

BERICHT

Prüfung der Einführung alternativer Antriebsformen (CVD)





BERICHT

Machbarkeitsstudie zur Prüfung der Einführung alternativer Antriebsformen im Verbandsgebiet des ZVSN (Landkreise Göttingen, Northeim, Holzminden)

Auftraggeber/-in:

Zweckverband Verkehrsverbund
Süd-Niedersachsen (ZVSN)
Jutta-Limbach-Str. 3
37073 Göttingen

Auftragnehmer/-in:

PTV
Transport Consult GmbH
Stumpfstr. 1
76131 Karlsruhe

Im Unterauftrag:

TransportTechnologie-Consult Karlsruhe
GmbH (TTK)
Durlacher Allee 73
76131 Karlsruhe

Karlsruhe, 18.04.2023

Dokumentinformationen

Kurztitel	Prüfung der Einführung alternativer Antriebsformen
Auftraggeber/-in	Zweckverband Verkehrsverbund Südniedersachsen
Auftrags-Nr.	
Auftragnehmer/-in	PTV Transport Consult GmbH
PTV-Projekt-Nr.	TC5000519
Autor/-in	Johannes Prinzler, Svenja Höner
Erstellungsdatum	28.03.2023
zuletzt gespeichert	01.12.2023

Inhalt

1	Aufgabenstellung.....	6
2	Kurze Zusammenfassung der Studie und ihrer Ergebnisse.....	7
3	Untersuchung / Darstellung der Teilnetze des ZVSN (AP1).....	8
3.1	Bestandsaufnahme.....	8
3.2	Betrachtung der definierten Teilnetze auf Laufleistung und Topografie.....	10
3.2.1	Teilnetz A: 11 - Harz (Landkreis Göttingen).....	10
3.2.2	Teilnetz B: Einbeck + Umland.....	12
3.2.3	Teilnetz C: Bodenwerder - Bürgerbus.....	14
4	Vertiefte Untersuchungen (AP2) - Simulationen.....	16
4.1	Teilnetz A: 11 - Harz (Landkreis Göttingen).....	17
4.2	Teilnetz B: Einbeck + Umland.....	19
4.3	Teilnetz C: Bodenwerder-Polle – Bürgerbus.....	22
5	Vertiefte Untersuchungen (AP2) – Wirtschaftlichkeit.....	25
5.1	Teilnetz A: 11 - Harz (Landkreis Göttingen).....	28
5.2	Teilnetz B: Einbeck + Umland.....	30
5.3	Teilnetz C: Bodenwerder – Bürgerbus.....	32
6	Zusammenfassung der vertieften Untersuchung und Empfehlung (AP2).....	34
7	Rahmenbedingungen für den Aufgabenträger (AP3).....	37
7.1	Gesetzlicher Rahmen.....	37
7.2	Clean Vehicles Directive umsetzen.....	38
8	Zusammenfassung (AP4).....	41

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Gesamtübersicht Teilnetz 11 - Harz	11
Tabelle 2: Linienübersicht Teilnetz A: 11 – Harz (Werktag)	11
Tabelle 3: Gesamtübersicht Teilnetz B: Einbeck + Umland	12
Tabelle 4: Linienübersicht Teilnetz B: Einbeck + Umland (Werktag)	13
Tabelle 5: Gesamtübersicht Teilnetz C: Bodenwerder - Bürgerbus	14
Tabelle 7: Linienübersicht Teilnetz C: Bodenwerder – Bürgerbus (Werktag)	15
Tabelle 8: Simulationsergebnis Batteriebusse Teilnetz 11	18
Tabelle 9: Simulationsergebnis Teilnetz Einbeck + Umland	21
Tabelle 10: Simulationsergebnis Bürgerbus Bodenwerder-Polle	23
Tabelle 11: Kostensätze Fahrzeuge	25
Tabelle 12: Kostensätze Infrastruktur	26
Tabelle 13: Umstellungsszenario Clean Vehicle Directive	27
Tabelle 14: Umstellungsszenario 100%-Umstellung (Batterie)	27
Tabelle 15: Umstellungsszenario 100%-Umstellung (Wasserstoff)	27

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Topographie im Untersuchungsgebiet _____	9
Abbildung 2: Visum Modell des Untersuchungsgebietes _____	10
Abbildung 3: Netzdarstellung Linienwege Teilnetz A: 11 – Harz _____	12
Abbildung 4: Netzdarstellung Linienwege Teilnetz B: Einbeck + Umland _____	14
Abbildung 5: Netzdarstellung Linienwege Teilnetz C: Bodenwerder - Bürgerbus _____	15
Abbildung 6: Betriebshof in Osterode _____	Fehler! Textmarke nicht definiert.
Abbildung 7: Teilnetz 11 - gleichzeitige Ladevorgänge _____	19
Abbildung 8: Betriebshof in Einbeck (links) und Abstellfläche in Dassel (rechts) _____	20
Abbildung 9: Teilnetz Einbeck + Umgebung - gleichzeitige Ladevorgänge _____	21
Abbildung 10: Abstellfläche in Bodenwerder _____	22
Abbildung 11: State-of-Charge Diagramm Bürgerbus Bodenwerder, Szenario 1.2 _____	23
Abbildung 12: State-of-Charge Diagramm Bürgerbus Bodenwerder, Szenario 2.2 _____	24
Abbildung 13: Kosten des Umstellungsszenarios in Teilnetz 11 (Osterode) - Szenario CVD _____	28
Abbildung 14: Kosten des Umstellungsszenarios in Teilnetz 11 (Osterode) - Szenario 100% _____	29
Abbildung 15: Umlaufzeiten pro Werktag im Teilnetz 11 Osterode _____	30
Abbildung 16: Kosten des Umstellungsszenarios in Teilnetz Einbeck - Szenario CVD _____	31
Abbildung 17: Kosten des Umstellungsszenarios in Teilnetz Einbeck - Szenario 100% _____	31
Abbildung 18: Umlaufzeiten pro Werktag im Teilnetz Einbeck _____	32
Abbildung 19: Kosten des Umstellungsszenarios in Teilnetz Bürgerbus - Szenario 100% _____	33
Abbildung 20: Mindestanteile an sauberen und emissionsfreien Fahrzeugen nach dem Gesetz je Ausschreibungszeitraum _____	37

1 Aufgabenstellung

Der Zweckverband Verkehrsverbund Süd-Niedersachsen (ZVSN) ist der Aufgabenträger für den straßengebundenen ÖPNV in den Landkreisen Göttingen, Holzminden und Northeim. Im aktuellen Nahverkehrsplan des ZVSN, beschlossen am 01.07.2021, wurde als Prüfauftrag festgelegt, dass im Zusammenhang mit umweltpolitischen Zielen sowie der Clean Vehicles Directive (CVD) der EU zukünftig vermehrt alternative Antriebsformen zur Verbesserung der Umweltqualität im ÖPNV-Betrieb zu berücksichtigen sind, um Schadstoffemissionen und Lärmwirkungen durch den ÖPNV zu minimieren. Der Einsatz verschiedener Antriebsformen mit dem Ziel, die bestmögliche Einsatzform für den Betrieb abhängig vom jeweiligen Einsatzgebiet zu finden wurde geprüft. Dabei wurden auch die benötigten (Lade-) Infrastrukturen vor Ort betrachtet.

Der ZVSN beabsichtigt, bei zukünftigen Vergabeverfahren gemäß geltenden Gesetzen die Bestellung von Verkehrsleistungen anteilig mit Fahrzeugen, die durch alternative Antriebsformen betrieben werden, vorzunehmen. Aus einer Vielzahl verschiedener möglicher neuartiger Antriebsformen müssen Lösungen gefunden werden, die einen zuverlässigen, dauerhaften und nachhaltigen Betrieb der einzelnen Teilnetze ermöglichen, der wirtschaftlich tragfähig erscheint.

Daher wurde im Rahmen dieses Projektes geprüft, welche Antriebsformen – auch unter Berücksichtigung der Topografie des Verbandsgebietes – technisch, ökologisch und ökonomisch sinnvoll umsetzbar sind. Dabei muss beachtet werden, dass die Busse in den Teilnetzen teilweise hohe tägliche Kilometer-Laufleistungen erreichen, sodass hier bevorzugt nach Antriebsformen bzw. Lösungen gesucht werden soll, die mit dem heutigen Stand der Technik abbildbar sind.

Darüber hinaus werden die rechtlichen Rahmenbedingungen der Clean Vehicles Directive und des darauf aufbauenden Saubere-Fahrzeuge-Beschaffungs-Gesetz dargestellt. Der gesetzliche Auftrag kann auf verschiedene Art und Weise erfüllt werden. Die Möglichkeiten zur Umsetzung der Antriebswende im Busverkehr durch Steuerung oder Anreizsetzung werden herausgearbeitet. Auch die Sinnhaftigkeit der Bildung eines Fahrzeugpools bzw. der Infrastrukturbereitstellung durch den ZVSN als Aufgabenträger wurde untersucht.

Die Fragestellungen wurden gemeinsam mit unserem Tochterunternehmen TTK Transport Consult bearbeitet. Die TTK wurde im Auftrag als Subunternehmer der PTV Transport Consult GmbH eingebunden. Die Projektleitung lag bei der PTV.

2 Kurze Zusammenfassung der Studie und ihrer Ergebnisse

Um die Antriebswende im Busverkehr ökonomisch zu gestalten, wurde beispielhaft in drei Teilräumen des Zweckverband Süd-niedersachsen (ZVSN) nach den effizientesten Antriebsformen gesucht, die die gesetzlichen Regelungen durch das Saubere-Fahrzeuge-Beschaffungsgesetz ermöglichen. Dazu wurden die Linienbündel untersucht und ein emissionsfreier Betrieb unter Berücksichtigung der Topografie, der Witterungsverhältnisse und der Möglichkeiten, vor Ort Ladepunkte zu schaffen simuliert. Ziel war es, deren Einfluss auf die Umlaufplanung (betrieblich) zu untersuchen und somit die Anzahl benötigter Mehrfahrzeuge (Mehrpersonal) ausweisen zu können. Die Auswirkungen auf die betrieblichen Mehrkosten, die notwendigen Infrastrukturen und die Kosten durch Fahrzeuganschaffungen und Treibstoffen/Energie können folgendermaßen zusammengefasst werden:

Der Umstieg auf einen batterieelektrischen Betrieb bedeutet:

- Benötigte Mehrfahrzeuge durch Ladepausen im Betrieb
- Kompliziertere Umlaufplanungen mit Berücksichtigung von Ladepausen und komplexeren Dienstplänen. Voraussichtlich entstehender Mehrpersonalaufwand.
- Schaffung von Ladepunkten in Depots und teilweise an Endhaltestellen
- Eine Erhöhung der Kosten der Bereitstellung von ÖPNV ca. um Faktor 2-3.

Der Umstieg auf einen Brennstoffzellen-Betrieb bedeutet:

- Keine Mehrfahrzeuge gegenüber Dieselbetrieb benötigt durch schnelles Tanken
- Entsprechend einfachere Umlaufplanungen ohne Personalmehraufwand
- Eine Erhöhung der Kosten für ÖPNV ca. um Faktor 2-3, allerdings nur wenn H₂- (Betankungs-) Infrastrukturen bereits vorhanden sind. Wenn Betankungsinfrastrukturen separat für den ÖPNV geschaffen werden müssen, steigen die Kosten entsprechend (ggf. deutlich)
- Ein kostengünstiger Betrieb mit Wasserstoffbussen ergibt sich nur bei (lokaler), kostengünstiger Wasserstoffherzeugung. Hierzu sind Synergieeffekte mit der Energieerzeugung zu nutzen. Da absehbar Wasserstoff auch in anderen Bereichen einer hohen Nachfrage unterliegt, ist ein Wasserstoff-Betrieb im ÖPNV nur bei lokaler grüner Wasserstoffherzeugung empfehlenswert, bei der überflüssiger Strom umgewandelt wird und dieser nicht an anderer Stelle effizienter Emissionen einsparen würde.

Den Wandel gestalten – Organisation der Antriebswende

Die Aufgabenträger haben die Möglichkeit, selbst Lade- bzw. Betankungsinfrastrukturen zu schaffen und ggf. auch den Verkehrsunternehmen Busse zu stellen. Dadurch können die Aufgabenträger die Antriebswende selbst aktiv umsetzen, einheitliche Technologieräume schaffen und auch bei Betreiberwechsel eines Linienbündels eine Weiternutzung der Infrastrukturen sicherstellen. Allerdings ist dies verbunden mit einem hohen organisatorischen und finanziellen Aufwand für den Aufgabenträger. Die Umsetzung von emissionsarmen/freien Fahrzeugen sollte bei jeder Neu-Ausschreibung von Linien bzw. Teilnetzen geprüft und nur noch in Ausnahmefällen auf dieselbetriebene Fahrzeuge zurückgegriffen werden.

3 Untersuchung / Darstellung der Teilnetze des ZVSN (AP1)

3.1 Bestandsaufnahme

Der vorliegenden Untersuchung liegen diverse Datensätze zugrunde, welche nachfolgend aufgelistet und beschrieben werden:

- Liniendaten der zu untersuchenden Linien/Teilnetze
- Netzdaten des Untersuchungsgebietes
- Höhendaten des Untersuchungsgebietes

Liniendaten

Die Liniendaten wurden vom ZVSN im VDV-Format zur Verfügung gestellt. Sie beinhalten neben den Linienwegen und Haltepunkten alle relevanten Fahrplandaten. Die Untersuchungen beziehen sich auf das Fahrplanangebot mit Fahrplanstand Juli 2022. Anpassungen von Linienwegen / Linien / Fahrplanlagen sind nach Aussage des ZVSN aufgrund vielfältiger Verflechtungen in der Schülerbeförderung nur sehr bedingt möglich und wurden bei dieser Machbarkeitsuntersuchung daher nicht berücksichtigt. Die Simulationsrechnungen (Umlaufbildung) beziehen sich auf einen repräsentativen Werktag (Schultag, 21.07.2022).

Netzdaten

Die Netzdaten des Untersuchungsgebietes wurden von der TTK im OSM-Format (Open Street Map) zur Verfügung gestellt (Stand Juli 2022)¹.

Geodaten

Die Geodaten des Untersuchungsgebietes wurden von der TTK im Geo-TIF-Format zur Verfügung gestellt (Stand Juli 2022)². Aus den Geodaten wurde ein DEM (digital elevation model) erstellt, welches die Topographie im Untersuchungsgebiet abbildet. In **Abbildung 1** wird eine derartige topographische Karte zur Veranschaulichung dargestellt.

