fokus auf Nachhaltigkeit. Die drei Gewichtungen wurden anschließend gemittelt und nachfolgend in Tabelle 8-2 dargestellt⁸.

⁸ Die drei Gewichtungstabellen des „paarweisen Vergleichs“ sind aus Gründen der Lesbarkeit in den Anhang verschoben.

Tabelle 8-2: Gewichtungsverteilung

Kategorie	Kriterium	Gewichtung in %
Technologie		
	Reichweite	3,9
	Sicherheit	6,6
	Lebensdauer	1,9
	Marktreife	4,0
	Energetischer Wirkungsgrad	4,3
Betrieb		
	Flexibilität der Streckenplanung	6,6
	Fahrzeugverfügbarkeit	8,2
	Verfügbarkeit der Ladeinfrastruktur	6,1
	Notwendigkeit der Mitarbeiterschulung	1,7
	Einführungsaufwand	2,4
Nachhaltigkeit		
	Reduktion der lokalen CO ₂ -Emissionen	6,2
	Reduktion der globalen CO ₂ -Emissionen	5,7
	Reduktion sonstiger Schadstoffe	5,9
	Lärm Emissionen	4,1
Wirtschaftlichkeit		
	Anschaffungskosten	5,0
	Betriebskosten	6,7
	Infrastrukturkosten	5,1
Sonstiges		
	Politische Fördermöglichkeit	5,3
	Politische Einflussfaktoren	5,5
	Imageförderung	5,0

Aus der Gewichtung geht hervor, dass die Fahrzeugverfügbarkeit mit 8,2 % die größte Gewichtung und damit den größten Einfluss auf den Nutzwert hat. Die Betriebskosten (6,7 %), die Flexibilität der Streckenplanung und die Sicherheit (6,6 %) folgen.

Die höchste Durchschnittsgewichtung der Kategorien kann die Wirtschaftlichkeit mit 5,6 % vorweisen, gefolgt von der Nachhaltigkeit mit 5,5 %.

8.3 Bewertung

Die Bewertung erfolgt für jedes Kriterium individuell durch die Darstellung des Erreichungsgrades bzw. dem Abschneiden gegenüber des Diesel-Hybrid-Konzeptes. Nachfolgend in Tabelle 8-3 sind die daraus resultierende Punktzahl und der Gesamtnutzwert übersichtlich dargestellt. Die Bewertungsgrundlage ist auf Grund der Lesbarkeit in den Anhang verschoben.

Tabelle 8-3: Bewertete Nutzwertanalyse

Bewertung			Konzept 0: Diesel-Hybrid		Konzept 1: Methanbus		Konzept 2: Depotlader		Konzept 3: Zwischenlader		Konzept 4: BZ-Bus		Konzept 5: H ₂ -Verbrenner	
Nr.	Kriterien	Gewichtung	Punkte	Produkt	Punkte	Produkt	Punkte	Produkt	Punkte	Produkt	Punkte	Produkt	Punkte	Produkt
1	Technologie													
1.1	Reichweite	3,9%	3	0,12	3	0,12	1	0,04	3	0,12	3	0,12	3	0,12
1.2	Sicherheit	6,6%	3	0,20	3	0,20	3	0,20	3	0,20	3	0,20	3	0,20
1.3	Lebensdauer	1,9%	3	0,06	3	0,06	2	0,04	2	0,04	2	0,04	3	0,06
1.4	Marktreife	4,0%	3	0,12	3	0,12	3	0,12	3	0,12	3	0,12	2	0,08
1.5	Energetischer Wirkungsgrad	4,3%	3	0,13	2	0,09	5	0,22	5	0,22	2	0,09	2	0,09
2	Betrieb													
2.1	Flexibilität der Streckenplanung	6,6%	3	0,20	3	0,20	2	0,13	2	0,13	3	0,20	3	0,20
2.2	Verfügbarkeit der Fahrzeuge	8,2%	3	0,24	4	0,33	3	0,24	3	0,24	3	0,24	4	0,33
2.3	Verfügbarkeit der Ladeinfrastruktur	6,1%	3	0,18	2	0,12	2	0,12	2	0,12	2	0,12	2	0,12
2.4	Notwendigkeit der Mitarbeiterschulung	1,7%	3	0,05	3	0,05	2	0,03	2	0,03	2	0,03	2	0,03
2.5	Einführungsaufwand	2,4%	3	0,07	3	0,07	2	0,05	1	0,02	3	0,07	3	0,07
3	Nachhaltigkeit													
3.1	CO ₂ lokal	6,2%	3	0,19	5	0,31	5	0,31	5	0,31	5	0,31	5	0,31
3.2	CO ₂ global	5,7%	3	0,17	5	0,29	5	0,29	5	0,29	4	0,23	4	0,23
3.3	Sonstige Schadstoffe	5,9%	3	0,18	4	0,24	5	0,29	5	0,29	5	0,29	5	0,29
3.4	Lärm	4,1%	3	0,12	4	0,16	5	0,21	5	0,21	5	0,21	4	0,16
4	Wirtschaftlichkeit													
4.1	Anschaffungskosten	5,0%	3	0,15	4	0,20	1	0,05	1	0,05	1	0,05	1	0,05
4.2	Infrastrukturkosten	6,7%	3	0,20	2	0,13	1	0,07	1	0,07	2	0,13	2	0,13
4.3	Betriebskosten	5,1%	3	0,15	3	0,15	4	0,20	4	0,20	3	0,15	2	0,10
5	Sonstiges													
5.1	Fördermöglichkeiten	5,3%	3	0,16	4	0,21	4	0,21	4	0,21	4	0,21	3	0,16
5.2	politische Einflussfaktoren	5,5%	3	0,17	4	0,22	4	0,22	4	0,22	4	0,22	4	0,22
5.2	Imageförderung	5,0%	3	0,15	4	0,20	4	0,20	4	0,20	4	0,20	4	0,20
Summe / Nutzwert		1,00	60	3,00	68	3,46	63	3,24	64	3,29	63	3,23	61	3,15

8.4 Auswertung

Um neben der tabellarischen Form der Ergebnisse auch das Abschneiden der jeweiligen Kategorien visuell darzustellen, wird ein Netzdiagramm in Abbildung 8-1 genutzt. Das Diesel-Hybrid-Konzept (schwarz) gilt dabei als Richtwert durch die festgelegten 3 Punkte in jeder Kategorie. Liegen Konzepte außerhalb des Diesel-Hybrid-Konzeptes, ist von einem besseren Abschneiden in dieser Kategorie die Rede. Liegt ein alternatives Konzept innerhalb des Referenzkonzeptes, liegt ein schlechteres Abschneiden vor.

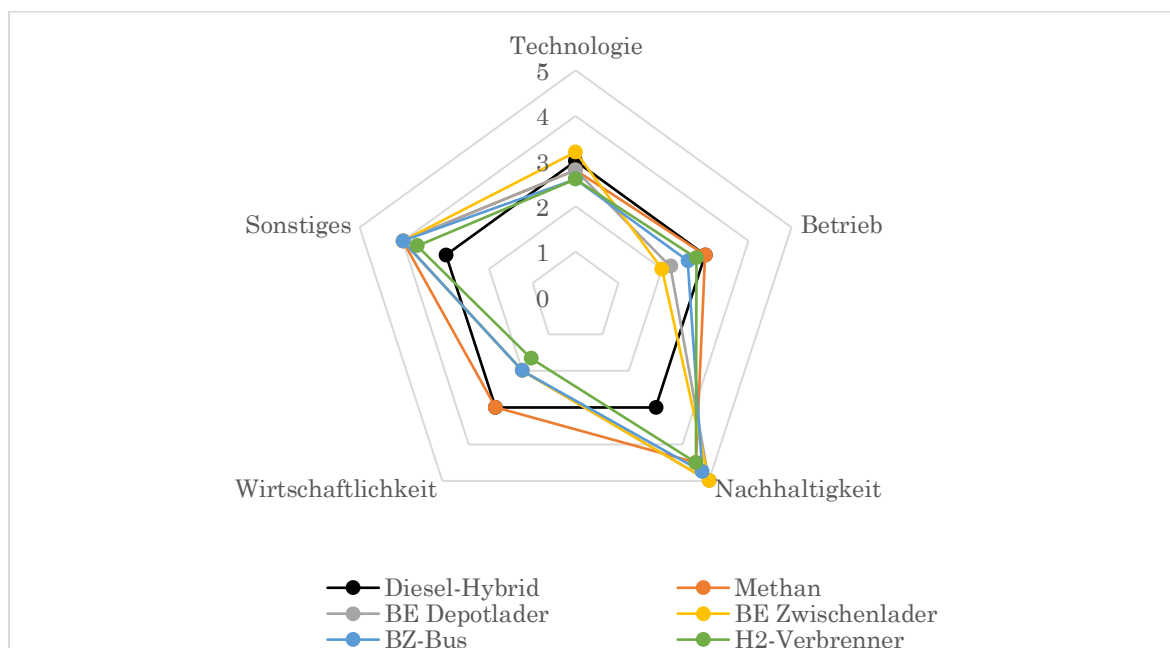


Abbildung 8-1: Bewertungsergebnisse im Netzdiagramm

Dabei ist ersichtlich, dass die alternativen Antriebskonzepte vor allem in der Kategorie Nachhaltigkeit und Sonstiges gegenüber dem Referenzkonzept punkten konnten. Klar zurück liegen sie in der Wirtschaftlichkeit. Lediglich Konzept 1 kann dort durch Nutzen der bewährten Gasbustechnik ökonomisch mit dem Referenzkonzept mithalten.

Sieger der Kategorie Technologie ist Konzept 3 des batterieelektrischen Zwischenladers. Die theoretisch unendliche Reichweite durch Nutzung der Zwischenladeinfrastruktur und der gute energetische Wirkungsgrad führen zu einem knapp besseren Ergebnis gegenüber des Referenzkonzeptes.

Die Kategorie zum Betrieb hat keinen klaren Gewinner, da das Referenzkonzept 0 und Konzept 1 gleich gut abschneiden. Ein schlechtes Ergebnis liefern die batterieelektrischen Konzepte 2 und 3, da die Flexibilität der Streckenplanung reichweitenbedingt eingeschränkt und der infrastrukturelle Mehraufwand bei der Einführung gegeben ist.

In der Kategorie Nachhaltigkeit erfolgt ein klarer Vorteil der alternativen Konzepte gegenüber des Referenzkonzeptes. Die in Kapitel 5.5 dargestellten gesamten CO₂-Emissionen liegen deutlich unter dem des Referenzkonzeptes, sofern der Wasserstoff aus Dampfreformierung oder erneuerbaren Energien gewonnen wird.

In der Kategorie Wirtschaftlichkeit sind für den Flottenbetreiber vor allem das Senken bzw. Optimieren der Betriebskosten von Bedeutung⁹. Dabei schneiden die wasserstoffbasierten Konzepte auf Grund des hohen Kraftstoffpreises derzeit am schlechtesten ab. Zusätzlich kommen zu den höchsten Betriebskosten auch die im Vergleich höchsten Anschaffungskosten pro Bus. Die Anschaffungskosten bei Konzept 1 sind hier hervorzuheben. Durch die Nutzung von Gasbussen im ÖPNV seit Jahren, steht dieses Konzept nicht nur preislich gegenüber den anderen Alternativen besser dar, sondern auch gegenüber des Referenzkonzeptes. Lediglich die infrastrukturellen Kosten sind auf Grund der teuren infrastrukturellen Umrüstung des Betriebshofs gegenüber den als gegeben angenommenen Infrastruktur des Referenzkonzeptes negativ zu bewerten.

Die Kategorie Sonstiges wirkt der Wirtschaftlichkeit bei den alternativen Konzepten entgegen. Derzeit sind eine Vielzahl an Fördermöglichkeiten zur Umrüstung und Anschaffung alternativer Buskonzepte und deren Infrastruktur vorhanden. Der Fokus liegt dabei jedoch vermehrt auf batterieelektrischen und Wasserstoffbrennstoffzellen Antrieben.

Die resultierenden Nutzwerte offenbaren, dass alle Alternativen besser abschneiden als das Referenzkonzept. Dies ist vor allem dem deutlich besseren Abschneiden in der Kategorie Nachhaltigkeit zu verdanken. Vergleichssieger mit dem größten Nutzwert ist Konzept 1, des Methanbusses. Der Vorteil des Konzeptes ist die Kombination von nachhaltigem emissionsneutralem Betrieb mit der bewährten Gasbustechnologie und ihren daraus resultierenden ökonomischen und betrieblichen Vorteilen gegenüber anderen Alternativen.

