

# **Abschlussbericht**

## ***Untersuchung zu Erfordernissen aus dem SaubFahrzeugBeschG und Kostenoptimierungsoptionen durch Kooperationen und Synergien für den Landkreis Göppingen***

### **Auftraggeber:**

Landkreis Göppingen

### **Ersteller:**

Steinbeis-Transferzentrum Energie- und Mobilitätssysteme (STEM)

### **Autoren:**

Dr. Oliver Ehret, B.Sc. Aljoscha Kammerer

### **Bearbeitungszeitraum:**

Dezember 2022 bis Mai 2023

### **Datum Abschlussbericht:**

24. August 2023



## Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis .....	3
Tabellenverzeichnis .....	3
Abkürzungsverzeichnis .....	4
1. Hintergrund, Zielsetzung und Vorgehen der Untersuchung .....	5
2. Regulative Vorgaben zu emissionsfreien Bussen .....	5
2.1 Clean Vehicles Directive und Saubere Fahrzeuge-Beschaffungs-Gesetz .....	5
2.2 Auswirkungen auf Technologien, Kosten und Umwelt .....	7
2.3 Förderprogramme der öffentlichen Hand .....	7
3. Busbetrieb im Landkreis Göppingen .....	8
3.1 Heutiger Busbetrieb .....	8
3.2 Zukünftiger Busbetrieb und anstehende Ausschreibungen .....	8
3.3 Anforderungen an die zu beschaffenden Busse .....	9
4. Technologien und Marktangebot emissionsfreier Busse .....	10
4.1 Batterieelektrische Busse .....	10
4.2 Brennstoffzellenelektrische Busse .....	12
4.3 Grobabschätzung Verfügbarkeit und Kosten Busse .....	12
5. Kraftstoff-Infrastrukturen für Busse .....	13
5.1 Stromversorgung für batterieelektrische Busse .....	13
5.2 Wasserstoffbereitstellung für brennstoffzellenelektrische Busse .....	14
5.2.1 Wasserstoffproduktion .....	14
5.2.2 Transport von Wasserstoff .....	15
5.2.3 Wasserstofftankstellen .....	16
5.3 Grobabschätzung Kosten von Infrastrukturelementen .....	17
6. Betrachtung zukünftiger Busbetriebe im Landkreis .....	18
6.1 Detailuntersuchung zweier idealtypischer Busumläufe .....	18
6.1.1 Überlandverkehr (Linien 966/980/981/983/984) .....	19
6.1.2 Stadtverkehr (Linien 962/963) .....	21
6.2 Analyse ausgewählter emissionsfreier Busse .....	22
6.3 Bewertung der Gesamtbetriebskosten und Umwelteffekte .....	23
6.3.1 Gesamtbetriebskosten .....	23
6.3.2 Umweltbetrachtung .....	27
7. Politische Prozesse und Handlungsoptionen .....	28
7.1 HyStarter-Dialog Landkreis Göppingen .....	28
7.2 Auftaktprojekt zum Einsatz von Brennstoffzellenbussen .....	29

7.3	Kostenoptimierung durch Kooperationen und Synergien .....	30
7.4	Wasserstoffgipfel Landkreis Göppingen.....	31
8.	Zusammenfassung.....	32
9.	Handlungsempfehlungen .....	33
Anhang	.....	36
Literatur	.....	38

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Anzahl der emissionsarmen und emissionsfreien Busse im ÖPNV.....	6
Abbildung 2 Übersicht aktueller Linienbündel im Landkreis Göppingen (eigene Darstellung) [68] .....	8
Abbildung 3 Übersicht neue Linienbündel nach NVP 2022.....	9
Abbildung 4 Beschaffungsszenarien nach CVD-Richtlinie (eigene Darstellung) .....	10
Abbildung 5: Übersicht Lademöglichkeiten für batterieelektrische Busse [35].....	11
Abbildung 6: geplante Wasserstoffpipelines in Baden-Württemberg [61].....	16
Abbildung 7: mögliche Konfiguration einer 350-bar Tankstelle für Nutzfahrzeuge [23] .....	17
Abbildung 8: Fahrzeugumlauf eines Überlandverkehrs (eigene Darstellung) .....	19
Abbildung 9: Linie 962 .....	21
Abbildung 10: Linie 963 .....	21
Abbildung 11 TCO-Betrachtung Überlandumlauf .....	24
Abbildung 12 TCO-Betrachtung Stadtumlauf.....	25
Abbildung 13: TCO-Betrachtung Landkreis Göppingen.....	26
Abbildung 14 jährliche Treibhausgasemissionen der betrachteten Umlaufbedienung .....	28
Abbildung 15: Denkbare Positionierung von Wasserstoff-Tankstellen im Landkreis [67] (bearbeitet)	30
Abbildung 16: Projektideen für Kooperationen entlang der Wasserstoff-Wertschöpfungskette [12].	32

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Marktübersicht batterieelektrischer Busse, Herstellerangaben .....	11
Tabelle 2: Marktübersicht brennstoffzellenelektrischer Busse, Herstellerangaben.....	12
Tabelle 3: Kostenannahmen für die TCO.....	36
Tabelle 4: Annahmen Laufleistungen .....	36
Tabelle 5: Annahmen CO <sub>2</sub> -Äquivalente Kraftstoffe.....	37

## Abkürzungsverzeichnis

AEL	Alkalische Elektrolyse
BEV	Batterieelektrisches Fahrzeug (Battery Electric Vehicle)
BVB	Basler Verkehrsbetriebe
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
CVD	Clean Vehicles Directive
EU	Europäische Union
€	Euro
FCEV	Brennstoffzellenelektrisches Fahrzeug (Fuel Cell Electric Vehicle)
h	Stunde
km	Kilometer
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
Lkw	Lastkraftwagen
LOHC	Liquid Organic Hydrogen Carrier
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
PEMEL	Polymer-Elektrolyt-Membran-Elektrolyse
Pkw	Personenkraftwagen
SaubFahrzeugBeschG	Gesetz über die Beschaffung sauberer Straßenfahrzeuge
SEL	Süddeutsche Erdgasleitung
SSB	Stuttgarter Straßenbahn AG
TCO	Gesamtbetriebskosten (Total Cost of Ownership)
THG	Treibhausgas
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik
VVS	Verkehrs- und Tarifverbund Stuttgart

## 1. Hintergrund, Zielsetzung und Vorgehen der Untersuchung

Der Landkreis Göppingen sieht sich in seiner Rolle als Aufgabenträger des straßengebundenen, öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) und als dem Klimaschutz verpflichteter Gebietskörperschaft mit substantiellen Herausforderungen konfrontiert. Zum einen verlangen die im Jahr 2019 verschärfte *Richtlinie [...] über die Förderung sauberer und energieeffizienter Straßenfahrzeuge* – besser bekannt als *Clean Vehicles Directive (CVD)* - und das *Gesetz über die Beschaffung sauberer Straßenfahrzeuge (SaubereFahrzeuge-Beschaffungs-Gesetz (SaubFahrzeugBeschG))* den Einsatz lokal emissionsfreier Nahverkehrsbusse im Landkreis.

Zum anderen erfordert die Klimaschutz-Strategie des Landkreises, im Einklang mit den klimapolitischen Zielsetzungen auf bundes- und internationaler Ebene, drastische Reduzierungen der Treibhausgasemissionen auch des Verkehrsbereichs. Sowohl die regulativen Anforderungen wie auch die im Kontext emissionsfreier Busse infrage kommenden Antriebstechnologien, einschließlich der erforderlichen Kraftstoff-Versorgungsinfrastrukturen, stellen für den Landkreis ‚Neuland‘ dar und verlangen die Einholung externer Expertise.

Vor diesem Hintergrund beauftragte der Landkreis Göppingen die vorliegende *Untersuchung zu Erfordernissen aus dem SaubFahrzeugBeschG und Kostenoptimierungsoptionen durch Kooperationen und Synergien für den Landkreis Göppingen*. Das zentrale Ziel besteht darin, Entscheidungsträger aus Politik und Wirtschaft im Landkreis über die Handlungserfordernisse zu informieren, welche sich hinsichtlich Beschaffung und Einsatz emissionsfreier Busse, einschließlich der für den Betrieb erforderlichen Kraftstoff-Infrastrukturen ergeben, sowie technologisch, ökonomisch und ökologisch möglichst vorteilhafte Umsetzungsoptionen aufzuzeigen.

Die Studie stellt zunächst die (2) regulativen Vorgaben zu emissionsfreien Bussen vor und analysiert die (3) Konsequenzen für den zukünftigen Busbetrieb im Landkreis Göppingen. Als einzig verfügbare lokal emissionsfreie Technologiekonzepte werden (4) batterie- und brennstoffzellenelektrische Busse, ebenso wie die dazugehörigen (5) Kraftstoff-Infrastrukturen untersucht. Die (6) Ausgestaltung des zukünftigen Busbetriebs im Landkreis steht im Zentrum der Analyse und liefert exemplarische Detailbetrachtungen zum Einsatz von Nullemissionsbussen auf ausgewählten Busumläufen. Anschließend werden (7) Zukunftsperspektiven für Wasserstoff entwickelt, sowie Optionen zur Kostenoptimierung durch Kooperationen und Synergien diskutiert. Eine (8) Zusammenfassung sowie die Vorstellung von (9) Handlungsempfehlungen schließen die Arbeit ab. Angesichts der zentralen Bedeutung von Batterie- und Brennstoffzellenbussen klingt stets auch die Frage nach der Eignung der beiden Technologiekonzepte zur Erfüllung der spezifischen Einsatzanforderungen des Landkreises mit.

## 2. Regulative Vorgaben zu emissionsfreien Bussen

Nachfolgend werden die für die vorliegende Analyse zentralen Beschaffungsvorgaben für emissionsfreie Busse vorgestellt, sowie ihre Auswirkungen auf Technologien, Kosten und Umwelt beschrieben. Angesichts hoher Technologiekosten werden auch Förderprogramme dargestellt.

### 2.1 Clean Vehicles Directive und SaubereFahrzeuge-Beschaffungs-Gesetz

Die Clean Vehicles Directive (CVD) von 2009 verpflichtet Mitgliedsstaaten und die darin ansässigen Behörden und Unternehmen zur Beschaffung emissionsarmer Fahrzeuge. Am 20. Juni 2019 wurde die

wesentlich verschärfte Version (EU) 2019/1161 beschlossen [18], die innerhalb von zwei Jahren in nationales Recht umzusetzen war. Bei öffentlichen Beschaffungsmaßnahmen müssen verbindliche Mindestquoten für emissionsarme bzw. -freie Fahrzeuge eingehalten werden, die je nach Fahrzeugklasse, EU-Mitgliedsland und Zieljahr variieren. Die Mindestquoten können durch nationale Zielsetzungen erhöht werden und sind auch bestimmten privaten Akteuren, z. B. öffentlich beauftragten privaten Busbetreibern, gegenüber bindend. Neben leichten Nutzfahrzeugen werden auch Lkw und Busse reguliert. Bei Letzteren müssen einerseits emissionsarme alternative Antriebskonzepte genutzt und z.B. Brennstoffzellen, Batterie- und Erdgasfahrzeuge angeschafft und andererseits lokal quasi emissionsfreie Fahrzeuge mit einem CO<sub>2</sub>-Austoß von unter 1 g/kWh oder g/km eingesetzt werden. In Deutschland müssen im Zeitraum 2. August 2021 bis 31. Dezember 2025 bereits 10 Prozent der Lkw und 45 Prozent der Busse emissionsarm sein; während die Mindestanteile im Zeitraum 1. Januar 2026 bis 31. Dezember 2030 auf 15 bzw. 65 Prozent steigen. Überdies ist die Hälfte der Beschaffungsziele für Busse durch emissionsfreie Fahrzeuge, im Kern also Brennstoffzellen- oder Batteriebusse zu erfüllen. Dabei ist die CVD im Busbereich ausschließlich auf Fahrzeuge der Klasse M3, Klasse I anzuwenden, welche mit Stehplätzen für einen häufigen Passagierwechsel ausgestattet sind; die Vorschrift gilt weder für Reise- noch Überlandbusse [18]. Abbildung 1 stellt die von der CVD vorgeschriebenen Mindestbeschaffungsquoten für Busse der Klasse M3, Klasse I dar.

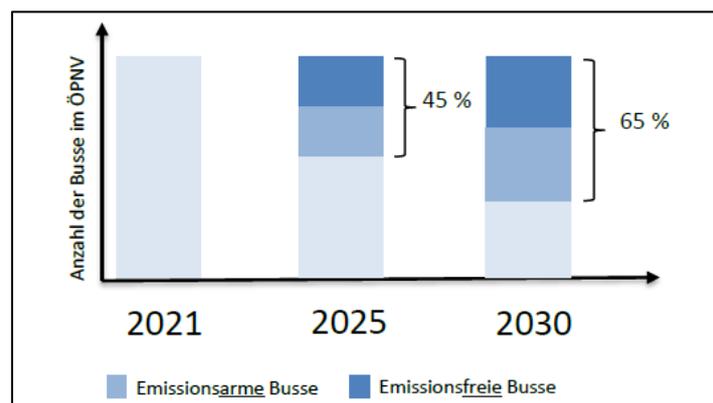


Abbildung 1: Anzahl der emissionsarmen und emissionsfreien Busse im ÖPNV

Mit der Verabschiedung des *Saubere-Fahrzeug-Beschaffungs-Gesetzes (SaubFahrzeugBeschG)* am 15. Juni 2021 wurde die CVD fristgerecht in deutsches Recht umgesetzt, wobei die Quoten unverändert übernommen wurden. Allerdings wurden die Bundesländer dazu ermächtigt, Flexibilität hinsichtlich der Quotenerfüllung durch individuelle Aufgabenträger walten zu lassen, so lange die Mindestziele insgesamt eingehalten werden. Unter anderem sind länderübergreifende Ausgleichsmechanismen und die Zusammenarbeit mit Branchenverbänden zugelassen; eine Übererfüllung der Quoten bleibt möglich [8]. Die in Baden-Württemberg letztendlich maßgeblichen rechtlichen Bestimmungen wurden Stand August 2023 noch nicht veröffentlicht, was erhebliche Unsicherheiten hinsichtlich der Umsetzungserfordernisse mit sich bringt. Offenbar wird eine Übererfüllung der Mindestbeschaffungsquoten diskutiert. Einem am 14. Februar 2023 veröffentlichtem Gesetzentwurf der EU-Kommission zufolge sollen ab 2030 ausschließlich emissionsfreie Stadtbusse in Verkehr gebracht werden dürfen [17].

## 2.2 Auswirkungen auf Technologien, Kosten und Umwelt

Im Sinne von CVD und SaubFahrzeugBeschG können aktuell lediglich batterieelektrische Fahrzeuge (*Battery Electric Vehicles: BEVs*) und brennstoffzellenelektrische Fahrzeuge (*Fuel Cell Electric Vehicles: FCEVs*) als emissionsfrei gelten, sieht man einmal von für den Landkreis Göppingen nicht relevanten Oberleitungsbussen und marktlich nicht verfügbaren Fahrzeugen mit Wasserstoff-Verbrennungsmotor ab [21]. Im Gegensatz zu Dieselmotoren handelt es sich bei Batterie- und Brennstoffzellenbussen um innovative Technologien, die weder von langjährigen technischen Optimierungsprozessen noch den Kostenvorteilen einer Großserienproduktion profitieren. Daher sind die in Kapitel 4 und Abschnitt 6.2 näher vorgestellten BEVs und FCEVs antriebstechnisch weniger ausgereift als herkömmliche Busse sowie wesentlich teurer. Zudem sind neue Kraftstoff-Infrastrukturen erforderlich, die weniger robust und deutlich kostenintensiver als die Kraftstoffversorgung von Dieselmotoren sind. Die nunmehr benötigten Strom- und Wasserstoff-Infrastrukturen werden in Kapitel 5 dargestellt. Schließlich verlangen die technischen wie auch wirtschaftlichen Herausforderungen innovative, in Kapitel 7 diskutierte Lösungsansätze, die einen intensiven Austausch zwischen den im Landkreis relevanten Entscheidungsträgern beinhalten und auf Kostenoptimierungen durch Kooperationen sowie Synergien zielen.

Entsprechend der zentralen Intention von CVD und SaubFahrzeugBeschG sind batterie- und brennstoffzellenelektrische Busse lokal emissionsfrei. Während des Fahrbetriebs entstehen keinerlei Emissionen von Treibhausgasen (THG) oder Schadstoffen und nahezu keine Antriebsgeräusche. Beide Antriebskonzepte ermöglichen die Nutzung erneuerbarer Energien als Kraftstoff und wandeln diesen hocheffizient in Bewegungsenergie um. Daher sind die Emissionen von brennstoffzellen- und batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen zumeist auch dann wesentlich geringer als diejenigen von Dieselfahrzeugen, wenn man zusätzlich zu den während der Fahrt anfallenden Abgasen auch die während der Produktion, Verteilung und Abgabe von Kraftstoffen entstehenden Emissionen erfasst. BEVs und FCEVs weisen insbesondere beim Einsatz erneuerbarer Energien extrem niedrige THG-Emissionen auf, wobei Batteriebusse aufgrund ihrer höheren Effizienz am emissionsärmsten sind. Allerdings sind BEVs z.B. aufgrund geringerer Reichweiten nicht für alle Einsatzfelder geeignet. Bei Nutzung fossiler Energien verschlechtern sich die Umweltbilanzen von BEVs und FCEVs. Daher ist der Einsatz kohlenstoffarm oder -frei hergestelltem Stroms bzw. Wasserstoffs eine unabdingbare Voraussetzung für weitreichende Verminderungen von THG-Emissionen [11]. Die mit dem Einsatz emissionsfreier Busse verbundenen Gesamtbetriebskosten und Umwelteffekte werden in Abschnitt 6.3 vertiefend analysiert.

## 2.3 Förderprogramme der öffentlichen Hand

Angesichts noch nicht wettbewerbsfähiger Kosten bedürfen Batterie- und Brennstoffzellenbusse, sowie die für den Betrieb erforderlichen Kraftstoff-Bereitstellungsinfrastrukturen staatlicher Förderung. Die Politik unterstützt den Markthochlauf der Technologien auf Ebene der EU, der Bundesrepublik und der Bundesländer einschließlich von Baden-Württemberg. Die Kumulierung von europäischen, nationalen und regionalen Fördermitteln ist oft zulässig und erwünscht.

Für den Landkreis Göppingen sind Förderaufrufe im Rahmen der *Richtlinie zur Förderung alternativer Antriebe von Bussen im Personenverkehr* des Bundes vom 7. September 2021 besonders relevant [4]. Der aktuelle, dritte Aufruf vom Juni 2023 läuft bis zum 10. September 2023 und sieht die Förderung der Beschaffung und Umrüstung von Bussen mit alternativen Antrieben, sowie den Erwerb der zum Betrieb notwendigen Infrastruktur zu attraktiven Quoten vor: Erfolgreichen Antragstellern werden 80 % der Investitionsmehrkosten von Batterie- und Brennstoffzellenbussen gegenüber konventionellen Referenzfahrzeugen, sowie 40 % der Investitionsvollkosten für die zum Betrieb notwendige, nicht

öffentliche Infrastruktur erstattet [49]. Im bisherigen Verlauf des Jahres waren diverse weitere Förderaufrufe des Bundes aktiv und bezuschussten z.B. Machbarkeitsstudien für Busse mit emissionsfreien Antrieben, sowie Elektrolyseanlagen zur Wasserstofferzeugung für den Verkehrssektor [45]. Obgleich solcherlei Förderangebote prinzipiell attraktiv sind und regelmäßig neu ausgeschrieben werden, gibt es keine Garantien für einen Antrags Erfolg und ist der Antragsaufwand nicht unerheblich.

### 3. Busbetrieb im Landkreis Göppingen

Das folgende Kapitel zeigt die Konsequenzen der oben beschriebenen regulativen Anforderungen für den zukünftigen Busbetrieb im Landkreis Göppingen auf. Ausgehend von der Betrachtung des derzeitigen Busbetriebs werden anstehende Bündelausschreibungen analysiert und wird die Anzahl der künftig zu beschaffenden emissionsfreien Busse bestimmt.