¹ Quelle: <https://download.geofabrik.de/>

² Quelle: <https://earthexplorer.usgs.gov/>

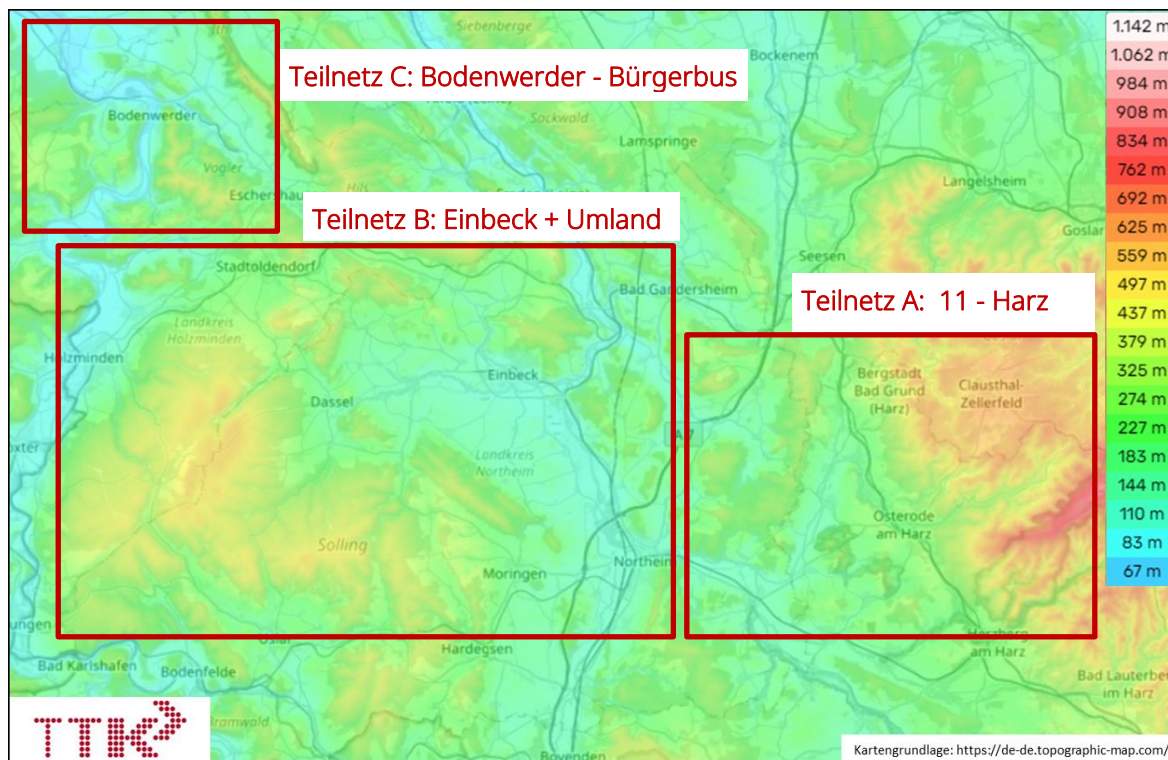


Abbildung 1: Topographie im Untersuchungsgebiet

Es ist ersichtlich, dass Teilnetz A durch seine Lage am Harz die anspruchsvollste Topographie aufweist. Dies gilt insbesondere für Linien in Richtung Clausthal-Zellerfeld, welches sich auf etwa 820 m ü. M. befindet. Auch Teilnetz B weist, besonders im Raum Dassel, teils anspruchsvolle Topographie auf, ist aber insgesamt gemäßigter als Teilnetz A. In Teilnetz C, im Gebiet in und um Bodenwerder, sind auf den Linienwegen weniger nennenswerte topographische Gegebenheiten vorzufinden.

Visum Modell

Die einzelnen Datensätze wurden aufbereitet, auf Plausibilität geprüft und in PTV Visum importiert. Das resultierende Modell bildet die Grundlage der weiteren Untersuchungen.

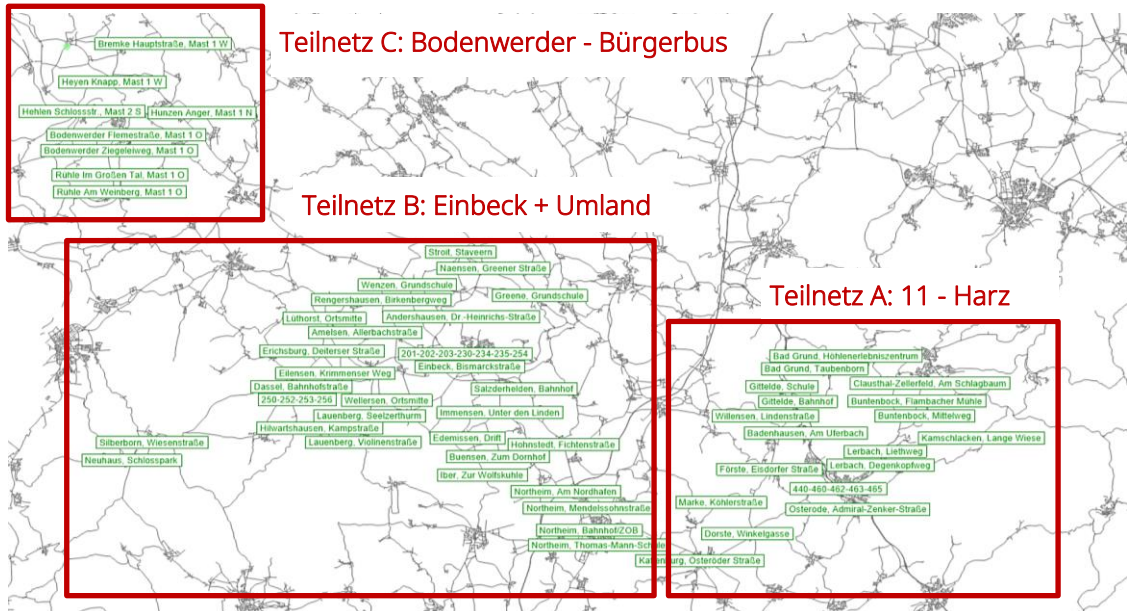


Abbildung 2: Visum Modell des Untersuchungsgebietes

Das Modell beinhaltet das Straßennetz inklusive der zugehörigen Höhendaten, sowie Liniendaten der betreffenden Buslinien in den jeweiligen Teilnetzen. Genauere Informationen hierzu werden in den nachfolgenden Abschnitten aufgelistet.

3.2 Betrachtung der definierten Teilnetze auf Laufleistung und Topografie

In der Simulation wird vereinfacht von einem ausschließlichen Betrieb mit Standardbussen (Solo-bus) ausgegangen ohne Einbeziehung von Reservefahrzeugen, auch wenn in der Realität ein Mischbetrieb zwischen Standard- und Gelenkbussen verkehrt. Eine Gliederung in verschiedene Busgrößen je nach Fahrplanfahrt sowie die Betrachtung von Reservefahrzeugen hätte die Komplexität der Untersuchung deutlich erhöht. Die Simulation berechnet ein rechnerisches Optimum des Betriebs, dadurch kann eine plausible Anzahl an benötigten Fahrzeugen durch eine Umstellung der Antriebstechnologien ausgewiesen werden.

3.2.1 Teilnetz A: 11 - Harz (Landkreis Göttingen)

In der nachfolgenden **Tabelle 1** werden allgemeine Informationen zu Teilnetz 11 aufgelistet. Eine linienscharfe Betrachtung folgt in **Tabelle 2**.

Tabelle 1: Gesamtübersicht Teilnetz 11 - Harz

Landkreis	Göttingen
Standort Depot (Festlegung)	Osterode
Topographie	sehr anspruchsvoll
Linien	440, 460, 462, 463, 465
Laufleistung / Werktag (Ist-Zustand)	3.422 km
Anzahl Fahrzeuge (Ist-Zustand)	13 Solobusse in der Simulation (11 Solobusse im realen Einsatz)
Neuvergabe	01.08.2029

Tabelle 2: Linienübersicht Teilnetz A: 11 – Harz (Werktag)

Linie	Anzahl bediente Haltepunkte	Ø – Linienroutenlänge [km]	Anzahl Linienrouten	Fahrthäufigkeit [Fahrten/h]	Anzahl Fahrplanfahrten	Laufleistung Fahrplanfahrten [km]	Bedienzeit
440	41	20,75	13	1 bis 3	39	795,84	05:31 – 20:27
460	51	27,57	32	1 bis 5	38	1104,03	05:26 – 20:15
462	29	13,22	7	1 bis 3	13	170,29	06:37 – 16:40
463	33	19,10	18	1 bis 3	27	540,69	06:38 – 19:38
465	21	17,37	16	1 bis 3	34	625,03	07:11 – 19:56

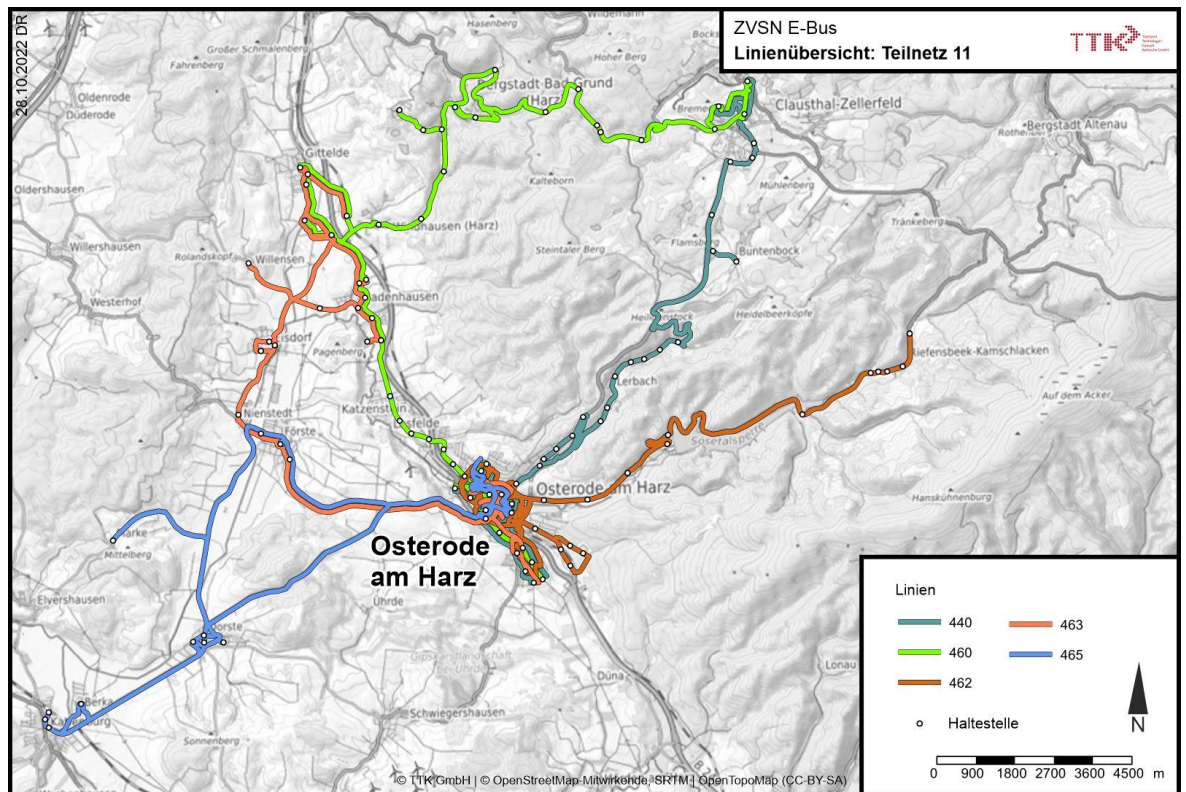


Abbildung 3: Netzdarstellung Linienwege Teilnetz A: 11 – Harz

Obige **Abbildung 3** stellt die Linienwege aller Linien im Teilnetz grafisch im Visum Modell dar. Zentraler Ort von Teilnetz A, inkl. Depot der hier eingesetzten Fahrzeuge, ist Osterode am Harz.

3.2.2 Teilnetz B: Einbeck + Umland

In der nachfolgenden **Tabelle 3** werden allgemeine Informationen zu Teilnetz B aufgelistet. Eine linienscharfe Betrachtung folgt in **Tabelle 4**.

Tabelle 3: Gesamtübersicht Teilnetz B: Einbeck + Umland

Landkreis	Northeim
Standort Depot (Festlegung)	Einbeck (max. 9 Fzg.) und Dassel (max. 11 Fzg.)
Topographie	teilweise anspruchsvoll
Linien	201, 202, 203, 230, 234, 235, 250, 252, 253, 254, 256
Laufleistung / Werktag (Ist-Zustand)	4.057 km
Anzahl Fahrzeuge (Ist-Zustand)	18 (Solobusse)
Neuvergabe	01.08.2025

Tabelle 4: Linienübersicht Teilnetz B: Einbeck + Umland (Werktag)

Linie	Anzahl bediente Haltepunkte	Ø – Linienroutenlänge [km]	Anzahl Linienrouten	Fahrthäufigkeit [Fahrten/h] / Takt [min]	Anzahl Fahrplanfahrten	Laufleistung Fahrplanfahrten [km]	Bedienzeit
201	18	5,9	3	60 min	16	104,6	05:37 – 21:02
202	9	4,36	3	60 min	14	54,61	05:56 – 20:27
203	9	4,24	2	60 min	12	51,85	06:12 – 20:40
230	38	17,01	13	1 bis 4	34	494,62	05:04 – 00:46
234	20	19,56	16	1 bis 3	19	369	06:23 – 18:50
235	36	15,08	22	1 bis 4	40	484,79	05:45 – 20:06
250	34	15,8	23	1 bis 4	35	584,58	05:28 – 21:19
252	31	23,69	22	1 bis 4	23	575,4	05:48 – 18:56
253	33	26,16	14	1 bis 2	15	424,66	06:48 – 17:47
254	30	20,67	19	1 bis 4	20	428,04	06:50 – 17:59
256	12	16,65	2	-	3	63,39	07:00 – 13:12

