



IFB-Bericht Nr. : IFB_2020-202130-007

**Erarbeitung einer
Machbarkeitsstudie für den
Einsatz alternativer Antriebe im
Schienenpersonennahverkehr
(SPNV) in Mecklenburg-
Vorpommern**

Schlussbericht

Kurztitel: „MBSt Antriebe SPNV M-V“

im Auftrag des
Ministerium für Energie, Infrastruktur und Digitalisierung Meck-
lenburg-Vorpommern

Schlossstraße 6 - 8, 19053 Schwerin

Berlin, 24. Juli 2020



Firmenanschrift:

IFB Institut für Bahntechnik GmbH
Hauptsitz Berlin
Carnotstraße 6
10587 Berlin

Tel.: 030 39 99 24 - 0

Fax: 030 39 99 24 - 90

E-Mail: ifb-berlin@bahntechnik.de

Projektleiter:

Dipl.-Ing. Uwe Dittrich
Tel.: 030 39 99 24 - 57

Bearbeiter:

Dipl.-Ing. Hendrik Ammoser
Tel.: 030 39 99 24 - 27

Dipl.-Ing. Nyascha Thomas Wittemann
Tel.: 0351 463 368 - 29

Dipl.-Ing. Tobias Bregulla
Tel.: 0351 463 365 - 77



Inhalt

1	Executive Summary	8
2	Aufgabenstellung.....	9
3	Marktüberblick Antriebstechnik	12
3.1	Mögliche Technologien alternativer Antriebe	12
3.2	Marktübersicht in Deutschland.....	13
3.3	Fahrzeug und Anlagenkonzepte für den SPNV	14
3.3.1	Dieseltriebwagen (DMU)	14
3.3.2	Elektrotriebwagen (EMU)	18
3.3.3	Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeuge.....	20
3.3.4	Oberleitungs-/Diesel-Hybrid (Dual-Mode)	31
3.3.5	Diesel-/Batterie-Hybridfahrzeuge	35
3.3.6	Wasserstoff-/ Batterie-Hybridfahrzeuge (FCMU)	40
3.4	CO ₂ -Emissionsvergleich	44
4	Fördermöglichkeiten.....	48
4.1	Ziel und Vorgehen.....	48
4.2	Zusammenfassung des Befragungsablaufes	48
4.3	Übersicht der kontaktierten Organisationen und deren Antworten.....	49
4.4	Ermittelte Fördermittelgeber.....	51
4.4.1	Die Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW)	51
4.4.2	Die KfW Bankengruppe.....	52
4.4.3	Richtlinie über die Förderung der Energieeffizienz des elektrischen Eisenbahnverkehrs (Bundesanstalt für Verwaltungsdienstleistungen [BAV]).....	54
4.4.4	Investive Schienenpersonennahverkehrsförderrichtlinie – InvestSPNVFöRL M-V - Land Mecklenburg-Vorpommern	55
4.4.5	Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetz (GVFG)	56
5	Machbarkeitsfeststellung durch linienbezogene Prüfung - Untersuchungsmethodik.....	58
5.1	Randbedingungen.....	58
5.2	Ablauf der Untersuchung	58
5.3	Definition der Bewertungsszenarien	59
5.3.1	Linien spezifische Parameter	59
5.3.2	Betrachtungszeiträume und Varianten der Infrastrukturfinanzierung .	60
5.4	Lebenszykluskosten-Berechnungen (Life Cycle Costing LCC)	61
5.4.1	Zielsetzung der LCC-Analyse	61