#### 3.1 Heutiger Busbetrieb

Linienbündel	Ende der aktuellen Konzession	Linienübersicht Linien im 5er Bündel	Betriebskilometer (km) Stand 2022, inkl. Ausbildungslinien (A-Linien)	Anzahl Busse
Linienbündel 1	31.05.2027	911, 912, 913, 914, 915, 916, 917, 918, 924	1.108.535	63
Linienbündel 2	31.05.2026	901, 902, 903, 904, 905, 906, 920, 921, 922, 923, 997	1.287.383	24
Linienbündel 3	30.11.2025	930, 931, 932, 933, 934, 935, 940, 941, 942, 943	1.628.265	(in Bündel 1 enthalten)
Linienbündel 4	30.11.2026	950, 951, 952, 953, 957, 958, 959, 970, 971, 972	1.249.913	26
Linienbündel 5	30.11.2027	961, 962, 963, 964, 965, 966, 980, 981, 982, 983, 984	1.768.091	38

Abbildung 2 Übersicht aktueller Linienbündel im Landkreis Göppingen (eigene Darstellung) [68]

Abbildung 2 stellt den heutigen Busbetrieb des ÖPNV im Landkreis anhand sog. *Linienbündel* dar, welche mehrere Buslinien umfassen. Der Landkreis schreibt künftig die Bedienung der Bündel aus und vergibt Konzessionen für den Busbetrieb an die im Bieterverfahren erfolgreichen Transportunternehmen. Insgesamt sind 51 Linien in fünf Linienbündeln organisiert, die zusammen eine jährliche Betriebsleistung von 7.042.187 Kilometer (km) erbringen und von 151 Fahrzeugen unterschiedlicher Größe bedient werden. Hinzu kommen vier Bürgerbuslinien, die nicht vom Landkreis koordiniert werden, sondern den regulären Linienverkehr lokal ergänzen. Gemäß der aktuell maßgeblichen, dritten Fortschreibung des Nahverkehrsplans vom Mai 2023 wird eine Umstrukturierung und Neuvergabe aller bestehenden Linienbündel bis zum Ende des Jahres 2027 vollzogen [37].

Damit unterliegen sämtliche Neuvergaben den in CVD und SaubFahrzeugBeschG enthaltenen Vorgaben zur Beschaffung emissionsfreier Busse, wobei voraussichtlich sechs der zehn Bündel den erhöhten Anforderungen ab 2026 unterliegen. Die Auswirkungen der Regularien werden in 3.3 detailliert analysiert [68].

#### 3.2 Zukünftiger Busbetrieb und anstehende Ausschreibungen

Der ÖPNV im Landkreis Göppingen wird gemäß dem aktuellen Nahverkehrsplan in Zukunft starken Veränderungen unterliegen. Einige bereits im Jahr 2019 im Fahrplankonzept *Bus19+* formulierten Ziele, welche bessere Anschlüsse, eine erhöhte Taktung und die Modernisierung der Haltestelleninfrastruktur erreichen sollen, werden dadurch umgesetzt und erweitert [36, 37]. Die bisherige Bündelstruktur wird ab dem Vergabezeitraum 2025 bis 2027 aufgebrochen und eine Struktur mit zehn Linienbündel etabliert, wie aus Abbildung 3 ersichtlich ist. Damit die Neustrukturierung der Linien leichter nachvollziehbar wird, sind die Linien entsprechend der ehemaligen Bündelzuordnung farblich gekennzeichnet [37].

Insgesamt wird der Busverkehr im Landkreis nach der Neustrukturierung mit 53 regulären Linien abgedeckt sein, wovon zwei die heutigen Linien der Radwanderbusse sind. Ergänzend kommen eine noch nicht bekannte Anzahl von notwendigen Ausbildungslinien (*A-Linien*) sowie zehn Nachtbuslinien hinzu. Analog zur bestehenden Struktur bleiben die vier außerbündisch organisierten Buslinien erhalten. Ausgehend von den Fahrplandaten des Jahres 2022, wird bei den neuen Bündeln von einer jährlichen Gesamtbetriebsleistung von 7.540.700 Kilometern ausgegangen [37].

Die Betriebsaufnahmen der Linienbündel liegen im Zeitraum 2025 bis 2027; die Auswirkungen von CVD und SaubFahrzeugBeschG werden in Kapitel 3.3 näher betrachtet.

Linienbündel NEU	Benennung	Betriebsaufnahme	Linienübersicht Linien im 10er Bündel	Betriebskilometer (km) ohne A-Linien
Linienbündel 1 (neu)	Stadverkehr Göppingen*	*01.06.2026	901, 901A, 902, 903, 904, 905, 906, 933*, 933A*, 980*, 980A*, 997, N94	882.700
Linienbündel 2 (neu)	Eberbach/Schurwald	*01.06.2027	912, 912A, 913, 913A, 916, 916A, 917, 918, 930*, N90	657.500
Linienbündel 3 (neu)	Unteres Filstal	01.06.2027	911, 911A, 914, 914A, 915, N91	504.800
Linienbündel 4 (neu)	Voralb-West	01.06.2026	920, 920A, 921, 921A, 922, 922A, 923, 924*, 924A, N92	1.010.000
Linienbündel 5 (neu)	Ostlicher Schurwald	01.12.2025	931, 931A, 932, 932A, 934, 934A, 935, N93	1.170.200
Linienbündel 6 (neu)	Mittleres Filstal	01.12.2025	940, 941, 941A, 942, 943	536.700
Linienbündel 7 (neu)	Süßen	01.12.2026	951, 951A, 970, 971, 972, 972A, N97	829.500
Linienbündel 8 (neu)	Voralb-Ost	01.12.2027	981, 981A, 982, 983, 983A, 984, 984A, RW1, RW2, N98	729.000
Linienbündel 9 (neu)	Oberes Filstal	01.12.2027	961, 965, 965A, 966, 966A, 967, 968, N96, N99	696.100
Linienbündel 10 (neu)	Geislingen/Bohmenkrich	01.12.2026	950, 950A, 952, 957, 958, 958A, 959, 962*, 963*, 964*, N95(+R)	524.200
*Nachtbuslinien (mit N gekennzeichnet) *RadWander-Busse (Mit RW) gekennzeichnet				
Gesamtfahrleistung der 10 Bündel (2022):				<b>7.540.700</b>

Abbildung 3 Übersicht neue Linienbündel nach NVP 2022

Zudem ist die im Nahverkehrsplan festgehaltene Option zu beachten, verschiedene On-Demand-Shuttleservices einzuführen. Sollten diese Fahrzeuge unter die Kategorie der leichten Nutzfahrzeuge fallen und neu beschafft werden, kämen auch hier die Regelungen von CVD und SaubFahrzeugBeschG zur Anwendung. Je nach Situation könnte die Einhaltung von Emissionsgrenzwerten von 50 Gramm CO<sub>2</sub> pro Kilometer bei bis Ende 2025, bzw. von 0 g CO<sub>2</sub> bei zwischen Anfang 2026 und Ende 2030, durch die zu beschaffende Fahrzeugen erforderlich werden.

### 3.3 Anforderungen an die zu beschaffenden Busse

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die CVD und deren Umsetzung in nationales Recht durch das SaubFahrzeugBeschG, sowie die aktuellen Busverkehre und die bevorstehende Neustrukturierung der Linienbündel vorgestellt. Nachfolgend werden die konkreten Auswirkungen betrachtet, welche die neue Gesetzeslage auf die anstehenden Neuvergaben der zehn zukünftigen Bündel hat. Dazu stellt Abbildung 4 den gesetzlichen Anforderungen den Bestand an Dieselnissen sowie die Neuvergaben gegenüber und weist die Anzahl der zukünftig zu beschaffenden emissionsarmen- und freien Busse aus. Die in Kapitel 2.1 dargestellten Beschaffungsquoten werden auf den aktuellen Busbestand im Landkreis Göppingen projiziert: Im Zuge der geplanten Ausschreibungsprozesse zwischen 2023 und 2025 müssen mindestens 45 % der zu beschaffenden Busse emissionsarm und davon wiederum die Hälfte emissionsfrei sein. Demnach müssen 34 der 151 Busse emissionsarm und weitere 34 Busse emissionsfrei sein. Im zweiten Ausschreibungszeitraum von 2025 bis 2027, in welchem auch die Neustrukturierung der Linienbündel erfolgt, wird die Beschaffungsquote sauberer bzw. emissionsfreier Busse auf 65 % erhöht. Daraus entsteht die Verpflichtung, 49 emissionsarme und 49 emissionsfreie Busse zu beschaffen.

Sollten durch den Gesetzgeber bis 2030 keine neuen Mindestziele festgelegt werden, bestehen die oben dargestellten Quoten fort. Dies gilt jedoch als unwahrscheinlich, da bereits im Zuge der Debatten um das Verbot von Verbrennungsmotoren in der EU ab 2035 verpflichtende Beschaffungsquoten von 100 % aller neuen Busse ab 2030 diskutiert wurden [25] und die europäische Kommission im Februar 2023 einen entsprechenden Gesetzesentwurf veröffentlichte [17].

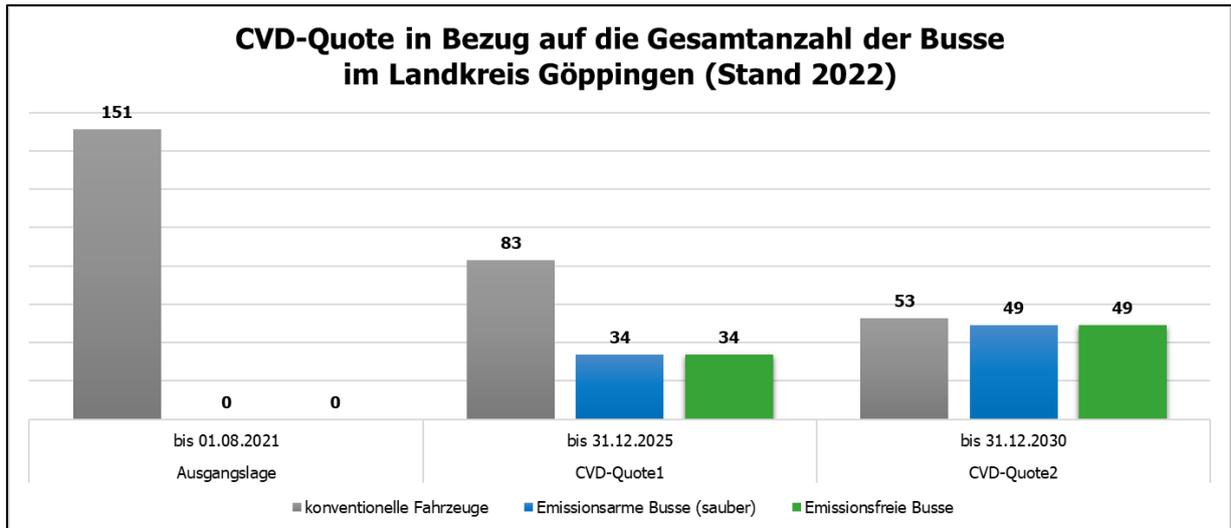


Abbildung 4 Beschaffungsszenarien nach CVD-Richtlinie (eigene Darstellung)

## 4. Technologien und Marktangebot emissionsfreier Busse

In diesem Kapitel werden batterie- und brennstoffzellenelektrische Busse vorgestellt. Beide Antriebskonzepte werden mit einem Elektromotor angetrieben und verfügen über eine Hochvolt-Traktionsbatterie für die Speicherung von Strom, sowie eine Steuerungselektronik. Die Batterie eines batterieelektrischen Busses ist allerdings wesentlich größer dimensioniert als die eines brennstoffzellenelektrischen Fahrzeugs, da sie allein die Energiespeicherung übernimmt. Bei FCEVs wird die Energie großteils mittels gasförmigen Wasserstoffs in Drucktanks gespeichert und in einer Brennstoffzelle zu Strom gewandelt, während die Traktionsbatterie im Wesentlichen zur Optimierung des elektrischen Gesamtsystems beiträgt. Die Vorteile von BEVs liegen in der höheren Energieeffizienz und den geringeren Anschaffungskosten einzelner Fahrzeuge, wohingegen FCEVs mit höheren Reichweiten und größerer betrieblicher Flexibilität punkten. Beide Technologiekonzepte sind bezüglich ihrer technologischen Reife nicht mit Dieselbussen zu vergleichen und die Leistungsmerkmale sowie Zuverlässigkeit einzelner Modelle unterscheiden sich mitunter deutlich.

### 4.1 Batterieelektrische Busse

Voraussetzung für die Beschaffung von emissionsfreien Bussen ist das Vorhandensein eines auskömmlichen Marktangebots. Auch als Grundlage für die spätere Analyse der Eignung batterie- bzw. brennstoffzellenelektrischer Busse zur Bedienung ausgewählter Strecken wird im Folgenden ein knapper Überblick aktuell verfügbarer Fahrzeuge präsentiert. Tabelle 1 stellt beispielhaft einige BEV-Modelle vor, welche bereits an verschiedenen Standorten im regulären Einsatz sind und prinzipiell auch für die Bedienung der Busverkehre im Landkreis Göppingen genutzt werden könnten. Die vorgestellten Konzepte werden auch als *Depotlader* und *Gelegenheitslader* bezeichnet und stellen die am weitesten verbreiteten Optionen dar, wobei die Depotlader klar dominieren und erfahrungsbasierten, vorläufigen Einschätzungen zufolge auch die für Göppingen relevanteste Alternative darstellen. Gestützt wird diese Erwartung durch eine Erhebung des Bundes, der zufolge sich 87 % der in einer Fördermaßnahme unterstützten Verkehrsbetriebe für eine Depotladung und nur 13 % für eine Gelegenheitsladung entschieden [20].

	Daimler eCitaro [41, 40]	Caetano e.City Gold [6]	Irizar ie Bus 12 [27, 58]	MAN Lion's City 12 E [58]
				
Länge [m]	12	12	12	12
Personenkapazität (Sitzplatz + Stehplatz)	88 (29 + 59)	87 (35 + 52)	80 (33 + 47)	88 (25 + 63)
Batteriekapazität [kWh]	396 (Li.-Ion) 441 (FSTB)	385	470	480
Ladetechnik	Plug-In, Pantograf	Plug-In, Pantograf	Plug-In, Pantograf	Plug-In, Pantograf
Ladestrategie	Gelegenheits-, Depotladung	Gelegenheits-, Depotladung	Gelegenheits-, Depotladung	Gelegenheits-, Depotladung
max. Ladeleistung [kW]	150 (Pantograf: 300)	150	150 (Pantograf: 300)	150
Reichweite [km] (Herstellerangaben)	≈ 320	≈ 300	250 - 300	350
Einsatzorte	Hamburg	k.A.	Düsseldorf	Hamburg

Tabelle 1 Marktübersicht batterieelektrischer Busse, Herstellerangaben

Jegliche Beschaffung batterieelektrischer Busse setzt den Aufbau bzw. das Vorhandensein einer geeigneten Stromladeinfrastruktur voraus. Abbildung 5 stellt eine Übersicht verfügbarer oder realisierbarer Infrastrukturoptionen vor. Das Spektrum der Ladestrategien reicht von Konzepten der Übernachtladung in Busdepots, über unterschiedliche Möglichkeiten der Gelegenheitsladung, bis hin zu Batterie-wechselkonzepten.

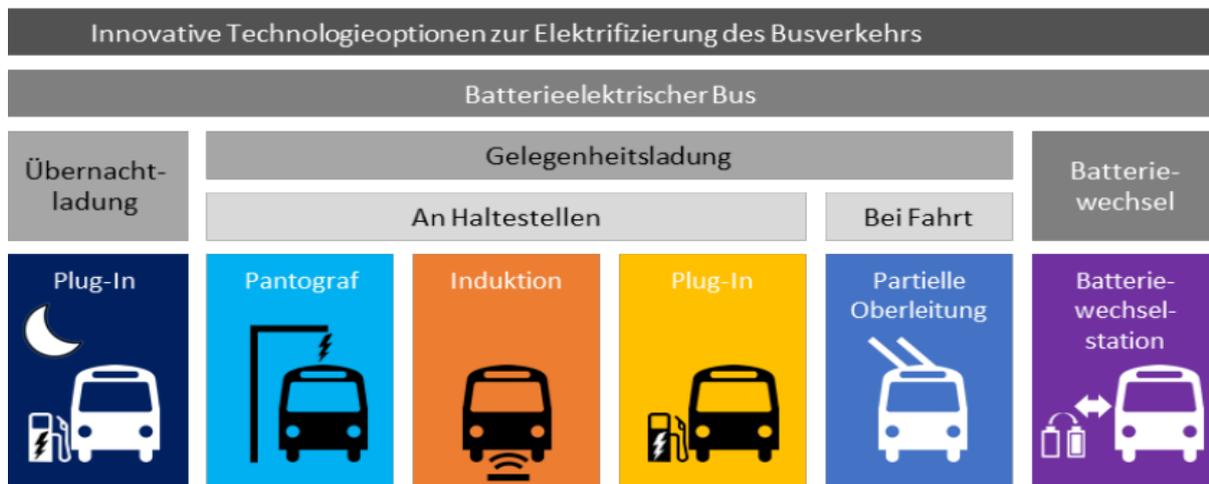


Abbildung 5: Übersicht Lademöglichkeiten für batterieelektrische Busse [35]

Für den Landkreis Göppingen sind die Optionen Batteriewechselstation und partielle Oberleitung auszuschließen, da der Aufbau entsprechender Infrastrukturen nicht tragbare Kosten zeitigen würde. Aus diesem Grund werden in Tabelle 1 ausschließlich Busse aufgeführt, die über Plug-In Ladetechnik verfügen und zudem die Nutzung von Pantografen ermöglichen. Dadurch können Ladekonzepte mit Nachtladung im Depot, Plug-In-Ladung an ausgewählten Streckenhaltepunkten, oder leistungsstarke Ladungen mittels eines Pantografen an Haltestellen realisiert werden. Zudem sind Anpassungen des Lade-Managements in Betracht zu ziehen, welche z.B. Ladefenster auch tagsüber außerhalb der Hauptverkehrszeiten beinhalten [35].

## 4.2 Brennstoffzellenelektrische Busse

Analog zur erfolgten Marktübersicht für BEV-Busse wird nachfolgend ein knapper Überblick derzeit marktlich verfügbarer brennstoffzellenelektrischer Busse geboten, die auch im Landkreis Göppingen zum Einsatz kommen könnten. Bei allen Modellen liefert die Brennstoffzelle den Großteil der Antriebsenergie, wenngleich die Fahrzeuge in unterschiedlichem Maße hybridisiert sind und eine Traktionsbatterie nutzen. Vereinfachend ausgedrückt handelt es sich um *brennstoffzellendominante* Antriebssysteme. Als weiteres Antriebsstrangkonzzept sind auch *Brennstoffzellen-Range-Extender* relevant, bei denen eine größer dimensionierte Batterie extern aufgeladen und während der Fahrt per vergleichsweise leistungsschwacher Brennstoffzelle nachgeladen wird [44]. Allerdings sind Busse dieses Technologiekonzepts, die z.B. von der Firma *evobus* angekündigt wurden und Reichweiten bis zu 400 km erreichen sollen [47], derzeit noch nicht marktlich verfügbar.

	van Hool A330 new [71, 58]	Caetano H2 City Gold [3, 58]	Solaris Urbino 12 Hydr. [73]	Wrightbus GBKite Hydro. [70]
				
Länge [m]	12	12	12	12
Leistung Brennstoffzelle [kW]	83	60	70	70 oder 100
Personenkapazität (Sitzplatz + Stehplatz)	75 (35 + 40)	76 (37 + 39)	74 (34 + 40)	88 (37 + 57)
Tankkapazität [kg]	38,5 (35,8)	37,5	37,5 (34,2)	32 40 50
Druckniveau [bar]	350	350	350	350
Reichweite [km] (Herstellerangaben)	350	max. 400	450	bis zu 720
Einsatzort	Köln	DB Regio [56]	Wuppertal, Köln	Köln

Tabelle 2: Marktübersicht brennstoffzellenelektrischer Busse, Herstellerangaben

## 4.3 Grobabschätzung Verfügbarkeit und Kosten Busse

Alle der in Kapitel 4.1 und 4.2 vorgestellten Busse sind prinzipiell lieferbar. Allerdings sind die Lieferzeiten individueller Busmodelle stark situationsbedingt und lassen sich pauschal nur ungefähr beziffern. Bei brennstoffzellenelektrischen Bussen gehen einzelne Quellen von einer Lieferzeit von mehr als einem Jahr aus [32]. Für batterieelektrische Bussen betrug die Lieferzeit im Jahr 2019 noch bis zu 18 Monaten [34]. Aufgrund der in den letzten Jahren gestiegenen Produktionskapazitäten und Nachfragemengen kann aktuell von kürzeren Lieferzeiten ausgegangen werden. Grundsätzlich erscheinen Lieferzeiten von etwa einem Jahr für beide Antriebstechnologien realistisch [19].