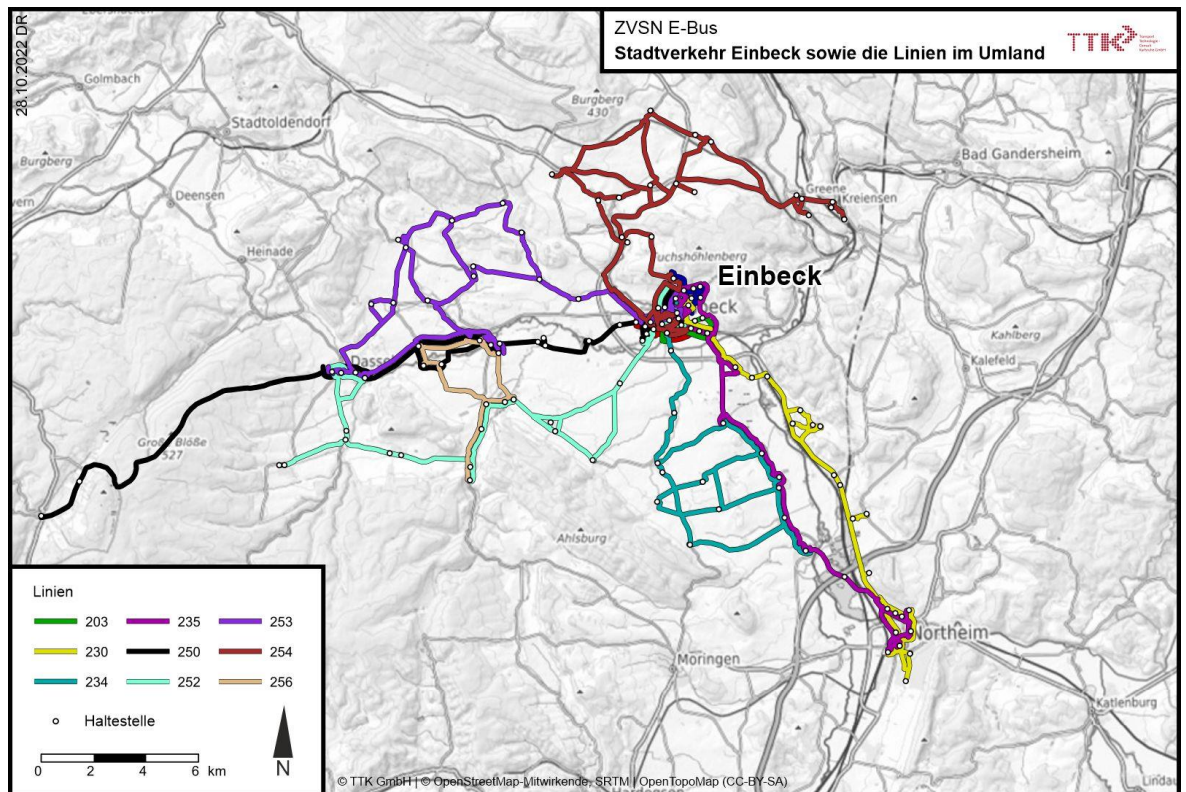


Abbildung 4: Netzdarstellung Linienwege Teilnetz B: Einbeck + Umland

Obige **Abbildung 4** stellt die Linienwege aller Linien im Teilnetz grafisch im Visum Modell dar. Zentrale Orte von Teilnetz B, inkl. Depots der hier eingesetzten Fahrzeuge, sind Dassel und insbesondere die Kernstadt Einbeck.

3.2.3 Teilnetz C: Bodenwerder - Bürgerbus

In der nachfolgenden **Tabelle 5** werden allgemeine Informationen zu Teilnetz C aufgelistet. Eine linienscharfe Betrachtung folgt in **Tabelle 6**.

Tabelle 5: Gesamtübersicht Teilnetz C: Bodenwerder - Bürgerbus

Landkreis	Holzminen
Standort Abstellplatz (Festlegung)	Stadtverwaltung Bodenwerder
Topographie	flach
Linien	526
Laufleistung / Werktag (Ist-Zustand)	277 km
Anzahl Fahrzeuge (Ist-Zustand)	1 (Kleinbus)
Ausschreibungszeit	Vergabe 01.08.2032

Tabelle 6: Linienübersicht Teilnetz C: Bodenwerder – Bürgerbus (Werktag)

Linie	Anzahl bediente Haltepunkte	Ø – Linienroutenlänge [km]	Anzahl Linienrouten	Fahrthäufigkeit [Fahrten/h]	Anzahl Fahrplanfahrten	Laufleistung Fahrplanfahrten [km]	Bedienzeit
526	52	29,94	5	1	7	239,55	08:42 – 17:29

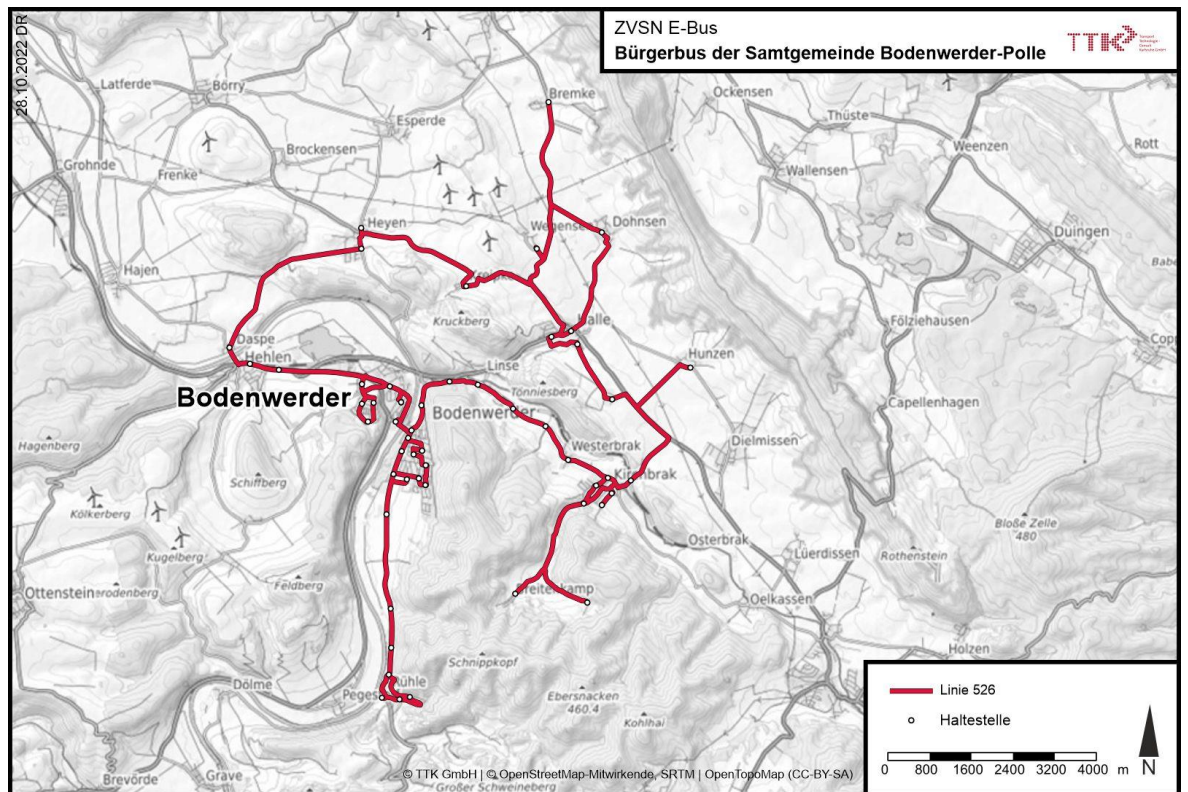


Abbildung 5: Netzdarstellung Linienwege Teilnetz C: Bodenwerder - Bürgerbus

Obige **Abbildung 5** stellt die Linienwege aller Linien im Teilnetz grafisch im Visum Modell dar. Zentraler Ort von Teilnetz C, inkl. Abstellplatz des hier eingesetzten Fahrzeugs, ist Bodenwerder.

4 Vertiefte Untersuchungen (AP2) - Simulationen

In der vertieften Untersuchung der drei Teilnetze wurde geprüft, inwiefern der aktuelle Fahrplan mit Batterie- oder Wasserstoffbussen gefahren werden kann und welche Änderungen sich hierdurch ergeben (v.a. Fahrzeugmehrbedarf).

Es wurde die folgende methodische Vorgehensweise gewählt:

a Import der Daten

Vorgehen

- › Import der VDV 452 Daten in PTV Visum
- › Prüfung auf Plausibilität

Resultat

- › Fahrplanfahrten und Betriebsstandorte der drei Teilnetze liegen in VISUM vor
- › Dieselumläufe (Prüfung durch den ZVSN erfolgt)

b Berechnung des Energiebedarfs

Vorgehen

- › Berechnung des Energiebedarfs der Linien/Umläufe auf Basis
 - › der Topographie,
 - › eines zuvor definierten Worst-Case-Szenarios
 - › und der Fahrzeugspezifikationen

Resultat

- › Verbrauchswerte der Fahrzeuge

c Umlaufprüfung auf Fahrbarkeit mit Batterie- und Wasserstoffbussen

Vorgehen

- › Prüfung der Umläufe unter Berücksichtigung des Energiebedarfs (b), der aktuellen Dieselumläufe (a) und zuvor definierter Umlaufparameter (z.B. minimaler Restladezustand am Ende des Umlaufs von 20%)

Resultat

- › Eignung der einzelnen Umläufe für die Umstellung auf alternative Antriebe unter Berücksichtigung möglicher Lade- / Tankpausen
- › (inkl. Ladezustände (SoC) der Fahrzeuge)

Dabei gelten für alle drei Teilnetze die folgenden Parameter bei der Worst-Case-Definition (siehe Bearbeitungsschritt „b“):

- Klimatische Rahmenbedingungen: -10°C (rein elektrisches Heizen aus der Batterie)
- Fahrzeuggewicht: max. zulässiges Gesamtgewicht
- Fahrprofil: Stop-and-Go (Halt an jeder Haltestelle und bei jedem Abbiegevorgang)
- Standort Depot: Festlegung nach Rücksprache mit dem Auftraggeber
- Abschlag auf die maximale Batteriekapazität zur Darstellung der Batteriealterung

4.1 Teilnetz A: 11 - Harz (Landkreis Göttingen)

Szenarien

Es wurden die folgenden Szenarien simuliert:

1. Batterietechnik
 - a. Laden nur im Depot (nachts sowie während der Standzeiten tagsüber)
 - b. Laden im Depot sowie an den Haltestellen Osterode Mitte und Clausthal-Zellerfeld ZOB

Die verwendete Ladeleistung beträgt 100 kW und die nutzbare Batteriekapazität eines 12-m-Busses 400 kWh. Mit einer Ladeleistung von 100 kW ist das Laden über einen CCS-Stecker möglich. Ebenso ist die Verwendung eines Pantografen möglich, durch den der Ladevorgang automatisiert werden kann. Grundsätzlich bilden die gewählten Parameter bzgl. Batteriekapazität und Ladeleistung nur einen Ausschnitt aus einem Spektrum verschiedener Möglichkeiten ab. Die genaue Spezifikation der Fahrzeuge und Ladeinfrastruktur (LIS) erfolgt im Rahmen der jeweiligen Ausschreibung.
2. Wasserstofftechnik

Es wurde eine H₂-Tankstelle (350 bar) im nahegelegenen öffentlichen Raum angenommen, wobei der Standort nicht näher spezifiziert wurde. Die Tankkapazität des Standard-Wasserstoffbusses liegt bei ca. 34 kg.

Depot

Für das Teilnetz 11 wurde für die Simulation der Betriebshof in der Stadt Osterode als Depot festgelegt. Von diesem Standort starten die Fahrzeuge auf ihre Linienfahrten und können die Ladeinfrastruktur nutzen.



Abbildung 6: Betriebshof in Osterode, Quelle: Geoportal.de

Ergebnisse

Im **Dieselsbusbetrieb** (Simulation) werden im Teilnetz 11 13 Fahrzeuge (ohne Reserve) benötigt. Sie erbringen pro Schultag rund 3.220 km an Fahrleistung (Fahrplanfahrten) und rund 205 km an Leerfahrten (Ein- und Aussetzfahrten, Umsetzfahrten).

In der **Batteriebus-Betrachtung** entstehen sehr hohe Energiebedarfe (ca. 2,9 kWh/km, nach Abzug von Rekuperationsenergie), die sich aus der sehr anspruchsvollen Topographie ergeben. Dies führt untertags zu langen und häufigen Ladepausen, durch die 2 (Szenario b) bzw. 5 (Szenario a) Fahrzeuge mehr benötigt werden. Insbesondere im Szenario a entstehen deutlich mehr Leerkilometer (+55%).

Die langen und häufigen Ladepausen erschweren zudem die Dienst- und Umlaufplanung. Als Folge davon ist anzunehmen, dass die Personalkosten sowie der Personalbedarf im Teilnetz 11 zunehmen werden.

Tabelle 7: Simulationsergebnis Batteriebusse Teilnetz 11

Energiebedarf Worst-Case	Dieselbus	Szenario 2 Batteriebus Langsamladen	
		2,9 kWh/km	
Ladeort	Tankstelle Depot	Depot + Endhaltestellen	Depot
Batteriekapazität (netto)		400 kWh	
Ladeleistung		100 kW	
Tagesgesamtfahrleistung (km)	3.422	3.431	3.534
davon Leerfahrten (km)	204	214	317
Fahrzeugbedarf (Solobus)	13	15	18

Insgesamt ist das Szenario b („Depot + Endhaltestellen“) ggü. dem Szenario a vorzuziehen.

Zur Umsetzung des Szenario b wird empfohlen, an den Haltestellen „Clausthal-Zellerfeld ZOB“ und ggf. auch in „Osterode Mitte“³ Lademöglichkeiten einzurichten (vgl. **Abbildung 7**).

³ Die Errichtung von Ladeinfrastruktur in diesem Bereich sollte bei den kommenden städtebaulichen Planungen berücksichtigt und zwischen dem ZVSN und der Kommune in bilateralen Klärungsgesprächen eruiert werden. Alternativ können die Fahrzeuge mit einem geringen Mehraufwand auch auf den Betriebshof zurückkehren.