5.4.2	Normen- und Vorschriftenlage	62
5.4.3	Lebenszyklusphasen und Berechnungsmethode.....	63
5.4.4	Kapitalwertmethode	64
5.4.5	Restwert eines Investitionsgutes.....	66
5.4.6	Kalkulationszins	68
6	Infrastrukturbedarf der Netze.....	70
6.1	Vorhandene Infrastruktur Netz Westmecklenburg II & Darßbahn	70
6.2	Dieseltriebwagen	71
6.3	Oberleitungs-/ Batterie-Hybrid.....	71
6.3.1	Allgemeine Anforderungen zur Elektrifizierung	71
6.3.2	Ladeinfrastruktur zum Einsatz von Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeugen.....	75
6.3.3	Linie RB 13: Rehna – Parchim (Variante mit kleinerem Speicher).....	78
6.3.4	Linie RB 13: Rehna – Parchim (Variante mit größerem Speicher).....	78
6.3.5	Linie RB 14: Hagenow Stadt – Parchim (ohne Durchbindung nach Plau am See)	82
6.3.6	Linie RB 14 & RB 19: Hagenow Stadt – Parchim (mit Durchbindung nach Plau am See)	82
6.3.7	Linie RB 25 (Stralsund –) Velgast – Prerow (Variante mit kleinerem Speicher).....	83
6.4	Vollelektrifizierung	86
6.5	Wasserstoff-/ Batterie-Hybrid	87
6.5.1	Netz Westmecklenburg II	87
6.5.2	Darßbahn.....	89
6.6	Bewertung der Eignung für Sektorenkopplung.....	91
6.6.1	Einordnung der Sektorenkopplung.....	91
6.6.2	Wasserstofferzeugung	92
6.6.3	Elektrische Versorgung der Nachladestationen	97
6.6.4	Zusammenfassung Sektorenkopplung.....	101
7	Wirtschaftliche Betrachtung	102
7.1	Ermittlung aller Einzelkosten.....	102
7.1.1	Übersicht der betrachteten Kostenpositionen	102
7.1.2	Antriebsspezifische Kosten Fahrzeuge und Betrieb.....	104
7.1.3	Infrastrukturkosten	113
7.2	Bestimmung der LCC für unterschiedliche Szenarien.....	117
7.2.1	Kosten je Linie	117
7.2.2	Linien spezifische Betrachtung Bsp. RB 13 Rehna – Parchim (WRA – WPM) (50-Hz-Ladestationen/ großer BEMU-Energiespeicher).....	117
7.2.3	Gesamtnetzbetrachtung.....	126



8	Zusammenfassung und Fazit.....	135
8.1	Wirtschaftliche Bewertung.....	135
8.2	Kostentreiber.....	135
8.3	Ökologische Bewertung	136
8.4	Empfehlung zur Technologieentscheidung	136
9	Anhang A-F.....	137
A	Gesamtkapitalwerte im Netz Westmecklenburg II.....	138
A.1	35 Jahre Betrachtungszeit inklusive Infrastruktur	138
A.2	35 Jahre Betrachtungszeit exklusive Infrastruktur	138
A.3	15 Jahre Betrachtungszeit inklusive Infrastruktur	139
A.4	15 Jahre Betrachtungszeit exklusive Infrastruktur	139
B	Linien spezifische Auswertung RB 13 Rehna –Schwerin - Parchim.....	140
B.1	Kapitalwertverlauf RB 13 WRA-WS-WPM – Zeitraum 15 a	140
B.2	Kapitalwertverlauf RB 13 WRA-WS-WPM – Zeitraum 35 a	140
B.3	Kapitalwertverlauf RB 13 – 35 a (differenziert)	141
B.4	Kostenpositionen jährlich RB 13 – 35 a.....	142
B.5	Kapitalwertverlauf RB 13 – Zeitraum 35 a Wasserstoffpreis von 4 €/kg	143
B.6	Kapitalwertverlauf RB 13 – Zeitraum 35 a Wasserstoffpreis von 3 €/kg	143
C	Linien spezifische Auswertung RB 14 Hagenow Stadt – Parchim ohne Durchbindung als RB 19.....	144
C.1	Kapitalwertverlauf RB 14 WH-WL-WPM – Zeitraum 15 a	144
C.2	Kapitalwertverlauf RB 14 WH-WL-WPM - – Zeitraum 35 a.....	144
C.3	Kapitalwertverlauf RB 14 – 35 a (differenziert)	145
C.4	Kostenpositionen jährlich RB 14 – 35 a.....	146



D	Linien spezifische Auswertung RB 14 & RB 19 Hagenow Stadt – Parchim mit Durchbindung Plau am See	147
D.1	Kapitalwertverlauf RB 14 & RB 19 WH-WL-WPM-WPU– Zeitraum 15 a.....	147
D.2	Kapitalwertverlauf RB 14 & RB 19 WH-WL-WPM-WPU– Zeitraum 35 a.....	147
D.3	Kapitalwertverlauf RB 14 & RB 19 – 35 a (differenziert)	148
D.4	Kostenpositionen jährlich RB 14 & RB 19 – 35 a	149
E	Linien spezifische Auswertung RB 25 Velgast – Prerow ohne Durchbindung nach Stralsund.....	150
E.1	Kapitalwertverlauf RB 25 WV-WPOS – Zeitraum 15 a.....	150
E.2	Kapitalwertverlauf RB 25 WV-WPOS – Zeitraum 35 a.....	150
E.3	Kapitalwertverlauf RB 25 – 35 a (differenziert)	151
E.4	Kostenpositionen jährlich RB 25 – 35 a (differenziert)	152
F	Linien spezifische Auswertung RB 25 Velgast – Prerow mit Durchbindung nach Stralsund.....	153
F.1	Kapitalwertverlauf RB 25 WSR-WV-WPOS – Zeitraum 15 a	153
F.2	Kapitalwertverlauf RB 25 WSR-WV-WPOS – Zeitraum 35 a	153
F.3	Kapitalwertverlauf RB 25 – 35 a (differenziert)	154
F.4	Kostenpositionen jährlich RB 25 – 35 a (differenziert)	155