Die Anschaffungskosten batterieelektrischer 12-Meter-Busse werden vom Consulting-Unternehmen *PwC* mit 550.000 Euro angegeben [50]. Die Beratungsgesellschaft *Sphera* geht von Investitionskosten über 560.000 Euro für einen batterieelektrischen Standardbus aus [59]. Andere Quellen nennen 500.000 Euro [22] oder bis zu 600.000 Euro [42] Anschaffungskosten pro batterieelektrischem Bus. Unter Würdigung der genannten Quellen werden für die spätere Ermittlung der Gesamtbetriebskosten, der sog. *Total Cost of Ownership* (TCO) Anschaffungskosten von 550.000 Euro für batterieelektrische Standardbusse angenommen.

Für brennstoffzellenelektrische Busse werden bei Sphera optimistische Beschaffungskosten von 595.000 Euro [59] angesetzt, während andere Quellen von 580.000 [66] bis zu 650.000 Euro ausgehen [44]. Letztere Angabe deckt sich mit weiteren Quellen, die von 650.000 Euro Anschaffungskosten berichten [74, 13]. Dieser Wert wird für spätere TCO-Betrachtungen herangezogen.

Damit sind die Anschaffungskosten einzelner Batteriebusse geringer als die einzelner Brennstoffzellenbusse. Allerdings wird beim Ersatz ganzer Dieselbusflotten oftmals die Beschaffung zusätzlicher BEVs erforderlich, um reichweitenbedingte Einschränkungen zu kompensieren, sollte dies nicht durch Anpassungen im Umlauf- und Lademanagement möglich sein. Da entsprechende Mehrbeschaffungen bei Nutzung von FCEVs nicht notwendig sind, kann der Kostenvorteil einzelner BEVs bei Flottenaustauschen oft nicht aufrechterhalten werden. Zudem sind die Anschaffungskosten nur ein Faktor der letztlich ausschlaggebenden Gesamtbetriebskosten und damit von nur bedingter Aussagekraft. In Abschnitt 6.3 wird eine exemplarische TCO-Analyse vollzogen, welche u.a. auch Kraftstoff- und Personalkosten berücksichtigt.

## 5. Kraftstoff-Infrastrukturen für Busse

Nachfolgend werden die Kraftstoff-Infrastrukturen dargestellt, welche für den Betrieb batterie- und brennstoffzellenelektrische Busse erforderlich sind. Da ein Stromnetz bereits vorhanden ist und der Ausbau der Ladeinfrastruktur darauf basieren kann, fokussiert die diesbezügliche Diskussion auf die eigentlichen Ladeoptionen für BEVs. Die Betrachtung der Kraftstoffversorgung von FCEVs ist jedoch weiter gefasst und beinhaltet Aspekte der vorgelagerten Wasserstoffbereitstellung, da entsprechende Infrastrukturen erst ansatzweise bestehen. Dies bedeutet aber nicht, dass der Infrastrukturaufbau für BEVs auch längerfristig weniger aufwändig als der für FCEVs zu gestalten ist; verschiedenen Studien zufolge kehrt sich mit wachsender Marktdurchdringung die Situation um [11]. Das hat auch damit zu tun, dass das bestehende Stromnetz ausgebaut werden müsste, um zunehmende Nachfragen aus dem Verkehrsbereich decken zu können.

### 5.1 Stromversorgung für batterieelektrische Busse

Ausgehend von der Darstellung verschiedener Lademöglichkeiten für batterieelektrische Busse in Kapitel 4.1 sowie der dort vorgeschlagenen Fokussierung werden nachfolgend die Konzepte der Depot- und Gelegenheitsladung vertiefend erläutert.

Gemäß dem *technischen Leitfaden für die Ladeinfrastruktur Elektromobilität des Verbands der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik (VDE)* wird ein Gleichstrom-Ladekonzept empfohlen, sobald BEVs über große Batteriekapazitäten verfügen und schnelle Ladezeiten gefordert sind. Daher legt auch die vorliegende Untersuchung ein Gleichstrom-Ladekonzept nahe [65].

Das Laden sog. Depotlader-Busse findet meistens über Nacht auf dem Betriebshof statt. Ansonsten besteht die Möglichkeit einer Nachladung im Depot während den Pausenzeiten. Depotlader zeichnen sich durch große Batteriekapazitäten aus, welche auskömmliche Reichweiten ohne Nachladen ermöglichen. Die Energieübertragung erfolgt über ein Ladekabel mit Stecker oder über einen Pantografen, der in der Infrastruktur im Depot oder am Fahrzeug verankert ist. Zur Vermeidung von Lastspitzen wird die Nutzung eines Lademanagementsystems empfohlen [20]. Als Beispiel für gelungene Depotladekonzepte werden die *Basler Verkehrs-Betriebe (BVB)* bemüht: Die Busse werden im Depot über einen fahrzeugseitigen Pantografen geladen, welcher die Ladehaube der Ladestation kontaktiert und Ladeleistungen bis zu 150 kW ermöglicht. Ein Lademanagementsystem passt die Ladeleistungen einzelner

Busse an die jeweiligen Bedarfe an. Hierfür werden der Ladezustand der Batterie, die Abfahrtszeit und der prognostizierte Energiebedarf des Busses berücksichtigt [2].

Beim Konzept der Gelegenheitsladung wird die Batterie mehrmals am Tag nachgeladen, wofür festgelegte Wende- oder Standzeiten reserviert werden. Dies erfordert einen liniennahen Aufbau der Infrastruktur und eine Installation mindestens eines Pantografen mit einer Ladeleistung von bis zu 450 kW. Der Anschluss der Ladeinfrastruktur an das Stromnetz gilt als Herausforderung, da an den relevanten Netzanschlusspunkten hohe Ladeleistungen im Bereich von 250 bis 450 kW abrufbar sein müssen. Darüber hinaus muss zur Gewährleistung eines verlässlichen Busbetriebs ggf. ein weiterer Ladepunkt vorgehalten werden, der beim Ausfall des ersten Ladepunkts als Redundanz dienen kann. Der damit verbundene zusätzliche Platzbedarf kann von Nachteil sein [20].

Die als kritisch erkannten Netzanschlusspunkte sollten bei der Infrastrukturplanung besondere Aufmerksamkeit erfahren. Frühzeitig sollte der Kontakt zum Netzbetreiber gesucht werden, um die Anschluss- bzw. Stromverfügbarkeit am Betriebshof, avisierten Gelegenheitsladepunkt oder einer im Bündel platzierten Ladeinfrastruktur zu ermitteln. Eine Auskunftspflicht besteht ohne formales Netzanschlussbegehren jedoch nicht. Nach Einholung erster Einschätzungen der gewünschten Anschlussleistung kann der Netzbetreiber ein Zeit- und Kostenbudget für die Schaffung eines ausreichend dimensionierten Netzanschlusses ermitteln. Je nach Situation kann ein Anschluss in einigen Monaten erfolgen oder auch bis zu zwei Jahre dauern [20].

Der Netzanschluss erfolgt bis zu einer erforderlichen Ladeleistung von 250 kW an das Niederspannungsnetz. Sind höhere Leistungswerte notwendig, wird ein direkter Anschluss an das Mittelspannungsnetz vorgenommen, welcher die Errichtung einer Trafostation verlangt [20].

Grundlegend für die Auslegung jeglicher Anschlussleistung und Ladeinfrastruktur ist die Zeit, die die Fahrzeuge im Betriebshof verweilen, sowie die Anzahl der gleichzeitig zu ladenden Busse [20]. Für eine klassische Nachtladung im Depot werden grob 75 bis 100 kW Ladeleistung pro Bus veranschlagt. Schon früh im Planungsprozess einer Ladeinfrastruktur sollten mögliche Ausbaustufen definiert und spätere Anschlusserweiterungen berücksichtigt werden [57].

## 5.2 Wasserstoffbereitstellung für brennstoffzellenelektrische Busse

Während der Aufbau einer Ladeinfrastruktur für batterieelektrische Busse nicht unerhebliche Herausforderungen mit sich bringt, sind im Falle der Wasserstoffversorgung brennstoffzellenelektrischer Fahrzeuge überdies Aspekte der Herstellung, des Transports und Abgabe des Kraftstoffs verstärkt zu berücksichtigen. Die zunächst höhere Komplexität kann sich aber in einen Vorteil wandeln, sofern eine Anbindung verkehrlicher Nutzungsszenarien für Wasserstoff an die nachfolgend geschilderten, großskaligen Infrastrukturvorhaben gelingt.

### 5.2.1 Wasserstoffproduktion

Wasserstoff kann mit einer Vielzahl von Verfahren auf Grundlage fossiler wie auch erneuerbarer Energien produziert werden. Bislang wird der bei Weitem größte Teil des weltweit genutzten Wasserstoff auf Basis fossiler Energien hergestellt und in industriellen Prozessen eingesetzt [10]. Im Kontext zunehmender internationaler Bemühungen um Klimaschutz ändert sich jedoch das Bild: So zielt die *nationale Wasserstoffstrategie* der Bundesregierung primär auf grünen Wasserstoff, der per Wasserelektrolyse auf Basis erneuerbarer Energien hergestellt wird [7]. Die älteste und am weitesten verbreitende Unterart ist die *alkalische Elektrolyse* (AEL). Sie steht kostengünstig zur Verfügung und spielt ihre Vorteile v.a. bei großen Elektrolyseanlagen aus [11]. Die *Polymer-Elektrolyt-Membran-Elektrolyse* (PEMEL)

etabliert sich seit einigen Jahren am Markt. Sie ist besonders gut für fluktuierende erneuerbare Energien und dezentrale Anwendungen geeignet und bildet trotz höherer Investitionskosten eine vielversprechende Alternative zur AEL [54]. Obwohl der nationalen Wasserstoffstrategie zufolge der größte Teil der zukünftig benötigten, erheblichen Wasserstoffmengen importiert werden muss, ist es auch im Sinne der Versorgungssicherheit wichtig, einen *Heimatmarkt* mit umfassenden Elektrolysekapazitäten zu schaffen.

### 5.2.2 Transport von Wasserstoff

Wird Wasserstoff für die Mobilität und andere Anwendungen dezentral bzw. vor-Ort hergestellt, entfällt ein weiterer Transport. Bei zentraler Produktion bzw. bei Bezug des Wasserstoffs von einem anderen Ort hingegen ist ein Transport erforderlich, bei dem Wasserstoff entweder in speziellen Lkw, sog. *Trailern*, oder in Pipelines zum Verbrauchsort befördert wird.

Für kleinere Mengen Wasserstoff, die über eine kurze bzw. mittlere Distanz transportiert werden, ist der Transport per Trailer im gasförmigen Zustand zu bevorzugen. Derzeit sind Wasserstoff Trailer mit einem Druckniveau von 200 bis 500 bar marktlich verfügbar, wobei der Standard bei 200 bar liegt. In Abhängigkeit vom Druckniveau können Trailer 300 bis 1.000 kg Wasserstoff transportieren [28, 23]. Beispielsweise können mit einem 300-bar-Trailer bis zu 500 kg Wasserstoff befördert werden [28, 48].

Bei mittleren Mengen und längeren Wegstrecken wird der Wasserstoff bei  $-252^{\circ}\text{Celsius}$  verflüssigt und in entsprechend ausgelegten Trailern befördert. Aufgrund der größeren Energiedichte von Flüssigwasserstoff können bis zu 4.000 kg per Lkw transportiert werden. Ungeachtet der Vorteile hinsichtlich der Transports muss der bei der Verflüssigung anfallende hohe Energiebedarf berücksichtigt werden [28].

Als weitere Transportmöglichkeit werden als *Liquid Organic Hydrogen Carriers* (LOHC) bekannte flüssige Wasserstoff-Träger erprobt. Bei diesem Verfahren wird Wasserstoff an flüssige Trägermaterialien gebunden und bei Bedarf wieder freigesetzt, wodurch eine relativ einfache Handhabung des Wasserstoffs erreicht werden kann. Allerdings muss sich die Praxistauglichkeit von LOHC für die Kraftstoffversorgung der Mobilität erst noch erweisen [28, 43].

Pipelines unterschiedlicher Länge sind besonders für den kostengünstigen Transport großer Mengen von Wasserstoff geeignet und werden vorwiegend für industrielle Anwendungen genutzt. Für den Transport reinen Wasserstoffs kommen sowohl speziell dafür ausgelegte Pipelines, wie auch für Wasserstoff umgerüstete Erdgaspipelines in Frage. Zudem kann Wasserstoff Erdgas bis zu gewissen Konzentrationen beigemischt und im bestehenden Erdgasnetz transportiert werden, was dem schrittweisen Aufbau von Infrastrukturen zur Herstellung und Nutzung von Wasserstoff zugutekommt. Da der nationalen Wasserstoffstrategie zufolge die zukünftig benötigten Mengen an Wasserstoff großteils importiert werden müssen, werden voraussichtlich alle drei genannten Optionen des rohrgelassenen Wasserstofftransports eine wesentliche Rolle spielen.

Diesbezüglich werden aktuell europa- und weltweit diverse Großprojekte vorangetrieben, von denen drei nachfolgend vorgestellt werden: Im Vorhaben *European Hydrogen Backbone* wird derzeit ein europaweites Wasserstoff-Pipelinennetz konzipiert, welches großteils auf dem bestehenden Erdgasnetz basiert und bis zum Jahr 2040 auch baden-württembergische Erdgas- bzw. Wasserstoff-Infrastrukturen einbinden soll [29]. Als Fernleitungsnetzbetreiber für Gas strebt *terranets bw* den vollständigen Umstieg von Erdgas auf Wasserstoff zwischen 2030 und 2040 an und legt den anstehenden Neubau der *süddeutschen Erdgasleitung* (SEL) auf Wasserstofftauglichkeit aus. Abbildung 6 stellt den geplanten Pipelineverlauf von Lampertheim (Hessen) nach Esslingen bis 2035 dar. Obgleich gemäß aktueller Planung die SEL den Bereich 3b einschließlich des Landkreis Göppingen nicht erreicht, ist bei Meldung hinlänglicher Wasserstoffbedarfe eine Verlängerung der Pipeline bis nach Bayern (unterbrochener Li-

nienverlauf) möglich. Dann könnte der Landkreis Göppingen Wasserstoff z.B. für die Kraftstoffversorgung von Brennstoffzellenbussen zu deutlich geringeren Kosten beziehen, als dies bei dezentralen Produktion bzw. Transport per Trailer möglich wäre [61].

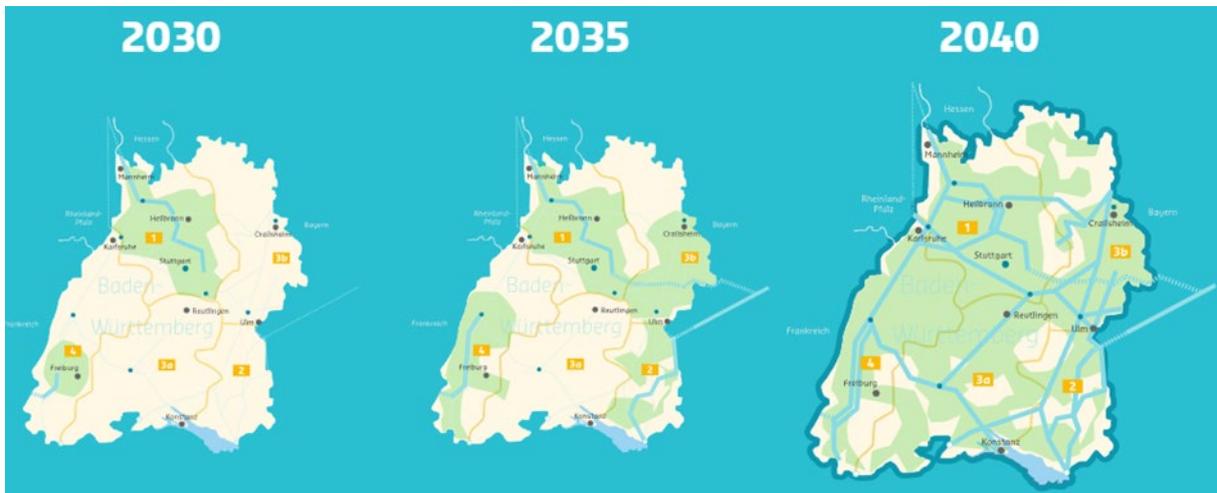


Abbildung 6: geplante Wasserstoffpipelines in Baden-Württemberg [61]

Von Bedeutung ist auch eine zweite Wasserstoffpipeline, deren Realisierung derzeit im Rahmen des Verbundprojekts *H2 GeNeSiS: Wasserstoff-Gesamtsystem entlang des Neckars als Basis für eine Skalierung der Wasserstoffwirtschaft in der Region Stuttgart* vorbereitet wird. Die über 10 km lange Pipeline verläuft zwischen Stuttgart-Gaisburg und Esslingen. Die Pipeline fungiert als Kernelement eines Marktplatzes für grünen Wasserstoff, in dem Erzeuger wie auch Verbraucher partizipieren. So sollen mehrere Elektrolyseure grünen Wasserstoff liefern, welcher nach dem Pipelinetransport von Brennstoffzellenbussen genutzt werden kann. Die Pipeline soll etwa 2024 in Betrieb gehen und - deutlich vor der SEL – größere Wasserstoffmengen kostengünstig transportieren [69, 60].

Neben großskaligen Wasserstoff-Bereitstellungsinfrastrukturen sind auch nachfragestarke Verbraucher absehbar: Insbesondere hat der Energieversorger EnBW unter der Überschrift *von Kohle über Gas zu Wasserstoff: Die Brücke in die Energiezukunft* angekündigt, mehrere Kraftwerke auf Wasserstoff umzustellen [15]. Dazu zählt auch das Kraftwerk Altbach/Deizisau nahe Esslingen, das gegen Mitte der 2030er Jahre auf erneuerbaren Wasserstoff oder andere grüne Gase umgestellt werden soll.

### 5.2.3 Wasserstofftankstellen

Ungeachtet der verschiedenen dargelegten Optionen für Wasserstoffherstellung und –transport ergibt sich letztendlich die Notwendigkeit der Abgabe an einer Tankstelle, soll der Wasserstoff als Kraftstoff verwendet werden. Grundsätzlich ist eine Vielzahl von Auslegungen von Wasserstofftankstellen praktikabel, die sich u.a. hinsichtlich der zu betankenden Fahrzeuge (Busse, Pkw, schwere und leichte Lkw, etc.), Aggregatzustände des Wasserstoffs (gasförmig, flüssig), Druckniveaus von gasförmigem Wasserstoff (350 und/oder 700 bar), Speicher- und Abgabemengen, Anzahl der *Dispenser* (Zapfanlagen), Art der Wasserstoffversorgung (v.a. vor-Ort Herstellung, Anlieferung per Trailer oder Pipeline), Auslegung von Kompressoren und Kühlanlagen, sowie weiterer Parameter unterscheiden [11, 21].