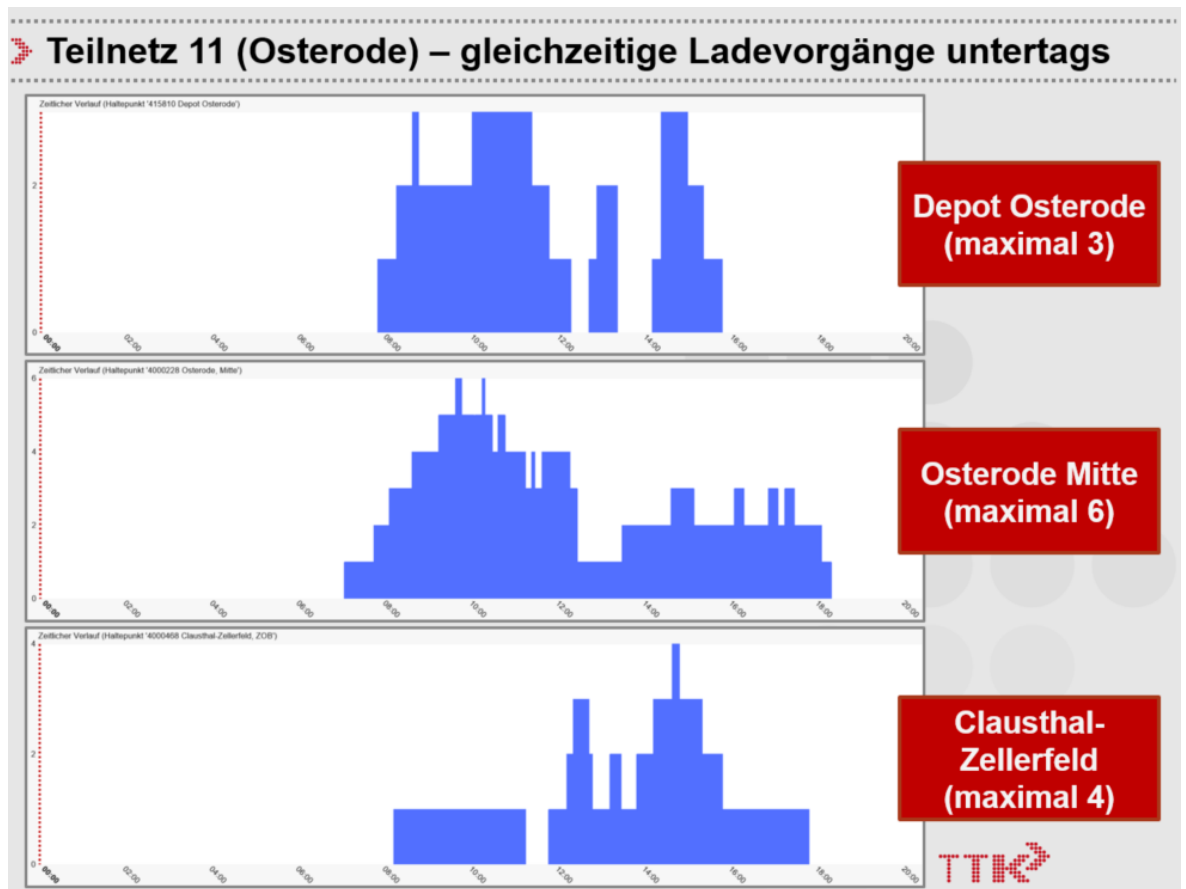


Abbildung 7: Teilnetz 11 - gleichzeitige Ladevorgänge

In der **Wasserstoffbus-Betrachtung** wird davon ausgegangen, dass es zu keinem Fahrzeugmehrbedarf kommt, da die durchschnittliche Fahrleistung pro Bus bei rund 264 km / Tag liegt und demnach mit einer Tankfüllung erbracht werden kann. Sollte bei einzelnen Bussen ein untertägliches Nachtanken erforderlich sein, so gibt es in der aktuellen Diesel-Fahrplanung hierfür ausreichend große Pausen (vorausgesetzt, die Tankstelle befindet sich in entsprechender räumlicher Nähe).

4.2 Teilnetz B: Einbeck + Umland

Szenarien

Es wurden die folgenden Szenarien simuliert:

1. Batterietechnik
 - a. Laden im Depot in Einbeck (Ilmebahn) und in Dassel sowie an der Hst. Einbeck Mitte

Die verwendete Ladeleistung beträgt 100 kW und die nutzbare Batteriekapazität eines 12-m-Busses 400 kWh. Mit einer Ladeleistung von 100 kW ist das Laden über einen CCS-Stecker möglich. Ebenso ist die Verwendung eines Pantografen möglich, durch den der Ladevorgang

automatisiert werden kann. Grundsätzlich bilden die gewählten Parameter bzgl. Batteriekapazität und Ladeleistung nur einen Ausschnitt aus einem Spektrum verschiedener Möglichkeiten ab. Die genaue Spezifikation der Fahrzeuge und Ladeinfrastruktur (LIS) erfolgt im Rahmen der jeweiligen Ausschreibung.

2. Wasserstofftechnik

Es wurde eine H₂-Tankstelle (350 bar) im nahegelegenen öffentlichen Raum angenommen, wobei der Standort nicht näher spezifiziert wurde. Die Tankkapazität des Standard-Wasserstoffbusses liegt bei ca. 34 kg.

Depot

Für das Teilnetz Einbeck + Umland wurden zwei Depots für die Simulation festgelegt: der Betriebshof der Ilmebahn in Einbeck (für maximal 9 Fahrzeuge) sowie eine aktuell genutzte Freifläche in Dassel (für maximal 11 Fahrzeuge). Von diesen Standorten starten die Fahrzeuge auf ihre Linienfahrten und können die Ladeinfrastruktur nutzen.

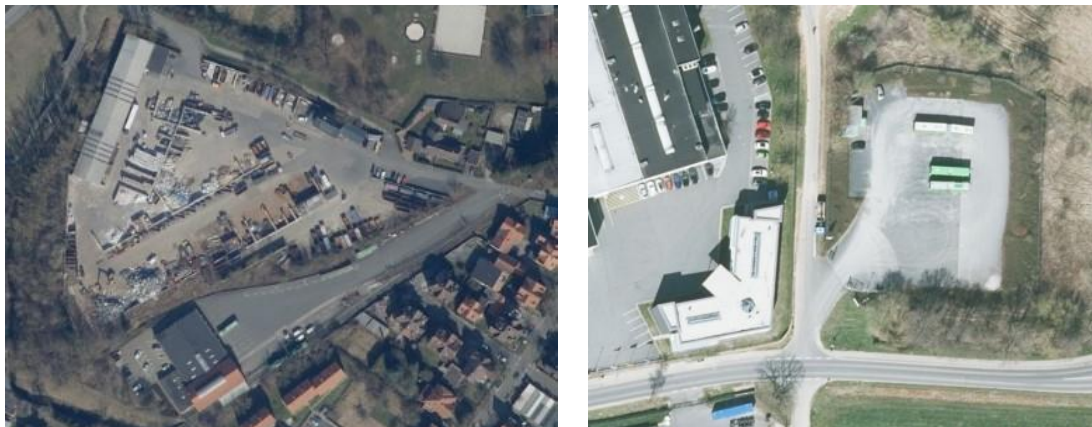


Abbildung 8: Betriebshof in Einbeck (links) und Abstellfläche in Dassel (rechts), Quelle: Geoportal.de

Ergebnisse

Im **Dieselsbusbetrieb** werden im Teilnetz Einbeck + Umgebung 18 Fahrzeuge (ohne Reserve) benötigt. Sie erbringen pro Werktag rund 3.550 km an Fahrleistung (Fahrplanfahrten) und rund 505 km an Leerfahrten (Ein- und Aussetzfahrten, Umsetzfahrten).

In der **Batteriebus-Betrachtung** entstehen hohe Energiebedarfe (ca. 2,6 kWh/km, nach Abzug von Rekuperationsenergie), die sich aus der anspruchsvollen Topographie ergeben. Dies führt untertags zu langen und häufigen Ladepausen. Da die Busse jedoch bereits heute teilweise mehrmals am Tag für mehrere Stunden im Depot stehen, können diese Standzeiten zum Laden genutzt werden. Insgesamt ergibt sich deshalb nur ein Fahrzeugmehrbedarf von +1. Die Leerkilometer steigen um +10%.

Die langen und häufigen Ladepausen können dennoch die Dienst- und Umlaufplanung erheblich beeinflussen. Als Folge davon ist anzunehmen, dass die Personalkosten sowie der Personalbedarf in diesem Teilnetz zunehmen werden.

Tabelle 8: Simulationsergebnis Teilnetz Einbeck + Umland

	Dieselbus	Szenario 2 Batteriebus Langsamladen
Energiebedarf Worst-Case		2,6 kWh/km
Ladeort	Tankstelle Depot	Depot
Batteriekapazität (netto)		400 kWh
Ladeleistung		100 kW
Tagesgesamtfahrleistung (km)	4.057	4.117
davon Leerfahrten (km)	504	554
Fahrzeugbedarf (Solobus)	18	19

Zur Umsetzung wird empfohlen, beide Depots mit Ladeinfrastruktur auszustatten sowie ggf. an der Haltestelle „Einbeck Mitte“ weitere Lademöglichkeiten zu schaffen (vgl. Abbildung 9).

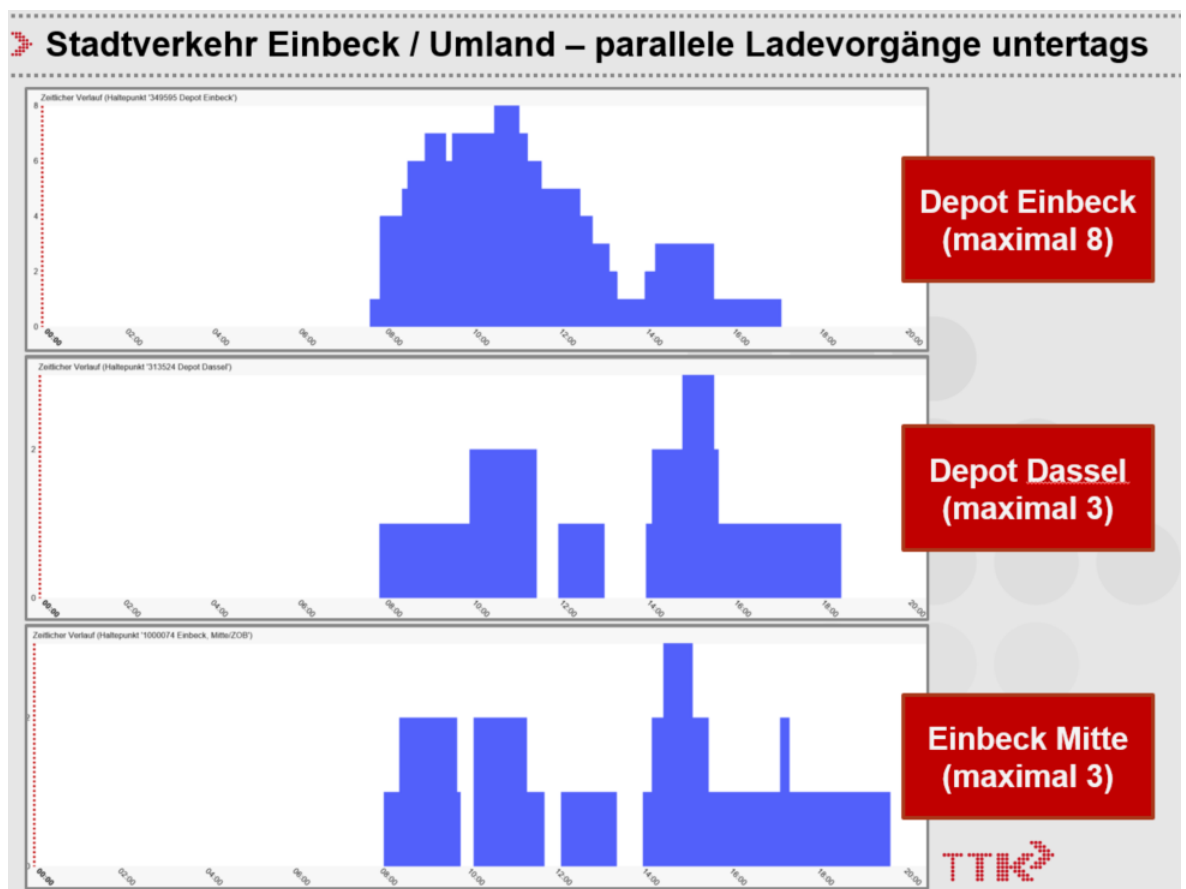


Abbildung 9: Teilnetz Einbeck + Umgebung - gleichzeitige Ladevorgänge

In der **Wasserstoffbus-Betrachtung** wird davon ausgegangen, dass es zu keinem Fahrzeugmehrbedarf kommt, da die durchschnittliche Fahrleistung pro Bus bei rund 225 km / Tag liegt und demnach mit einer Tankfüllung erbracht werden kann. Sollte bei einzelnen Bussen ein untertägliches Nachtanken erforderlich sein, so gibt es in der aktuellen Diesel-Fahrplanung hierfür ausreichend große Pausen (vorausgesetzt, die Tankstelle befindet sich in entsprechender räumlicher Nähe).

4.3 Teilnetz C: Bodenwerder-Polle – Bürgerbus

Depot

Für den Bürgerbus Bodenwerder wurde als „Depot“ der Parkplatz in der Nähe der Stadtverwaltung Bodenwerder festgelegt:



Abbildung 10: Abstellfläche in Bodenwerder; Quelle: Geoportal.de

Szenarien

Es wurden die folgenden Szenarien simuliert:

3. Batterietechnik
 - a. Laden nur im Depot
 - b. Laden im Depot und in Rühle (Endhaltestelle)

Außerdem wurde zwei verschiedene Ladeleistung simuliert (22 kW – analog einer Pkw-Ladesäule und 90 kW – spezifische Ladeinfrastruktur mit Schnelllader). Die Batteriekapazität wurde auf 90 kWh festgelegt.

4. Wasserstofftechnik

Es erfolgte keine vertiefte Betrachtung der Wasserstofftechnik, da Stand Winter 2022/23 noch kein entsprechendes Fahrzeug für den Personenverkehr auf dem Markt ist.

Ergebnisse

Im **Dieselsbusbetrieb** wird für den Bürgerbus Bodenwerder-Polle ein Fahrzeug (ohne Reserve) benötigt. Die Fahrleistung beträgt maximal rund 220 km (Fahrplanfahrten), wenn alle Bedarfshalte bedient werden. Es fallen rund 8 km Leerfahrten an (Ein- und Aussetzfahrten, Umsetzfahrten).

In der **Batteriebus-Betrachtung** entsteht ein durchschnittlicher Energiebedarf (ca. 0,5 kWh/km). Die betrachteten Szenarien unterscheiden sich in ihrem Fahrzeugbedarf: Wenn die verwendete Batterie (90 kWh) in der Mittagszeit (rund eine Stunde Zeit) wieder vollständig bzw. ausreichend geladen werden kann, um die nachmittäglichen Fahrten zu erbringen, reicht weiterhin ein Fahrzeug aus (Szenarien 1.1 und 1.2 - „Schnellladen mit 90 kW“). Ansonsten wird ein weiteres Fahrzeug benötigt (Szenarien 2.1 und 2.2 - „Langsamladen mit 22 kW“).

Tabelle 9: Simulationsergebnis Bürgerbus Bodenwerder-Polle

Energiebedarf Worst-Case	Dieselbus	Szenario 1 Batteriebus Schnellladen		Szenario 2 Batteriebus Langsamladen	
		0,5 kWh/km			
Variante		1.1	1.2	2.1	2.2
Ladeort	Tankstelle Depot	Depot + Endhaltestelle	Depot	Depot + Endhaltestelle	Depot
Batteriekapazität (netto)		90 kWh		90 kWh	
Ladeleistung		90 kW		22 kW	
Tagesgesamtfahrleistung (km)	227	238	238	238	238
davon Leerfahrten (km)	8	19	19	19	19
Fahrzeugbedarf	1	1	1	2	2

Die Tagesganglinien der Batterieladung („State-Of-Charge“) sind in den **Abbildung 11** und **Abbildung 12** dargestellt.