⁹ Vgl. Anforderungen der Flottenbetreiber, Kapitel 6.1

9 Machbarkeitsanalyse

Nach der Konzeptbewertung und Auswahl erfolgt anschließend eine Analyse der Umsetzbarkeit. Dabei erfolgt eine Marktrecherche zu Herstellern und Fahrzeugen, Umsetzungsbeispiele genannt, und die Biomethanproduktion des Kreises analysiert.

9.1 Marktrecherche

Die Marktrecherche ergibt eine Vielzahl an Herstellern, die Gasbusse für den deutschen Markt herstellen. Die Verwendung von Biomethan statt Erdgas als Kraftstoff wird dabei bei allen Herstellern explizit beworben.

Tabelle 9-1: Marktübersicht der Gasbusse in Deutschland

Marke	Modell	Kraftstoff	Leistung	Abgasnorm	Passagierzahl	Tankgröße	
IVECO	Urbanway 12 Cursor 8 CNG	CNG, Biomethan	213 kW (290 PS)	Euro VI	36 Sitzplätze	1.260 L	[64]
MAN	Lion's City 12 G	CNG, Biomethan	206 kW (280 PS)	Euro VI	35 Sitzplätze	1.875 L	[57]
SOLARIS	Urbino 12 CNG	CNG, Biomethan	235 kW	Euro VI	39 Sitzplätze	1.260 L	[65]
MERCEDES	Citaro NGT	CNG, Biomethan	222 kW	Euro VI	104 Steh- und Sitzplätze	908 L	[66]
SCANIA	Citywide	CNG, Biomethan	280 PS	Euro VI	100 Steh- und Sitzplätze	1.260 L	[67]
CM FLUIDS*	-	LNG	240 kW	Euro VI	-	500 L	[68]

*CM FLUIDS rüstet vorhandene Dieselflotten um mit eigenen Gasmotoren.

In Deutschland haben bereits eine ganze Reihe an Städten das Potenzial des Biomethans als Kraftstoff für die Nahverkehrsbusflotte für sich entdeckt und umgesetzt. Die Städte Augsburg und Oldenburg behaupten dabei beide „Deutschlands umweltfreundlichste Busflotte“ zu besitzen. Beide Städte setzen bereits seit Jahren auf die Gastechnik und haben ihren kompletten Fuhrpark (90 vorhanden (30 bestellt) in Augsburg und 112 vorhanden in Oldenburg) auf Biomethanbusse umgestellt. In Augsburg wird das Biomethan seit 2011 aus eigenem Biomüll, Baum- und Strauchschnitt hergestellt. In Oldenburg stammt das Methan aus landwirtschaftlichen Reststoffen der Ethanol-Großproduktion [69], [70].

Weitere Städte in Deutschland wie Gießen (12 Gasbusse [71]), Chemnitz (54 [72]), Werningerode (48 [73]) und Greifswald (12 [74]) nutzen Biomethan als Kraftstoff. Die Greifswalder Busse beziehen ihren Kraftstoff verbiogas dabei vom Unternehmen VERBIO, das sich auf die Produktion von alternativen Kraftstoffen ausschließlich aus Stroh, agrarischen Reststoffen und Abfallprodukten aus der Bioethanol-Produktion spezialisiert haben

Zur Überprüfung der technischen Umsetzbarkeit eines Busbetriebs auf Biomethanbasis wird nachfolgend beispielhaft die Biogasanlage in Osterby zur Berechnung genommen.

Diese produziert laut eigenen Angaben 12.000 m^3 Biomethan pro Tag [79]. Mit der Annahme, dass es sich dabei um Normkubikmeter handelt, lässt sich die täglich erzeugte Masse an Biomethan umrechnen:

$$\dot{m}_{Methan} = \dot{V}_{Methan} \cdot \rho_{Methan} \quad (21)$$

Darin ist:

\dot{m}_{Methan}	Massenstrom des Biomethans in kg/d
\dot{V}_{Methan}	Volumenstrom des Biomethans in Nm^3/d
ρ_{Methan}	Dichte des Biomethans in kg/Nm^3 (bei 0 °C und 1,013 bar)

Mit

$$\rho_{Methan} = 0,7175 \frac{kg}{Nm^3} \quad [80]$$

Ergibt sich der Massenstrom zu:

$$\dot{m}_{Methan} = 12.000 \frac{Nm^3}{d} \cdot 0,7175 \frac{kg}{Nm^3} = 8.610 \frac{kg}{d}$$

Das Biomethan aus Osterby wird derzeit von Privatanwendern, Gewerbetreibende und Wohnungsbauunternehmen genutzt und wird zusätzlich an Tankstellen Gasfahrzeugen zur Verfügung gestellt [79].

Bei der von der AUTOKRAFT angegebenen durchschnittlichen 330 km Fahrleistung der Busse im Regionalverkehr, ergeben sich für den täglichen Kraftstoffverbrauch pro Bus nach Kapitel 5.4:

$$B_{Gas} = B_{S,Gas} \cdot S_{Umlauf} = \frac{E_{S,Gas}}{H_{U,Methan}} \cdot S_{Umlauf} \quad (22)$$

Mit

$$H_{U,Methan} = 50 \text{ MJ/kg}$$

Ergibt sich:

$$B_{Gas} = \frac{1.325 \frac{MJ}{100 \text{ km}}}{50 \frac{MJ}{kg}} \cdot 330 \frac{km}{d} = 87,4 \frac{kg}{d}$$

$$A_{Bus} = \frac{\dot{m}_{Methan}}{B_{Gas}} = \frac{8610 \frac{kg}{d}}{87,4 \frac{kg}{d}} = 98,5$$

Die Biomethananlage in Osterby wäre dementsprechend in der Lage bei voller Verwertung und ohne Berücksichtigung von Verlusten durch Transport, Verdichtung, Leerkilometer und Methanslip 98 Gasbusse des Kreises im täglichen Umlauf zu versorgen.

Da dies selbstverständlich kein realistisches Szenario darstellt, wird im Folgenden von einer Nutzung von ca. 10 % des erzeugten Biomethans zur Betreibung einer kleinen Busflotte von 10 Fahrzeugen ausgegangen und eine Gegenüberstellung des Jahresverbrauchs und Jahresemissionen mit konventionellem Diesel und den im Kreis eingesetzten Diesel-Hybrid-Bussen vorgenommen.

Mit der Annahme, dass die Busse täglich die im Kreis durchschnittlichen 330 km unter gleichem Besetzungsgrad und jährlich 60.000 km zurücklegen, ergibt sich der jährliche Energieverbrauch der 10 Methanbusse $E_{Methan,Jahr,10b}$ zu:

$$E_{Methan,Jahr,10b} = 10 \cdot E_{S,Gas} \cdot 60.000 \frac{km}{a} = 10 \cdot 1.325 \frac{MJ}{100 km} \cdot 60.000 \frac{km}{a}$$

$$E_{Methan,Jahr,10b} = 7,95 \cdot 10^6 \frac{MJ}{a}$$

Umgerechnet in den jährlichen Kraftstoffverbrauch $B_{Methan,Jahr,10b}$:

$$B_{Methan,Jahr,10b} = \frac{E_{Methan,Jahr,10b}}{H_{U,Methan}} = \frac{7,95 \cdot 10^6 \frac{MJ}{a}}{50 \frac{MJ}{kg}} = 159 \cdot 10^3 \frac{kg}{a}$$

Der Verbrauch der Dieselbusse kann auf die gleiche Weise ermittelt werden:

Mit

$$H_{U,Diesel} = 35,7 \frac{MJ}{L}$$

$$RF = 0,1$$

Ergibt sich der tägliche Dieselverbrauch B_{Diesel} und jährliche Dieselverbrauch der 10 Busse $B_{Diesel,Jahr,10b}$ und der daraus resultierende Energieverbrauch $E_{Diesel,Jahr,10b}$ zu:

$$B_{Diesel} = B_{S,Diesel} \cdot s_{Umlauf} = 31,7 \frac{L}{100 km} \cdot 330 \frac{km}{d} = 105 \frac{L}{d}$$

$$B_{Diesel,Jahr,10b} = 10 \cdot B_{S,Diesel} \cdot 60.000 \frac{km}{a} = 10 \cdot 31,7 \frac{L}{100 km} \cdot 60.000 \frac{km}{a} = 190 \cdot 10^3 \frac{L}{a}$$

$$E_{\text{Diesel},\text{Jahr},10b} = B_{\text{Diesel},\text{Jahr},10b} \cdot H_{U,\text{Diesel}} = 190 \cdot 10^3 \frac{\text{L}}{\text{a}} \cdot 35,7 \frac{\text{MJ}}{\text{L}} = 6,79 \cdot 10^6 \frac{\text{MJ}}{\text{a}}$$

Für den Diesel-Mild-Hybrid wird weiterhin der Zusammenhang über den Rekuperationsfaktor RF hergestellt. So lassen sich der jährliche Kraftstoffverbrauch $B_{DHybrid}$ und Energieverbrauch $E_{DHybrid,\text{Jahr},10b}$ ermitteln:

$$B_{DHybrid} = B_{\text{Diesel}} \cdot (1 - RF) = 105 \frac{\text{L}}{\text{d}} \cdot (1 - 0,1) = 94,2 \frac{\text{L}}{\text{d}}$$

$$E_{DHybrid,\text{Jahr},10b} = E_{\text{Diesel},\text{Jahr},10b} \cdot (1 - RF) = 6,79 \cdot 10^6 \frac{\text{MJ}}{\text{a}} \cdot (1 - 0,1) = 6,11 \cdot 10^6 \frac{\text{MJ}}{\text{a}}$$

Zur Berechnung der jährlichen Well-to-Wheel-Emissionen wird wieder auf die Emissionsfaktoren aus der Norm EN 16258 [32] zurückgegriffen und die Faktoren aus Tabelle 5-2 in (18) verwendet.

$$EM_{\text{Methan},\text{WTW}} = 159 \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{a}} \cdot 0,6 \frac{\text{kgCO}_2\text{e}}{\text{kg}} = 95,4 \cdot 10^3 \frac{\text{kgCO}_2\text{e}}{\text{a}}$$

$$EM_{\text{Diesel},\text{WTW}} = 190 \cdot 10^3 \frac{\text{L}}{\text{a}} \cdot 3,15 \frac{\text{kgCO}_2\text{e}}{\text{L}} = 599 \cdot 10^3 \frac{\text{kgCO}_2\text{e}}{\text{a}}$$

$$EM_{DHybrid,\text{WTW}} = EM_{\text{Diesel},\text{WTW}} \cdot (1 - RF) = 599 \cdot 10^3 \frac{\text{kgCO}_2\text{e}}{\text{a}} \cdot (1 - 0,1)$$

$$EM_{DHybrid,\text{WTW}} = 539 \cdot 10^3 \frac{\text{kgCO}_2\text{e}}{\text{a}}$$

Tabelle 9-2: Übersicht über den jährlichen Kraftstoffverbrauch und die Well-to-Wheel-Emissionen von 10 Fahrzeugen der jeweiligen Antriebsart

	Jahresenergieverbrauch in 10^6 MJ/a	Well-to-Wheel-Emissionen in $10^3 \text{ kgCO}_2\text{e/a}$
Biomethanbus	7,95	95,4
Dieselbus	6,79	599
Diesel-Hybrid-Bus	6,11	539

Aus der Jahresbilanz der Antriebskonzepte wird der Vorteil des Biomethanbusses gegenüber der Dieselvarianten deutlich sichtbar. Durch die Verwendung von 10 Biomethanbussen statt 10 Busse der Dieselvarianten kann im Kreis 443,6 bis 503,6 t CO₂e-Emissionen eingespart werden. Dies entspricht einer prozentualen Einsparung von 82,3 bis 84,1 %. Energetisch kommt es dabei auf Grund des besseren Wirkungsgrads des Dieselmotors zu einem um 17,6 % erhöhten Fahrzeugenergieverbrauch.

9.3 Betriebskosten

Da gerade für kleinere Busgesellschaften zur Umsetzung der Einführung von alternativen Antrieben die Finanzierbarkeit und eine im Betrieb langfristige Kostenreduktion nötig ist¹⁰, wird abschließend anhand der vorherigen Ergebnisse eine einfache Überschlags-Kostenrechnung der jährlichen Betriebskosten erstellt. Dabei werden lediglich die Kosten für Kraftstoff, Wartung und der Instandhaltung betrachtet. Infrastruktur-, Personal- und Anschaffungskosten werden nicht beachtet.

Für die Berechnung wird der durchschnittliche Dieseldieselpreis 156,0 ct/L [81] aus November 2021 genommen. Studien im Kreis geben eine Vergünstigung für ein regionales Busunternehmen gegenüber des Tankstellenpreises von 10 ct an [2], sodass hier mit einem Wert von 146,0 ct/L gerechnet wird. Zusätzlich wird angenommen, dass der AdBlue-Bedarf 2 % des Dieselbedarfs entspricht [31] und beim Vergleich der Tankstellenpreise Kosten in Höhe von 80 ct/L anfallen. Für das Biomethan wird zur Festlegung des Preises ein derzeitiger durchschnittlicher Tankstellenwert genommen in Höhe von 111 ct/kg. Bei der realen Umsetzung im Kreis kann möglicherweise über feste zugesicherte Abnahmemengen zusätzlich der Preis gesenkt werden.