Änderungsverzeichnis

Datum	Bearbeiter	Änderung
18.05.2020	Dipl.-Ing. Uwe Dittrich	Berichtsentwurf erstellt
19.05.2020	Dipl.-Ing. Hendrik Ammoser	Review Berichtsentwurf
20.05.2020	Dipl.-Ing. Uwe Dittrich	Zwischenbericht fertiggestellt
25.06.2020	Dipl.-Ing. Uwe Dittrich	Final Draft Schlussbericht fertiggestellt
10.07.2020	Dipl.-Ing. Uwe Dittrich	Schlussbericht fertiggestellt
24.07.2020	Dipl.-Ing. Uwe Dittrich	Kleinere Änderungen eingearbeitet

1 Executive Summary

Das Land Mecklenburg-Vorpommern hat das Ziel, bei zukünftig auszuschreibenden Verkehrsleistungen im regionalen Schienenverkehr effiziente und emissionsarme Antriebssysteme anzuwenden. Hierfür waren im Rahmen einer Studie des IFB, Institut für Bahntechnik Berlin und der TU Dresden, Professur Elektrische Bahnen, vorab diejenigen Fahrzeug- und Antriebskonzepte zu bestimmen, die gesamtwirtschaftlich den höchsten Nutzen versprechen. Zudem sollten die Anforderungen der befahrenen Netze an die Fahrzeuge und die der Fahrzeugantriebe an die Infrastruktur spezifiziert werden sowie eine Übersicht über Fördermöglichkeiten für alternative Antriebssysteme und ihre Infrastruktur erstellt werden.

In dieser Studie werden für die Ausschreibungen des Netzes Westmecklenburg II sowie der Darßbahn Lebenszykluskostenanalysen für den Betrieb mit verschiedenen alternativen Antriebssystemen durchgeführt. Damit wird eine Entscheidungsgrundlage für die Auswahl des bevorzugten alternativen Antriebskonzepts bereitgestellt. Ziel einer im Vorfeld begründeten technologiespezifischen Ausschreibung ist einerseits Vergleichbarkeit bzw. Chancengleichheit für alle potenziellen Wettbewerber zu gewährleisten und andererseits rechtzeitig Ausbauten für die benötigte Infrastruktur zu veranlassen.

Innerhalb der Studie werden Dieseltriebzüge als Referenzfall mit Oberleitungs-triebwagen, Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeugen, Zweikraftzügen (sog. Dual-Mode-Züge für Diesel- und Oberleitungsbetrieb) und Wasserstoff-/Batterie-Hybridfahrzeugen mittels einer Lebenszykluskostenanalyse verglichen. Der Betrachtungszeitraum umfasst minimal 15 bis maximal 35 Jahre. Neben den fahrzeugseitigen und betrieblichen Parametern wird eine Dimensionierung und Kostenermittlung für die von den Technologien benötigte Infrastruktur durchgeführt.

Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeuge sind in der Gesamtnetzbetrachtung im Vergleich der Antriebssysteme langfristig am wirtschaftlichsten. Der Gesamtkapitalwert des Systems ist günstiger als jener der Bestandstechnologie mit Dieseltriebzügen. Aufgrund der größer gewählten Referenzdieseltriebzüge (2-Teiler) zur Berechnung bleiben einteilige Dieseltriebzüge wie aktuell im Betrieb allerdings weiterhin noch die wirtschaftlichste Technologie.

Die Technologie der Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeug reduziert die CO₂-Emissionen im Vergleich zum Bestand bis 2038 um ca. 90 %.

Unter Berücksichtigung aller untersuchten Randbedingungen sehen die Gutachter **Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeuge** als die sinnvollste alternative Antriebstechnologie sowohl im Netz Westmecklenburg II als auch auf der Darßbahn an. Die Wirtschaftlichkeit dieser Technologie kommt am weitesten an den aktuellen Dieselbetrieb heran und ist sogar besser als bei einer Neubeschaffung vergleichbarer Dieseltriebwagen mit ca. 120 Sitzplätzen.

2 Aufgabenstellung

Veranlassung

Bislang wird der Schienenpersonennahverkehr (SPNV) in Mecklenburg-Vorpommern auf den Hauptstrecken bereits weitgehend elektrisch, auf den Nebenstrecken jedoch ausschließlich mit herkömmlichen Dieselantrieben realisiert.