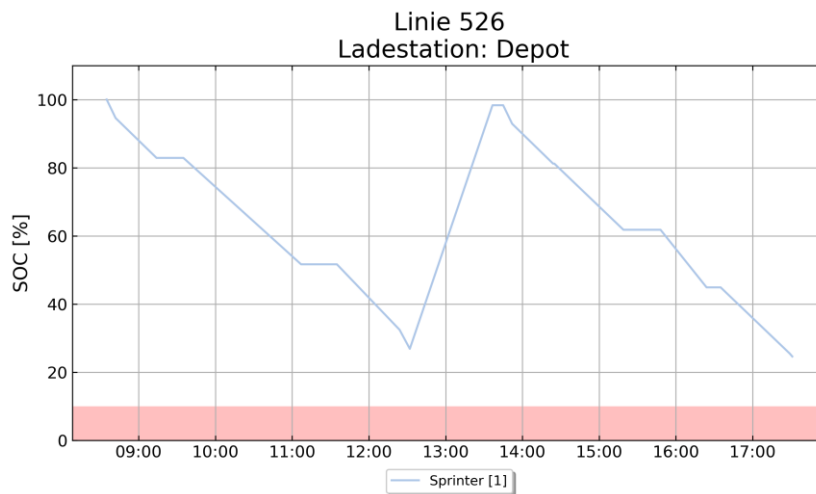


Abbildung 11: State-of-Charge Diagramm Bürgerbus Bodenwerder, Szenario 1.2

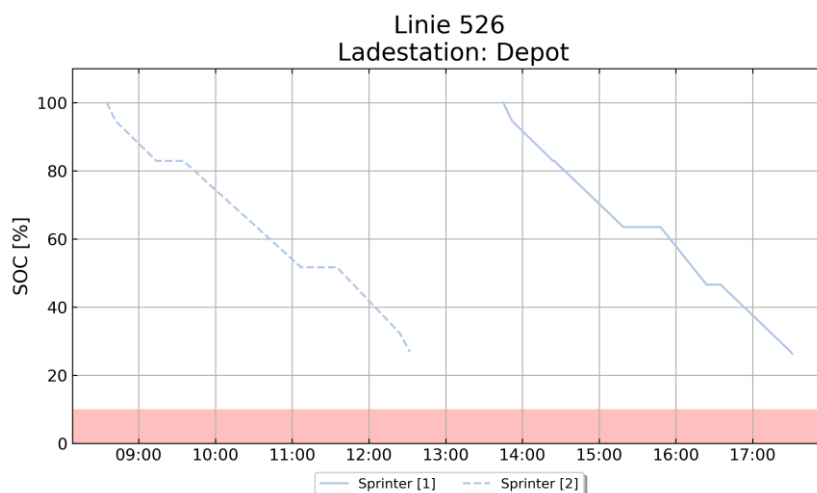


Abbildung 12: State-of-Charge Diagramm Bürgerbus Bodenwerder, Szenario 2.2

Im Bereich Kleinfahrzeuge für Bürgerbus-Systeme gibt es aktuell keine bzw. nur vereinzelte wasserstoffbetriebenen Fahrzeuge auf dem Markt. Diese Situation dürfte sich zwar in den kommenden Jahren verbessern, für die aktuelle Untersuchung wurde jedoch keine Marktverfügbarkeit angenommen.

5 Vertiefte Untersuchungen (AP2) – Wirtschaftlichkeit

Die vertiefte Untersuchung der Teilnetze enthält auch eine überschlägige wirtschaftliche Einschätzung der Szenarien. Dafür wurden die folgenden Annahmen/Vorgehensweisen definiert.

- Es erfolgte keine Betrachtung der Personalkosten, da keine ausreichende Datengrundlage zur Bestimmung der bezahlten Arbeitszeit vorhanden war. Stattdessen wurde eine Analyse der Umlaufzeiten⁴ durchgeführt, um über diesen Parameter die Höhe der zusätzlichen Arbeitszeit zu schätzen.
- Es ist davon auszugehen, dass Verkehrsunternehmen, die sich im Wettbewerb um Liniengenehmigungen befinden, aufgrund der kurzen Laufzeiten der Genehmigungen eine Investition in teure Wasserstoffinfrastruktur scheuen. Aus diesem Grund wurde angenommen, dass die Wasserstoffbusse an hypothetischen öffentlichen Wasserstofftankstellen tanken werden. Folglich wurden keine Kosten für Wasserstoffinfrastruktur in der Berechnung aufgenommen, sondern stattdessen ein angepasster „Tankstellenpreis“ für den Wasserstoff verwendet.
- Es erfolgte eine reine Kostenbetrachtung, ohne Einbeziehung möglicher Fördermittel oder dem Verkauf von CO₂-Zertifikaten.
- Als Kostenbasis wurde das Quartal IV / 2022 festgelegt. Es erfolgte keine Dynamisierung.
- Der Berechnungszeitraum umfasst 10 Jahre ab Laufzeitbeginn des Teilnetzes.

Den Berechnungen liegen die folgenden Ausgangswerte im Bereich Fahrzeuge und Infrastruktur zugrunde:

Tabelle 10: Kostensätze Fahrzeuge

Antrieb	Dieselbusse		Brennstoffzelle		Batterie	
	Klein	Solo	Klein	Solo	Klein	Solo
Fahrzeugtyp						
Investition	120.000 €	250.000 €	340.000 €	590.000 €	270.000 €	570.000 €
Wartung / km	0,19 €		0,30 €		0,24 €	
Energiekosten	2,00 / 0,61 € je Liter (Diesel / AdBlue)		12 € je kg (Wasserstoff)		0,30 € je kWh (Strom)	

⁴ Umlaufzeit = Zeitspanne zwischen morgendlichem Aus- und abendlichem Einrücken des Fahrzeugs

Tabelle 11: Kostensätze Infrastruktur

Batterie		Wasserstoff	
Ladepunkt (inkl. Bau-/Installationskosten)	75.000 € pro Ladepunkt (einmalig)	Annahme: Nutzung einer öffentlichen Wasserstofftankstelle	
Laufende Kosten Ladepunkte	3.000 € pro Ladepunkt (jährlich)		
Anschluss an das Mittel-/Niederspannungsnetz und Transformator	1,1 Mio. € (einmalig)		
Lademanagementsystem	1,0 Mio. € (einmalig)		
Umbau Werkstatt	270.000 € (einmalig)	Umbau Werkstatt	370.000 € (einmalig)
Planungskosten	15% der einmaligen Infrastrukturkosten (einmalig)	Planungskosten	15% der einmaligen Infrastrukturkosten (einmalig)
Unvorhergesehene Kosten	15% der einmaligen Infrastrukturkosten (einmalig)	Unvorhergesehene Kosten	15% der einmaligen Infrastrukturkosten (einmalig)

Umstellungsszenarien

Neben den verschiedenen Simulationsszenarien wurden außerdem zwei Umstellungsszenarien definiert, die sich auf die Geschwindigkeit der Antriebswende beziehen: Zum einen wird mit dem Szenario „Clean Vehicle Directive“ die entsprechende Beschaffungsquote für emissionsarme und -freie Fahrzeuge (vgl. Abschnitt 7.1) zum Ausschreibungsbeginn angesetzt, d.h. zum Beispiel im Teilnetz B mit Ausschreibung im Jahr 2025 die Beschaffung von mindestens 45% alternative Antriebe⁵. Gleichzeitig werden die restlichen benötigten Fahrzeuge als Dieselfahrzeuge beschafft:

⁵ Da im Teilnetz C „Bürgerbus Bodenwerder-Polle“ nur ein oder zwei Fahrzeuge benötigt werden, wird das Teilnetz C nur im „100%“-Szenario betrachtet.

Tabelle 12: Umstellungsszenario Clean Vehicle Directive

Szenario Clean Vehicle Directive						
Vorgabe Stufe 1 (bis 2025)	45 %	Beschaffungsquote				
Vorgabe Stufe 2 (bis 2030)	65 %	Beschaffungsquote				
Teilnetz	Aktuell				2025	2029
	A	B	C		B	A
Kleinbus	0	0	1	1		
Midibus	0	0	0	0		
Solobus	13	18	0	31	9	9
Gelenkbus	0	0	0	0		
	13	18	1	Σ	9	9
erreichte Quote					50%	69%
Anzahl Fzg.-Beschaffung laut Vorgabe					9	9
Anzahl Dieselfahrzeuge als Ersatz für Bestand					9	4

Teilnetz A: 11 – Harz (LKR Göttingen)
 Teilnetz B: Einbeck + Umland
 Teilnetz C: Bürgerbus Bodenwerder-

Zum anderen wird im Umstellungsszenario „100%“ davon ausgegangen, dass bei der Neuvorgabe der Teilnetze nur noch Fahrzeuge mit alternativem Antrieb zum Einsatz kommen. Dabei ist zu beachten, dass bei den Batteriebussen ein Fahrzeugmehrbedarf in den Teilnetzen auftritt und somit mehr Fahrzeuge als bei der Wasserstofftechnik beschafft werden müssen:

Tabelle 13: Umstellungsszenario 100%-Umstellung (Batterie)

100% (Batterie-Szenario)							
Teilnetz	Aktuell				2025	2029	2025
	A	B	C		B	A	C
Kleinbus	0	0	1	1			2
Midibus	0	0	0	0			
Solobus	13	18	0	31	19	15	
Gelenkbus	0	0	0	0			
	13	18	1	Σ	19	15	2
davon zusätzliche Fahrzeuge durch Mehrbedarf					1	2	1

Teilnetz A: 11 – Harz (LKR Göttingen)
 Teilnetz B: Einbeck + Umland
 Teilnetz C: Bürgerbus Bodenwerder-

Tabelle 14: Umstellungsszenario 100%-Umstellung (Wasserstoff)

100% (H2-Szenario)							
Teilnetz	Aktuell				2025	2029	2025
	A	B	C		B	A	C
Kleinbus	0	0	1	1			1
Midibus	0	0	0	0			
Solobus	13	18	0	31	18	13	
Gelenkbus	0	0	0	0			
	13	18	1	Σ	18	13	1
davon zusätzliche Fahrzeuge durch Mehrbedarf					0	0	0

Teilnetz A: 11 – Harz (LKR Göttingen)
 Teilnetz B: Einbeck + Umland
 Teilnetz C: Bürgerbus Bodenwerder-

5.1 Teilnetz A: 11 - Harz (Landkreis Göttingen)

Im Teilnetz A würden im „CVD“-Szenario im Jahr 2029 neun Fahrzeuge mit Batterie- oder Brennstoffantrieb beschafft und weitere vier Dieselfahrzeuge (insgesamt 13 Fahrzeuge). Damit wird eine Quote von 69% Fahrzeugen mit alternativem Antrieb erreicht, wodurch die rechtlichen Anforderungen durch die CVD erreicht werden.

Im Kostenvergleich (**Abbildung 13**) schneidet der Batteriebus trotz der Investitionskosten besser ab als der Wasserstoffbus. Dies ist vor allem auf den erheblichen Unterschied bei den Energiekosten zurückzuführen, die im H2-Szenario deutlich über dem Batterie-Szenario liegen. Gegenüber dem Dieselvegleichsszenario steigen die Kosten um das Doppelte.

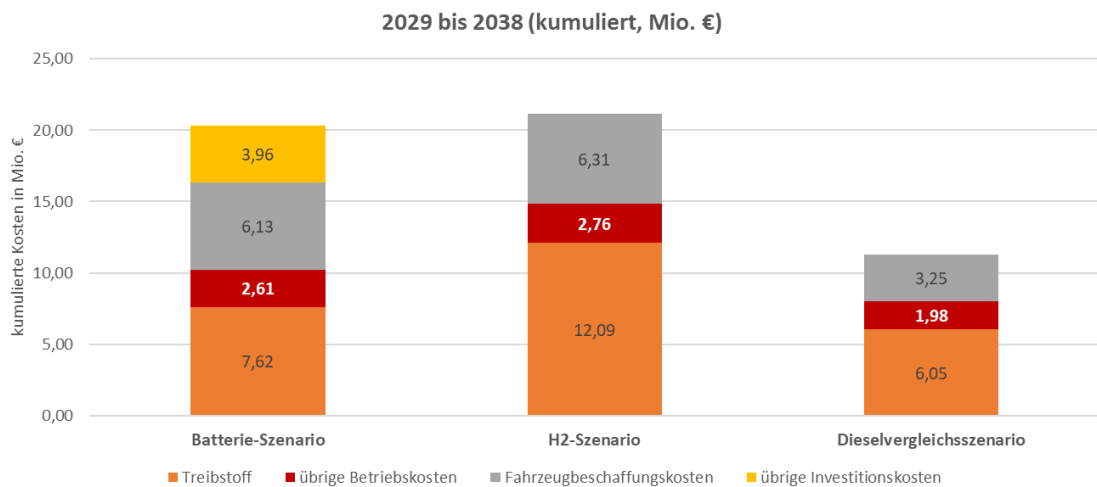


Abbildung 13: Kosten des Umstellungsszenarios in Teilnetz 11 (Harz) – Szenario CVD

Im „100%“-Szenario würden im Jahr 2029 15 Batteriebusse oder 13 Wasserstoffbusse beschafft, wodurch eine komplette Antriebswende erreicht wäre.

Im Kostenvergleich (**Abbildung 14**) liegen der Batteriebus und der Wasserstoffbus in etwa gleichauf. Dies ist vor allem durch die Mehrkosten im Fahrzeugbereich (+2 bei Batteriebussen) und durch einen größeren Investitionsbedarf für mehr Ladesäulen begründet. Dennoch bleibt der erhebliche Unterschied bei den Energiekosten vorhanden, die im H2-Szenario deutlich über dem Batterie-Szenario liegen. Gegenüber dem Dieselvegleichsszenario steigen die Kosten um das 2,5-fache.