Bei den Kosten zur Instandhaltung und Wartung der Fahrzeuge wird für die Dieselfahrzeuge nach [4] einen Wert von 0,33 ct/km angenommen. Für den Methanbus wird nach [31] durch Herstellerangaben 5 % höhere Kosten gegenüber die Dieselvariante angenommen, sodass die Kosten 0,35 ct/km betragen.

Tabelle 9-3: Übersicht der Jahresbetriebskosten

Busvariante	Kraftstoffverbrauch in kg/100 km	Jahresfahrleistung in km/a	Kosten pro Bus in 10 ³ €/(a · Bus)		
			Kraftstoff	Instandhaltung	Gesamt
Diesel	26,5	60.000	27,8	19,8	46,6
Diesel-Hybrid	23,9	60.000	25,0	19,8	44,8
Biomethan	26,5	60.000	17,6	21,0	38,6

Tabelle 9-3 zeigt auf, dass das Biomethankonzept auch bei den Betriebskosten besser abschneidet und 13,8 % beziehungsweise 17,2 % Kosteneinsparungen gegenüber den Dieselskonzepten ermöglicht. Da die Wartungskosten ähnlich hoch sind, sind vor allem die Kosten für Kraftstoff entscheidend. Der Dieselpreis ist im Verlauf der letzten zwölf Monate um 47 % [81] angestiegen. Mit dem damaligen Preis von 105,6 ct/L (95,6 ct/L für Busunternehmen) sind für die Dieselskonzepte Kraftstoffkosten in Höhe von 18.200 und 16.400 € entstanden, wodurch sie auf ungefähr dem gleichen Niveau wie ein derzeitiger

¹⁰ Vergleich Anforderungen der Flottenbetreiber, Kapitel 6.1

Biomethanbus lagen. Grund für den Preisanstieg ist zum einen ein Versorgungsengpass auf Grund des Coronavirus und die Anfang des Jahres eingeführte CO₂-Bepreisung [82]. Perspektivisch wird unabhängig vom derzeitigen Preisanstieg davon ausgegangen, dass der Dieselpreis bis 2025 auf 150-155 ct/L ansteigt und anschließend moderat auf ca. 180 ct/L bis 2050 steigt [83]. Bezogen auf die Betriebskostenentwicklung und der Annahme, dass zukünftig die Verfügbarkeit des Biomethans als Kraftstoff weiter zunimmt, ergibt der Einsatz von Biomethanbussen im Kreis als nachhaltige Alternative Sinn.

10 Zusammenfassung und Fazit

Im Rahmen dieser Arbeit wurden alternative nachhaltige Antriebsarten für Regionalbusse technologieoffen auf ihre Nachhaltigkeit in Bezug auf Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen untersucht und ihren Nutzwert zum Einsatz im Kreis Schleswig-Flensburg ermittelt.

Dabei wurde zur Berechnung des Streckenverbrauchs der unterschiedlichen Antriebsarten Gleichungen abhängig von der Durchschnittsgeschwindigkeit des Umlaufes verwendet. Es zeigt sich, dass bei den alternativen Antriebskonzepten im Regionalverkehr des Kreises große Energieeinsparungen im Betrieb von bis zu 70 % (batterieelektrischer Antrieb) gegenüber des Standard-Dieselmotors möglich sind.

Weiterhin wurden die unterschiedlichen Antriebsarten auf ihre Treibhausgasemissionen mittels Well-to-Wheel-Analyse untersucht. Dabei wurden nicht nur die Emissionen betrachtet, die während des Betriebs anfallen, sondern auch die Vorkettenemissionen z. B. bei der Kraftstoffherstellung. Es zeigt sich, dass verschiedene alternative Antriebskonzepte die ausgestoßenen Emissionen gegenüber dem Dieselmotors stark senken können. Kann bei der Energieerzeugung vollständig auf erneuerbare Energien zurückgegriffen werden, kann der Emissionsausstoß der batterieelektrischen Busse, Brennstoffzellenbusse, Wasserstoffverbrenner und E-Methanbusse sogar auf nahezu null reduziert werden.

Solange dies nicht der Fall ist, und alternative Kraftstoffe auf konventioneller Energiebereitstellung beruhen, stellt der Biomethantrieb mit einer 84 % Reduzierung der Emissionen bereits heute eine technisch sinnvolle und bereits anderorts erprobte „Nahe-Null-Emissionen“-Alternative dar.

Im Sinne der Produktentwicklung wurden mögliche Antriebe und Kraftstoffarten in einem morphologischen Kasten dargestellt und Konzepte gebildet, welche in einer Nutzwertanalyse ganzheitlich, über die Nachhaltigkeitsaspekte hinaus, im Vergleich zum im Kreis eingesetzten Diesel-Hybrid-Bus bewertet wurden. Die Bewertungskriterien und die Gewichtung gingen dabei u. A. aus der Anforderungsanalyse und den Interviews hervor.

Den derzeit größten Nutzwert bietet dabei das Biomethantriebskonzept, da es neben der guten Ökobilanz auch als einzige Alternative im Betrieb dem Dieselmotors ebenbürtig ist in Bezug auf Flexibilität der Streckenplanung und Fahrzeugverfügbarkeit. Ein großer Vorteil gegenüber den anderen Alternativen ist auch die verhältnismäßig geringen Anschaffungskosten.

Eine anschließende Machbarkeitsanalyse untersuchte die Umsetzbarkeit im Kreis Schleswig-Flensburg. Durch die Vielzahl an Biogasanlagen im Kreis, wäre eine nachhaltige regionale Versorgung mit Biomethan vorstellbar, welche vor der Umsetzung jedoch geprüft werden sollte. Die in dieser Arbeit herangezogene Biomethananlage in Osterby wäre theoretisch im Stande, bei 100 % Nutzung für Mobilität, täglich 98 Busse im Regionalverkehr mit Biomethan zu versorgen. Zusätzlich führt die derzeitige Dieselpreisentwicklung zu einer Betriebskosteneinsparung von 17 %.

Durch den technischen Fokus dieser Arbeit empfiehlt es sich bei einer tatsächlichen Umsetzung genauere wirtschaftliche Untersuchungen voranzustellen. Ausschlaggebende Faktoren sind neben den Anschaffungskosten und den Betriebskosten vor allem Kosten für die notwendige Tankinfrastruktur in den Betriebshöfen. Dementgegen stehen mögliche Förderungen, welche im konkreten Fall zu prüfen sind.

Aufgrund der derzeitigen politischen Fokussierung auf batterieelektrische Antriebe und Wasserstoff-Brennstoffzellenantriebe als Antriebe der Zukunft gefördert durch die Clean Vehicle Directive, wird an dieser Stelle zusammenfassend für eine technologieoffene Denkweise geworben. Der Biomethanantrieb stellt derzeit im Regionalbereich das Antriebskonzept mit dem größten Nutzwert bezogen auf Alltagstauglichkeit, Kosteneffizienz und Klimaschutz dar – trotz Verbrennungsmotor. Das Antriebskonzept kann bereits heute einen relevanten Beitrag zur Senkung der Emissionen leisten und zukünftig durch die Nutzung von synthetischem E-Methan vollständig emissionsneutral werden. Ein technologieoffener Planungsprozess der regionalen Mobilität wird deshalb empfohlen.

Literaturverzeichnis

- [1] S. Breuer und A. Rohrbach-Kerl, *Fahrzeugdynamik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015.
- [2] D. Bohl, J. M. Isermann, M.-L. Wengler, und B.-O. Rehder, „Mobilitätskonzept für eine Wasserstoffwirtschaft“, Hochschule Flensburg, Flensburg, Projektarbeit, 2021.
- [3] K. Berthold, „Techno-ökonomische Auslegungsmethodik für die Elektrifizierung urbaner Busnetze“, Doktorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie Institut für Fahrzeugsystemtechnik, Karlsruhe, 2018. Zugegriffen: Nov. 12, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000097162>
- [4] A. W. Kunitz, *Elektrifizierung des urbanen öffentlichen Busverkehrs*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017.
- [5] International Association of Public Transport, „Standardised On-Road Test Cycles: SORT“. 2001. Zugegriffen: Nov. 28, 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://ec.europa.eu/environment/archives/clean_bus/slides/etienne_sort.pdf
- [6] R. Pütz, *Modell zur ökologischen und ökonomischen Analyse und strategischen Optimierung von Linienbusflotten*. Düsseldorf: Alba Fachverlag, 2010.
- [7] R. Pütz, *Einführung in die Linienbustechnik*. Düsseldorf: Alba Fachverlag, 2012.
- [8] *UN Regulation 107 Rev 7 - Uniform provisions concerning the approval of category M2 or M3 vehicles with regard to their general construction*. 2021. Zugegriffen: Okt. 30, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://unece.org/sites/default/files/2021-05/R107r7e.pdf>
- [9] Bundesverband deutscher Omnibusunternehmer e. V., „2021-137 CVD Sonderfragen zu Überlandbussen“, Juli 21, 2021. Zugegriffen: Nov. 14, 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.wbo.de/images/21Akt_V/210715_V_Anlage2_21_137_CVD_Sonderfragen_zu_Ueberlandbussen.pdf
- [10] „MAN Vergleich von Stadt und Überlandbussen“, *Willkommen im MAN Low Entry Fahrzeug der Zukunft*. https://www.man.eu/de/de/bus/ueberlandbusse/der-man-lion_s-intercity-le/man-lion_s-intercity-le.html (zugegriffen Okt. 30, 2021).
- [11] Europäisches Parlament und Rat, *RICHTLINIE 2001/85/EG über besondere Vorschriften für Fahrzeuge zur Personenbeförderung mit mehr als acht Sitzplätzen außer dem Fahrersitz und zur Änderung der Richtlinien 70/156/EWG und 97/27/EG*. 2001. Zugegriffen: Nov. 14, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:02001L0085-20070101>
- [12] „Bustool | Bustool“, *NOW GmbH*. <https://www.ebustool.de/> (zugegriffen Okt. 31, 2021).
- [13] „BMVI - Gesetz über die Beschaffung sauberer Straßenfahrzeuge“, *Bundesministerium für Digitales und Verkehr*. <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/clean-vehicles-directive.html> (zugegriffen Okt. 25, 2021).

- [14] Europäisches Parlament und Rat, *RICHTLINIE (EU) 2019/1161 zur Änderung der Richtlinie 2009/33/EG über die Förderung sauberer und energieeffizienter Straßenfahrzeuge*. 2019. Zugegriffen: Nov. 14, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019L1161&from=DE>
- [15] R. Pütz und P. Bronnenberg, „Alternative Antriebe für Linienbusse vor dem Hintergrund der Novelle der Clean Vehicles Directive der EU – eine ökologisch-ökonomische Gesamtbetrachtung“, *J. Für Mobil. Verk.*, Nr. 3, S. 29–39, Sep. 2019.
- [16] C. Esche, „Re: Präsentation RNVP Werk- und Infrastrukturausschuss“, Nov. 29, 2021.
- [17] „Regionalbusse im Kreis Schleswig-Flensburg“, *Mobilitätszentrale Region Flensburg*. <https://www.mobizentrale.de/bus/fahrplan/schleswig-flensburg/index.php> (zugegriffen Nov. 19, 2021).
- [18] „Nahverkehrsstruktur Bedienungsgebiete (Teilnetze)“, *Kreis Schleswig-Flensburg*. <https://www.schleswig-flensburg.de/Navigation-/Mobilit%C3%A4t/Nahverkehrsstruktur> (zugegriffen Dez. 09, 2021).
- [19] „Liniennetzplan Busse und Bahn im Kreis Schleswig-Flensburg“. Mobilitätszentrale Region Flensburg. Zugegriffen: Nov. 19, 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.mobizentrale.de/bus/fahrplan/schleswig-flensburg/PDF-2021_22/Liniennetz_VGSF_2021_Druck.pdf?m=1622720403&
- [20] T. Jepsen, „ÖPNV in Kreis SL-FL“, *TARP – kommunal und regional*, Aug. 04, 2021. <https://tarpkommunal.wordpress.com/2021/08/04/opnv-im-kreis-sl-fl/> (zugegriffen Nov. 19, 2021).
- [21] T. von Freeden *u. a.*, „1. Regionaler Nahverkehrsplan des Planungsraums 1 für den Zeitraum 2017-2021 – Regionalteil für den Kreis Schleswig-Flensburg“, IGES Institut GmbH, Schleswig, 2017. Zugegriffen: Dez. 09, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.schleswig-flensburg.de/output/download.php?fid=3333.1233.1.PDF>
- [22] T. von Freeden *u. a.*, „1. Regionaler Nahverkehrsplan des Planungsraums 1 für den Zeitraum 2017-2021 – Gemeinsamer Teil“, IGES Institut GmbH, Schleswig, 2017. Zugegriffen: Dez. 09, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.schleswig-flensburg.de/output/download.php?fid=3333.1232.1.PDF>
- [23] „Betriebsstart im Teilnetz Schleswig-Flensburg Ost am 1. Juli 2021“, *DB Regio Bus Nord*. <https://www.dbregiobus-nord.de/aktuell/aktuelles-presse/autokraft#teilnetzost> (zugegriffen Nov. 19, 2021).
- [24] „Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Bundesländern, Fahrzeugklassen und ausgewählten Merkmalen“. Kraftfahrt-Bundesamt, Aug. 2021. Zugegriffen: Nov. 14, 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Vierteljaehrlicher_Bestand/vierteljaehrlicher_bestand_node.html