Für die Betankung von Brennstoffzellenbussen kommen regelmäßig verhältnismäßig leistungsstark ausgelegte 350-bar-Tankstellen zum Einsatz, die sich vielfach bewährt haben und als robust gelten. Für die Kraftstoffversorgung einer kleinen Busflotte kann schon eine einzige Anlage genügen; aufgrund der überschaubaren Aktionsradien und strikten Betankungsregime der Busse sind keine aufwändigen Tankstellennetzwerke erforderlich [11].

Abbildung 7 stellt beispielhaft den Aufbau einer 350-bar-Wasserstofftankstelle für Busse und andere Nutzfahrzeuge dar. Die Hauptkomponenten beinhalten Druckspeicher, mehrere Kompressoren zur Verdichtung des Wasserstoffs auf das gewünschte Druckniveau, Mess- und Regelungstechnik für den Betankungsvorgang, eine Kühleinheit zur sicherheitstechnisch gebotenen Vorkühlung des Wasserstoffs, sowie zwei Dispenser für die Abgabe an Fahrzeuge [23]. Im Beispiel wird der Wasserstoff gasförmig per Wechseltrailer angeliefert. Der Betankungsprozess erfolgt durch den Prozess des sog *Überströmens* hoch verdichteten Wasserstoffs vom Trailer-Tank direkt in die zu betankenden Fahrzeuge. Sobald sich ein Druckausgleich einstellt schaltet sich ein Kompressor zu, welcher den Wasserstoff verdichtet und eine vollständige Betankung ermöglicht. Um auch bei mehreren aufeinanderfolgenden Betankungsvorgängen eine ausreichende Wasserstoffverfügbarkeit zu gewährleisten werden zusätzliche Mitteldruckspeicher als Puffer installiert [23].

Das exemplarisch vorgestellte Tankstellenkonzept kann entsprechend der eingangs beschriebenen, vielfältigen Auslegungsvarianten angepasst werden. Beispielsweise kann der Wasserstoff vor Ort per Elektrolyse erzeugt werden oder eine Belieferung mittels anderer Trailer oder per Pipeline erfolgen. Andere Auslegungsoptionen beinhalten die Erweiterung um einen 700-bar-Betankungspfad für brennstoffzellenbetriebene Pkw, leichte Nutzfahrzeuge oder Müllsammelfahrzeuge [28], [23]. Bei der Auslegung sind neben den lokal anzutreffenden Betankungsbedarfen sowie der Bereitstellungssituation auch infrastrukturenspezifische regulative Rahmenbedingungen zu berücksichtigen. So sind die Mitgliedsstaaten der EU gemäß eines aktuellen Gesetzentwurfs verpflichtet, eine Mindestanzahl von 700-bar-Wasserstofftankstellen vorzuhalten, welcher sich durchaus auch auf die Planungen einzelner Landkreise auswirken kann [16].

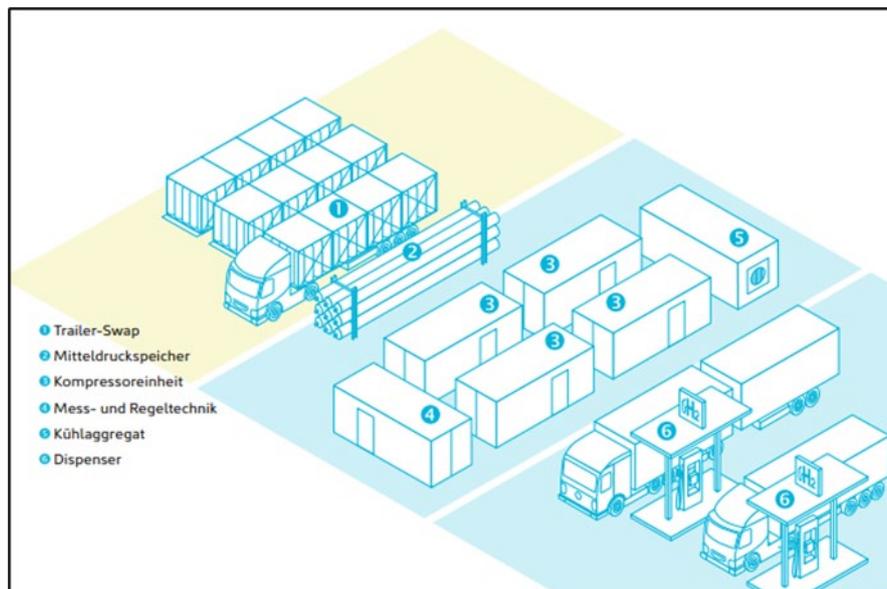


Abbildung 7: mögliche Konfiguration einer 350-bar Tankstelle für Nutzfahrzeuge [23]

### 5.3 Grobabschätzung Kosten von Infrastrukturelementen

Im Folgenden wird eine beispielhafte Darstellung der Investitionskosten ausgewählter Kraftstoff-Infrastrukturelemente vollzogen, welche bei entsprechenden Projektplanungen zu berücksichtigen sind. Da jegliche Kraftstoff-Infrastrukturen für batterie- und brennstoffzellenelektrische Busse spezifischen Umständen unterliegen sowie individuelle Auslegungen und Kapazitäten widerspiegeln, können die Kostenbeispiele nur eine ungefähre Orientierung bieten. Die beschriebenen Elemente sind marktlich verfügbar, unterliegen aber Preisschwankungen und variablen Lieferkonditionen.

Zu den wichtigsten Kostenpositionen einer Infrastruktur für batterieelektrische Busse zählen die Ladesäulen und der Netzanschluss. Konzepte der Depotladung müssen eine anforderungsgerechte Anzahl an Ladesäulen beinhalten. Die Investitionskosten werden durch die insgesamt und maximal erforderlichen Ladeleistungen bedingt. Im Rahmen einer von STEM durchgeführten Herstellerabfrage konnten Kosten von ca. 40.000 Euro für 120-kW-Ladesäulen ermittelt werden [64]. Eine Alternative zu Ladesäulen können Pantografen sein, welche eine Platzersparnis im Depot ermöglichen.

Bereits in Kapitel 5.1 wurde auf die Bedeutung von Netzanschlüssen verwiesen. Im Kontext einer Depotaladeinfrastruktur ist ein Anschluss an das Mittelspannungsnetz notwendig, welcher mit substantiellen Netzanschlussgebühren einher geht. Des Weiteren können Netzbetreiber einen Baukostenschlag verlangen, der ca. 100 €/kW Anschlussleistung beträgt. Der Anschluss an das Mittelspannungsnetz erfordert zudem den Bau eines Transformators, dessen Kosten im fünfstelligen Euro-Bereich liegen und z.B. im Falle einer Leistung von 500 kW um die 40.000 Euro betragen [20].

Hinzu kommen diverse weitere Kostenpositionen z.B. für Energiespeicher und Bauarbeiten, die aber nicht pauschal zu beziffern sind. Festzuhalten bleibt, dass der Infrastrukturaufbau mit erheblichen und situationsbedingt sehr unterschiedlichen Kosten einhergeht, welche die Kosten einer vergleichbaren Kraftstoffversorgung für Dieselfahrzeuge weit übersteigen.

Der Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur ist weitaus komplexer, aber nicht unbedingt teurer als der einer Ladeinfrastruktur. Angesichts der oben erläuterten Vielzahl von Auslegungen von Wasserstofftankstellen sind an dieser Stelle nur wenige beispielhafte Kostenaussagen angebracht. Einer anwendungsnahen Studie zufolge betragen im Jahr 2017 die Investitionskosten einer Tankstelle für 50 Brennstoffzellenbusse etwa fünf Millionen Euro und stiegen bei einer Anlage mit Vor-Ort-Wasserstoffproduktion per Wasserelektrolyse auf etwa zwölf Millionen Euro sind aber seitdem stark gestiegen [11]. Andere Quellen benennen ein Investitionsvolumen von drei Millionen Euro für eine Tankstelle, die 1.000 kg Wasserstoff pro Tag abgeben und eine kleine Busflotte versorgen kann [5].

Auch im Falle der Wasserstoff-Infrastruktur bleibt zu konstatieren, dass die Investitionskosten hochgradig situationsspezifisch und nicht pauschal bezifferbar sind. Belastbare Kostenaussagen können erst im Zuge konkreter Projektplanungen und Angebotsanforderungen getroffen werden, wobei von beträchtlichen Mehrkosten gegenüber einer konventionellen Kraftstoffversorgung auszugehen ist.

Auch hinsichtlich der Investitionskosten für Infrastrukturen gilt, dass sie isoliert betrachtet wenig aussagekräftig sind und nur Analysen der Gesamtbetriebskosten Kostenrelationen verlässlich abbilden.

## 6. Betrachtung zukünftiger Busbetriebe im Landkreis

Die Ausgestaltung des zukünftigen Busbetriebs im Landkreis Göppingen steht im Zentrum der vorliegenden Untersuchung und liefert Detailbetrachtungen zum Einsatz von Nullemissionsbussen auf ausgewählten Umläufen. Dies schließt eine nähere Betrachtung zur Umlaufbedienung geeigneter Brennstoffzellenbusse, sowie eine Bewertung von Gesamtbetriebskosten und Umwelteffekten ein. Da die exemplarischen Untersuchungen kein vollständiges Bild der Gesamtsituation im Landkreis zeichnen können, werden die Ergebnisse im abschließenden Kapitel 7 im Kontext weiterer Analysen diskutiert.

### 6.1 Detailuntersuchung zweier idealtypischer Busumläufe

Nachfolgend werden ein Überland- und ein Stadtbuss-Umlauf detailliert mit Blick auf die Ermittlung der zur Umlaufbedienung geeigneten, emissionsfreien Antriebstechnologien untersucht. Die analysierten

Umläufe sind den bisherigen Linienbündeln zuzuordnen, während mit der Fortschreibung des Nahverkehrsplan ein neuer Zuschnitt der Linienbündel erfolgt. Da in den meisten Fällen einzelne Busse mehrere im Fahrplan verzeichnete Linien befahren und umgekehrt einzelne Linien von verschiedenen Bussen bedient werden, ist eine Zusammenfassung einzelner Linien zu stilisierten bzw. idealtypischen Überland- bzw. Stadtumläufen unumgänglich.

### 6.1.1 Überlandverkehr (Linien 966/980/981/983/984)

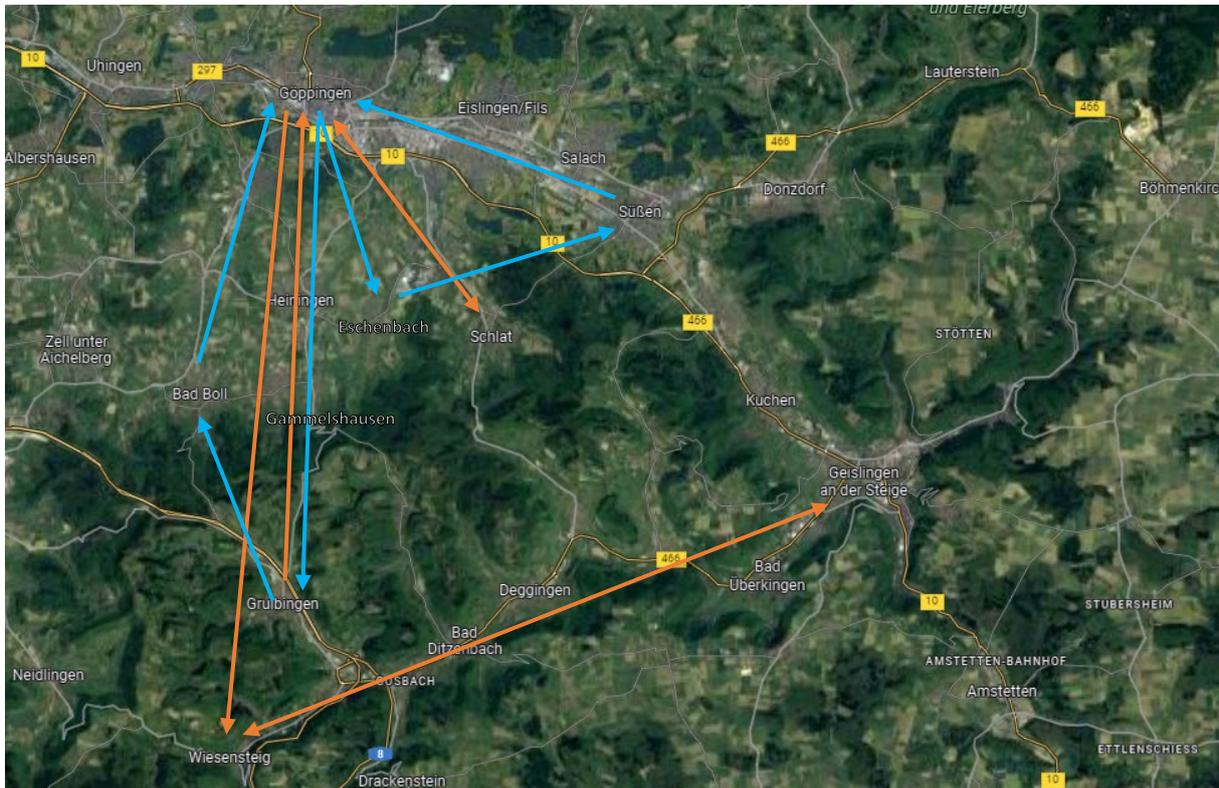


Abbildung 8: Fahrzeugumlauf eines Überlandverkehrs (eigene Darstellung)

Beispielhaft für einen Überlandverkehr im Landkreis Göppingen werden nachfolgend die Linien 966/980/981/983/984 zusammengefasst und als ein idealtypischer Überlandumlauf analysiert. Zum Zeitpunkt der vorliegenden Analyse ist der stilisierte Überlandumlauf dem 5. Linienbündel zuzuordnen und wird unter der Woche und am Wochenende bedient. An den Wochenenden und in den Ferien ist die zurückzulegende Umlaufstrecke kürzer als unter der Woche. Vor diesem Hintergrund werden die zu leistenden Umlaufkilometer eines unterwöchigen, repräsentativen Schultags herangezogen, da dieser Umlauf der maximalen Anforderung an die eingesetzten Fahrzeuge entspricht.

Abbildung 8 zeigt die Strecke des stilisierten Überlandumlaufs auf. Die zugrundeliegenden Daten wurden dankenswerterweise vom Busunternehmen *Hildenbrand GmbH Omnibusverkehr* in Grubingen zur Verfügung gestellt. Der Überlandumlauf wird in zwei Schichten bedient: Die erste Schicht (orange) startet in Grubingen und fährt die Städte Göppingen, Schlat, Wiesensteig, Geislingen und Gammelshausen in unterschiedlichen Zeitkorridoren an. Eine Strecke von 213 km wird in 6 Stunden und 48 Minuten zurückgelegt, wobei eine durchschnittliche Geschwindigkeit von 31 km/h erreicht wird. Die zweite Schicht (blau) hat eine Umlauflänge von 99 km und wird in 3 Stunden abgefahren. Auch diese Schicht beginnt in Grubingen und bedient die Kommunen Bad Boll, Göppingen, Eschenbach und Süßen zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Daraus resultiert eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 33 km/h. Kombiniert beträgt die von einem einzelnen Fahrzeug pro Tag zurückzulegende Streckenlänge 312 km.

Diese Streckenlänge wird als Grundlage für die nachfolgende Bestimmung der zur Umlaufbedienug geeigneten Antriebstechnologie herangezogen.

Für die Ermittlung der geeigneten Antriebstechnologie ist die Bestimmung des Kraftstoffverbrauchs der einzusetzenden Busse von wesentlicher Bedeutung. Der Strom- bzw. Wasserstoffverbrauch batterie- bzw. brennstoffzellenelektrischer Busse wird im Kern von der Auslegung und Effizienz des Antriebsstranges, sowie den jeweils relevanten Fahr- und Geschwindigkeitsprofilen bedingt. Beide Fahrzeugarten nutzen Technologien zur Rückgewinnung von Bremsenergie, sodass der Einfluss der Streckentopographie geringer als bei herkömmlichen Bussen ausfällt. Demgegenüber wirken sich jahreszeitliche Bedingungen insbesondere bei batterieelektrischen Fahrzeugen wesentlich stärker aus. Da anders als bei Dieselfahrzeugen keine Motorabwärme für Heizzwecke genutzt werden kann, muss die zur Klimatisierung benötigte Energie im Wesentlichen aus den Batterien bezogen werden. Dadurch ist die Reichweite eines BEV im Winter deutlich geringer als im Sommer. Demgegenüber können FCEVs einen guten Teil der Heizenergie aus der Abwärme der Brennstoffzelle beziehen [11].

Basierend auf einer Literaturlauswertung [20], [26], [35], [18] und eigenen Erfahrungswerten werden folgende, über das gesamte Jahr gemittelte Verbrauchswerte für batterie- und brennstoffzellenelektrische Busse angesetzt: Analog zu [18] wird ein Verbrauchswert von 1,7 kWh/km für ein batterieelektrisches Fahrzeug mit zwölf Meter Länge und vollelektrischer Heizung bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 25 km/h angesetzt. Da die Durchschnittsgeschwindigkeit des hier betrachteten Überland-Umlaufs bei über 25 km/h liegt und damit leicht verbrauchsmindernd wirkt, ist der für die nachfolgenden Berechnungen übernommene Verbrauch von 1,7 kWh/km als tendenziell leicht überhöht zu werten. Bezugnehmend auf [26], [35], [18] wird für einen brennstoffzellenelektrischen Zwölf-Meter-Bus bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 30 km/h ein Verbrauch von 9,5 kg H<sub>2</sub>/100 km angesetzt. Auch dieser Verbrauchswert ist aufgrund der etwas höheren Durchschnittsgeschwindigkeit der Überlandstrecke als konservativ zu werten. Die angegebenen Kraftstoffverbräuche beider Technologien bilden wichtige Eingangsdaten für die Ermittlung der geeigneten Antriebstechnologien.

Anhand der oben angegebenen Länge des Überlandumlufs ist ein für die Umlaufbedienug erforderlicher Strombedarf von 830 kWh pro Tag festzustellen. Dabei wird nicht nur der reine Kraftstoffbedarf berücksichtigt, sondern auch ein Abschlag von 20 % der vom Hersteller angegebenen Batteriekapazität angesetzt, der Tiefenentladungen verhindern und die Haltbarkeit der Batterie sicherstellen soll. Weitere 20 % Abschlag werden angenommen, um die über die Lebensdauer eintretende Alterung und den damit einhergehenden Kapazitätsverlust der Batterie zu kompensieren.

Wie der Vergleich mit den in Kap. 4.1 angegebenen Batteriekapazitäten von 385 bis 480 kWh ergibt, kann kein am Markt verfügbarer BEV den geforderten Kraftstoffbedarf von 830 kWh auch nur annähernd decken. Auch eine Zwischenladung im Depot nach Ende der ersten Schicht könnte das Problem nicht entschärfen, da die Bedienung der Schicht einen Strombedarf von 565 kWh mit sich bringt, welcher von den marktverfügbaren Bussen nicht befriedigt werden kann. Eine batterieelektrische Umlaufbedienug wäre nur durch den Einsatz eines weiteren Busses unter Inkaufnahme der damit verbundenen Mehrkosten möglich, sofern keine umfangreichen Änderungen bei den Betriebsabläufen vorgenommen werden. Eine batterieelektrische Bedienung des Gesamtumlufs mit nur einem Fahrzeug wäre selbst ohne Berücksichtigung der gegen Ende der Lebensdauer zu erwartenden Kapazitätsverluste nicht darstellbar. Die Bedienung nur der ersten Schicht wäre in diesem Falle zwar denkbar, ließe aber lediglich geringe Sicherheitsreserven für widrige Ereignisse wie Verkehrsstaus oder extreme Kälte. Niedrigere als die oben angesetzten Verbrauchswerte könnten die Situation verbessern, erscheinen aber nur in besonders günstigen Fällen realistisch.