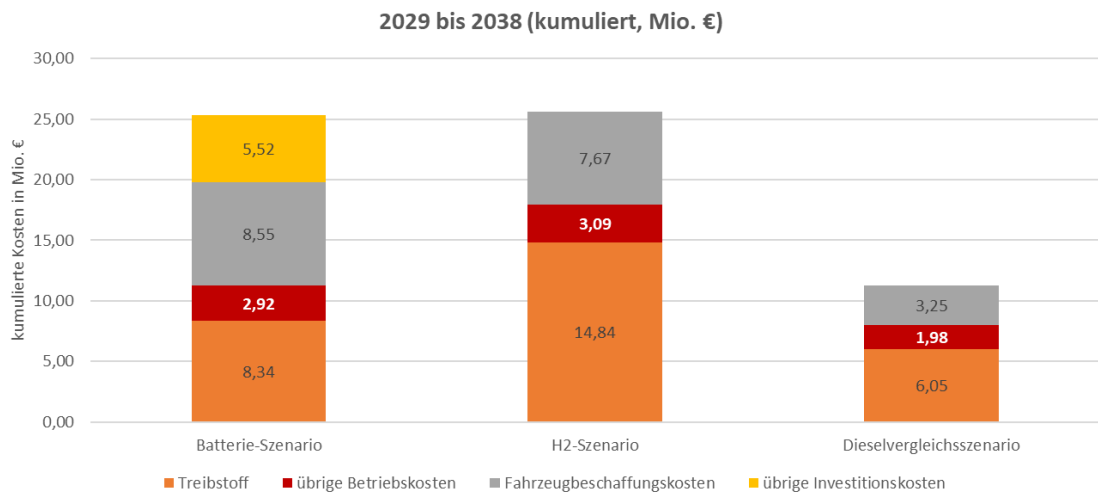


Abbildung 14: Kosten des Umstellungsszenarios in Teilnetz 11 (Harz) - Szenario 100%

Wie eingangs erwähnt, wurden die Personalkosten aufgrund der unklaren Datenlage nicht in die Kostenberechnung aufgenommen. Um dennoch eine Einschätzung zur Entwicklung des Personalbedarfs bzw. der Arbeitszeit geben zu können, wurden für die 100%-Umstellung die Veränderungen in der Umlaufzeit kumuliert über die gesamte Flotte an einem Werktag betrachtet.

Im Teilnetz A verändern sich die Einsatzzeiten gegenüber dem Dieselbusbetrieb nicht, wenn Wasserstoffbusse eingesetzt werden (**Abbildung 15**). Bei der Umstellung auf Batterietechnik werden jedoch mehr Fahrzeuge als zuvor eingesetzt, was mehr Leerfahrten, mehr Standzeiten und entsprechende Ladezeiten nach sich zieht. Aufgrund der notwendigen Ladepausen können zudem die Fahrplanfahrten nicht mehr so effektiv wie im Dieselbusbetrieb kombiniert werden. Insgesamt erhöht sich die Umlaufzeit pro Werktag um ca. 28 Stunden ggü. den Diesel- oder Wasserstofffahrzeugen.

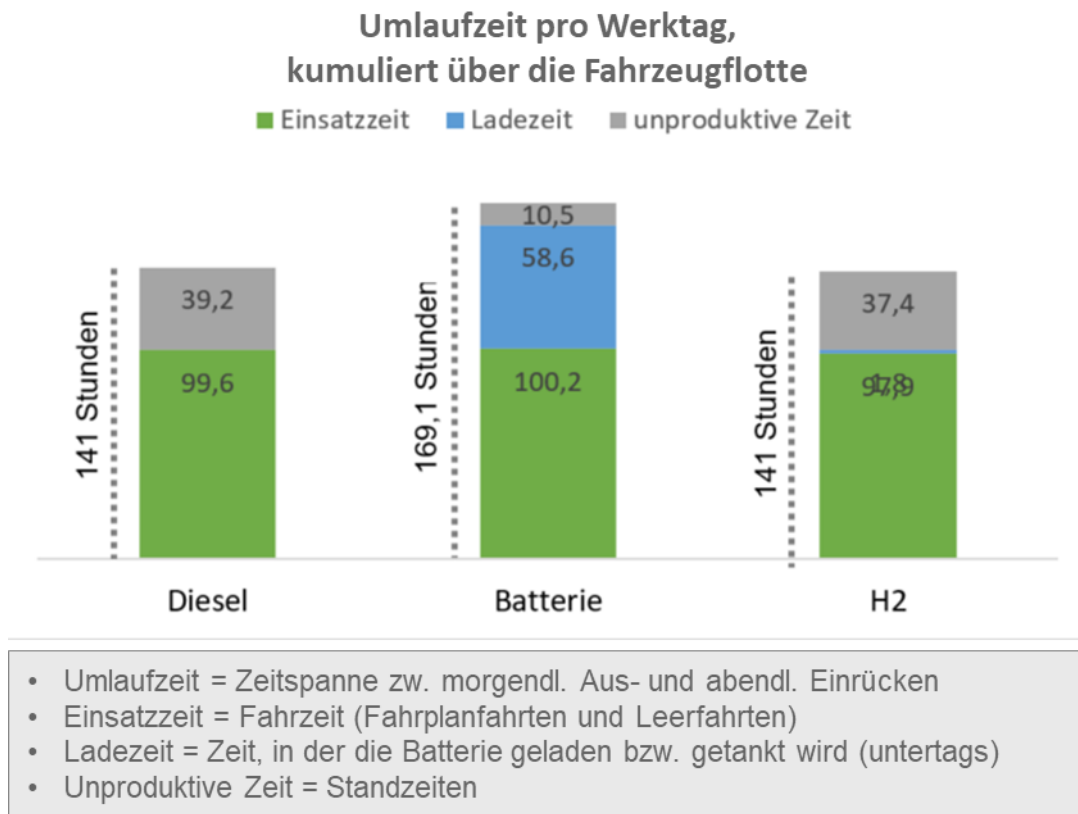


Abbildung 15: Umlaufzeiten pro Werktag im Teilnetz 11 (Harz)

5.2 Teilnetz B: Einbeck + Umland

Im Teilnetz B würden im „CVD“-Szenario im Jahr 2025 neun Fahrzeuge mit Batterie- oder Brennstoffantrieb beschafft und weitere 9 Dieselfahrzeuge (insgesamt 18 Fahrzeuge). Damit wird eine Quote von 50% Fahrzeugen mit alternativem Antrieb erreicht, wodurch die rechtlichen Anforderungen durch die CVD erreicht werden.

Im Kostenvergleich (**Abbildung 16**) liegen der Batteriebus und der Wasserstoffbus ungefähr gleichauf, obwohl im Batteriebuszenario in den Aufbau der Ladeinfrastruktur investiert werden muss. Jedoch gibt es einen erheblichen Unterschied bei den Energiekosten, die im H2-Szenario deutlich über dem Batterie-Szenario liegen. Gegenüber dem Dieselvegleichsszenario steigen die Kosten um rund 60%.

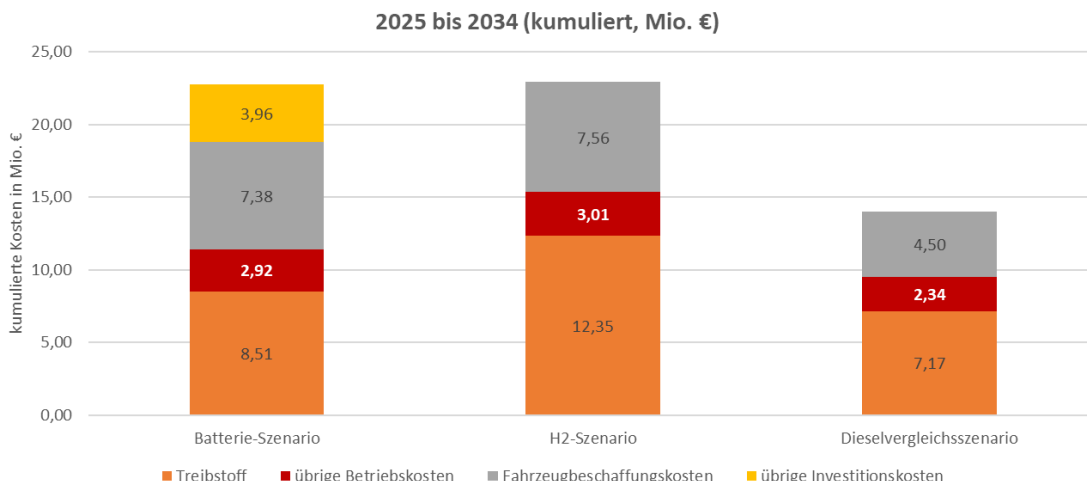


Abbildung 16: Kosten des Umstellungsszenarios in Teilnetz Einbeck + Umland - Szenario CVD

Im „100%“-Szenario würden im Jahr 2025 19 Batteriebusse oder 18 Wasserstoffbusse beschafft, wodurch eine komplette Antriebswende erreicht wäre.

Im Kostenvergleich (Abbildung 17) schneidet der Batteriebus – trotz des höheren Investitionsbedarfs – leicht besser als der Wasserstoffbus ab. Dies ist vor allem auf den erheblichen Unterschied bei den Energiekosten zurückzuführen, die im H2-Szenario deutlich über dem Batterie-Szenario liegen. Gegenüber dem Dieselvegleichsszenario steigen die Kosten fast um das Doppelte.

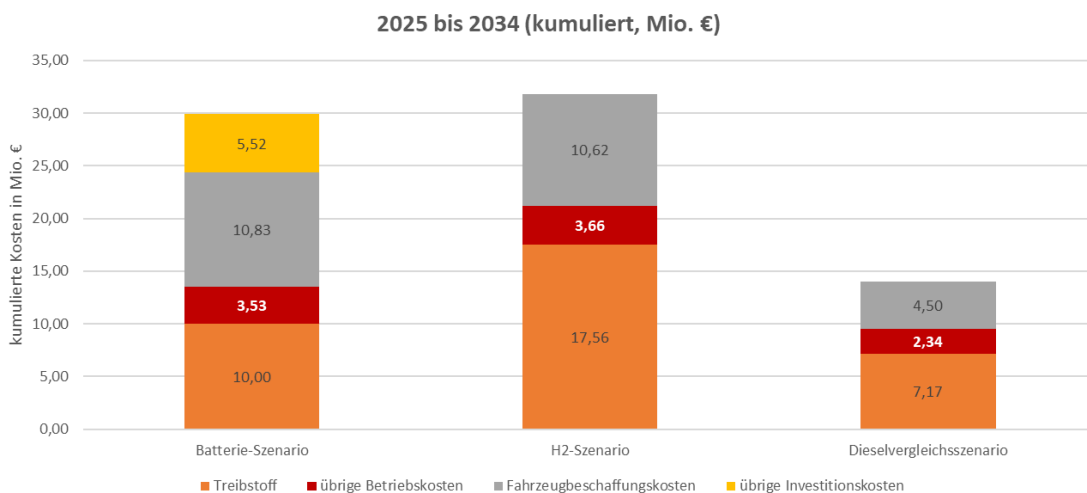


Abbildung 17: Kosten des Umstellungsszenarios in Teilnetz Einbeck + Umland - Szenario 100%

Auch im Teilnetz B wurden die Personalkosten aufgrund der unklaren Datenlage nicht in die Kostenberechnung aufgenommen. Um dennoch eine Einschätzung zur Entwicklung des Personalbedarfs bzw. der Arbeitszeit geben zu können, wurden für die 100%-Umstellung die Veränderungen in der Umlaufzeit kumuliert über die gesamte Flotte an einem Werktag betrachtet.

Im Teilnetz B verändern sich die Einsatzzeiten gegenüber dem Dieselsebusbetrieb nicht, wenn Wasserstoffbusse eingesetzt werden (Abbildung 18). Bei der Umstellung auf Batterietechnik wird

jedoch ein Fahrzeug mehr als zuvor eingesetzt, wodurch v.a. mehr Leerfahrten und geringfügig mehr Standzeiten entstehen. Insgesamt gibt es jedoch auch im aktuellen Dieselbusbetrieb einen großen Anteil an unproduktiver Zeit (=Standzeiten). Innerhalb dieser Standzeiten können die Ladepausen abgebildet werden. Somit vergrößert sich die Umlaufzeit im Batteriebusbetrieb nur geringfügig um ca. 9 Stunden pro Schultag.

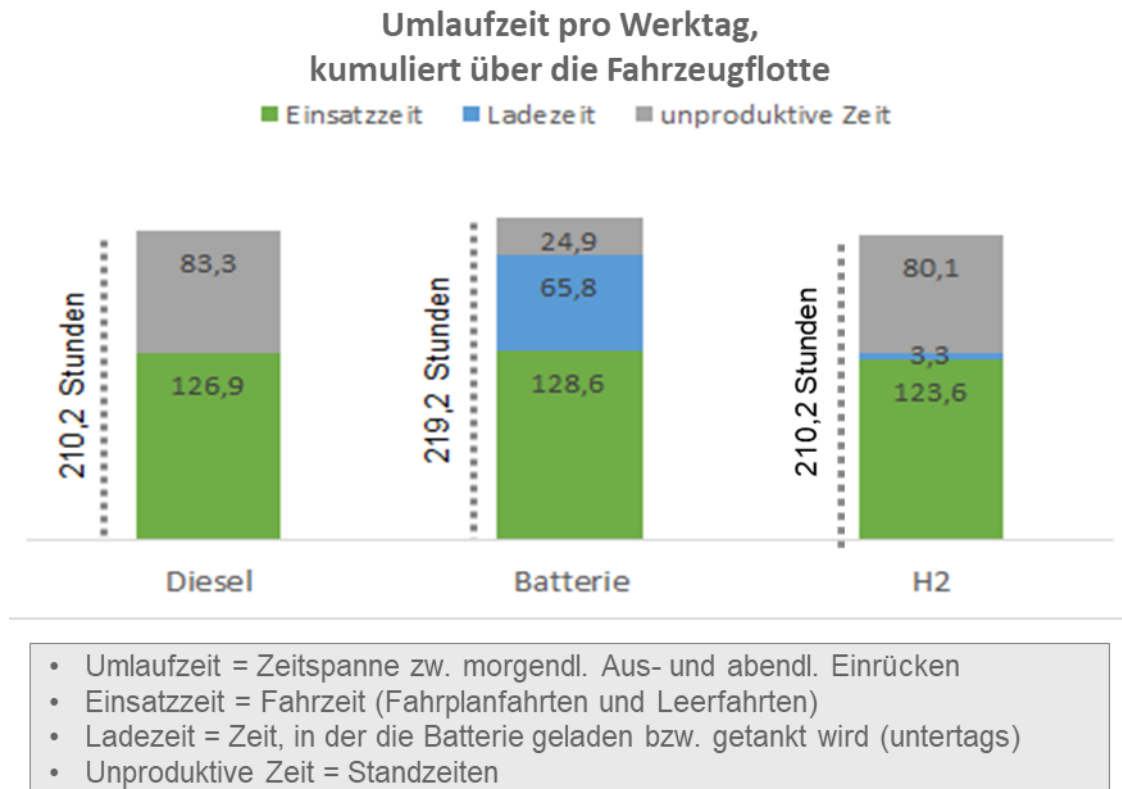


Abbildung 18: Umlaufzeiten pro Werktag im Teilnetz Einbeck + Umland

5.3 Teilnetz C: Bodenwerder – Bürgerbus

Im „100%“-Szenario würden im Jahr 2025 zwei Batterie-Bürgerbusse beschafft, da aktuell von der Nutzung einer 22 kW Ladeinfrastruktur ausgegangen wird. Auch wenn es im Bereich Wasserstoff noch keine bzw. nur vereinzelte⁶ Kleinbusse auf dem Markt gibt, wurde ein hypothetisches Fahrzeug definiert, um einen Vergleich zwischen den zwei Techniken durchführen zu können.