- [25] TSB Transferstelle Bingen, „Machbarkeitsuntersuchung Alternative Antriebe im ÖPNV Ingelheim“, TSB, Ingelheim, 2017. Zugegriffen: Dez. 17, 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.ingelheim.de/fileadmin/Content/Leben___Soziales/Verkehr___Mobilitaet/Formulare_Downloads/Abschlussbericht_Ingelheim_OEPNV_2017_neu.pdf
- [26] „SHELL Nutzfahrzeug-Studie“, SHELL Deutschland, Hamburg, 2016. Zugegriffen: Dez. 06, 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.shell.de/promos/media/shell-goods-vehicle-study/_jcr_content.stream/1466682556570/006b9c62dcca41b86d0adafc3ee2ad4fa14ef4d3/shell-nutzfahrzeugstudie.pdf
- [27] „verbiodiesel“, *Verbio.de*. <https://www.verbio.de/produkte/verbiodiesel/> (zugegriffen Dez. 11, 2021).
- [28] H. Watter, *Regenerative Energiesysteme*, 5. Aufl., Bd. 5. Springer Vieweg, 2019.
- [29] S. Imhoff, „Analyse der zukünftigen Versorgungsstruktur von Powerfuels“, Hochschule Reutlingen, Reutlingen, 2020. Zugegriffen: Okt. 21, 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://energie-informatik.de/wp-content/uploads/2020/11/Analyse_der_zukuenftigen_Versorgungsstruktur_von_Powerfuels.pdf
- [30] „MAN-Efficienthybrid“, *MAN*. https://www.man.eu/de/de/bus/der-man-lion_s-city/man-efficienthybrid/man-efficienthybrid.html (zugegriffen Nov. 28, 2021).
- [31] M. Henneka, W. Köppel, K. Kröger, und D. Gerstein, „Bewertung von Gasbussen für den öffentlichen Personennahverkehr und Vergleich mit Alternativkonzepten“, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, Aug. 2019. Zugegriffen: Nov. 06, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/forschung/berichte/g201810-busstudie-abschlussbericht.pdf>
- [32] M. Schmied und M. Mottschall, „Berechnung des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen des ÖPNV Leitfadens zur Anwendung der europäischen Norm EN 16258“, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Berlin, 2014. Zugegriffen: Nov. 29, 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/energieverbrauch-treibhausgasemission-oepnv.pdf?__blob=publicationFile
- [33] M. Prosser, „China’s Electric Buses Save More Diesel Than All Electric Cars Combined“, *Singularityhub*, 2019. <https://singularityhub.com/2019/04/22/chinas-electric-buses-save-more-diesel-than-all-electric-cars-combined> (zugegriffen Okt. 14, 2021).
- [34] Fraunhofer ISE, „Öffentliche Nettostromerzeugung in Deutschland in Halbjahr 1 2021“, *Energy-Charts*. https://energy-charts.info/charts/energy_pie/chart.htm?l=de&c=DE&year=2021&interval=halfyear&halfyear=1 (zugegriffen Okt. 30, 2021).
- [35] P. Icha, T. Dr. Lauf, und G. Kuhs, *Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990-2020*. Umweltbundesamt, 2021. Zugegriffen: Nov. 21, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/entwicklung-der-spezifischen-kohlendioxid-7>

- [36] G. Bieker, „A global comparison of the lifecycle greenhouse gas emissions of combustion engine and electric passenger cars“, ICCT- International Council on Clean Transportation Europe, Berlin, 2021. Zugegriffen: Nov. 29, 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://theicct.org/sites/default/files/publications/Global-LCA-passenger-cars-jul2021_0.pdf
- [37] M. Schuster, I. Steinacher, und C. Link, „Marktübersicht Elektro- und Wasserstoffbusse“, Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, Wien, 2020. Zugegriffen: Dez. 09, 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.klimaaktiv.at/dam/jcr:a2e1f7f2-c7a3-42f0-81ba-7471e25cb074/KAM_2021_Marktuebersicht_Elektrobusse.pdf
- [38] „EBUSCO 3.0“, *EBUSCO*. <https://www.ebusco.com/de/elektrische-busse/ebusco-3-0/> (zugegriffen Dez. 09, 2021).
- [39] NOW-GmbH, „Projektübersicht 2019/2020 Zero Emission Busse in Deutschland“. 2020. Zugegriffen: Nov. 29, 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2020/09/now_broschuere_zero-emission-busse.pdf
- [40] VDV Verband Deutscher Verkehrsunternehmen, „Emissionsfreie Energie- und Antriebskonzepte für Stadtbusse zur Umsetzung der europäischen Clean Vehicles Directive“, VDV Verband Deutscher Verkehrsunternehmen, Köln, Feb. 2020. Zugegriffen: Okt. 31, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.vdv.de/emissionsfreie-energie-und-antriebskonzepte-fuer-stadtbusse.pdf>
- [41] BMVI, „Leitfaden für Busse mit alternativen Antrieben“, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Berlin, 2021.
- [42] S. Gräbener, „Methodische Entwicklung und Bewertung von Elektrifizierungskonzepten für innerstädtische Nutzfahrzeuge“, Doktorarbeit, Technische Universität Berlin, Berlin, 2017. Zugegriffen: Okt. 21, 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://depositonce.tu-berlin.de/bitstream/11303/6573/4/gruebener_sven.pdf
- [43] B. Shadidi, G. Najafi, und T. Yusaf, „A Review of Hydrogen as a Fuel in Internal Combustion Engines“, *Energies*, Bd. 14, Nr. 19, S. 6209, Sep. 2021.
- [44] „Wasserstoff DIHK-Faktenpapier“. Deutscher Industrie- und Handelskammertag e. V. (DIHK), Juni 2020. Zugegriffen: Nov. 21, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dihk.de/resource/blob/24872/fd2c89df9484cf912199041a9587a3d6/dihk-faktenpapier-wasserstoff-data.pdf>
- [45] N. Gosch, N. Lammers, M. Roßberg, K. Schumacher, J. Widera, und J. Wolfrat, „Machbarkeitsstudie zu einer Power-to-Gas Umsetzung für einen Windpark“, Hochschule Flensburg, Flensburg, Projektarbeit, Aug. 2020.
- [46] M. Schrank, V. Langer, und B. Jacobsen, „Wasserstoff-Verbrennungsmotor als alternativer Antrieb“, NOW-GmbH Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, Berlin, März 2021. Zugegriffen: Nov. 21, 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2021/10/NOW_Meta-studie_Wasserstoff-Verbrennungsmotor.pdf

- [47] NOW GmbH, „Einführung von Wasserstoffbussen im ÖPNV – Fahrzeuge, Infrastruktur und betriebliche Aspekte“, Berlin, 2018. Zugegriffen: Nov. 04, 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.starterset-elektromobilität.de/content/1-Bausteine/5-OEPNV/now_leitfaden_einfuehrung-wasserstoffbusse.pdf
- [48] Bundesamt für Energie BFE, „Abschätzung des Einsatz- und CO₂- Reduktionspotenzials durch Busse mit nicht fossilen Antriebstechnologien und Fördermöglichkeiten Grundlagenstudie“, Zürich/Bern, Studie, Okt. 2020. Zugegriffen: Dez. 17, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/10414>
- [49] KEYOU, „The Most Effective Technology to Comply with CO₂-Legislation: The New Generation of Hydrogen Internal Combustion Engines“. Sep. 2020. Zugegriffen: Dez. 11, 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.kfz.tu-berlin.de/fileadmin/fg40/media/lehre/19-11-21_KEYOU_H2-Engine-Today_TU-Berlin_AS.pdf
- [50] M. Bauermeister, E. Claus, T. Diebel, F. Laurent, N. Nakkash, und J. Nolte, „Alternative Antriebe im öffentlichen Verkehr“, KCW, Wien, Studie, Apr. 2021. Zugegriffen: Dez. 17, 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.vor.at/fileadmin/CONTENT/Downloads/Aktuelles/Low_Carb_Mobility-Studie_alternative_Antriebe.pdf
- [51] R. van Basshuysen, Hrsg., *Erdgas und erneuerbares Methan für den Fahrzeugantrieb: Wege zur klimaneutralen Mobilität*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015.
- [52] C. Bassano, P. Deiana, L. Lietti, und C. G. Visconti, „P2G movable modular plant operation on synthetic methane production from CO₂ and hydrogen from renewables sources“, *Fuel*, Bd. 253, S. 1071–1079, Okt. 2019.
- [53] M. Esteban und L. M. Romeo, „Techno-Economics Optimization of H₂ and CO₂ Compression for Renewable Energy Storage and Power-to-Gas Applications“, *Appl. Sci.*, Bd. 11, Nr. 22, S. 10741, Nov. 2021.
- [54] „bioCO₂nvert“, *Technische Hochschule Ostwestfalen-Lippe*. <https://www.th-owl.de/ilt-nrw/projekte/bioco2nvert/> (zugegriffen Nov. 23, 2021).
- [55] „Power-to-Gas: Projekt Hyaunais bei Auxerre (F)“, *Storengy*. <https://www.storengy.de/sites/default/files/mediateque/pdf/2019-09/Hyaunais.pdf> (zugegriffen Nov. 23, 2021).
- [56] „BioPower2Gas“, *PowertoGas.info*. <https://www.powertogas.info/projektkarte/biopower2gas/> (zugegriffen Nov. 23, 2021).
- [57] „MAN Lion’s City G“, *MAN Deutschland*. https://www.man.eu/de/de/bus/der-man-lion_s-city/gasantrieb/man-lion_s-city-g.html (zugegriffen Dez. 11, 2021).
- [58] M. Romare und L. Dahllöf, „The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries A Study with Focus on Current Technology and Batteries for light-duty vehicles“, Swedish Environmental Research Institute, Stockholm, 2017. Zugegriffen: Nov. 30, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ivl.se/download/18.694ca0617a1de98f473b98/1628417788414/FULL-TEXT01.pdf>

- [59] A. Sternberg, C. Hank, und C. Hebling, „Treibhausgas-Emissionen für Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge mit Reichweiten über 300 km“, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg, Juli 2019. Zugegriffen: Nov. 30, 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/news/2019/ISE_Ergebnisse_Studie_Treibhausgasemissionen.pdf
- [60] C. Gipp und J. Hardt, „2. Gemeinsamer Regionaler Nahverkehrsplan im Planungsraum I 2022-2026“, IGES Institut GmbH, Schleswig, Entwurf, Nov. 2021. Zugegriffen: Nov. 27, 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://kreisinfo.schleswig-flensburg.de/sdnetrim/UGhVM0hpd2NXNFdFcExjZVO-sYgY3GzMF0iJle8Si5y5mtFxe2ThWgqsV9w19bDdy/Praesentation_RNVP.pdf
- [61] VDI, „VDI-Richtlinie 2222 Konstruktionsmethodik Konzipieren technischer Produkte“, 1977.
- [62] M. Kröll, „Methode zur Technologiebewertung für eine ergebnisorientierte Produktentwicklung“, Jost-Jetter-Verl, Heimsheim, 2007. Zugegriffen: Dez. 17, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://d-nb.info/99497096x/34>
- [63] R. Felkai und A. Beiderwieden, *Projektmanagement für technische Projekte*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015.
- [64] IVECO, „Datenblatt URBANWAY 12 m Cursor 8 CNG“. Zugegriffen: Jan. 03, 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.iveco.com/ivecobus/de-de/neufahrzeuge/Documents/datenblaetter/urbanway/np/urbanway-12-c8-cng.pdf>
- [65] Solarisbus, „Urbino CNG“. <https://www.solarisbus.com/de/fahrzeuge/low-emissions/urbino-cng> (zugegriffen Jan. 03, 2022).
- [66] Mercedes-Benz-Bus, „Der Citaro NGT“. 2017. Zugegriffen: Jan. 03, 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.mercedes-benz-bus.com/content/dam/mbo/markets/common/buy/services-online/download-technical-brochures/images/content/regular-service-buses/citaro-ngt/MB-NGT-2-DE-09_17.pdf
- [67] Scania, „Scania Citywide“. <https://www.scania.com/group/en/home/products-and-services/buses-and-coaches/urban/scania-citywide-le.html> (zugegriffen Jan. 03, 2022).
- [68] CM Fluids, „We like to move! Wirtschaftlich – effizient – regional – klimaneutral“. 2020. Zugegriffen: Jan. 03, 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.cm-fluids.de/wp-content/uploads/2020/07/CMF-20-008_Broschu%CC%88re_Daten_Bus.pdf
- [69] „Deutschlands umweltfreundlichste Busflotte“, *Verkehr und Wasser GmbH*. <https://www.vwg.de/Unternehmen-Ueber-die-VWG.html> (zugegriffen Dez. 10, 2021).
- [70] „Augsburg bestellt über 30 CNG-Busse!“, *gibgas*, März 08, 2021. <https://www.gibgas.de/Aktuelles/Kurzmeldungen/Augsburg-bestellt-%C3%BCber-30-CNG-Busse?id=242> (zugegriffen Dez. 10, 2021).