Generell ist es möglich, der hier exemplarisch dargestellten Reichweitenproblematik Änderungen bei der Einsatzplanung der Busse entgegenzusetzen, welche beispielsweise längere Ladezeitfenster und

die Nutzung leistungsstärkerer Ladeinfrastrukturen beinhalten. Hier wäre zu prüfen, ob trotz verkürzter Standzeiten ausreichende tägliche Nutzungsdauern der Fahrzeuge zu erreichen sind oder ob ein Mehrbedarf an Bussen entstände. Auch der erhöhte Infrastrukturaufwand müsste berücksichtigt werden. Die Sinnhaftigkeit größerer Änderungen in der Einsatzplanung wäre individuell zu prüfen, da angesichts der Vielfalt der Ausgestaltungsoptionen pauschale Aussagen unmöglich sind. Ohne entsprechende Anpassungen bleiben die obigen Befunde für den analysierten Umlauf gültig.

Demgegenüber wäre der Überlandumlauf mit einem brennstoffzellenelektrischen Bus ohne Änderungen der Einsatzplanung problemlos zu bedienen: Die erforderliche Kraftstoffmenge von 29,7 kg Wasserstoff bleibt deutlich unter den Tankkapazitäten aller in Kap. 4.2 vorgestellten Kapazitäten im Bereich von 32 bis 50 kg. Unter Beibehaltung bestehender Betriebsabläufe kommen beim aktuellen Stand der Technik nur FCEVs für die Bedienung des stilisierten Überlandumlaufs in Frage.

### 6.1.2 Stadtverkehr (Linien 962/963)

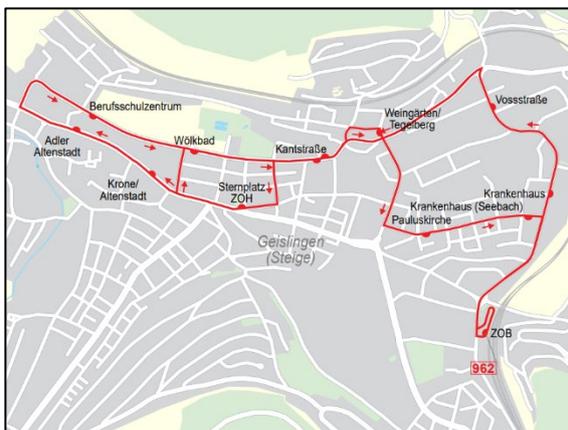


Abbildung 9: Linie 962

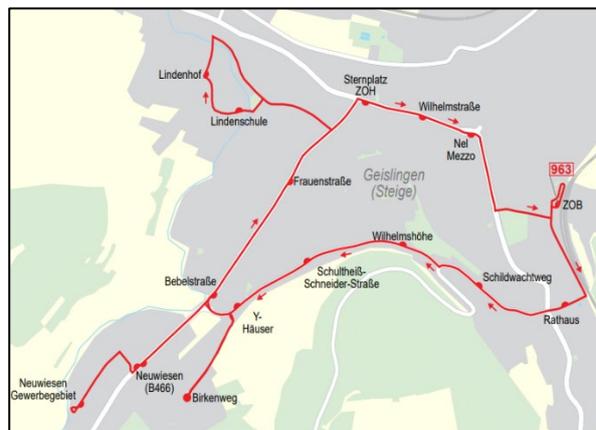


Abbildung 10: Linie 963

Ähnlich zum Vorgehen beim Überlandumlauf werden auch für die Analyse eines idealtypischen Stadtverkehrs zwei Linien in Geislingen zusammengefasst, da die relevanten Linien 962 und 963 von nur einem Fahrzeug bedient werden. Wiederum ergibt sich die vom eingesetzten Bus zu bewältigende Strecke aus der Addition der Längen bzw. Fahrleistungen der einzelnen Linien. Die Linie 963 mit einer Länge von 8,5 km wird unterwöchig täglich 16-mal bedient und legt folglich eine Strecke von 136 km pro Tag zurück. Anhand der Analyse von Fahrplandaten des Verkehrsverbundes lässt sich für diese Strecke eine Durchschnittsgeschwindigkeit von etwa 20,5 km/h ermitteln. Auch Linie 962 wird unter der Woche 16-mal pro Tag bedient. Ein Streckenumlauf weist eine Länge von 6,9 km auf. Dadurch wird täglich eine Strecke von 110 km zurückgelegt. Aufgrund der geringeren Streckenlänge sinkt die Durchschnittsgeschwindigkeit auf ca. 17 km/h. Für die Bedienung beider Linien muss der eingesetzte Bus also eine Gesamtstrecke von gerundet 247 km pro Tag zurücklegen.

Im Zuge der Ermittlung der für die Bedienung des stilisierten Stadtlumfs geeigneten Antriebstechnologie werden die in Abschnitt 6.1.1 angesetzten Verbrauchswerte herangezogen. Aufgrund der niedrigeren Durchschnittsgeschwindigkeiten und den geringeren Höhendifferenzen des Stadtlumfs, welche die Möglichkeit zur Rekuperation schmälern, wird allerdings ein erhöhter Verbrauch von 2,0 kWh/km für batterieelektrische Busse [39] und ein gleichfalls gesteigerter Wasserstoffverbrauch von 10,5 kg/100 km angenommen [26]. Beide Werte sind konservativ angesetzt und decken auch ungünstige Witterungs- und sonstige Betriebsbedingungen ab.

Sollte der Umlauf von nur einem batterieelektrischen Fahrzeug bedient werden, müsste der Bus eine Batteriekapazität von rund 772 kWh ausweisen, wobei hier wiederum Kapazitätsabschläge zur Vermeidung von Tiefentladungen und zur Kompensation der Batteriealterung angesetzt werden. Beide zugrundeliegenden Linien werden von 5:34 Uhr bis 21:26 Uhr im Zweischichtbetrieb kombiniert bedient. Analog zum Überlandumlauf wäre die Bedienung des Stadtumlaufs mit nur einem BEV nicht möglich. Erfolgt zum Schichtwechsel jedoch auch ein Wechsel des eingesetzten Fahrzeugs, entfällt auf jeden der Busse eine Strecke von etwa 124 km, welche eine Batteriekapazität von 386 kWh verlangt. Wie Kap. 4.1 zeigt, können heute verfügbare BEVs diesen Anforderungen entsprechen. Allerdings ist dann der Einsatz von zwei Bussen erforderlich, dessen Sinnhaftigkeit angesichts zusätzlicher Beschaffungs- und Betriebskosten zu hinterfragen ist. Demgegenüber könnte der Stadtumlauf mit nur einem brennstoffzellenelektrischen Bus bedient werden, da die erforderliche Kraftstoffmenge von 26 kg Wasserstoff problemlos in den Tanks aller in Kap. 4.2 vorgestellten FCEVs gespeichert werden kann. Die oben vorgetragenen Überlegungen zu den Möglichkeiten einer veränderten Einsatzplanung für batterieelektrische Busse sind auch hier gültig.

Damit könnte der Stadtumlauf mit beiden Antriebsalternativen bedient werden. Ein batterieelektrischer Betrieb würde jedoch Stand heute mehrere Busse erfordern und Mehrkosten für Fahrzeuge sowie Personal zeitigen. Mit Blick auf die für die Bedienung des gesamten Umlaufs erforderliche Reichweite sind allerdings Brennstoffzellenbusse zu bevorzugen.

## 6.2 Analyse ausgewählter emissionsfreier Busse

Angesichts der festgestellten besonderen Eignung brennstoffzellenelektrischer Busse für die Bedienung sowohl des stilisierten Überland- wie auch Stadtumlaufs werden nachfolgend vier Modelle näher vorgestellt, welche auch für den Einsatz im Landkreis Göppingen in Frage kommen. Grundlage ist die in Kapitel 4.2 vollzogene Marktübersicht, wobei die Auswahl der im Folgenden Modelle rein exemplarisch und nicht im Sinne einer Ausweisung besonders geeigneter Modelle zu verstehen ist.

Der belgische Bushersteller *Van Hool* bietet aktuell fünf unterschiedliche Linienbusse mit Brennstoffzellenantrieb an, wobei auch bislang industrieweit selten lieferbare Gelenkbus-Varianten aufgeführt werden. Das Modell *A330 Fuel Cell* gehört zu den in Deutschland am weitesten verbreiteten Brennstoffzellenbussen und wird in Köln sowie Wuppertal in größeren Stückzahlen eingesetzt. In Köln wurden die ersten Fahrzeuge bereits im Jahr 2014 beschafft und 2020 weitere 35 Einheiten in Dienst gestellt, wodurch die Flotte auf 37 FCEVs wuchs [38]. In der nahe gelegenen Stadt Wuppertal verkehren seit 2020 zehn weitere Busse des Herstellers Van Hool [72].

Ein weiteres vielversprechendes Modell ist der *GBKite Hydroliner* des irischen Unternehmens *Wrightbus*. Im Mai 2022 kündigte das Busunternehmen *Regionalverkehr Köln* seine Absicht an, ergänzend zu den Fahrzeugen von Van Hool, 20 Einheiten des GBKite Hydroliner zu bestellen. Hinzu kommt eine Option, 40 weitere Busse dieser Art zu beziehen. Der Hydroliner besticht durch seine große Fahrgastkapazität von 82 bis 88 Personen und Wahloptionen bezüglich der Tankgröße, welche 32 kg, 40 kg oder 50 kg betragen kann [51].

Auch die Brennstoffzellenbusse des spanisch-polnischen Unternehmens *Solaris* sind seit 2021 fester Bestandteil der Verkehrsbetriebe in Köln und Wuppertal. Die Fahrzeuge des Typs *Urbino Hydrogen* wurden im Rahmen einer gemeinsamen Bestellung 2020 geordert. Der Verkehrsbetreiber in Frankfurt am Main hat kurz darauf ebenfalls Busse dieser Art bestellt [14].

In geografischer Nähe zum Landkreis Göppingen hat die *Stuttgarter Straßenbahnen AG* (SSB) eine Bestellung von acht Brennstoffzellenbussen vom Typ *H2.City Gold* des portugiesischen Herstellers *Caetano* aufgegeben [33]. Zudem hat die *Deutsche Bahn AG* für ihre Bussparte *DB Regio Bus* einen Rahmenvertrag für eine Lieferung von 60 FCEVs des gleichen Typs bis 2026 geschlossen [52].

Zu allen Brennstoffzellenbussen der verschiedenen Hersteller sei angemerkt, dass die Zuverlässigkeit der vergleichsweise jungen Technologie nicht an die von Dieselfahrzeugen heranreicht. Es gibt erhebliche Unterschiede zwischen Herstellern, Modellen und auch Bau- bzw. Betriebsjahren, wobei immer wieder ‚Kinderkrankheiten‘ auftreten, welche anschließend geheilt oder zumindest wesentlich gemildert werden. Wie bei Batteriebussen sind weitere Reifungsschritte erforderlich, bevor die Technologie ihr volles Potential ausspielen kann. Einstweilen ist Busunternehmen und Aufgabenträgern zu raten, vor Fahrzeugbeschaffungen bzw. Ausschreibungen die aktuelle Leistungsfähigkeit individueller Modelle gründlich zu prüfen, um einen erwartungskonformen späteren Betrieb zu erreichen.

### 6.3 Bewertung der Gesamtbetriebskosten und Umwelteffekte

Angesichts der bereits in Abschnitt 6.1 betonten Bedeutung der Gesamtbetriebskosten und Umwelteffekte emissionsfreier Busse werden diese Aspekte nachfolgend vertiefend analysiert.

#### 6.3.1 Gesamtbetriebskosten

Dieses Kapitel liefert eine grobe Kostenschätzung für den Betrieb des in Abschnitt 6.1 analysierten (1) Überlandumlaufs und (2) Stadtumlaufs, sowie einer zusätzlich eingebrachten (3) Gesamtheit aller Linien im Landkreis, wobei jeweils nach verschiedenen Antriebstechnologien, Förderkonditionen, sowie hohen oder niedrigen Kraftstoffkosten unterschieden wird. Die Gesamtbetriebskosten werden mittels der etablierten Methode der TCO-Analyse ermittelt. In dieser werden über die Nutzungsdauer hinweg sowohl die Investitionskosten, wie auch die Betriebskosten (Wartung, Kraftstoff, Personal) der Busse berücksichtigt. Fördermittel können nur für emissionsfreie Busse, aber nicht für Dieselfahrzeuge in Anspruch genommen werden und reduzieren die Investitionskosten von BEVs und FCEVs wesentlich. Die den Berechnungen zugrundeliegenden Annahmen sind in Anhang 1 hinterlegt. Für die Busse wird eine Nutzungsdauer von acht Jahren angenommen, über die hinweg die Kosten betrachtet werden. Als Beschaffungszeitpunkt der Busse wird das Jahr 2025 festgelegt. Die im Anhang angegebenen Kraftstoffkosten werden nicht als konstant betrachtet, sondern verändern sich im Zeitverlauf. Bei Strom- und Wasserstoff wird von sinkenden Kosten über die Nutzungsdauer hinweg ausgegangen, während bei Dieselmotoren, aufgrund zunehmender CO<sub>2</sub>-Besteuerung und anderen Einflussfaktoren, Kostensteigerungen angenommen werden. Obgleich im Sinne der Vollständigkeit auch die Berücksichtigung von Infrastrukturen wünschenswert ist, werden die Kosten von Wasserstoff- und Ladeinfrastrukturen nicht in die TCO einbezogen. Dies liegt darin begründet, dass die Auslegungen der letztendlich erforderlichen Infrastrukturen kaum absehbar und Kostenbetrachtungen daher nicht sinnvoll sind.

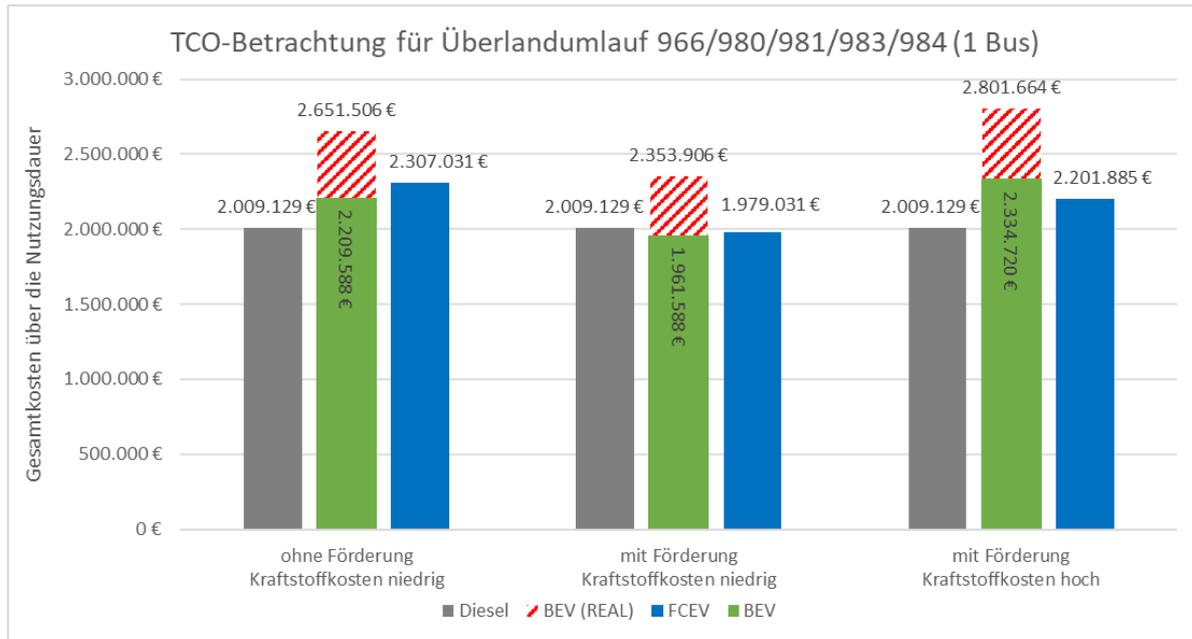


Abbildung 11 TCO-Betrachtung Überlandumlauf

(1) Die TCO-Betrachtung des Überlandumlaufs in Abbildung 11 zeigt die Kosten eines Busses über seine Nutzungsdauer, unterschieden nach Antriebstechnologien. Es zeigt sich, dass der Umlaufbetrieb mit BEVs und FCEVs gegenüber Dieseln zu höheren Kosten führt, sofern keine Förderung in Anspruch genommen wird (links). Trotz über die Nutzungsdauer steigenden Dieselnkosten kostet die Bedienung des Umlaufs mit einem Brennstoffzellenbus ca. 300.000 € mehr. Bei der Betrachtung von Batteriebusen wird aufgrund deren gegenüber Diesel- und Brennstoffzellenfahrzeugen geringeren Reichweite ein Mehrkostenfaktor von 20 % aufgeschlagen (BEV Real), welcher u.a. die Beschaffung zusätzlicher Busse, sowie die Personalkosten zusätzlicher Fahrer einbezieht. Bei Berücksichtigung dieses Faktors sind Mehrkosten eines BEV-Einsatzes von bis zu 640.000 € zu veranschlagen. Allerdings können die Gesamtbetriebskosten emissionsfreier Antriebskonzepte durch Inanspruchnahme von Fördermitteln erheblich reduziert werden (Mitte). Unter der Prämisse niedriger Kraftstoffkosten kann mit einem FCEV die Strecke kostengünstiger als mit einem Dieselfahrzeug betrieben werden. Während bei einer angenommenen unveränderten Anzahl von zur Umlaufbedienung eingesetzten Bussen ein Betrieb mit BEVs kostengünstiger als mit Dieseln wäre, sind aufgrund der zu veranschlagenden Mehraufwände deutliche reale Mehrkosten eines BEV-Einsatzes gegenüber Alternativen zu erwarten. Bei Ansetzung von hohen Kraftstoffkosten (rechts) kann der durch die Förderung erreichte Kostenvorteil von FCEVs nicht erhalten werden. Somit üben neben Fördermitteln auch die Kraftstoffkosten einen erheblichen Einfluss auf die TCO aus.

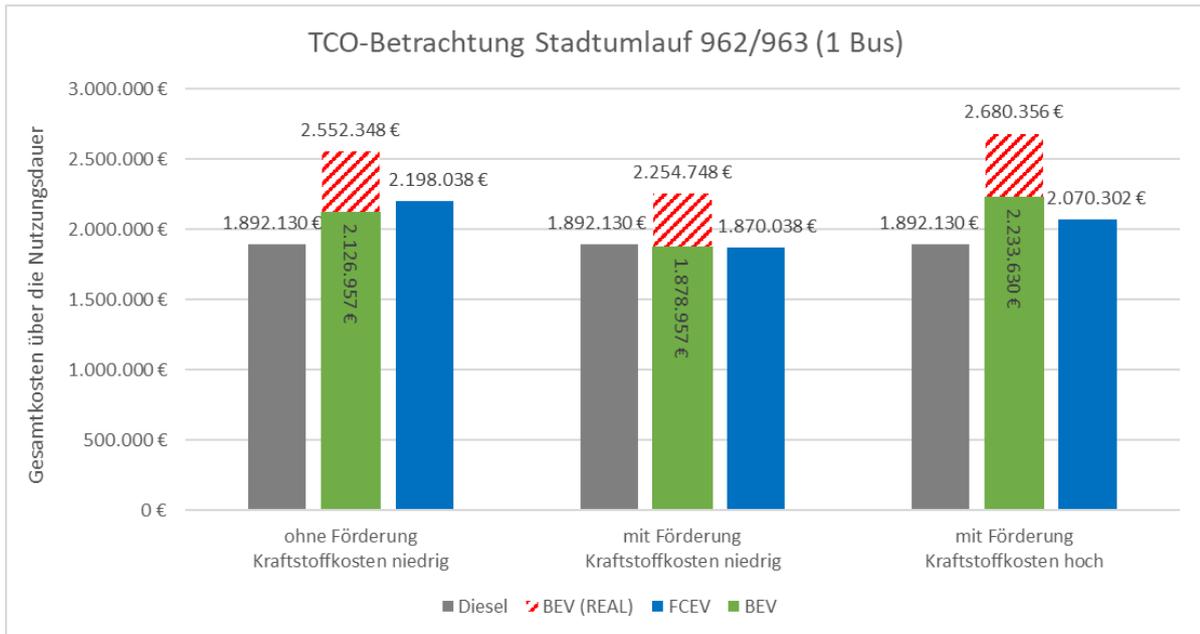


Abbildung 12 TCO-Betrachtung Stadtumlauf

(2) Aufgrund der geringeren Strecke des Stadtlumlaufs fallen die Gesamtbetriebskosten eines Busses im Vergleich zur Überlandstrecke geringer aus. Der Kostenvorteil eines Dieselmotors besteht unverändert, sofern keine Förderung in Anspruch genommen wird (links). Analog zum Überlandumlauf führen Förderung und niedrige Kraftstoffkosten für emissionslose Antriebe zu Kostenvorteilen gegenüber dem Dieselmotors (Mitte). Batteriebusse können jedoch nur dann Kostenvorteile erlangen, wenn real zu erwartende Mehraufwände ausgeblendet werden. Sollten die Kraftstoffkosten steigen, fallen beide emissionslosen Antriebsarten wieder hinter den Dieselmotors zurück (rechts).