Im Kostenvergleich (Abbildung 19) schneidet der Batteriebus – aufgrund des höheren Investitionsbedarfs in Fahrzeuge und Infrastruktur – deutlich schlechter als der Wasserstoffbus ab. Eine Optimierung der Investitionskosten könnte allerdings durch den Aufbau einer Schnellladestation – an einem geeigneten Platz aus Sicht des Bürgerbusvereins – erfolgen, da dann nur ein Batteriebus beschafft werden muss.

⁶ z.B. den Hyvia / Renault Master City Bus mit einer kleinen Batterie und einem 4,5 kg H2-Tank

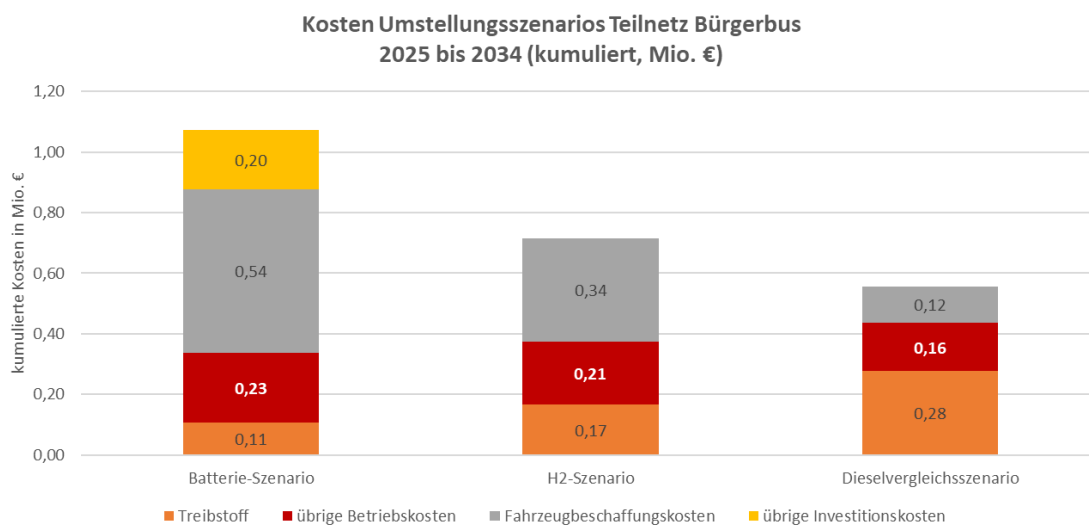


Abbildung 19: Kosten des Umstellungsszenarios in Teilnetz Bürgerbus - Szenario 100%

Da der Bürgerbus in Bodenwerder-Polle von Ehrenamtlichen betrieben wird, fallen bereits heute keine Personalkosten an. Folglich wurden auch in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung keine Personalkosten / Arbeitszeiten betrachtet.

6 Zusammenfassung der vertieften Untersuchung und Empfehlung (AP2)

Der Energiebedarf in den jeweiligen Teilnetzen wird sehr stark durch die vorhandene Topographie geprägt, vor allem bei den Linien, welche im Harz verkehren (Teilnetz A). Dies betrifft insbesondere die Teilnetze A und B (Harz und Einbeck + Umland).

In den drei Teilnetzen entsteht bei einer 100%igen Umstellung auf **Batteriebusse** der folgende Fahrzeugmehrbedarf (ohne Reserve):

- Teilnetz A – Harz: +2 (Ladeinfrastruktur Depot + Haltestellen) / +5 (Ladeinfrastruktur Depot)
- Teilnetz B – Einbeck + Umland: +1 (Ladeinfrastruktur Depots + Haltestellen)
- Teilnetz C – Bürgerbus⁷: +0 oder +1

Bei einer Umstellung auf **Wasserstofffahrzeuge** entsteht kein Fahrzeugmehrbedarf (ohne Reserve), obgleich es für das Teilnetz C – Bürgerbus aktuell noch keine Serienfahrzeuge mit dieser Technik gibt. Zudem setzt diese Betrachtung das Vorhandensein einer öffentlichen H₂-Tankstelleninfrastruktur in der Nähe der Betriebshöfe bzw. an passender Stelle in den Bedienebenen voraus, die von den Bussen genutzt werden kann (Bedarf an einer 350bar Anlage).

In Hinsicht auf die wirtschaftliche Betrachtung der Netze ergibt sich folgendes Bild:

Teilnetz A – Harz:

Die Kosten für eine Umstellung auf Batterie- oder Wasserstofftechnik sind unter den angenommenen Voraussetzungen (v.a. in Bezug auf die Schaffung der Infrastruktur, siehe Kapitel 5) sehr ähnlich, wobei die laufenden Kosten (Energiekosten und Wartung) bei den Wasserstoffbussen höher liegen. Insgesamt steigen die Kosten ggü. dem Dieselvegleichsszenario um den Faktor 2. Es ist allerdings davon auszugehen, dass im Batteriebusbetrieb deutlich höhere Personalmehrkosten als im Wasserstoffbetrieb anfallen werden (durch die notwendigen Ladepausen und den Fahrzeugmehrbedarf).

Empfehlung zum weiteren Vorgehen: Im Teilnetz A sollte der Einsatz von Wasserstofffahrzeugen detailliert geprüft werden, da hier betriebliche Vorteile ggü. dem Einsatz von Batteriefahrzeugen zu erwarten sind. Um Wasserstoffbusse einsetzen zu können, muss jedoch auch die entsprechende Tankinfrastruktur geschaffen werden. Es sollte deshalb eine realistische Analyse erfolgen, wie schnell ein öffentliches Tankstellennetz – auch in Kooperation mit anderen Projekten und Nutzern – errichtet werden könnte. Wenn keine adäquate Wasserstofftankstelle im unmittelbaren Umfeld des Betriebsstandortes errichtet werden kann, ist eine negative (kostenrelevante) Beeinträchtigung der Umlauf- und Dienstpläne aufgrund häufigerer Leerfahrten eine wahrscheinliche Folge. Sollten die Busunternehmen gezwungen sein, eigene Wasserstofftankstellen

⁷ Im Teilnetz C – Bürgerbus ist der Fahrzeugbedarf abhängig von der Leistungsfähigkeit der Ladeinfrastruktur.

auf ihren Betriebshöfen zu errichten, sind die jeweilige Ausschreibung mit einem entsprechenden zeitlichen Vorlauf zu planen und die zusätzlich anfallenden Kosten einzukalkulieren.

Ist der Einsatz von Wasserstoffbussen aufgrund einer fehlenden Tankinfrastruktur auszuschließen, kann der Einsatz von Batteriebusen durch eine Vergrößerung der Ladeleistung an den (End-)Haltestelle und ggf. dem Depot auf z.B. 150 kW je Ladepunkt optimiert werden. Dadurch verringern sich die notwendigen Ladezeiten um 1/3. Folglich ist auch von erheblichen Einsparungen im Personalbereich bzw. von Erleichterungen in der Betriebsplanung auszugehen. Auch könnte der Fahrzeugmehrbedarf aller Voraussicht nach verringert werden. Diese Optionen sind mit dem örtlichen Netzbetreiber zu prüfen. Die Einbindung von lokal erzeugter erneuerbarer Energie ist zu präferieren. Ebenfalls können ggf. Synergien durch die gemeinsame Nutzung von Ladeinfrastruktur in Clausthal-Zellerfeld zwischen den Linien des ZVSN und des Regionalverband Großraum Braunschweig (Teilnetz 81) genutzt werden.

Teilnetz B - Einbeck + Umland:

Die Kosten für eine Umstellung auf Batterie- oder Wasserstofftechnik sind unter den angenommenen Voraussetzungen (v.a. in Bezug auf die Schaffung der Infrastruktur, siehe Kapitel 5) auch in diesem Teilnetz sehr ähnlich, wobei der Batteriebus bei dem Szenario „100%-Umstellung“ einen geringen wirtschaftlichen Vorteil aufweist. Die laufenden Kosten (Energiekosten und Wartung) liegen bei den Wasserstoffbussen höher. Insgesamt steigen die Kosten ggü. dem Dieselvergleichsszenario um den Faktor 2-2,5. In diesem Teilnetz werden im Batteriebusbetrieb nur geringe zusätzliche Ladezeiten benötigt, da der Großteil der Ladepausen in den bereits heute vorhandenen Standzeiten fällt. Dementsprechend ist anzunehmen, dass die Personalkosten im Batteriebusbetrieb in einem geringeren Maße als im Teilnetz A ansteigen werden. Für den Wasserstoffbetrieb werden keine höheren Personalkosten ggü. dem Dieseldienstbetrieb erwartet, da die Tankdauer mit dem Tankvorgang eines Dieseldienstbusses vergleichbar ist.

Empfehlung zum weiteren Vorgehen: Im Teilnetz B kann sowohl der Einsatz von Batterie- als auch von Wasserstoffbussen fokussiert werden. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass sich ein dauerhaft kostengünstiger Betrieb mit Wasserstoffbussen aber nur bei (lokaler) Wasserstoffherzeugung durch Nutzung von Überschussstrom ergibt. Auch muss die notwendige Tankstelleninfrastruktur – analog dem Teilnetz A – überhaupt erstmalig geschaffen werden.

Um den Einsatz von Batteriebusen zu optimieren, sollte auch im Teilnetz B über eine Erhöhung der Ladeleistung beim untertägigen Laden nachgedacht werden. Weiterhin sollte der Einfluss von zusätzlicher Ladeinfrastruktur in Northeim bzw. Einbeck und Dassel auf das Betriebsbild geprüft werden.

Teilnetz C - Bürgerbus Bodenwerder-Polle:

Die Kosten für eine Umstellung auf Batterie- oder Wasserstofftechnik sind unter den angenommenen Voraussetzungen (v.a. in Bezug auf die Schaffung der Infrastruktur, siehe Kapitel 5) auch in diesem Teilnetz sehr ähnlich, wobei der Batteriebus bei dem Szenario „100%-Umstellung“ einen kleinen wirtschaftlichen Vorteil aufweist. Die laufenden Kosten (Energiekosten und Wartung) liegen bei den Wasserstoffbussen höher. Insgesamt steigen die Kosten ggü. dem Dieseldienst-

gleichsszenario um den Faktor 2-2,5. In diesem Teilnetz werden im Batteriebusbetrieb nur geringe zusätzliche Ladezeiten benötigt, da der Großteil der Ladepausen in den bereits heute vorhandenen Standzeiten fällt. Dementsprechend ist anzunehmen, dass die Personalkosten im Batteriebusbetrieb in einem geringeren Maße als im Teilnetz A ansteigen werden. Für den Wasserstoffbetrieb werden keine höheren Personalkosten ggü. dem Dieselbusbetrieb erwartet, da die Tankdauer mit dem Tankvorgang eines Dieselbusses vergleichbar ist.

Empfehlung zum weiteren Vorgehen: Für den Bürgerbus Bodenwerder-Polle ist die Situation komplex: Beim Einsatz von (verfügbaren) Batteriebussen und einer schnell verfügbaren 22 kW Ladestation wird ein zusätzliches Fahrzeug benötigt, was einer Verdopplung des Fuhrparks entspricht. Ein Wasserstofffahrzeug – die Tankstelle vorausgesetzt – könnte zwar den Fahrplan erbringen, ist aber aktuell nicht in Serienreife am Markt verfügbar. Der längerfristige Einsatz von Dieselfahrzeugen erscheint hier die aktuell sinnvollste Variante. Zum Schutze des Klimas könnte eine Umstellung auf synthetische Kraftstoffe erfolgen (gemäß Clean-Vehicle-Verordnung: „emissionsarm“).

7 Rahmenbedingungen für den Aufgabenträger (AP3)

7.1 Gesetzlicher Rahmen

Im Jahr 2019 hat die Europäische Union mit der Verabschiedung der Clean Vehicles Directive einen An Schub gegeben, die Antriebsarten im Busverkehr auf emissionsarme bzw. -freie Antriebe umzustellen. Die Vorgaben wurden anschließend 2021 im Saubere-Fahrzeuge-Beschaffungs-Gesetz konkretisiert und auf einen deutschen Rechtsrahmen abgestellt. Das Gesetz sieht vor:

- Bei Neuausschreibungen von Linien müssen die wie in **Abbildung 20** beschriebenen Anteile von „emissionsfreien“ und „sauberen“ Fahrzeugen erreicht oder überschritten werden. Dabei werden saubere Fahrzeuge als Fahrzeuge mit Emissionen von $<50\text{g CO}_2/\text{km}$ definiert, „emissionsfreie“ Fahrzeuge haben keinen Verbrennungsmotor oder einen Ausstoß von $<1\text{g CO}_2/\text{km}$.



Abbildung 20: Mindestanteile an sauberen und emissionsfreien Fahrzeugen nach dem Gesetz je Ausschreibungszeitraum

- Die Beschaffungsquoten müssen nicht bei jedem Beschaffungsvorgang erreicht werden, sondern in Summe aller eingesetzter Fahrzeuge
- Die Bundesländer sollen die Einhaltung der Beschaffungsquoten überwachen und können gebietsübergreifende Regelungen finden zur Erfüllung der Beschaffungsvorgaben. Allerdings sind bislang keine solche länderübergreifenden Abkommen bekannt und auch keine Branchenvereinbarungen.
- Ausgenommen von den gesetzlichen Regelungen sind sogenannte Klasse II-Fahrzeuge (Überlandbusse) und Klasse III-Fahrzeuge (Reisebusse) der Fahrzeugklasse M3 sowie kleinere Vergaben unter einem geschätzten Jahresdurchschnittswert von 1 Millionen € oder einer Verkehrsleistung unter 300.000 Kilometer/a oder Vergaben an kleinere Verkehrsunternehmen, die weniger als 23 Fahrzeuge betreiben.

Daraus resultiert, dass bei der Ausschreibung von Linien(-bündeln) der Einsatz von sauberen/emissionsfreien Fahrzeugen in Erwägung gezogen werden und nur noch in begründeten Ausnahmen auf konventionelle Dieselantriebe zurückgegriffen werden sollte.