- [71] „MIT.BUS modernisiert ihre Flotte“, *SWG Stadtwerke Gießen*. <https://www.swg-konzern.de/presse/detail/news/mit-bus-modernisiert-ihre-flotte> (zugegriffen Dez. 10, 2021).
- [72] „Sachsen fördert Kauf von 30 Niederflurbussen mit Biomethan-Antrieb“. <https://www.blick.de/chemnitz/sachsen-foerdert-kauf-von-30-niederflurbussen-mit-biomethan-antrieb-artikel11813540> (zugegriffen Dez. 10, 2021).
- [73] S. Wernigerode, „Stadtwerke Wernigerode weihen weitere Erdgastankstation ein“, *Stadt Wernigerode*, Juni 15, 2021. <https://www.wernigerode.de/Wirtschaft-Stadtentwicklung/Stadtwerke-Wernigerode-weihen-weitere-Erdgastankstation-ein.php?FID=3098.18315.1&La=1&ModID=7&NavID=3098.62&object=tx%2C3098.5.1> (zugegriffen Dez. 10, 2021).
- [74] M. Jacobson, „CNG-Hybrid-Bus für Greifswald“, *Behörden Spiegel*, Dez. 07, 2021. <https://www.behoerden-spiegel.de/2021/12/07/cng-hybrid-bus-fuer-greifswald/> (zugegriffen Dez. 10, 2021).
- [75] „verbiogas“, *Verbio.de*. <https://www.verbio.de/produkte/verbiogas/> (zugegriffen Dez. 10, 2021).
- [76] „CNG-Busse hoch im Kurs“, *CNG-Mobility*. <https://www.cng-mobility.ch/beitrag/cng-busse-hoch-im-kurs/> (zugegriffen Dez. 10, 2021).
- [77] „70 CNG-Busse für Warschau“, *CNG-Mobility*. <https://www.cng-mobility.ch/beitrag/305-cng-busse-fuer-warschau/> (zugegriffen Dez. 10, 2021).
- [78] „Übersicht der Biogasanlagen im Kreis“, *Google Maps*. <https://www.google.de/maps/place/Biogas+Tram-sen+KG/@54.6736075,9.5738775,11z/data=!4m9!1m2!2m1!1sBiogas!3m5!1s0x47b33fbfeaed2cd1:0x66a59ab42b9d1040!8m2!3d54.77461!4d9.68187!15sCgZCaW9nYXOSAQRmYXJt> (zugegriffen Dez. 10, 2021).
- [79] „Biogas Warum?“, *Osterby Unternehmensgruppe*. <https://www.osterbygruppe.de/regenerativ-nachhaltig/biogas/> (zugegriffen Dez. 10, 2021).
- [80] GESTIS-Stoffdatenbank, „Methan“, *IFA Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung*. https://gestis-api.dguv.de/api/print/de/010000?excluded_chapters=&id=e0f9eaff7fd2eb39da9dc04c42dba6670167da1695813c32029af0e7f871715d (zugegriffen Dez. 13, 2021).
- [81] „Spritpreise Entwicklung: Benzin- und Dieselpreise seit 1950“, *ADAC*, Nov. 02, 2021. <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/deutschland/kraftstoff-preisentwicklung/> (zugegriffen Dez. 13, 2021).
- [82] „CO₂-Steuer – was Autofahrer dazu wissen müssen“, *ADAC*, Mai 21, 2021. <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/auto-kaufen-verkaufen/kfz-steuer/co2-steuer/> (zugegriffen Dez. 15, 2021).

- [83] M. Wietschel *u. a.*, „Klimabilanz, Kosten und Potenziale verschiedener Kraftstoffarten und Antriebssysteme für PKW und LKW“, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe, Sep. 2019. Zugegriffen: Dez. 15, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2019/klimabilanz-kosten-potenziale-antriebe-pkw-lkw.pdf>
- [84] W. Fichtner, R. McKenna, und D. Balussou, „Vergleichende Untersuchung an großtechnischen Biogasreaktoren – mikrobiologische, verfahrenstechnische, ökologische und ökonomische Bewertung und Optimierung: OPTGAS“, KIT Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, 2012. Zugegriffen: Dez. 07, 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.energetische-biomassenutzung.de/fileadmin/Steckbriefe/dokumente/03KB018F_Endbericht_KIT.pdf
- [85] M. Gis, „Comparative studies exhaust emissions of the Euro VI buses with diesel engine and spark-ignition engine CNG fuelled in real traffic conditions“, *MATEC Web Conf.*, Bd. 118, S. 00007, 2017.
- [86] M. Emschermann, „DENA Workshop Erdgas im ÖPNV“, VWG, Berlin, Feb. 2017. Zugegriffen: Dez. 06, 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Veranstaltungen/Vortraege_OEPNV/6_Emschermann.pdf
- [87] F. Reichenbach *u. a.*, „Emissionsfreier ÖPNV auf Basis der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie – Regionale Konzeptentwicklung zur Vorbereitung des Aufbaus einer Infrastruktur“, ISC, Konstanz, 2019. Zugegriffen: Okt. 21, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://pudi.lubw.de/detailseite/-/publication/10143>
- [88] KfW Bankengruppe, „Investitionskredit Nachhaltige Mobilität – Individualvariante“, *Förderdatenbank*. <https://www.foerderdatenbank.de/FDB/Content/DE/Foerderprogramm/Bund/KfW/investkredit-nachhaltige-mobilitaet-individual.html> (zugegriffen Dez. 07, 2021).
- [89] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), „Alternative Antriebe von Bussen im Personenverkehr“, *Förderdatenbank*. <https://www.foerderdatenbank.de/FDB/Content/DE/Foerderprogramm/Bund/BMVI/alternative-antriebe-busse-personenverkehr.html> (zugegriffen Dez. 07, 2021).
- [90] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU), „Anschaffung von Elektrobussen im öffentlichen Personennahverkehr“, *Förderdatenbank*. <https://www.foerderdatenbank.de/FDB/Content/DE/Foerderprogramm/Bund/BMU/anschaffung-von-elektrobussen-im-oePNV.html>
- [91] Wirtschaftsförderung und Technologietransfer Schleswig-Holstein GmbH, „Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge“, *Förderdatenbank*. <https://www.foerderdatenbank.de/FDB/Content/DE/Foerderprogramm/Land/Schleswig-Holstein/ladeinfrastruktur-elektrofahrzeuge.html> (zugegriffen Dez. 07, 2021).
- [92] M. König, „Erfahrungen mit Elektrobussen im ländlichen Raum“, Bad Langensalza, 2020. Zugegriffen: Dez. 07, 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://umwelt.thueringen.de/fileadmin/001_TMUEN/Aktuelles/Topthemen/Online-Konferenz_Nachhaltige_Mobilitaet/009_2020-12-07_PP_Salza-Tours_Koenig.pdf

- [93] „Umsteuern erforderlich: Klimaschutz im Verkehrssektor“, Sachverständigenrat für Umweltfragen, Berlin, Sondergutachten, Nov. 2017. Zugegriffen: Dez. 07, 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/02_Sondergutachten/2016_2020/2017_11_SG_Klimaschutz_im_Verkehrssektor.pdf
- [94] AVL, „Systemvergleich zwischen Wasserstoffverbrennungsmotor und Brennstoffzelle im Schweren Nutzfahrzeug“, e-mobil BW GmbH – Landesagentur für neue Mobilitätslösungen und Automotive Baden-Württemberg, Stuttgart, 2021. Zugegriffen: Dez. 07, 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publikationen/Studien/e-mobilBW-Studie_H2-Systemvergleich.pdf
- [95] M. Zeller, R. Luise, M. Sikka, N. Hartmann, H. Kim, und T. Soylu, „Wasserstoffmobilität im ÖPNV der Stadt Offenburg und Umgebung – Konzeptentwicklung, technoökonomische Analyse und gesellschaftliche Akzeptanz ‚H2Bus‘“, Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg, Karlsruhe, 2019. Zugegriffen: Dez. 07, 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://pudi.lubw.de/detailseite/-/publication/10141-Wasserstoffmobilit%C3%A4t_im_%C3%96PNV_der_Stadt_Offenburg_und_Umgebung_-_Konzeptentwicklung__techno%C3%B6konomisch.pdf

Anhang

Anhang 1 Interview mit Herrn Thomas Jepsen

Interviewpartner: Thomas Jepsen

Partner-Hintergrund: Vorsitzender des Werk- und Infrastrukturausschusses des Kreises Schleswig-Flensburg (CDU)

Datum: Montag, den 15.11.2021

Ort: Per Telefon

Länge: 21:57 Minuten

Einverständnis zur Veröffentlichung und Namensnennung vorliegend

MR: Ich steige mal direkt ein: Mitte des Jahres wurden ja im Osten des Kreises neue Buslinien von der Autokraft eingeführt, diese Hybridbusse. Wie steht die Kreispolitik der Umrüstung des Busverkehrs auf nachhaltige Antriebe generell gegenüber?

TJ: Positiv, sehr positiv. Das ist auch ein Ziel, das wir anstreben. Um den ÖPNV insgesamt attraktiv zu machen, gibt es verschiedene Möglichkeiten. Wir haben zum 1. Schritt das Angebot deutlich erweitert. Ungefähr ca. 40 % mehr Verkehrsleistung, also Fahrplankilometer im Jahr im gesamten Kreisgebiet erbracht, so dass auf mehr Linien/Strecken und mehr Haltepunkte angefahren werden auch zu längeren Bedienzeiten und öfter.

Weitere Möglichkeiten ist eine preisliche Gestaltung den ÖPNV billiger zu machen für die Bürger.

Und dritte ist neben der Quantität und der preislichen Gestaltung auch die Qualität. Und dazu zählt im weiteren Sinne auch die alternativen Antriebe, zur Dekarbonisierung beispielsweise. Und das ist natürlich auch ein erklärtes Ziel, aber im ersten Step wurde sich im Wesentlichen auf die Angebotsausweitung konzentriert.

MR: Okay. Wo sehen Sie Probleme bei der Umsetzung bei der Einführung von Bussen mit emissionsneutralen Antrieben? Zum Beispiel ist das eine Kostenfrage oder...

TJ: Es sind verschiedenste Sachen. Zum einen ist es eine Klimabetrachtung, eine energetische Betrachtung. Wo wird wirklich CO₂ eingespart? Es hängt ja auch davon ab beispielsweise, wenn Batteriebusse gefahren werden, welcher Strom wird eingekauft, ist es wirklich grüner Strom? Und zum anderen auch die Fahrzeugproduktion, Batterien müssen hergestellt, gekauft und angeschafft werden. Wo ist da die gesamte Energieeffizienz? Das ist ein Thema, das relativ schwer zu urteilen ist. Klar wenn es reiner grüner Strom ist, ist die Fahrweise logisch, dann gibt es da keine Diskussion. Die gesamte Energieeffizienz ist noch ein Fragezeichen, kein Problem, sondern ein Fragezeichen. Dazu kommt noch die preisliche Gestaltung. Wir haben jetzt ein Zuschussbedarf im ÖPNV, ich meine bei 7,5 Mio. € pro Jahr aktuell für 2022...

MR: Steht das in diesem...