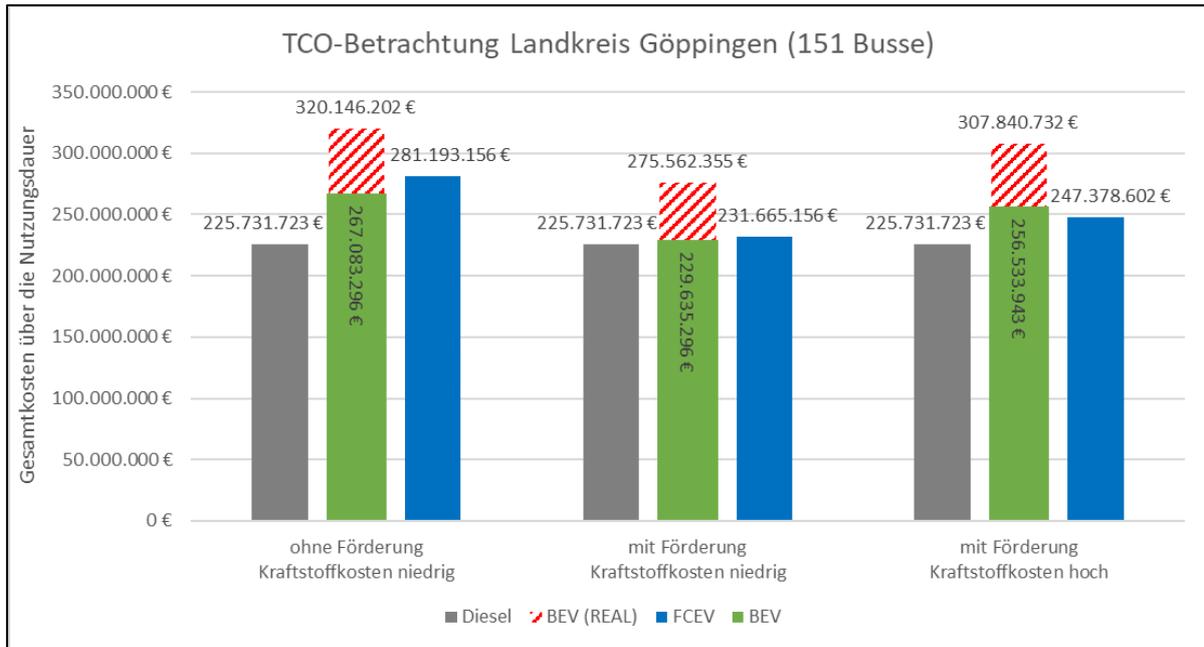


Abbildung 13: TCO-Betrachtung Landkreis Göppingen

(3) Abbildung 13 zeigt eine Gesamtkostenbetrachtung auf, die einer kompletten Umstellung des Fuhrparks auf eine emissionslose Antriebsart entspricht. Alle derzeit im Landkreis eingesetzten 151 Dieselsebuse werden durch brennstoffzellen- bzw. batterieelektrische Fahrzeuge ersetzt. Die in die Berechnung eingehenden Durchschnittsverbräuche der emissionsfreien Busse werden dafür aus den in den vorausgegangenen Analysen ermittelten Verbrauchswerten abgeleitet. Bei einer Umstellung auf FCEVs unter Inanspruchnahme von Fördermitteln und bei niedrigen Wasserstoffkosten kann nahezu eine Kostenparität zu Dieselsebussen erreicht werden (Mitte). Sollten die Wasserstoffkosten steigen, muss mit einer Mehrbelastung von über 21 Millionen Euro gerechnet werden (rechts). Bei BEVs ist ein Mehrbedarf von 30 Fahrzeugen zu erwarten, wodurch die Gesamtkosten wesentlich steigen: Hier muss trotz Berücksichtigung von Fördermitteln bei niedrigen Stromkosten mit einem realen Mehraufwand von 50 Millionen Euro gegenüber Dieselsebussen gerechnet werden. Hohe Stromkosten lassen das Delta zwischen Diesel- und Batteriebusen auf ca. 82 Millionen Euro ansteigen.

Anhand der dargestellten Kostenrelationen zwischen den verschiedenen Antriebsvarianten kann die oben getätigte technische Empfehlung, FCEVs für die Bedienung der untersuchten Busverkehre einzusetzen, aus ökonomischer Sicht bestätigt werden.

Wie in Kap. 6.1 dargelegt, handelt es sich bei den vorliegenden Analysen um exemplarische Betrachtungen ausgewählter Umläufe, die auf bestehenden Einsatzplanungen beruhen und den aktuellen Stand der Technik zugrunde legen. Änderungen der Einsatzplanung der Busse sind prinzipiell möglich und könnten die Reichweitenproblematik entschärfen, was sich positiv auf den in der TCO für batterieelektrische Fahrzeuge angelegten Mehrkostenfaktor auswirken könnte. Allerdings wären auch die zusätzlichen Aufwände einer Änderung von Betriebsabläufen zu berücksichtigen. Sollten zukünftig die Reichweiten von Batteriebusen durch technischen Fortschritt wesentlich steigen, könnte dies die Kostenrelationen zugunsten von Batteriefahrzeugen verschieben. Da aber auch bei Brennstoffzellenbussen von technologischen Verbesserungen auszugehen ist, können ohne weitergehende Untersuchungen keine validen Aussagen getroffen werden.

Die vorliegende Studie befasst sich weder mit der Umgestaltung der Einsatzplanung für Busse, noch strebt sie eine Analyse zukünftiger technologischer Entwicklungen an. Das aktuelle Kapitel untersucht lediglich einige Beispiele für Buseinsätze, ein Anspruch auf Allgemeingültigkeit besteht nicht.

### 6.3.2 Umweltbetrachtung

Angesichts der umweltpolitisch motivierten Vorgaben für die Beschaffung emissionsfreier Fahrzeuge ist eine Betrachtung der zu erwartenden ökologischen Wirkungen des Buseinsatzes von erheblicher Bedeutung. Für die nachfolgend vollzogene Umweltbewertung werden der in Abschnitt 6.1 analysierte Überlandumlauf und Stadtlumlauf herangezogen. In Abbildung 14 wird der jährliche Ausstoß der Umlaufbedienung in Abhängigkeit zur Kraftstoffwahl dargestellt. Ausgangspunkt bilden die Treibhausgasemissionen, die durch den Umlaufbetrieb mit einem Dieselbus ausgestoßen werden. Anhand der zur Umlaufbedienung jährlich erforderlichen Kilometerleistung, sowie den THG-Emissionen in Form von CO<sub>2</sub>-Äquivalenten pro Liter Diesel, lassen sich Gesamttreibhausgasemissionen von ca. 130 Tonnen für den Überlandumlauf und knapp 120 Tonnen für den Stadtlumlauf berechnen (siehe linke Balken im folgenden Diagramm).

Die Umweltbelastung kann durch den Einsatz emissionsloser Antriebskonzepte reduziert werden. Bei Versorgung des Busumlaufs mit Grünstrom bzw. grünem Wasserstoff sind Gesamttreibhausgasemissionen von 0 kg anzusetzen, da sowohl die Herstellung wie auch die Nutzung der Kraftstoffe klimaneutral sind. Allerdings ist nicht von einer klimaneutralen Versorgung der betrachteten Umläufe in naher Zukunft auszugehen. Daher wird parallel eine mögliche Versorgung mit herkömmlichem Netzstrom, sowie aus Erdgas gewonnenem Wasserstoff betrachtet. Die hierfür angesetzten CO<sub>2</sub>-Äquivalentwerte sind dem Anhang zu entnehmen. In Abbildung 14 werden die THG-Emissionen der angesprochenen Kraftstoffarten als *Strom konv.* und *H<sub>2</sub> grau* deklariert. Sollten die Umläufe von mit herkömmlichem Strom versorgten Batteriebusen betrieben werden, stehen THG-Emissionen von ca. 80 Tonnen an. Dies entspricht im Falle des Überlandumlaufs einer THG-Reduzierung von 33 % und von 30 % beim Stadtlumlauf gegenüber dem Dieselbetrieb. Wird die Strecke mit einem FCEV betrieben, können THG-Minderungen von 82 % beim Überlandumlauf und 83 % beim Stadtlumlauf erreicht werden.

Zumindest bei Nutzung von Netzstrom für den Betrieb erweisen sich batterieelektrische Busse als weniger klimafreundlich denn brennstoffzellenelektrische Fahrzeuge, selbst wenn letztere grauen Wasserstoff verwerten. Insoweit kann die oben festgestellte technische und ökonomische Vorteilhaftigkeit von Brennstoffzellenbussen auch in ökologischer Hinsicht bestätigt werden.

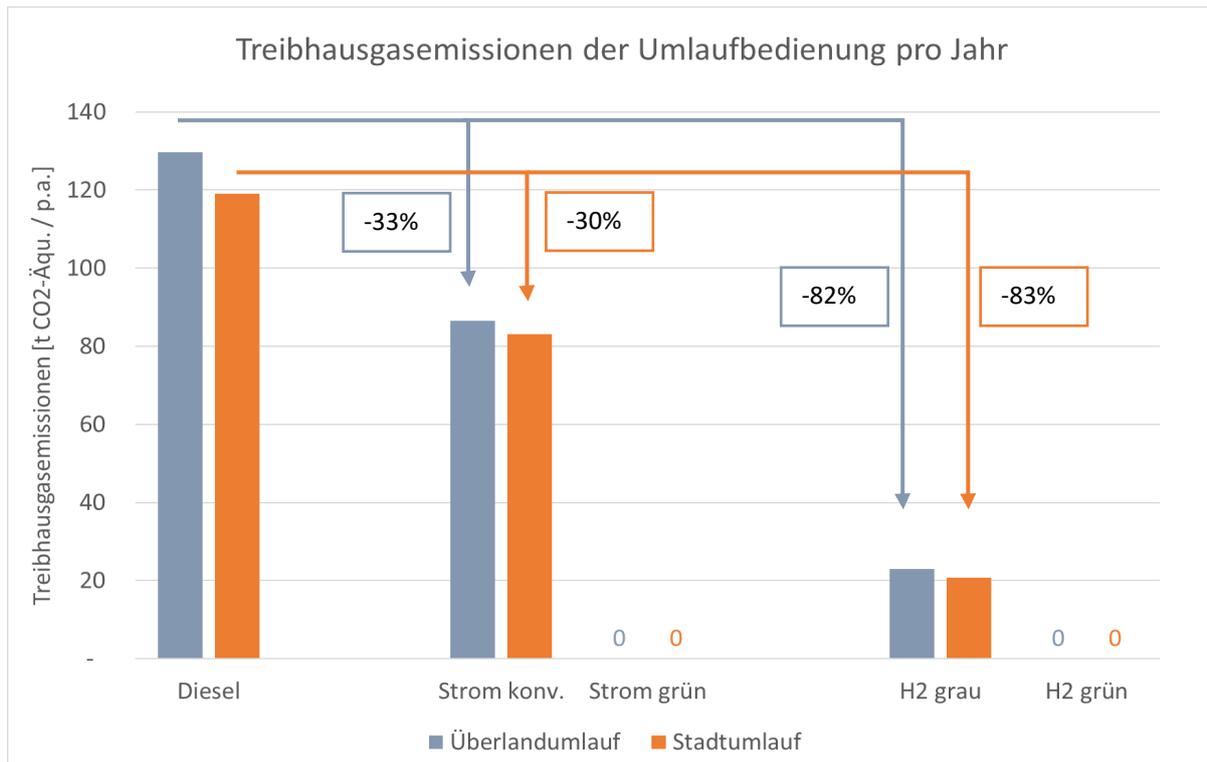


Abbildung 14 jährliche Treibhausgasemissionen der betrachteten Umlaufbedienung

## 7. Politische Prozesse und Handlungsoptionen

Ein zentrales Ziel der vorliegenden Untersuchung besteht darin, Entscheidungsträger im Landkreis Göppingen über die Handlungserfordernisse zu informieren, welche sich hinsichtlich Beschaffung und Einsatz emissionsfreier Busse, einschließlich der erforderlichen Kraftstoff-Infrastrukturen ergeben, sowie technologisch, ökonomisch und ökologisch vorteilhafte Umsetzungsoptionen aufzuzeigen. Stets steht auch die Frage nach der Eignung batterie- und brennstoffzellenelektrischer Busse zur Erfüllung der spezifischen Einsatzanforderungen des Landkreises im Raum.

In den vorausgegangenen Kapiteln wurden die regulativ bedingten Handlungserfordernisse dargestellt, die fahrzeug- und infrastrukturseitig bestehenden Technologieoptionen erörtert, sowie technisch, ökonomisch und ökologisch sinnvolle Einsatzmöglichkeiten untersucht. Obgleich Batteriebusse in einzelnen analysierten Einsatzszenarien Brennstoffzellenfahrzeugen gegenüber im Vorteil sind, erweisen sich Letztere doch in den untersuchten Fällen als insgesamt überlegen. Allerdings sind die Ergebnisse nur teilweise für den gesamten Landkreis repräsentativ und werden daher nachfolgend im Kontext anderer Befunde interpretiert. Zugleich verlässt die Betrachtung den Bereich rein faktenbasierter Analyse und wendet sich politischen sowie umsetzungsbezogenen Sachverhalten zu.

### 7.1 HyStarter-Dialog Landkreis Göppingen

Angesichts der eingangs geschilderten klimapolitischen Zielsetzungen des Landkreises Göppingen und der aufkommenden Herausforderungen der CVD bewarb sich der Landkreis um Fördermittel des Bundes, welche die Feststellung der Potentiale und Einsatzchancen grünen Wasserstoffs ermöglichen sollten. Im September 2021 erhielt der Landkreis die Zusage zur Finanzierung eines *HyStarter-Dialogs*, in

welchem einen Kreis regionaler Akteure aus Wirtschaft, Energieversorgung, Verwaltung, Politik, Bildung und Wissenschaft die Einsatzpotentiale von grünem Wasserstoff für die Region ermittelte und erste Umsetzungsoptionen identifizierte. Sowohl der Auftraggeber wie auch der Erstautor der vorliegenden Untersuchung gehörten dem Akteurskreis an und wirkten bei der Entwicklung von Handlungsansätzen zum Einsatz wasserstoffbetriebener Brennstoffzellenbusse, als eine der technologieoffen betrachteten Antriebsoptionen zur Erfüllung von CVD und SaubFahrzeugBeschG mit. Im April wurde der *Ergebnisbericht 2023: HyStarter-Region Landkreis Göppingen* samt einer *Roadmap* für vielversprechende Wasserstoffprojekte präsentiert [53] und wird nachfolgend referiert.

Für den Landkreis werden große Potentiale hinsichtlich der Erzeugung von Wasserstoff per Wasserelektrolyse auf Basis lokaler erneuerbarer Energien gesehen, wobei perspektivisch auch Importe grünen Wasserstoffs zur Bedienung der ab 2030 erwarteten hohen Nachfragen beitragen können. Der Wasserstoff soll in diversen Einsatzfeldern der Sektoren Verkehr, Wärme und Industrie Verwendung finden und bei günstigen Rahmenbedingungen auch ökonomisch wettbewerbsfähig sein. Angesichts der hohen Komplexität und den beträchtlichen Technologiekosten des Aufbaus wasserstoffbasierter Strukturen wird dem Austausch zwischen relevanten Akteuren und der Initiierung von Kooperationen auch zwischen den Sektoren große Bedeutung zugesprochen, um gemeinschaftlich getragene Innovationsstrategien zu realisieren und Kosten auf mehrere Parteien zu verteilen.

Als Initiator entsprechender Entwicklungen kann der Einsatz von Brennstoffzellenbussen eine wichtige Rolle spielen, wird angesichts laufender bzw. erst noch zu vollziehender Klärungs- und Entscheidungsprozesse aber als optional betrachtet. Nichtsdestotrotz liefern die HyStarter-Diskussionen sowie mehrere Expertisen klare Hinweise, dass sich FCEVs für Göppingen und andere dem *Verkehrs- und Tarifverbund Stuttgart (VVS)* angehörige Landkreise als eine wichtige Technologieoption erweisen könnten. Daher zeigt der HyStarter-Ergebnisbericht konkrete Anwendungsoptionen für FCEVs und die damit verbundenen Betankungsinfrastrukturen auf.

So könnte 2027 ein erstes Linienbündel, welches zwischen Geislingen und Göppingen verkehrende Überlandverkehre beinhaltet, durch Brennstoffzellenbusse bedient werden, da Batteriefahrzeuge den anspruchsvollen Streckenanforderungen nicht genügen könnten. Die restlichen neun der in Kapitel 3.2 geschilderten, neu auszuschreibenden zehn Bündel könnten theoretisch bis 2028 den Betrieb mit FCEVs aufnehmen. Dies wäre mit dem Aufbau von Wasserstofftankstellen zu flankieren, welche in Abstimmung mit der Privatwirtschaft bedarfsgerecht auszulegen und an geeigneten Standorten, z.B. autobahnnah in Geislingen, zu platzieren wären. Da aktuell im Landkreis keine Tankstellen existieren, müssten mehrere Anlagen aufgebaut werden. Neben der Versorgung von Bussen mit 350-bar-Technologie sind weitere Verbraucher, wie z.B. brennstoffzellenelektrische Lkw oder 700-bar-Müllsammel-fahrzeuge und Pkw, zu berücksichtigen. Die Wasserstoffversorgung könnte zunächst dezentral per Elektrolyse und Trailer-Anlieferung erfolgen und später durch Pipelineanbindung ergänzt werden. Allerdings setzt die Realisierung aller vorstellten Ansätze entsprechende Beschlüsse der zuständigen politischen Gremien voraus und können detailliertere Aussagen z.B. zur Platzierung und Wasserstoffversorgung von Tankstellen erst auf dieser Basis getätigt werden.

## 7.2 Auftaktprojekt zum Einsatz von Brennstoffzellenbussen

Der HyStarter-Ergebnisbericht schlägt ein Pilotprojekt großer Strahlkraft zur Erprobung der ersten Tranche brennstoffzellenelektrischer Busse vor. Hierfür kommt wiederum ein Linienbündel im Bereich Geislingen in Frage, das mittels einer moderat dimensionierten, aber skalierbaren Tankstelle eine zunächst überschaubare Anzahl von FCEVs mit Kraftstoff versorgt. Der Wasserstoff könnte entweder vor Ort per Elektrolyse hergestellt oder mittels Trailer angeliefert werden.

Von der Hochschule Esslingen betreute Teilnehmer eines Master-Studiengangs haben ein Konzept zur Platzierung dreier Tankstellen entwickelt, das sich am Ergebnisbericht sowie der Ausschreibungsplanung der zehn neuen Linienbündel orientiert und dabei eine Bedienung aller Bündel durch FCEVs unterstellt [1]. Alle Standorte zeichnen sich durch die Nähe zu diversen Linienverläufen und prinzipiell guten Voraussetzungen für die Wasserstoffbereitstellung aus. Obgleich die Vorschläge an bereits diskutierte Projektideen anbinden bzw. auf fundierten Recherchen beruhen, geben sie theoretische und nicht mit den relevanten Umsetzungsakteuren abgestimmte Überlegungen wieder.