7.2 Clean Vehicles Directive umsetzen

Bei der Umsetzung des Gesetzes ergibt sich ein großer Gestaltungsspielraum im Ansatz. Der Aufgabenträger hat folgende Möglichkeiten, die insbesondere in Verbindung miteinander sinnvoll sein können:

Anreize zur Umsetzung von CVD

Kommunikation

Der Aufgabenträger sollte die Verkehrsunternehmen, die aktuell in seinem Zuständigkeitsbereich tätig sind und andere, die ein Interesse an der Erbringung von Verkehren in dem Gebiet haben in den Umstellungsprozess einbinden. Den Verkehrsunternehmen sollte ein Weg aufgezeigt werden, wie sich zukünftige Ausschreibungen verändern werden und welche Technologien bei den Ausschreibungen erwartet werden. Dadurch bekommen die Verkehrsunternehmen eine Orientierung über die Entwicklungen und können sich entsprechend positionieren. Insbesondere bei der Schaffung von Lade-/Betankungsinfrastrukturen ist eine gewisse Vorlaufzeit vonnöten. Dies kann zu einer Mittelstandsförderung vor Ort beitragen.

Beihilfe bei der Fördermittelakquise

Die Beschaffung von Bussen mit emissionsarmem bzw. -freiem Antrieb wird aktuell durch öffentliche Fördermittel unterstützt. Der Aufgabenträger kann hier mit Information aber auch bei der Vorbereitung und Durchführung der Fördermittelgenerierung unterstützend tätig sein und somit zentrales Wissen zum Prozess bei sich aufbauen. Insbesondere für kleinere mittelständische Unternehmen kann das eine wichtige Unterstützung darstellen.

Praxisbeispiel:

traffiQ⁸

Wahl sinnvoller Vergabelängen

Wenn Verkehrsunternehmen selbst Lade- bzw. Betankungsinfrastrukturen schaffen müssen, ist dies mit Kosten verbunden, die refinanziert werden müssen. Ein langer Vergabezeitraum von Linien(-bündeln) hilft dem Verkehrsunternehmen, die Infrastruktur-Kosten entsprechend über einen längeren Zeitraum zu verteilen und somit die finanzielle Belastung zu verringern. Allerdings sind lange Vergabezeiträume aus Sicht der Öffentlichkeit nicht immer gewünscht.

Infrastruktur

Aufgabenträger haben die Möglichkeit, Verkehrsunternehmen bei der Suche nach geeigneten Flächen für Betriebshöfe mit Lade- bzw. Betankungsinfrastruktur zu unterstützen. Hierbei ist vor allem die Herstellung von Synergien bei der Nutzung von Energie zwischen verschiedenen Bran-

⁸ 13. VDV Elektrobuskonferenz (2022): Erfolge bei der wettbewerblichen Vergabe von E-Busleistungen der traffiQ. Vortrag von Prof. Dr. Reinhold Lindemann.

chen und insbesondere zwischen Energieerzeugung, Energieinfrastruktur und Betriebshöfen interessant und hat das Potenzial, hohe Kosten zu vermeiden. Die Nutzung solcher Synergien ist somit anzustreben.

Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, dass Aufgabenträger selbst die Anmietung oder den Erwerb geeigneter Flächen vornehmen und den späteren Betreibern der Linien die Lade-/Betankungsinfrastruktur zur Verfügung stellen. Dadurch wird sichergestellt, dass auch bei Betreiberwechsel einer Linie bzw. eines Teilnetzes die Infrastrukturen weiter genutzt werden. Mit der Schaffung von Infrastrukturen können lokal Technologien und Standards festgelegt werden, die einzuhalten bzw. zu nutzen sind.

Allerdings sind hierbei je nach Ausgestaltung rechtliche Fragestellungen zu klären. Das können beispielsweise sein:

- Zu welchen Konditionen wird die Infrastruktur den Verkehrsunternehmen zur Verfügung gestellt und stellt das eine Beihilfe dar? Wird sie nach marktüblichen Preisen zur Verfügung gestellt oder vergünstigt oder gar kostenfrei?
- Haben Wettbewerber einen Zugang zu solchen Infrastrukturen und wie kann eine unerwünschte Fremdnutzung ausgeschlossen werden?

Praxisbeispiele:

Landkreis Karlsruhe⁹, traffiQ

Beschaffung der Fahrzeuge

Mithilfe von Rahmenverträgen können Aufgabenträger Verkehrsunternehmen bei der Beschaffung unterstützen und somit den Aufwand bei den Verkehrsunternehmen durch Markterkundung und Beschaffung reduzieren sowie die Kosten je Fahrzeug. In größeren technologieeinheitlichen Räumen können bei der Fahrzeugbeschaffung zusätzlich Kosten durch Skalenvorteile reduziert werden. Darüber hinaus können Aufgabenträger selbst die Fahrzeuge beschaffen und im Rahmen des Auftrags an die Unternehmen zur Nutzung geben. Dies ist im Schienenverkehr bereits gelebte Praxis. Allerdings verlagert sich die Aufgabe der Verkehrsunternehmen und sie müssen lediglich die Fahrleistung erbringen und ggf. für die Wartung der Fahrzeuge sorgen.

Praxisbeispiele:

Landkreis Karlsruhe¹⁰, traffiQ

⁹ stadt+werk (11.1.2022) - Einstieg in die Elektromobilität (Landkreis Karlsruhe).

¹⁰ Landkreis Karlsruhe (2019): Sitzungsvorlage KT/24/2019: Einstieg in die Elektromobilität bei den Busverkehren.

Vorgaben zur Umsetzung von CVD

Einsatz von bestimmten Fahrzeugtypen/Antriebstypen

Bestandteil einer Ausschreibung kann der Einsatz definierter Fahrzeugtypen oder Antriebstechnologien sein. Die Ausformulierung kann dabei auch Spielräume für unternehmerische Entscheidungen lassen. Folgende Spielarten sind denkbar:

- Der Aufgabenträger schreibt die Nutzung z.B. von Batteriebussen verpflichtend vor

Praxisbeispiel:

Landkreis Karlsruhe

- Der Aufgabenträger schreibt die maximalen Emissionen bei der Erbringung der Verkehre vor und überlässt dem Verkehrsunternehmen, welche Antriebsarten zum Einsatz kommen.

Praxisbeispiel:

traffiQ

- Der Aufgabenträger fordert emissionsfreie Busse, formuliert aber keine Verpflichtung der Umsetzung und lässt somit größere Spielräume

Praxisbeispiel:

Landkreis Erding (MVV)¹¹

Solche Vorgaben sind vergaberelevant, stellen jedoch eine gewisse Einschränkung der Verkehrsunternehmen bei der Fahrzeugbeschaffung dar. Allerdings kann dadurch der Auftraggeber aktiver die Umsetzung der Clean Vehicles Directive sicherstellen und gegebenenfalls einzelne Technologien durchsetzen. Darüber hinaus können sich wiederum Mengenvorteile ergeben und die Preise für Infrastrukturen und Fahrzeuge reduzieren.

Auch bei eigenwirtschaftlichen Verkehren, die aktuell von den gesetzlichen Regelungen ausgenommen sind, kann durch eine entsprechende Festschreibung im Nahverkehrsplan die Umsetzung der Clean Vehicles Directive sichergestellt werden.

Die Aufgabenträger haben die Möglichkeit, die Antriebswende im Busverkehr aktiv voranzutreiben. Dazu haben sie verschiedenste Möglichkeiten zur Durchsetzung, von Vorgaben über finanzielle und organisatorische Anreize und Bereitstellung von Infrastrukturen und ggf. Fahrzeugen. Allerdings ist dies mit teilweise hohem organisatorischem Aufwand und finanziellem Risiko verbunden und bedarf teilweise der Klärung rechtlicher Fragestellungen. Dafür können über eine zentrale Koordination der Antriebswende die später entstehenden Kosten beispielsweise bei der Fahrzeugbeschaffung durch Skalenvorteile reduziert werden.

¹¹ MVV (2022): Informationen zur Ausschreibung von sieben Buslinien im Landkreis Erding.

8 Zusammenfassung (AP4)

Das Saubere-Fahrzeuge-Beschaffungs-Gesetz formuliert den Auftrag an die Länder und Aufgabenträger, die Antriebswende im Busverkehr umzusetzen. Dazu wurden für zwei Zeiträume Auflagen festgelegt, die den Mindestanteil der Fahrzeuge mit emissionsarmen und -freien Fahrzeugen am Gesamt-Fahrzeugbedarf vorschreibt. Bei jeder Neuausschreibung von Buslinien (-bündeln) sollte der Einsatz emissionsarmer Antriebstypen entsprechend vorgeben werden, wenn keine anderen Gründe dagegensprechen. Allerdings birgt die Antriebswende im Busverkehr technische, organisatorische und finanzielle Herausforderungen.

Die Untersuchung der aktuell gefahrenen Teilräume hat gezeigt, dass prinzipiell die Umstellung auf emissionsfreie Antriebstypen im Busverkehr des Verbandsgebietes technisch machbar ist. Die angesetzten Parameter haben eine konservative Betrachtung ermöglicht, somit kann z.B. auch bei anspruchsvollen Witterungsbedingungen von einem funktionierenden (batterie-)elektrischen Busbetrieb ausgegangen werden. Die untersuchten Teilräume im Verbandsgebiet des ZVSN lassen diesen Rückschluss zu, insbesondere das Teilnetz A im Harz stellt Extrembedingungen an einen batterieelektrischen Betrieb. Teilnetz B steht exemplarisch für Stadt/Umlandverkehre und Teilnetz C für kleinteiligere, spezielle Angebotsformen.

Der Umstieg auf Batteriebusse ist mit der Schaffung von Ladepunkten im Depot und teilweise an Haltestellen im öffentlichen Raum verbunden. Durch die Ladevorgänge entstehen Standzeiten, die einen Mehrbedarf an Fahrzeugen zur Folge haben. Die Umlaufplanung wird mit Berücksichtigung der Ladepausen komplexer und Dienstpläne werden entsprechend angepasst werden müssen. Dadurch entsteht ein Mehrbedarf an Personal im laufenden Betrieb.

Der Betrieb von Wasserstoff-Fahrzeugen hat betriebliche Vorteile gegenüber Batteriebussen. Insbesondere die schnelle Betankung der Fahrzeuge ermöglicht einen unveränderten Betrieb gegenüber Dieseln, wodurch Umlauf- und Dienstpläne weitgehend unverändert bleiben können. Dadurch entsteht kein nennenswerter Personalmehraufwand. Allerdings ist Wasserstoff als Technologie mit hohen finanziellen Aufwendungen für Infrastruktur verbunden und die Verfügbarkeit von Wasserstoff ist nicht überall gegeben. Daher ist ein Betrieb mit Wasserstoffbussen wirtschaftlich nur bei vorhandener Wasserstoffinfrastruktur sinnvoll, mit vor Ort produziertem (überschüssigem) Strom und Umwandlung zu grünem Wasserstoff. Allerdings wird in Zukunft der Bedarf an Wasserstoff in anderen Branchen voraussichtlich stark ansteigen. Dadurch entsteht ein Konkurrenzeffekt mit entsprechenden Auswirkungen auf Preise und Verfügbarkeit.

In der vorliegenden Untersuchung wurden die Auswirkungen des Antriebswechsels für die aktuell gefahrenen Linienbündel in Teilräumen untersucht. Bei einer angenommenen Ausweitung des Fahrplanangebots auf den untersuchten Linien, wie sie im Nahverkehrsplan angestrebt wird, würden die Vorteile der Wasserstoffbusse gegenüber elektrischen Bussen in Hinsicht auf den Personalbedarf und den dadurch entstehenden Kosten zunehmen. Die Nachteile eines Betriebes mit Wasserstoff blieben allerdings bestehen. Eine Optimierung der Fahrplanlagen, speziell abgestimmt auf den Energieverbrauch und die notwendigen Ladezyklen von Batteriebussen, wurde in der Untersuchung jedoch nicht näher betrachtet. Hierdurch könnten betrieblichen Kosten und der Fahrzeugbedarf bei Batteriebussen reduziert werden, allerdings mit großen Auswirkungen auf die Fahrplangestaltung und ggf. negative Auswirkungen auf die Angebotsattraktivität.

Der Umstieg der Antriebe ist mit hohen Mehrkosten gegenüber dem Status Quo verbunden. Diese Kosten entstehen insbesondere bei der Neuausschreibung der Linienbündel im Verbandsgebiet des ZVSN und fallen damit gestaffelt je nach Vergabezeitraum an. Beide Technologien sind mit ihren eigenen komplexen Herausforderungen verbunden und haben ihre individuellen Vor- und Nachteile. Der Gesetzgeber lässt aktuell durch Ausnahmeregelungen bei der Größe der Verkehrsunternehmen und der Auswahl der eingesetzten Fahrzeugtypen Ausnahmen vom Gesetz zu. Die Nutzung der Ausnahmen kann insbesondere bei aktuell stark steigenden Preisen durch Inflation, gestiegenen Energiekosten und Lohnsteigerungen attraktiv sein, um die bestehenden Verkehre in ihrem Umfang weiterhin gewährleisten zu können. Daher sollte die Antriebswende im Busverkehr insbesondere dort zeitnah umgesetzt werden, wo Umläufe effizient mit emissionsfreien Antrieben gefahren werden können, sodass eine bestmögliche Ausnutzung der Fahrzeuge mit entsprechender Kosten- und Emissionsoptimierung gewährleistet wird. In den untersuchten Teilräumen sind elektrisch betriebene Busse gegenüber Wasserstoffbussen vorzuziehen, da aktuell keine lokale Wasserstoffherzeugung vorhanden und konkret geplant ist.

Die Aufgabenträger können nicht nur bei der Ausschreibung der Linien (-bündel) die Antriebswende sicherstellen. Durch Anreize und Vorgaben haben die Aufgabenträger einen großen Gestaltungsspielraum, die Antriebswende zu organisieren. Beispielsweise können Aufgabenträger durch Information, Beratung oder durch Hilfe bei der Beantragung von Fördermitteln oder durch eine koordinierte Sammelbestellung von Fahrzeugen und Infrastrukturen die Antriebswende für die Verkehrsunternehmen vereinfachen und günstiger umsetzen. Sie können auch Infrastrukturen selbst aufbauen und den Verkehrsunternehmen zur Nutzung überlassen. Dadurch können Synergieeffekte sichergestellt werden und Kosten optimiert werden. Bei Betreiberwechsel eines Linienbündels wäre außerdem die Weiternutzung der Infrastrukturen gewährleistet. Allerdings ist dies mit teilweise großen finanziellen und organisatorischen Risiken verbunden. Dafür können der öffentlichen Hand mittelfristig Kostenvorteile entstehen bei einer gut organisierten, effizienten Umstellung auf alternative Antriebsformen.

Die Antriebswende im Busverkehr stellt die Aufgabenträger vor große Herausforderungen im Bereich Organisation und Finanzen. Dafür können Sie die Energie- und Antriebswende sinnvoll verzahnen, um den Transformationsprozess hin zu einer klimaneutralen Wirtschaft mit ihren vielfältigen Möglichkeiten in ihrem Interesse zu steuern.