TJ: Ja, Das steht in der aktuellen Vorlage drin, wir haben Ausschusssitzung. Das steht im Wirtschaftsplan drin. Genau 7,5 Mio. € ist der Zuschussbedarf, ich gucke aber noch eben in etwas anderes hinein. Letztes Jahr 12,5 Mio. € jetzt 14,8 Mio. €. Hängt im Wesentlichen damit zusammen, dass wir im Teilnetz Ost das volle Betriebsjahr haben, die Angebotsausweitung im Teilnetz Ost. Das Teilnetz Ost ist ungefähr von der Betriebsleistung genauso groß wie Teilnetz West und Teilnetz Süd zusammen. Und da ist jetzt das volle Jahr einzuplanen. Und wir kommen von ungefähr 9 Mio. € bevor wir die 40 % Verkehrsausweitung hatten. Insofern ist der Zuschussbedarf der öffentlichen Hand auch ein großes Thema. Das hängt dann mit Preisgestaltung zusammen, wie hoch sind die Betriebserlöse. Da kriegen wir nun Gott sei Dank Corona-Hilfen, um die Ausfälle zu kompensieren. Es geht um eine Busausweitung aber natürlich auch um Antriebsformeln und Zusatzkosten.

MR: Ja, also geht der Förderbeitrag an die Verkehrsunternehmen, damit sie diese Linien betreiben, obwohl es jetzt nicht das Verkehrsaufkommen ist aber die Linien dennoch angeboten werden.

TJ: Genau, die Fahrgelderlöse, die durch die Fahrgeldeinnahmen erzielt werden, bekommt der Kreis als Aufgabenträger. Im Teilnetz West nicht, da haben wir eine Genehmigung und keinen Verkehrsvertrag. Aber ansonsten überall auch bei den kreisverkehrsübergreifenden Linien nach Nordfriesland, Rendsburg, Eckernförde. Da hat der Aufgabenträger, die öffentliche Hand, die Verkehrseinnahmen und mit Verkehrsverträgen werden die Verkehrsunternehmen eben entschädigt dafür, dass die Busse fahren, vereinfacht dargestellt. Das sind insgesamt 14,8 Mio. €, darin enthalten 300.000 flexible Bedienformen. Also ein Rufbussystem Hürup und ein Smartcity-Projekt in Süderbrarup. Man kann jetzt nicht alles auf den reinen Linienverkehr abzielen.

MR: Hat der Kreis/die Politik bei der Auswahl neuer Busse ein Mitspracherecht, oder ist das in der Hand der Busunternehmen?

TJ: Es gibt kein Mitspracherecht es gibt ein Vertragsrecht, an das sich die Busunternehmen halten müssen. In dem Verkehrsvertrag ist geregelt, wie die Euronorm z. B. sein muss. Bei Neuanschaffungen muss die neuste Euronorm erfüllt sein. Darüber hinaus gibt es aber keine weiteren Verpflichtungen. Es gilt inzwischen die europäische „Clean Vehicle“-Richtlinie, die besagt, dass jedes zweite Fahrzeug klimaneutral fahren muss. Lesen Sie das besser nochmal nach. Die gilt jetzt vertraglich rechtlich jetzt nicht für den Kreis Schleswig-Flensburg, weil wir Verkehrsverträge haben, die in der Regel eine Laufzeit von 10 Jahren haben. Und der Verkehrsvertrag für das letzte Teilnetz ist ja im August letzten Jahres an den Start gegangen. Aber wenn neue Fahrzeuge angeschafft werden, dann ist ja das Verkehrsunternehmen dazu verpflichtet jedes zweite Fahrzeug klimaneutral zu fahren. Das ist eine große Herausforderung. Jetzt haben die Busunternehmen schon ihre Busse angeschafft und haben nicht den Druck neue Fahrzeuge anzuschaffen. Aber es gibt eben eine vertragliche Vereinbarung, dass jeweils immer die neueste Euronorm angeschafft werden muss und die gesetzliche Regelung mit Neuanschaffungen. Wir können im Vertrag eine Anpassungsklausel nutzen und Busse nachbestellen. Wenn auf Wunsch des Aufgabenträgers, der Kreis Schleswig-Flensburg, wir möchten gerne einen Bus mit Antrieb XY haben, dann können wir das fordern, müssen jedoch auch die Mehrkosten tragen. Das ist möglich. Es gibt auch Gespräche, kennen Sie das indikative Angebot der Autokraft für batteriebetriebene Busse in Schleswig? Die mit Bundesmitteln gefördert werden? Und trotz der Förderung sind die Anschaffungs- und Betriebskosten noch höher als im Vergleich zu einem neuen Dieselfahrzeug mit neuester Euronorm. Und trotz der Bundesförderung besteht eben noch ein weiterer Zuschussbedarf, den müsste der Kreis dann finanzieren. Das ist jedoch nur ein indikatives Angebot im Moment.

Um auch nochmal auf die zweite Frage zurückzukommen, es gibt Klärungsbedarf hinsichtlich einer Systemsicherheit, das eben auch der Betrieb gewährleistet ist. Es nützt ja auch nicht, wenn ein Fahrzeug mit alternativem Antrieb eingesetzt wird, dann aber durch betriebliche Störung nicht fahren kann. Beispiel Wasserstoff, gibt es schon ein funktionierendes Tankstellensystem? Gibt es funktionierende Busse? Ich weiß, es gibt Hersteller in Belgien und Einsatzbereiche in Bonn und Aachen. Aber auch die Werkstattkapazität muss vorausgesetzt werden, da es ja nicht nur bei der Technik bleibt, und die Werkstatt aufrüsten. Da besteht sicherlich noch ein Klärungsbedarf, unabhängig vom Wasserstoff, gilt auch für Batterie, Biogas und E-Fuels.

MR: Eine Frage zur Anforderungsliste für meine Konzepte. Welche technischen Anforderungen stellen Sie an Busse mit nachhaltigem Antrieb zum Einsatz im Regionalverkehr des Kreises? Z. B. Reichweite, Ausstattung, Niederflrigkeit, Barrierefreiheit etc.

TJ: Die Anforderungen habe ich nicht genau im Kopf, die kann ich Ihnen jedoch raussuchen. Die sind im Verkehrsvertrag genormt. Da stehen Vorgaben zur Barrierefreiheit z. B. drin. Es wird unterschieden zwischen den wichtigen Linien, zwischen den Hauptlinien auf Netzebenen 0, 1 und 2. 0 ist Stadtverkehr, 1 sind die großen Linien Flensburg Kappeln, Flensburg Schleswig, Flensburg Niebüll, Flensburg Husum. Dann gibt es Netzebene 2, wo im zweistunden-Takt gefahren wird und Netzebene 3, das ist der Schülerverkehr, wo theoretisch morgens einmal der Bus zur Schule fährt und nachmittags die Kinder wieder nach Hause gefahren werden. Da haben wir andere Anforderungen. Beispielsweise an Ausstattung.

Die Anforderungen kann ich Ihnen gerne zukommen lassen, was grundsätzlich vertraglich gefordert ist.

MR: Ja gerne.

MR: Vielen Dank für Ihre Zeit!

TJ: Gerne.

Anhang 2 Interview mit Frau Carmen Esche

Interviewpartner: Carmen Esche

Partner-Hintergrund: ÖPNV-Betrieb des Kreises Schleswig-Flensburg

Datum: Montag, den 15.11.2021

Ort: Schleswig, ÖPNV Betrieb

Länge: 9 Minuten

Einverständnis zur Veröffentlichung und Namensnennung vorliegend

MR: Okay, vielen Dank, dass Sie sich für mich Zeit nehmen.

CE: Sehr gerne.

MR: Zum Einstieg die Frage, Mitte des Jahres wurden ja im Osten des Kreises neue Buslinien der Autokraft mit Dieselhybrid-Antrieb eingeweiht. Wie steht der Kreis dem Umrüsten des Regionalverkehrs auf nachhaltige Antriebe generell gegenüber?

CE: Absolut positiv. Also wir unterstützen das und haben in den Verkehrsverträgen auch eine sogenannte Innovationsklausel, die besagt, dass wir das Verkehrsunternehmen, in dem Fall die Autokraft, auch beauftragen können, das ganze natürlich mit einer gewissen Vorlaufzeit, auf alternative Antriebe umzustellen in einem gewissen Rahmen. Das ist seitens des Kreises absolut unterstützenswert, aber natürlich gibt es auch die Gesetzeslage und die Klimapolitik vor. Also von allen Seiten ist die Richtung klar.

MR: Wo sehen Sie Probleme bei der Umsetzbarkeit bei der Einführung emissionsneutraler Busse?

CE: Ich würde sagen allen voran die Infrastruktur. Unweit von hier befindet sich der Betriebshof und es ist dort nicht die Infrastruktur vorhanden für Elektrofahrzeuge. Also man spricht von sogenannten Depotladern, die im Betriebshof geladen würden. Es gibt auch die Möglichkeit an Endhaltestellen zu laden, aber auch da ist die Infrastruktur nicht vorhanden.

Das nächste (Problem) ist bei Wasserstoffbussen. Wir haben in Flensburg und Niebüll Wasserstofftankstellen, aber hier in der Gegend keine. Das hieße ja, es werden sehr viele Leerkilometer (gefahren), die natürlich Kosten produzieren, um das Fahrzeug wieder zu betanken. Das Hauptproblem sehe ich wirklich in der nicht vorhandenen Infrastruktur.

MR: Ja okay. Die nächste (Frage) hatten Sie in der ersten Frage schon ein wenig beantwortet: Hat der Kreis bei der Auswahl neuer Busse Mitspracherecht oder entscheidet das Busunternehmen für sich, was für Busse genutzt werden?

CE: Ich sage mal bei der Wahl des Herstellers ist das Unternehmen auf jeden Fall frei, aber der Verkehrsvertrag enthält eine Anlage, die gewisse Anforderungen an die Fahrzeuge vorgibt. Das geht los hier in Schleswig im Stadtverkehr durchgängige Niederflrigkeit. Im Überlandbereich auch der Einsatz von Low-Entry Fahrzeugen möglich. Klimatisierung, podestfreie Plätze, Klapprampe für mobilitätseingeschränkte Personen. Also es gibt Anforderungen an die Fahrzeuge, die eben erfüllt werden müssen.

MR: Anforderungen ist ein gutes Stichwort. Welche technischen Anforderungen stellen sie an Busse mit nachhaltigem Antrieb zum Einsatz im Regionalverkehr? z. B. Reichweite, Kosten etc.

CE: Ja das sind alles wichtige Dinge. Man weiß ja heute schon, dass im Stadtverkehr die Reichweite geringer sein kann, Das ergibt sich betriebsbedingt, wohingegen die Fahrzeuge im Regionalverkehr eine höhere Reichweite brauchen, damit die Sache effizient ist. Aber ich sage mal, das ist auch Sache des Verkehrsunternehmens das umzusetzen. Von Seiten des Kreises gibt es nur die Anforderungen mit der Barrierefreiheit, bzw. möglichst bis zur Tür 2 Barrierefreiheit, weil natürlich auch die Haltestellen dazu passen müssen. In punkto welche Fahrzeuge genau und welche Reichweite ist eine betriebliche Sache und somit Sache des Verkehrsunternehmens, denn wir als Kreis geben den Fahrplan vor und das Verkehrsunternehmen wandelt diesen Fahrplan in einen Dienstplan um. Das regelt das Verkehrsunternehmen und wir haben keine Aktien darin.

- MR: Ich hatte auch kurz Kontakt mit der VSF, weil ich nachgefragt hatte, ob es möglich wäre, Verbrauchsdaten und Umlaufpläne etc. zu bekommen, da man dann natürlich sinnvoller mit rechnen kann. Jedoch hatten sie mir direkt anschließend abgesagt, da alternative Antriebe sich finanziell nicht lohnen für das Unternehmen, und deshalb nicht in Frage kommen. Gibt es da Förderungen vom Kreis selbst?
- CE: Vom Kreis nicht direkt. Man muss wissen, die VSF betreibt das Netz West hier im Kreis, und das ist eigenwirtschaftlich, also wie der Name sagt, die VSF finanziert sich hauptsächlich durch Fahrgeldeinnahmen wohingegen die Netze Ost und Süd, die von der Autokraft betrieben werden mit einem Bruttoverkehrsvertrag gestaltet sind, das bedeutet, die Autokraft gibt uns die Fahrgeldeinnahmen, bekommt aber eine Vergütung pro Kilometer, das war eine europaweite Ausschreibung. Es gibt aber jetzt ganz aktuell Fördertöpfe für Fahrzeuge und auch für Infrastruktur, also vom Bund und vom Verkehrsministerium werden 80 % der Fahrzeug-Mehrkosten ggü. Dieselbus gefördert und 40 % der Infrastruktur. Da würde ich jedem Verkehrsunternehmen empfehlen, sich um die Förderung zu bemühen. Das ist die beste Möglichkeit. Von Seiten des Kreises gibt es keine Fördertöpfe.
- MR: Okay, und eigentlich auch schon die letzte Frage, sind Sie der Meinung, dass der Einsatz von emissionsfreien Bussen also Batterie- und Brennstoffzellen-Bussen gegenüber Hybrid- und Gasbussen zusätzlich akzeptanz- und imagesteigernd sein können?
- CE: Wenn die Fahrzeuge zuverlässig sind mit Sicherheit. Ob es die Leute zum Umstieg bewegt, weiß man nicht. Die junge Generation Stichwort „Fridays for future“ kann man nur hoffen. Was Anklang gefunden hat ist, dass wir im Teilnetz Ost jetzt überall USB-Steckdosen und durchgehend WLAN haben. Das wurde positiv bemerkt und genutzt. Ich denke, weil Klimapolitik in aller Munde ist, könnte es positiv registriert werden. Die ÖPNV Nutzung hängt allem voran auch vom Kostenfaktor ab. Für jemanden, der beruflich das Auto braucht, um zu pendeln, wird immer gucken, was günstiger ist. Kosten und Zuverlässigkeit sind unabhängig von alternativen Antrieben sehr sehr wichtig im ÖPNV.
- MR: Alles klar, vielen Dank für das Gespräch.
- CE: Gerne.