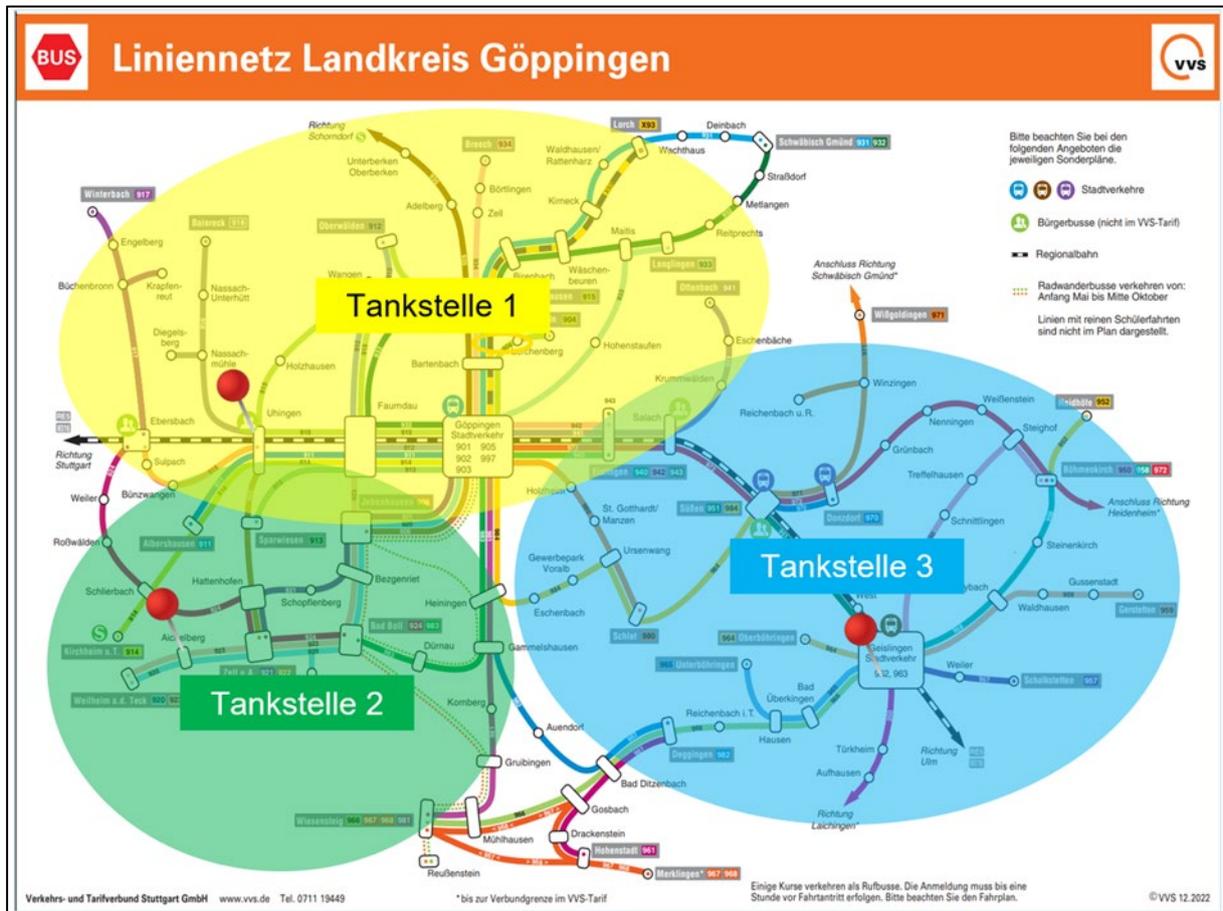


Abbildung 15: Denkbare Positionierung von Wasserstoff-Tankstellen im Landkreis [67] (bearbeitet)

### 7.3 Kostenoptimierung durch Kooperationen und Synergien

Ein wichtiges Ziel der vorliegenden Untersuchung besteht darin, Ansätze zur Reduzierung der hohen mit der Einführung von emissionsfreien Bussen sowie dazugehörigen Infrastrukturen verbundenen Kosten zu entwickeln. Kosten können durch Fördermittel sowie Variationen anderer in der Analyse der Gesamtbetriebskosten berücksichtigten Faktoren reduziert werden. Zudem sind die Kosten neuer Technologien generell hoch und nehmen erst mit zunehmender Technologiereife ab. Indes werden nachfolgend speziell Kostenoptimierungsoptionen durch Kooperationen und Synergien thematisiert. Die Betrachtung bleibt auf wasserstoffbetriebene Brennstoffzellenbusse beschränkt.

Im Zuge des HyStarter-Dialogs Landkreis Göppingen wurden Möglichkeiten zur Kostensenkung regelmäßig und in vielerlei Hinsicht diskutiert. Dabei spielten sog. *Skaleneffekte* eine wesentliche Rolle, welche sich auf die Tatsache beziehen, dass in großen Mengen hergestellter, transportierter und verwen-

deuter Wasserstoff wesentlich kostengünstiger ist als im Falle kleiner Volumina. Gleiches gilt für Brennstoffzellenbusse, deren Herstellung mit wachsender Nachfrage und steigenden Produktionsmengen zunehmend günstiger wird, sowie tendenziell für alle infrastruktur- und fahrzeugseitig eingesetzten Anlagen. Gelingt es beispielsweise, durch Kooperationen verschiedener Akteure Wasserstoffbedarfe zu bündeln und statt mehrerer leistungsschwacher Elektrolyseure nur eine leistungsstarke Anlage gemeinschaftlich zu betreiben, können Synergien erschlossen und die TCO der Wasserstoffproduktion deutlich reduziert werden. Analog führen Einkaufsgemeinschaften für FCEVs aufgrund der größeren Fahrzeuganzahl regelmäßig zu besseren Konditionen als beim individuellen Erwerb weniger Busse [11].

Ein weiterer wesentlicher Ansatz besteht darin, komplementäre Interessen ansonsten nur wenig verbundener Akteure zu identifizieren und zugunsten der Realisierung von Gemeinschaftsprojekten zusammenzuführen. Während z.B. Landkreise generell wenig Neigung zum Betrieb eigener Kraftstoffinfrastrukturen zeigen, betrifft dies das Kerngeschäft darauf spezialisierter Firmen und kann auch für vom Strukturwandel betroffene, bisher anderweitig tätige Energieversorgungsunternehmen durchaus interessant sein. Insbesondere da alle Sektoren zunehmend Regulierung zur Minderung von THG-Emissionen und verstärkter Nutzung erneuerbarer Energien unterworfen sind, ist von einer neuen Aufgeschlossenheit gegenüber Kooperationen im Bereich Wasserstoff auszugehen.

Im HyStarter-Dialog wurden einige, teils sehr konkrete Kooperationsoptionen mit beträchtlichem Synergiepotential diskutiert, bislang aber nicht verwirklicht. Zur Stärkung und Weiterverfolgung entsprechender Verhandlungen wurde der nachfolgend referierte *Wasserstoffgipfel* einberufen.

#### 7.4 Wasserstoffgipfel Landkreis Göppingen

Auf Einladung des Landrats Edgar Wolff wurde am 8. Februar 2023 der *Wasserstoffgipfel Göppingen* durchgeführt, an dem Vertreter des STEM einem hochrangigen Publikum Zwischenergebnisse der vorliegenden Untersuchung vorstellten [12]. Ein wesentlicher Aspekt war die Betonung der Notwendigkeit von Kooperationen zwischen öffentlichem und privaten Sektor, da die resultierenden Projekte Kosten wie auch Risiken einer Nutzung von Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien erheblich mindern, sowie die strategische Ausrichtung des Landkreises schärfen und optimieren können. Nachfolgend werden Projektideen für Kooperationen entlang der Wasserstoff-Wertschöpfungskette anhand einer auf dem Wasserstoffgipfel vorgetragenen Folie präsentiert, die alle im Zuge des HyStarter-Dialogs entwickelt, aber nur teilweise einer Umsetzung angenähert wurden. Die Gründe dafür sind vielfältig, aber die Weiterverfolgung aller Vorhaben würde, gemäß den Teilnehmern des Wasserstoffgipfels, deutlich von verstärkter Zusammenarbeit profitieren. Letztere sollte auch auf die Gewinnung neuer Partner im Sinne der Umsetzung der HyStarter-Roadmap zielen.

**Projektideen zur Kooperation von Busunternehmen, Tankstellenbetreibern und H<sub>2</sub>-Produzenten**

**st w** Steinbeis-Transferzentrum  
Energie- und Mobilitäts-  
systeme, STEM

**Im HyStarter Dialog Göppingen wurden einige Projektideen und denkbare Partner diskutiert, die es anzusprechen gilt:  
Wie könnten Projekte kooperativ und komplementär gestaltet werden, um Risiken und Kosten zu mindern?**

 <p><b>Betrieb von BZ-Bussen im Raum Geislingen</b></p>	 <p><b>H<sub>2</sub>-Tankstelle(n) in Göppingen bzw. Geislingen</b></p>	 <p><b>H<sub>2</sub>-Herstellung /- Nutzung in Geislingen</b></p>	 <p><b>Betrieb von BZ-NFZ im Landkreis</b></p>
 <p><b>H<sub>2</sub> aus Klärschlamm /-gas in Deggingen und Göppingen: Projekt war lange unbekannt!</b></p>	 <p><b>Hochschul-Kooperation zu H<sub>2</sub> im Programm PAN HAW</b></p>	 <p><b>H<sub>2</sub>-Bezug aus Weilheim (von H<sub>2</sub>-Lieferanten für cellcentric etc.)</b></p>	

08.02.2023 Ehret, Wörmer: Handlungserfordernisse emissionsfreie Busse
13

Abbildung 16: Projektideen für Kooperationen entlang der Wasserstoff-Wertschöpfungskette [12]

## 8. Zusammenfassung

Die vorliegende Untersuchung setzte sich zum (1) Ziel, Entscheidungsträger im Landkreis Göppingen über die Handlungserfordernisse zu informieren, welche sich hinsichtlich des Einsatzes emissionsfreier Busse, einschließlich der erforderlichen Kraftstoff-Infrastrukturen, aus der Clean Vehicles Directive und dem Gesetz über die Beschaffung sauberer Straßenfahrzeuge ergeben, sowie möglichst vorteilhafte Umsetzungsoptionen aufzuzeigen.

Auf Basis der (2) Analyse der CVD und des SaubFahrzeugBeschG wurde (3) festgestellt, dass alle der zehn neuen, zwischen 2025 und 2027 zu vergebenden Linienbündel den Vorgaben beider Regularien unterliegen, denen zufolge 22,5 % aller bis Ende 2025 und 32,5 % sämtlicher bis Ende 2030 zu beschaffender Busse lokal emissionsfrei sein müssen. Im Landkreis müssen damit perspektivisch rund 88 batterie- oder brennstoffzellenelektrische Busse beschafft werden.

Gemäß den (4) vollzogenen Marktrecherchen besteht ein hinlängliches Angebot an Batterie- und Brennstoffzellenbussen. Auch die notwendigen (5) Lade- und Wasserstoff-Infrastrukturtechnologien sind verfügbar, wobei die höhere Komplexität einer Wasserstoffproduktion und -distribution dahingehend Chancen aufweist, dass zukünftig erhebliche Skaleneffekte zu erwarten sind.

Die (6) Ausgestaltung des zukünftigen Busbetriebs im Landkreis wurde anhand exemplarischer Betrachtungen eines Überland- und eines Stadtumlaufs analysiert und ergab in beiden Fällen, dass Brennstoffzellenbusse die gegenüber Batteriefahrzeugen technisch zu präferierende Option sind. Unter Berücksichtigung von bei Batteriebussen anzusetzenden Fahrzeugmehrbedarfen erweisen sich zudem die Gesamtbetriebskosten von Brennstoffzellenbussen als niedriger, wobei diese Aussage auch repräsentativ für den gesamten Landkreis gilt. Überdies verursachen Brennstoffzellenbusse geringe Treibhausgasemissionen als Batteriefahrzeuge, wenn konservativ von der Nutzung grauen Wasserstoffs und herkömmlichen Netzstroms ausgegangen wird. Während die vollzogenen Detailanalysen also den Einsatz von Brennstoffzellenbussen nahelegen, sind sie nur bezüglich der Kosten repräsentativ. Die Aussagekraft der technischen und ökologischen Bewertungen bleibt auf die beiden analysierten Umläufe

begrenzt; Einschätzungen zur globalen Eignung der Buskonzepte zur Bedienung der Gesamtheit von Umläufen im Landkreis können daraus nicht abgeleitet werden.

Die vorliegende Untersuchung setzte sich auch das Ziel, (7) Ausblicke auf zukünftige akteursbezogene Entwicklungen zu geben und Handlungsempfehlungen auch zu Kostenoptimierungsoptionen durch Kooperationen und Synergien zu liefern. Im HyStarter-Dialog Göppingen wurden große Potentiale hinsichtlich der Erzeugung und Nutzung grünen Wasserstoff ermittelt, sowie konkrete Perspektiven für die Anwendung im ÖPNV entwickelt: Zukünftig könnten alle zehn Linienbündel durch Brennstoffzellenbusse bedient und durch ein aufzubauendes Tankstellennetz mit Wasserstoff versorgt werden. Bezugnehmend auf verschiedene Expertisen werden dabei die technischen, wirtschaftlichen und ökologischen Vorteile dieser Option bestätigt. Anknüpfend an HyStarter wurden von Studierenden der Hochschule Esslingen erarbeitete Vorschläge zur Platzierung dreier Tankstellen unterbreitet.

Kosten können durch Kooperationen verschiedener Akteure mit komplementären Interessen reduziert werden, welche Skaleneffekte erschließen und Risiken mindern. So können z.B. Wasserstoffbedarfe gebündelt und dadurch kostengünstige, leistungsstärkere Elektrolyseanlagen genutzt, oder durch Bildung von Einkaufsgemeinschaften die Preise für Brennstoffzellenbusse gesenkt werden. Im Rahmen des Wasserstoffgipfels Göppingen wurden diverse Kooperationsoptionen mit beträchtlichem Synergiepotential diskutiert und die Notwendigkeit verstärkter Zusammenarbeit betont.

## 9. Handlungsempfehlungen

Auf Basis der vorausgegangenen Analysen werden abschließend Handlungsempfehlungen zum Umgang mit den Erfordernissen des SaubFahrzeugBeschG und zur Erschließung von Kostenoptimierungsoptionen durch Kooperationen und Synergien aufgestellt.

- 1) Sowohl die in der vorliegenden Untersuchung vollzogene Analyse zweier Busumläufe, wie auch die im Zuge des HyStarter-Dialogs Göppingen diskutierten Expertisen, legen die zumindest teilweise Erfüllung der Beschaffungsquoten für emissionsfreie Busse im Landkreis durch Brennstoffzellenfahrzeuge nahe. Allerdings sollten auch angesichts der mangelnden Repräsentativität der Befunde Batteriebusse als gleichberechtigte Alternative betrachtet werden.

*Daher empfiehlt die Untersuchung, bei den anstehenden Ausschreibungen zum Betrieb von Linienbündeln sowohl den Einsatz von Brennstoffzellen- wie auch Batteriebussen zu ermöglichen.*

- 2) Während der Betrieb zunächst nur weniger batterieelektrischer Fahrzeuge geringe Anforderungen an die notwendige Ladeinfrastruktur stellt, ist für brennstoffzellenelektrische Busse der Aufbau initialer Infrastrukturen zur Herstellung, Transport und Abgabe von Wasserstoff erforderlich. Im Sinne von Nachhaltigkeit und regionaler Wertschöpfung sollte Wasserstoff wie auch Ladestrom auf Basis erneuerbarer Energien gewonnen werden.

*Aufgrund dessen wird nahegelegt, umsetzungsorientierte Konzepte zum Aufbau von Infrastrukturen zur Bereitstellung grünen Wasserstoffs für Brennstoffzellenbusse zu entwickeln und die Beladung von Batteriebussen mit Grünstrom sicherzustellen.*

- 3) Die Einführung von Brennstoffzellen- bzw. Batteriebussen und der Aufbau von Infrastrukturen muss schrittweise entsprechend dem gewünschten Einsatz und passend zum Zeitstrahl der zehn Bündelausschreibungen erfolgen. Ein Auftaktprojekt sollte die Entwicklung einleiten und praktische Lernerfahrungen für den weiteren Ausbau ermöglichen.

*Angesichts dessen wird empfohlen, im Zuge einer der nächsten Ausschreibungen ein Pilotprojekt mit einer kleineren Anzahl von Fahrzeugen sowie einer moderat dimensionierten Wasserstoff-Tankstelle oder, falls erforderlich, einer Ladestation zu realisieren.*

- 4) Eine Wasserstoffversorgung des Pilotprojekts sowie darauffolgender Ausbauschritte kann nur per lokaler Wasserelektrolyse oder Trailer erfolgen. Im Sinne von Skaleneffekten ist aber eine spätere Anbindung an zwei voraussichtlich bis spätestens 2035 realisierte Pipelinesysteme anzustreben. Bei Fokussierung auf Batteriefahrzeuge wäre die Bereitstellung größerer Strommengen im Megawattbereich sicherzustellen.

*In den angeregten Konzepten zum Infrastrukturaufbau sollten sowohl lokale Produktion wie auch überregionaler Bezug der beiden Kraftstoffarten berücksichtigt und im Zeitstrahl verortet werden.*

- 5) Die Relevanz von Wasserstoff und Brennstoffzellen reicht weit über den ÖPNV hinaus und betrifft die gesamten Sektoren Verkehr, Energie und Industrie. Der Aufbau neuer Strukturen ist hochkomplex und erfordert den sektorenübergreifenden Austausch von Entscheidungsträgern. Wasserstoff kann als Speicher für volatilen, erneuerbaren Strom für stationäre und mobile Anwendungen dienen, sodass Akteure aus der Stromwirtschaft einzubeziehen wären.

*Daher wird empfohlen, regelmäßige Strategiedialoge zwischen Entscheidungsträgern aller Sektoren einzuberufen und darin gemeinschaftlich getragene Innovationsstrategien voranzutreiben.*

- 6) Durch Kooperationen verschiedener Akteure mit komplementären Interessen und Ressourcen können Risiken sowie Kosten erheblich reduziert werden, indem durch Realisierung gemeinschaftlicher Geschäftsmodelle die Planungssicherheit erhöht und Skaleneffekte erschlossen werden.

*Angesichts dessen wird geraten, Kooperationen zwischen Akteuren mit komplementären Interessen sowie Ressourcen zu initiieren und zugunsten gemeinschaftlicher Projekte zu nutzen.*

- 7) Im Zuge der Entwicklung einer zumindest teilweise auf Wasserstoff und Brennstoffzellen beruhenden Wirtschaft im Landkreis entsteht erheblicher Koordinations- und Informationsbedarf, der mit den derzeitigen personellen Ressourcen der Kreisverwaltung nicht gedeckt werden kann.

*Daher wird die Schaffung einer im Umfeld der Kreisverwaltung angesiedelten Personalstelle empfohlen, die Aufgaben der Koordination und Information übernehmen kann.*

- 8) Während der HyStarter-Diskussionen sowie generell im Kontext von Energiewende und damit einhergehender Transformationsprozesse wurde immer wieder eine mangelnde Eindeutigkeit und Unstetigkeit politischer Zielsetzungen vor allem auf Ebene von Bund sowie Land moniert.

*Daraus folgt, dass auch auf Ebene des Landkreises richtungsweisende politische Entscheidungen bezüglich der zukünftigen Ausgestaltung des ÖPNV und der zugehörigen Kraftstoffversorgung erforderlich sind. Während Technologieneutralität prinzipiell zu begrüßen ist, begünstigt sie in der Praxis batterieelektrische Konzepte, da die anfänglich höheren Hürden eines wasserstoffbasierten ÖPNV nicht ohne substantielle politische Unterstützung zu überwinden sind. Da dem ÖPNV eine Initialfunktion für die Etablierung innovativer, wasserstoffbasierter Wirtschaftsstrukturen im Landkreis zukommt, darf die Tragweite entsprechender Beschlüsse nicht unterschätzt werden.*

- 9) Die vorliegende Untersuchung und vergleichbare Expertisen können die Entscheidungsträger im Landkreis zwar nach bestem Wissen und Gewissen informieren, aber letztendlich weder alle Ungewissheiten ausräumen noch spezifische technologische Entwicklungen antizipieren.

*Somit wird die kontinuierliche Einbeziehung wissenschaftlicher Akteure in die weiteren strategischen Planungen empfohlen, um die Berücksichtigung des aktuellsten Wissens zu garantieren.*

Es bleibt zu hoffen, dass der Landkreis Göppingen auf Grundlage dieser Empfehlungen den Anforderungen des SaubFahrzeugBeschG möglichst klimafreundlich und kostengünstig entsprechen kann. Die Zukunft bleibt offen und bietet Chancen für brennstoffzellen- wie auch batterieelektrische Konzepte, die es im stetigen Dialog zwischen den relevanten Stakeholdern zu erschließen gilt.

## Anhang

### Anhang 1: Annahmen TCO-Berechnung

In Tabelle 3 sind die festgelegten Kosten für die TCO-Betrachtung abgebildet. Die Anschaffungskosten wurden bereits in 4.3 thematisiert.

Die Aufsetzpunkte der Kraftstoffkosten werden aus [46] herangezogen. Es ist zu berücksichtigen, dass die Kraftstoffpreise für Dieselbusse steigen werden und die Stromkosten in Zukunft sinken werden. Des Weiteren werden für Strom und Wasserstoff unterschiedliche Startpunkte gewählt, um den Einfluss der Kraftstoffpreise abbilden zu können.

Die Instandhaltungskosten für die betrachteten Antriebsvarianten sind für eine Betrachtung aus unterschiedlichen Quellen festgelegt worden. Die Spanne der Instandhaltungskosten reicht von 0,52 €/km in [20], über 0,40 €/km in [24], bis hin zu 0,28 €/km [31]. Für die Ausarbeitung wird ein plausibler Wert im Bereich dieser Spanne gewählt. Für BEV-Busse werden Instandhaltungskosten von 0,39 €/km [20], 0,24€/km [31] bzw. 0,36 €/km [24] angenommen. Für FCEV-Busse wird eine Spanne von 0,3 -0,45 €/km [9] angenommen. In dieser Arbeit wird für beide Antriebsvarianten ein gemeinsamer Wert, der in der recherchierten Spanne liegt, festgelegt.

Als weiterer Bestandteil einer TCO-Betrachtung, müssen realistische Verbräuche angenommen werden. Die Festlegung der Verbräuche von emissionslosen Antriebe sind in 6.1 aufgeführt. In [30] wird ein Verbrauch von 40 l/100 km angenommen. Andere Quellen sprechen von 43,7 l/100 km [20] oder 45 l/100 km [24]. Als Annahme wurde der maximale Wert als Stadtumlaufverbrauch und der niedrigste Wert als Überlandumlaufverbrauch festgelegt.

Die Versicherungskosten stammen aus einem realen Angebot eines Versicherungsunternehmens, das im Zuge einer Untersuchung übermittelt wurde.

#### Kostenannahmen

Bezeichnung	Diesel	BEV	FCEV
Investitionskosten [€]	240.000	550.000	650.000
Kraftstoffkosten [€/l/kWh/kg]	1,6	0,38 (niedrig) 0,66 (hoch)	7 (niedrig) 10(hoch)
Instandhaltung [€/km]	0,45	0,37	0,37
Verbrauch [l/kWh/kg/100km]	40 (Überland) 45 (Stadt) 42 (Durchschnitt)	170 (Überland) 200 (Stadt) 185 (Durchschnitt)	9,5 (Überland) 10,5 (Stadt) 10 (Durchschnitt)
Personalkosten [€/h]	40 [59]	40 [59]	40 [59]
Versicherung [€]	3.000	4200	4200

Tabelle 3: Kostenannahmen für die TCO

#### Annahmen Laufleistung

Die Laufleistungen wurden aus dem Nahverkehrsplan des Landkreis Göppingen abgeleitet.

	Überlandumlauf	Stadtumlauf	Landkreis
Laufleistung p.a. [km]	105.000	85.657	7.042.187 (46.637 pro Bus)

Tabelle 4: Annahmen Laufleistungen

## Anhang 2: Annahmen Treibhausgasemissionen

Die CO<sub>2</sub>-Äquivalente für die Well-to-Wheel Betrachtung unter 6.3 sind in Tabelle 5 abgebildet.

	<b>Diesel</b>	<b>Strom</b>		<b>Wasserstoff</b>	
		Strommix	Grünstrom	grau	grün
CO <sub>2</sub> - Äquivalent [g/kWh]	315 [55]	485 [62]	0	68,89 [63]	0

Tabelle 5: Annahmen CO<sub>2</sub>-Äquivalente Kraftstoffe

## Literatur

- [1] *Aslan V., Ba Z., Ivkovic M., Pertschi J., Schäfer M., Scherer D., Städele J., Stocker A.* Lösungsansätze zur nachhaltigen und klimafreundlichen Transformation des öffentlichen Nahverkehrs im Zeitraum 2025 bis 2030 für den Landkreis Göppingen. Esslingen; 19.03.2023.
- [2] *Basler Verkehrs-Betriebe.* Depotladung und Gelegenheitsladung; 15.10.2021.
- [3] *Bernhardt J.* Mit Wasserstoff durch Bielefeld: Die neuen "H2 City Gold" Busse von moBiel. <https://www.urban-transport-magazine.com/mit-wasserstoff-durch-bielefeld-die-neuen-h2-city-gold-busse-von-mobiel/>.
- [4] *Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur.* Richtlinie zur Förderung alternativer Antriebe von Bussen im Personenverkehr; 07.09.2021.
- [5] *Bünger U., Steffen N., Zerhusen J., Monsalve C., Kharboutli S., Michalski J., Ruhe S., Albrecht U.* Infrastruktur E-Mobilität. Analyse eines koordinierten Infrastrukturaufbaus zur Versorgung von Batterie- und Brennstoffzellen-Pkw in Deutschland; 2021.
- [6] *Caetano Bus.* e.city Gold. the 100% electric bus for your city.
- [7] *Deutsche Bundesregierung.* Die Nationale Wasserstoffstrategie; 2020.
- [8] *Deutscher Bundestag.* Gesetz über die Beschaffung sauberer Straßenfahrzeuge. SaubFahrzeugBeschG; 09.06.2021.
- [9] *EE Energy Engineers GmbH.* Machbarkeitsstudie: HyExperts-Lastverkehr mit grünem Wasserstoff-Future Mobility; 2022.
- [10] *Ehret O.* Wasserstoff und Brennstoffzellen: Antworten auf wichtige Fragen; 2018.
- [11] *Ehret O.* Wasserstoffmobilität: Stand, Trends, Perspektiven. Bonn; 2020.
- [12] *Ehret O., Wörner R.* Wasserstoff-Gipfel Göppingen: Handlungserfordernisse hinsichtlich der Einführung emissionsfreier Busse und Kraftstoffinfrastrukturen. Göppingen; 08.02.2023.
- [13] *EMCEL.* Wie entwickeln sich die Preise für Brennstoffzellenbusse? <https://emcel.com/de/preise-fuer-brennstoffzellenbusse/>.
- [14] *eMobilitaet.* Frankfurt bestellt 13 Wasserstoffbusse bei Solaris. <https://emobilitaet.online/news/wirtschaft/7276-frankfurt-solaris-wasserstoffbus>.
- [15] *EnBW.* Von Kohle über Erdgas zu Wasserstoff. Kohleausstieg am Standort Altbach/Deizisau. <https://www.enbw.com/unternehmen/konzern/energieerzeugung/neubau-und-projekte/gas-und-dampfturbinenanlage-gud-altbach-deizisau/>.
- [16] *Europäische Kommission.* Vorschlag für eine Verordnung des europäischen Parlaments und des Rates über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe und zur Aufhebung der Richtlinie 2014/94/EU des Europäischen Parlaments und des Rates. 2021/0223 (COD); 14.07.2021.
- [17] *Europäische Kommission.* Europäischer Grüner Deal: Kommission schlägt Null-Emissionsziel für neue Stadtbusse bis 2030 und 90 % weniger Emissionen für neue Lkw bis 2040 vor. Straßburg; 14.02.2023.
- [18] *Europäische Union.* Richtlinie zur Änderung der Richtlinie 2009/33/EG über die Förderung sauberer und energieeffizienter Straßenfahrzeuge. 2019/1161; 20.06.2019.
- [19] *Faltenbacher M.* Erkenntnisse aus der Praxis Betriebliche, ökologische und ökonomische Bewertung emissionsfreier Busse. Abschluss Symposium; 23.09.2021.
- [20] *Faltenbacher M., Bopp J., Roderer V., Vetter O., Kupferschmid S., Klingenberg H., Burkhardt J., Staffetius S., Verleger S., Schwärzel-Lange C., Howaldt T., Kiepsch M., Otte M., Ramme J., Schmidt R., Knotte T., Jehle C., Krug S., Krey O., Ohm B., Kratz S.-E., von Leuckart S., Sarac Z.* Programmbegleitforschung Innovative Antriebe und Fahrzeuge. Innovative Antriebe im straßengebundenen ÖPNV. Berlin; 13.08.2021.
- [21] *Faltenbacher M., Kupferschmid S.* Emissionsfreie Energie- und Antriebskonzepte für Stadtbusse zur Umsetzung der europäischen Clean Vehicles Directive; 20.02.2020.
- [22] *Grundhoff S.* Auf Europa-Tour: MAN zeigt die Praxistauglichkeit von Elektro-Bussen. <https://www.autobild.de/artikel/man-e-bus-elektro-test-nachhaltigkeit-reichweite-preis-21448921.html>.
- [23] *H2 Mobility.* Wasserstoffbetankung von Schwerlastfahrzeugen- die Optionen im Überblick. Berlin; 2021.
- [24] *Hacker F., Waldenfels R. von, Mottschall M.* Wirtschaftlichkeit von Elektromobilität in gewerblichen Anwendungen. Betrachtung von Gesamtnutzungskosten, ökonomischen

- Potenzialen und möglicher CO<sub>2</sub>-Minderung; 04/2015.
- [25] *Hartmann C.* Europa beschließt Verbrenner-Aus - nur Lkw dürfen noch ein bisschen. <https://transport-online.de/news/europa-beschliesst-verbrenner-aus-nur-lkw-duerfen-noch-ein-bisschen-80920.html>.
- [26] *Hof E., Kupferschmid S., Faltenbacher M.* Einführung von Wasserstoff - bussen im ÖPNV. Fahrzeuge, Infrastruktur und betriebliche Aspekte. Berlin; 2018.
- [27] *Irizar Group.* Integrale Elektromobilitätslösungen für Städte; 2022.
- [28] *Jenne M., Jörissen L., Schilling M.* Potenziale in der Wasserstoff-Tankstellentechnologie; 2022.
- [29] *Jens J., Wang A., van der Leun K., Peters D., Buseman M.* Extending the European Hydrogen Backbone. A European Hydrogen Infrastructure vision covering 21 countries; 2021.
- [30] *Knote T., Faltenbacher M., Kratz S.-E., Schwärzel-Lange C.* Leitfaden für Busse mit alternativen Antrieben; 2021.
- [31] *Knote T., Haufe B., Saroch L.* Ansätze zur Standardisierung und Zielkosten für Elektrobusse. Gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Dresden; 5/2017.
- [32] *Koch F., Verleger S.* Brennstoffzellenbusse für den emissionsfreien ÖPNV; 07.07.2022.
- [33] *Koeller S.* SSB will vier Brennstoffzellenbusse beschaffen. <https://www.electrive.net/2022/07/07/ssb-will-vier-brennstoffzellenbusse-beschaffen/>.
- [34] *Kros M.* Evobus kontert Kritik an Elektrobussen. [https://www.mannheimer-morgen.de/wirtschaft/firmen\\_artikel,-mercedes-benz-evobus-kontert-kritik-an-elektrobussen-\\_arid,1400862.html](https://www.mannheimer-morgen.de/wirtschaft/firmen_artikel,-mercedes-benz-evobus-kontert-kritik-an-elektrobussen-_arid,1400862.html).
- [35] *Kunith A.* Elektrifizierung des urbanen öffentlichen Busverkehrs - Technologiebewertung für den kosteneffizienten Betrieb emissionsfreier Bussysteme: Springer Vieweg; 2017.
- [36] *Landkreis Göppingen.* Neues Fahrplankonzept ab 1. Januar 2019. Ab jetzt: im Takt: Bus19+. [https://www.landkreis-goeppingen.de/site/LRA-GP-Internet/get/params\\_E167290143/15615254/Bus19plus\\_E-Paper.pdf](https://www.landkreis-goeppingen.de/site/LRA-GP-Internet/get/params_E167290143/15615254/Bus19plus_E-Paper.pdf).
- [37] *Landkreis Göppingen.* Nahverkehrsplan für den Landkreis Göppingen. 3. Fortschreibung (Gesamt-Fortschreibung); 15.09.2022.
- [38] *Marquardt C.* RVK Köln – die lange Geschichte ihrer Wasserstoffbusse. <https://www.urban-transport-magazine.com/rvk-koeln-die-lange-geschichte-ihrer-wasserstoffbusse/>.
- [39] *Mercedes-Benz.* Gesamtwirtschaftlichkeit. Alle Vorteile im Blick. [https://www.mercedes-benz-bus.com/de\\_LU/models/ecitaro/e-mobility/total-economy.html](https://www.mercedes-benz-bus.com/de_LU/models/ecitaro/e-mobility/total-economy.html).
- [40] *Mercedes-Benz.* Extremer Einsatz in der Schweiz: Mercedes-Benz eCitaro fährt künftig bis zu 22 Stunden und 370 Kilometer täglich im Linienbetrieb; 03.09.2021.
- [41] *Mercedes-Benz Group.* Der eCitaro. Alle technischen Daten und Ausstattungen im Überblick; 2023.
- [42] *Mobilitätsmagazin.* E-Bus: Die Zukunft im öffentlichen Nahverkehr? <https://www.bussgeldkatalog.org/e-bus/>.
- [43] *Nationaler Wasserstoffrat.* Wasserstofftransport; 02.07.2021.
- [44] *NOW GmbH.* Brennstoffzellenbusse. <https://www.ebustool.de/antriebsformen/brennstoffzellenbusse/>.
- [45] *NOW GmbH.* Förderfinder. <https://www.now-gmbh.de/foerderung/foerderfinder>.
- [46] *NOW GmbH.* Factsheet TCO. eine Wirtschaftlichkeitsanalyse der Antriebsarten für PKW. Berlin; 03/2023.
- [47] *Omnibus News.* eCitaro REX startet 2023. <https://omnibus.news/ecitaro-rex-startet-2023>.
- [48] *Plantz J.* Erster Wasserstoff für Bad Dürkheim. Die Rheinlandpfalz. 06.12.2022.
- [49] *Projekträger Jülich.* Förderung alternativer Antriebe von Bussen im Personenverkehr-Fahrzeuge und Infrastruktur. <https://www.ptj.de/projektfoerderung/busfoerderung/beschaffung>.
- [50] *Rohs M., Krewerth F.* E-Bus-Radar. Das Jahrzehnt des E-Busses hat begonnen. <https://www.pwc.de/de/branchen-und-markte/oeffentlicher-sektor/e-bus-radar-2022.pdf>.
- [51] *Schaal S.* Regionalverkehr Köln bestellt BZ-Busse bei Solaris und Wrightbus. <https://www.electrive.net/2022/05/30/regionalverkehr-koeln-bestellt-bz-busse-bei-solaris-und-wrightbus/>.
- [52] *Schaal S.* DB Regio Bus bestellt erstmals H2-Busse bei CaetanoBus.

- <https://www.electrive.net/2023/02/17/db-regio-bus-bestellt-erstmal-h2-busse-bei-caetanobus/>.
- [53] *Schmidt A., Steiger P., Koch F., Budschun F., Beste J., Hölzinger N.* Ergebnisbericht 2023. HyStarter-Region Landkreis Göppingen; 2023.
- [54] *Schmidt T.* Wasserstofftechnik. Grundlagen, Systeme, Anwendung, Wirtschaft. Leipzig: Hanser Verlag; 2020.
- [55] *Schmied M., Mottschall M.* Berechnung des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen des ÖPNV. Leitfaden zur Anwendung der europäischen Norm EN 16258.
- [56] *Schuhmacher O.* DB gibt Startschuss für Wasserstoffbusse. Berlin; 16.02.2023.
- [57] *Schulz-Dübi C., Zürcher R., Otte M., Schwarzenberger J.* Leitfaden Flottenelektrofizierung für Busbetriebe. Bern; 2019.
- [58] *Schuster M., Steinacher I., Link C.* Marktübersicht. Elektro- und Wasserstoffbusse. Wien; 2021.
- [59] *Sphera Solutions GmbH.* Abschlussbericht Transformationsprozess zu emissionsfreien Bussen im Kontext der Clean Vehicles Directive (CVD-Studie); 2021.
- [60] *Stadtwerke Stuttgart.* Fördermittel für Neckarpipeline „H2 GeNeSiS“ bewilligt; 01.07.2022.
- [61] *terraneTs bw.* Wasserstoff für Baden-Württemberg. Eine Initiative der terraneTs bw. <https://www.h2-fuer-bw.de/#c267>.
- [62] *Umwelt Bundesamt.* Strom- und Wärmeversorgung in Zahlen. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/energieversorgung/strom-waermeversorgung-in-zahlen#Strommix>.
- [63] *Umwelt Bundesamt.* Wasserstoff – Schlüssel im künftigen Energiesystem. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/wasserstoff-schluesel-im-kuenftigen-energiesystem#undefined>.
- [64] *Unternehmen für Ladesäuleninfrastruktur.* Angebotspreise Ladesäulen. 2022.
- [65] *VDE.* Technischer Leitfaden: Ladeinfrastruktur Elektromobilität. Version 4; 10/2021.
- [66] *Verkehrsverbund Rhein-Sieg GmbH.* Brennstoffzellen-Linienbus. <https://infoportal.mobil.nrw/technik/busse-mit-elektrischem-antrieb/brennstoffzellen-linienbus.html>.
- [67] *VVS.* Liniennetz Landkreis Göppingen. <https://download.vvs.de/Netzplan-Go%CC%88ppingen.pdf>.
- [68] *Wienecke J.-M.* offene Fragen im Rahmen der Projektarbeit.
- [69] *Wirtschaftsförderung Region Stuttgart.* Modellregion Grüner Wasserstoff – H2 GeNeSiS. Wasserstoff-Gesamtsystem entlang des Neckars als Basis für eine Skalierung der Wasserstoffwirtschaft in der Region Stuttgart. <https://zukunftsenergien.region-stuttgart.de/modellregion-gruener-wasserstoff-h2-genesis>.
- [70] *Wrightbus.* Kite DF FCEV Hydroliner; 2023.
- [71] *Wuppertaler Stadtwerke.* Datenblatt A330 FC Brennstoffzellen-Hybridbus der WSW mobil GmbH.
- [72] *Wuppertaler Stadtwerke.* WSW-Wasserstoffbusse fahren ab heute im Linienverkehr. Wuppertal; 19.06.2020.
- [73] *Wuppertaler Stadtwerke.* Datenblatt Solaris Urbino 12 hydrogen. Brennstoffzellen-Hybridbus der WSW mobil GmbH; 4/2021.
- [74] *Wuppertaler Stadtwerke.* Mit Wasserstoff durchs ganze Tal. <https://www.wsw-online.de/wsw-mobil/mehr-service/aktuelles/wasserstoffbusse/#:~:text=F%C3%B6rderung%20f%C3%BCr%20Busse%20und%20Tankstellenbau&text=Die%20Kosten%20eines%20Brennstoffzellenbusses%20betragen,%C3%BCber%20die%20F%C3%B6rdergelder%20gedeckt%20werden>.