Anhang 3 Anforderungen aus dem Regionalen Nahverkehrsplan 2017-2021

Tabelle A-1: Anforderung an Neubeschaffung aus dem Regionalen-Nahverkehrsplan 2017-2021

Anforderungen	Quantifizierung und Beschreibung
Zustand der Busse	Technisch und optisch einwandfreier Zustand
Zugang	Barrierefrei, vorzugsweise Niederflerbus, in jedem Fall gemäß UN R107 bzw. 2001/85/EG genügend
Zugang	Fahrzeuge >10m sollen doppelbreite Türen haben
Stellflächen und Stauraum	Stellfläche für Kinderwagen, Rollstühle, Rollatoren und Gepäck
Alter der Fahrzeugflotte	Durchschnittsalter der Fahrzeuge <=8 Jahre Maximales Fahrzeugalter <=15
Emissionsgrenzwert für Neufahrzeuge	Neufahrzeug muss die im Beschaffungsjahr geltende Abgasnorm unterstützen
Nachhaltigkeit	Klimafreundliche alternative Antriebe im Rahmen der finanziellen Möglichkeit unterstützt
Geräuschgrenzwert	gemäß EU-Richtlinie EG/92/97/EWG
Ausstattung	Elektronische Haltestellenanzeige und Ansage
Ausstattung	Fahrzeuge sind mit für Betriebsabwicklung notwendigen Einrichtungen (Bordrechner RBL, Fahrausweisverkaufstechnik, Kommunikationseinrichtung) auszustatten
Ausstattung	Moderne Belüftungs- und Klimatisierungstechnik und Sonnenblendschutz
Kennzeichnung	Kennzeichnung des Fahrziels und der Linie gemäß §33 BOKraft mit Zielmatrix
Fahrzeugdesign	Äußerlich erkennbar mit Corporate Design des NAH.SH
Reinigung	Sauberer Zustand, täglich fegen, wöchentlich nass reinigen, jährliche Grundreinigung, Vandalismus zeitnah entfernen
Mindestanforderungen zur Barrierefreiheit	
Stellflächen	Berücksichtigung von Stellflächen zur Aufnahme von Kinderwagen, Rollstühlen und anderen orthopädischen Hilfsmitteln, schwerem Gepäck und ggf. Fahrrädern
Zugang	Stufenloser Zugang in das Fahrzeug bei entsprechender Haltestellengestaltung
Zugang	Rampen und Absenkung (kneeling) bei Niveauunterschied erforderlich
Durchgang	Stufenloser Durchgang zur nächsten Fahrzeugtür mit einer Breite von mindestens 850 mm
Rollstuhlgerecht	Rückhaltesysteme für Rollstühle, Haltestange, Haltewunsch- und Nottasten in günstiger Lage für Rollstuhlfahrer
Sicherheit und Ausstattung	Ebene und rutschfeste Bodenbeläge im Fahrzeug, Lückenlose Ausstattung mit kontrastreichen Haltestangen und Haltefordere- rungstasten im gesamten Fahrzeug
Beleuchtung	Blendfreie Ausleuchtung des Innenraumes
Sichtbarkeit von außen	Gut auffindbarer und kontrastreicher Anforderungstaster für Einstiegs- hilfe
Signale	Optische und Akustische Signale bei Türöffnung und -schließung
Wünsche	
Besondere Qualitätsmerkmale	Klimatisierung, bequeme Sitze, WLAN, USB-Ladesteckdosen, Mehrzweck- bereiche zum Abstellen, erweiterter Fahrradtransport

Anhang 4 Gewichtungstabellen des paarweisen Vergleichs

Tabelle A-2: Gewichtungstabelle von Herrn Thomas Jepsen, Vorsitzender des Infrastrukturausschusses

wichtiger \ als		Reichweite	Sicherheit	Lebensdauer	Marktreife	Energetischer Wirkungsgrad	Einfachheit/Flexibilität Streckenplanung	Fahrzeugverfügbarkeit	Verfügbarkeit der Ladeinfrastruktur	Notwendigkeit von Mitarbeiterschulung	Einführungsaufwand	Lokale Reduktion von CO2	Globale Reduktion von CO2	Reduktion sonstiger Schadstoffe	Lärmreduktion	Anschaffungskosten	Betriebskosten	Infrastrukturkosten	Politische Fördermöglichkeiten	Politische Einflussfaktoren	Imageförderung	Summe	Resultierende Gewichtung
		Technologie	Reichweite	0	1	2	0	0	0	0	1	2	1	1	1	1	2	1	0	1	1	1	2
	Sicherheit	2	0	2	2	1	1	0	1	2	2	1	1	1	2	1	0	1	1	1	2	24	6,32%
	Lebensdauer	1	0	0	2	0	0	0	0	2	1	0	0	0	2	1	0	1	1	1	1	13	3,42%
	Marktreife	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	2	0	0	1	1	1	1	11	2,89%
	Energetischer Wirkungsgrad	2	1	2	2	0	0	0	1	2	2	2	1	2	1	0	1	1	1	1	2	23	6,05%
Betrieb	Einfachheit/Flexibilität Streckenplanung	2	1	2	2	2	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	0	2	1	1	2	29	7,63%
	Fahrzeugverfügbarkeit	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	38	10,00%
	Verfügbarkeit der Ladeinfrastruktur	2	1	2	2	2	2	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	35	9,21%
	Notwendigkeit von Mitarbeiterschulung	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	2	0	0	0	1	1	1	9	2,37%
	Einführungsaufwand	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	2	0	0	0	1	1	1	8	2,11%
Klimaschutz	Lokale Reduktion von CO2	1	1	2	1	0	0	0	0	2	2	2	1	2	1	0	1	1	1	1	2	20	5,26%
	Globale Reduktion von CO2	1	1	2	1	0	0	0	0	2	2	0	1	2	1	0	1	1	1	1	2	18	4,74%
	Reduktion sonstiger Schadstoffe	1	1	2	1	1	0	0	0	2	2	1	1	2	2	0	1	1	1	1	2	21	5,53%
	Lärmreduktion	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	3	0,79%
Wirtschaft	Anschaffungskosten	1	1	1	2	1	0	0	0	2	2	1	1	0	2	0	0	1	1	2	2	18	4,74%
	Betriebskosten	2	2	2	2	2	2	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	2	32	8,42%
	Infrastrukturkosten	1	1	1	1	1	0	0	0	2	2	1	1	1	2	2	0	1	1	2	2	20	5,26%
Sonstiges	Politische Fördermöglichkeiten	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	15	3,95%
	Politische Einflussfaktoren	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	19	5,00%
	Imageförderung	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	2	0	0	7	1,84%

Tabelle A-3: Gewichtungstabelle von Frau Carmen Esche, ÖPNV Betrieb

wichtiger \ als		Reichweite	Sicherheit	Lebensdauer	Marktreife	Energetischer Wirkungsgrad	Einfachheit/Flexibilität Streckenplanung	Fahrzeugverfügbarkeit	Verfügbarkeit der Ladeinfrastruktur	Notwendigkeit von Mitarbeiterschulung	Einführungsaufwand	Lokale Reduktion von CO2	Globale Reduktion von CO2	Reduktion sonstiger Schadstoffe	Lärmreduktion	Anschaffungskosten	Betriebskosten	Infrastrukturkosten	Politische Fördermöglichkeiten	Politische Einflussfaktoren	Imageförderung	Summe	Resultierende Gewichtung
		Technologie	Reichweite	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Sicherheit	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	38	10,00%
	Lebensdauer	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	1,05%
	Marktreife	2	0	2	2	2	2	0	2	2	2	2	2	2	2	0	0	2	0	0	2	26	6,84%
	Energetischer Wirkungsgrad	0	0	2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0,79%
Betrieb	Einfachheit/Flexibilität Streckenplanung	2	0	2	0	2	0	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0	25	6,58%
	Fahrzeugverfügbarkeit	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	34	8,95%
	Verfügbarkeit der Ladeinfrastruktur	0	0	2	0	2	1	0	2	2	2	2	2	2	1	1	1	0	0	2	22	5,79%	
	Notwendigkeit von Mitarbeiterschulung	0	0	2	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	1,05%	
	Einführungsaufwand	2	0	2	0	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	1,84%	
Klimaschutz	Lokale Reduktion von CO2	2	0	2	0	2	0	0	0	2	2	2	2	2	0	0	0	0	0	0	16	4,21%	
	Globale Reduktion von CO2	2	0	2	0	2	0	0	0	2	2	0	1	1	0	0	0	0	0	0	12	3,16%	
	Reduktion sonstiger Schadstoffe	2	0	2	0	2	0	0	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	11	2,89%	
	Lärmreduktion	0	0	0	0	2	0	0	0	2	2	0	1	2	0	0	0	0	0	0	9	2,37%	
Wirtschaftlichkeit	Anschaffungskosten	2	0	2	2	2	0	0	1	2	2	2	2	2	2	0	0	0	0	0	21	5,53%	
	Betriebskosten	2	0	2	2	2	0	0	1	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0	0	25	6,58%	
	Infrastrukturkosten	0	0	2	0	2	0	0	1	2	2	2	2	2	2	0	0	0	0	0	19	5,00%	
Sonstiges	Politische Fördermöglichkeiten	2	0	2	2	2	2	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	34	8,95%	
	Politische Einflussfaktoren	2	0	2	2	2	2	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	1	31	8,16%	
	Imageförderung	2	0	2	0	2	2	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	1	27	7,11%	

Tabelle A-4: Eigene Gewichtungstabelle mit Fokus auf Nachhaltigkeit

wichtiger \ als		Reichweite	Sicherheit	Lebensdauer	Marktreife	Energetischer Wirkungsgrad	Einfachheit/Flexibilität Streckenplanung	Fahrzeugverfügbarkeit	Verfügbarkeit der Ladeinfrastruktur	Notwendigkeit von Mitarbeiterschulung	Einführungsaufwand	Lokale Reduktion von CO2	Globale Reduktion von CO2	Reduktion sonstiger Schadstoffe	Lärmreduktion	Anschaffungskosten	Betriebskosten	Infrastrukturkosten	Politische Fördermöglichkeiten	Politische Einflussfaktoren	Imageförderung	Summe	Resultierende Gewichtung
		Technologie	Reichweite	1	2	2	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	2	1	1	1	1	0	0
	Sicherheit	1	1	1	0	1	1	1	2	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	13	3,42%
	Lebensdauer	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	1,32%
	Marktreife	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	8	2,11%
	Energetischer Wirkungsgrad	2	2	2	2	1	1	1	2	2	0	0	0	0	1	1	1	2	2	1	23	6,05%	
Betrieb	Einfachheit/Flexibilität Streckenplanung	2	1	2	1	1	1	1	2	2	0	0	0	0	1	1	1	2	2	1	21	5,53%	
	Fahrzeugverfügbarkeit	2	1	2	2	1	1	2	1	1	0	0	0	0	1	1	1	2	2	1	21	5,53%	
	Verfügbarkeit der Ladeinfrastruktur	2	1	1	1	1	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	13	3,42%	
	Notwendigkeit von Mitarbeiterschulung	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	6	1,58%	
	Einführungsaufwand	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	12	3,16%	
Klimaschutz	Lokale Reduktion von CO2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	2	2	2	2	2	2	35	9,21%	
	Globale Reduktion von CO2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	35	9,21%	
	Reduktion sonstiger Schadstoffe	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	35	9,21%	
	Lärmreduktion	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	35	9,21%	
Wirtschaftlichkeit	Anschaffungskosten	0	1	2	2	1	1	1	2	2	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	18	4,74%	
	Betriebskosten	1	1	2	2	1	1	1	2	2	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	19	5,00%	
	Infrastrukturkosten	1	1	2	2	1	1	1	2	2	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	19	5,00%	
Sonstiges	Politische Fördermöglichkeiten	0	1	2	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	11	2,89%	
	Politische Einflussfaktoren	1	2	2	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	13	3,42%	
	Imageförderung	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	0	0	0	1	1	1	2	2	2	23	6,05%	

Anhang 5 Begründete Konzeptbewertung

Tabelle A-5: Begründete Konzeptbewertung zur Nutzwertanalyse Teil 1

Bewertung		Konzept 0: Diesel Hybrid		Konzept 1: Methangas		Konzept 2: Depotlader	
Nr.	Kriterien	Punkte	Begründung und Quelle	Punkte	Begründung und Quelle	Punkte	Begründung und Quelle
1 Technologie							
1.1	Reichweite	3	Über 600 km [31]	3	Über 500 km [31]	1	180-330 km
1.3	Sicherheit	3	Vergleichswert	3	Keine höheren Sicherheitsrisiken ggü. Diesel.	3	Keine höheren Sicherheitsrisiken ggü. Diesel.
1.4	Lebensdauer	3	12 Jahre	3	12 Jahre	2	12 Jahre, Batteriewechsel nach 6 Jahren [31]
1.5	Marktreife	3	Im Markt etabliert	3	Im Markt etabliert	3	Serienreif [41]
1.6	Energetischer Wirkungsgrad	3	Bis zu 43 % [46]	2	Monovalenter Gasmotor ca. 10 % schlechter als Diesel: 33 % [26] 27 % mit Betrachtung der Biomethanerzeugung und -Reinigung [84]	5	80 % Netzverluste, Ladegeräteverluste, Batterie und Elektromotor [42]
2 Betrieb							
2.1	Einfachheit/Flexibilität der Streckenplanung	3	Ohne Einschränkungen	3	Ohne Einschränkungen	2	Innerhalb der Ladungsreichweite begrenzt
2.2	Verfügbarkeit der Fahrzeuge	3	Ca. 88 %, Wartungsaufwand durch zusätzliches Hybridmodul erhöht ggü. Standarddiesel [25]	4	95 %, wie Standarddieselbusse [25]	3	Ca. 88 %, ähnliches Niveau wie Diesel hybrid [25]
2.3	Verfügbarkeit der Ladeinfrastruktur und Energie	3	Flächendeckende Diesel Verfügbarkeit. Tanksäule im Betriebs Hof für alle Busse	2	Flächendeckende Erdgas CNG-Verfügbarkeit. Biomethan standortabhängig. Tanksäule im Betriebs Hof	2	Eine Ladesäule pro Bus im Depot
2.4	Notwendigkeit der Mitarbeiterschulung	3	Keine spezielle Ausbildung. Lediglich Ausbildung im KFZ-Handwerk [31]	3	Geringfügige Unterscheidung zu Diesel, durch Schulung mit Gasanlagen [31]	2	1-5h generelle Sensibilisierung 40-100h HV-Komponenten
2.5	Einführungsaufwand	3	Geringer Aufwand [60]	3	Geringer Aufwand [60]	2	Gering – mittlerer Infrastruktureller Aufwand [60]
3 Nachhaltigkeit							
3.1	Reduktion CO ₂ lokal	3	89,9 kg/100 km	5	0 kg/100 km	5	0 kg/100 km
3.2	Reduktion CO ₂ global	3	109 kg/100 km	5	15,9 kg/100 km	5	35,4 kg/100 km
3.3	Sonstige Schadstoffe	3	Vergleichswert	4	50-60 % des vergleichbaren Dieselbusses [31], [85], [86]	5	0
3.4	Lärm	3	3 dB(A) Reduktion ggü. Diesel [87]	4	50 % Leiser ggü. vergleichbaren Dieselbusses [31]	5	Kein Lärm bei Halt 4-7 dB(A) ggü. Diesel während der Fahrt [48]
4 Wirtschaftlichkeit							
4.1	Anschaffungskosten	3	Ca. 280 T€ [60]	4	250 T€ [60]	1	Ca. 550 T€ [60]
4.2	Infrastrukturkosten	3	Infrastruktur meist bereits vorhanden	2	Ca. 1 Mio. € für Tankanlage und Gasspeicher im Betriebs Hof [31]	1	Langsamladepunkte im Depot ca. á 400 T€
4.3	Betriebskosten	3	Ca. 46k/(a*Bus) 0,33€/km Wartung/Instandhaltung + 1,87€/L Diesel und AdBlue[25] [31]	3	Ca. 40k/a*Bus 0,35€/km Wartung/Instandhaltung + 1,2€/kg Biomethan [25][31]	4	Ca. 29k /a*Bus 0,30€/km Wartung/Instandsetzung + 18,47ct/kWh [18][20]
5 Sonstiges							

5.1	Fördermöglichkeiten	3	Investitionskredit Nachhaltige Mobilität – Individualvariante (Darlehen) [88]	4	Alternative Antriebe von Bussen im Personenverkehr (Zuschuss) [89] Investitionskredit Nachhaltige Mobilität – Individualvariante (Darlehen) [88]	4	Anschaffung von Elektrobussen im öffentlichen Personennahverkehr (Zuschuss) [90] Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge (Zuschuss) [91] Alternative Antriebe von Bussen im Personenverkehr (Zuschuss) [89] Investitionskredit Nachhaltige Mobilität – Individualvariante (Darlehen) [88]
5.2	Politische Einflussfaktoren	3	Voraussichtlich steigende Dieselpreise bis 2030 [31] Verdrängung des Dieselantriebs durch emissionsneutrale und -freie Alternativen	4	Voraussichtlich steigende Biomethanpreise bis 2030 [31] Gesteigerter Fokus und Ausbau	4	Voraussichtlich leicht steigende Strompreise bis 2030 [31] Ausbau der erneuerbaren Energien führt zu besserer Emissionsbilanz des Strommix Elektrifizierung des Verkehrs
5.3	Imageförderung	3	Positives Bild	4	Hohe Akzeptanz in der Bevölkerung [31]	4	Hohe Akzeptanz bei Fahrgästen und Fahrpersonal [92]

Tabelle A-6: Begründete Konzeptbewertung zur Nutzwertanalyse Teil 2

Bewertung		Konzept 3: Zwischenlader		Konzept 4: FC		Konzept 5: H2V	
Nr.	Kriterien	Punkte	Begründung und Quelle	Punkte	Begründung und Quelle	Punkte	Begründung und Quelle
1	Technologie						
1.1	Reichweite	3	Keine Begrenzung, bei vorhandener Infrastruktur [60]	3	350-500 km	3	300 - 450 km
1.3	Sicherheit	3	Keine höheren Sicherheitsrisiken gegenüber Diesel.	3	Keine höheren Sicherheitsrisiken gegenüber Diesel.	3	Keine höheren Sicherheitsrisiken gegenüber Diesel.
1.4	Lebensdauer	2	12 Jahre – Batteriewechsel nach 6 Jahren[31]	2	12 Jahre – Batteriewechsel nach 6 Jahren, Brennstoffzellenwechsel nach 4 Jahren [31]	3	12 Jahre
1.5	Marktreife	3	Serienreif [41]	3	Kleinserien bis Serienreif [41]	2	Prototyp bis Kleinserienreif
1.6	Energetischer Wirkungsgrad	5	80 % Netzverluste, Ladegeräteverluste, Batterie und Elektromotor [42]	2	38-50 % Brennstoffzellensystem inklusive Spannungswandler, Batterie, Leistungselektronik und Elektromotor 25-35 % mit Betrachtung der Wasserstoffelektrolyse, Verdichtung und Transport [46], [93]	2	30-43 % Verbrennungsmotor und Getriebe 21-30 % mit Betrachtung der Wasserstoffelektrolyse, Verdichtung und Transport [46], [93]
2	Betrieb						
2.1	Einfachheit/Flexibilität der Streckenplanung	2	Abhängig von dem Vorhandensein von Nachladepunkten	3	Ohne Einschränkungen	3	Ohne Einschränkungen
2.2	Verfügbarkeit der Fahrzeuge	3	Ca 88 %, ähnliches Niveau wie Diesel-Hybrid [25]	3	Ca. 88%, ähnliches Niveau wie Diesel-Hybrid [25]	4	Keine Daten vorliegend. Annahme einer ähnlichen Verfügbarkeit wie gasbetriebene Busse.

2.3	Verfügbarkeit der Ladeinfrastruktur	2	Eine Ladesäule für alle Fahrzeuge an Haltestelle, sofern nicht mehrere gleichzeitig ankommen. Ansonsten mehrere. Zusätzliche Ladesäulen im Depot	2	Herkunft des Wasserstoffs standortabhängig. Tanksäule im Betriebshof inklusive Speicher.	2	Herkunft des Wasserstoffs standortabhängig. Tanksäule im Betriebshof inklusive Speicher.
2.4	Notwendigkeit der Mitarbeiterschulung	2	1-5h generelle Sensibilisierung 40-100h HV-Komponenten	2	Grundsätzliche Einführung in H2- und HV-Technik und Gasanlagenprüfung [47]	2	Grundsätzliche Einführung in H2-Technik und Gasanlagenprüfung
2.5	Einführungsaufwand	1	Mittlerer Infrastruktureller Aufwand [60]	3	Geringer Aufwand [60]	3	Geringer Aufwand
3	Nachhaltigkeit						
3.1	Reduktion CO ₂ lokal	5	0	5	0	5	CO ₂ – sehr gering durch verbranntes Motoröl [46] Reduktion >98 %
3.2	Reduktion CO ₂ global	5	34,4 kg/100 km	4	Abhängig von der Erzeugung. Dampfref.: 61,9 kg/100 km	4	Abhängig von der Erzeugung. Dampfref.: 82,9 kg/100 km
3.3	Sonstige Schadstoffe	5	0	5	0	5	Nox – gering; CO, HC – sehr gering [46]
3.4	Lärm	5	Kein Lärm bei Halt 4-7 dB(A) ggü. Diesel während der Fahrt [48]	5	4-7 dB(A) ggü. Diesel während der Fahrt [87]	4	Lauter als Brennstoffzellenantrieb. Leiser als Dieselantrieb [94]
4	Wirtschaftlichkeit						
4.1	Anschaffungskosten	1	Ca. 600 T€ [41], [60]	1	Ca. 600 T€ [60]	1	Ca. 600 T€ [46]
4.2	Infrastrukturkosten	1	Lademöglichkeit an Haltestellen ca. á 500 TEUR Richtwert [60]	2	Tankstelle im Depot inklusive Zapfsäule, Verdichter, Hochdruckspeicher 1-2 Mio. € [47]	2	Tankstelle im Depot inklusive Zapfsäule, Verdichter, Hochdruckspeicher 1-2 Mio. € [47]
4.3	Betriebskosten	4	Ca. 28k/a*Bus resultierend aus 0,30€/km Wartung/Instandsetzung + 18,47ct/kWh [18][20]	3	Ca. 59k/a*Bus resultierend aus 0,4€/km Wartung/Instandhaltung + 9,5€/kg H ₂ [25][31]	2	Eigene Annahme: Instandhaltung wie Brennstoffzellenbus. Ca. 71k/a*Bus resultierend aus 0,4€/km Wartung/Instandhaltung + 9,5€/kg H ₂
5	Sonstiges						
5.1	Fördermöglichkeiten	4	Anschaffung von Elektrobussen im öffentlichen Personennahverkehr (Zuschuss) [90] Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge (Zuschuss) [91] Alternative Antriebe von Bussen im Personenverkehr (Zuschuss) [89] Investitionskredit Nachhaltige Mobilität – Individualvariante (Darlehen) [88]	4	Alternative Antriebe von Bussen im Personenverkehr (Zuschuss) [89] Investitionskredit Nachhaltige Mobilität – Individualvariante (Darlehen) [88]	3	Investitionskredit Nachhaltige Mobilität – Individualvariante (Darlehen) [88]
5.2	Politische Einflussnahme	4	Voraussichtlich leicht steigende Strompreise bis 2030 [31] Ausbau der erneuerbaren Energien führt zu besserer Emissionsbilanz des Strommix Elektrifizierung des Verkehrs	4	Voraussichtlich sinkende Wasserstoffpreise bis 2030 [31] Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur und Erstellung von Wasserstoffstrategien	4	Voraussichtlich sinkende Wasserstoffpreise bis 2030 [31] Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur und Erstellung von Wasserstoffstrategien
5.3	Imageförderung	4	Hohe Akzeptanz bei Fahrgästen und Fahrpersonal [92]	4	Umweltfreundlich, zukunftsfähiges, attraktives Verkehrsmittel [95]	4	Keine Daten vorliegend. Es wird von einer ähnlichen Akzeptanz wie bei Brennstoffzellen ausgegangen