Angesichts der in den kommenden Jahren anstehenden Vergaben im Schienenpersonennahverkehr, die bislang mittels Dieseltraktion bedient wurden, beabsichtigt das Ministerium für Energie, Infrastruktur und Digitalisierung Mecklenburg-Vorpommern alternative Antriebstechnologien bei den entsprechenden Vergabeverfahren zu Grunde zu legen.

Aus vergaberechtlichen Gründen mussten bisher die Vergabeverfahren so gestaltet sein, dass Angebote mit erprobten im produktiven Einsatz befindlichen Fahrzeugtypen wirtschaftlich waren. Dies schloss bislang alternative Antriebe mangels vorliegender Serienreife aus. Da durch die technische Entwicklung neuer Antriebssysteme und die gesellschaftliche Diskussion im Zuge der Abgasmanipulation im MIV einerseits und der Klimaschutzbemühungen andererseits die Beschaffung neuer Dieselmotoren bei den Unternehmen zwischenzeitlich wirtschaftliche Bedenken (Stichworte: Wertverlust, Wiedereinsatzbarkeit) hervorruft, soll nun technologieoffen nach Alternativen auf Grundlage erneuerbarer Energien für Nebennetze gesucht werden. Hinzu kommen Forderungen politischer Entscheidungsträger nach einer Reduzierung der Dieseltraktion auch im Schienenverkehr.

Für die alternativen Fahrzeugantriebskonzepte und deren Energieversorgung sind somit Untersuchungen zu verfügbaren Technologien und deren Lebenszykluskosten durchzuführen. Planungshorizont für die hiervon betroffenen Verkehrsverträge sind die Fahrplanwechsel Ende 2025 bzw. 2026, bei denen das Teilnetz Westmecklenburg II sowie die Darßbahn (zunächst im aktuellen Bestand) betriebsbereit sein sollen.

Aus dieser Veranlassung hat das Ministerium für Energie, Infrastruktur und Digitalisierung Mecklenburg-Vorpommern das IFB Institut für Bahntechnik Berlin und die TU Dresden, Professur Elektrische Bahnen, beauftragt, eine Machbarkeitsstudie durchzuführen. Die Machbarkeitsstudie wurde in drei Arbeitspaketen erarbeitet:

- Marktüberblick
- Fördermöglichkeiten
- Machbarkeitsfeststellung durch linienbezogene Prüfung

Stand der Technik

Auf elektrifizierten Strecken sind leistungsstarke, effiziente und instandhaltungsarme elektrische Fahrzeugantriebe mit stromrichtergespeisten Drehstrommotoren seit vielen Jahren Standard. Daneben wird ebenfalls seit vielen Jahren der Elektromotor als Antriebsform genutzt, realisiert durch die Elektrifi-

zierung von Bahnstrecken mit Oberleitungsanlagen bei Einsatz von Elektrolokomotiven oder Elektrotriebwagen. Als „elektrifizierungswürdig“ gilt eine einzelne Bahnstrecke im Regelfall ab Verkehrsleistungen von über 10 Mio. Bruttotonnen pro Jahr. Auf nichtelektrifizierten Strecken dominieren im Leistungsbe-
reich bis ca. 1 MW aktuell diesel-mechanische und dieselhydraulische Antriebe die Fahrzeugflotten. Für höhere Leistungen bis 2,5 MW haben sich insbesonde-
re bei Lokomotiven dieselektrische Antriebe etabliert. Hauptgrund für den Einsatz von Dieselfahrzeugen sind die geringen Infrastrukturkosten. Zudem sind wesentliche Systemelemente wie das Energiespeichermedium Dieseldieselkraftstoff (Handhabbarkeit, Einkaufspreis), die innerbetriebliche Speicherung und Bevorratung (Tankstellen, Fahrzeugtankvolumen) sowie die Leistungsanforderungen und Leistungsfähigkeiten der Motoren und Fahrzeuge nach Jahrzehnten so gut aufeinander abgestimmt, dass betrieblich akzeptable Reichweiten bei gleichzeitig unkomplizierter universeller betrieblicher Einsetzbarkeit von Dieselfahrzeugen gegeben ist. Strengere Anforderungen durch den Umweltschutz sowie die Reduktion von Luftschadstoffen sowie klimawirksamen Gasen lassen allerdings vermuten, dass dieses optimal eingestellte Gesamtsystem in den kommenden Jahren einem erheblichen Anpassungsdruck ausgesetzt sein wird.

Verbrennungsantriebe sind jedoch mit hohen CO₂- sowie lokalen Schadstoff- und Lärmemissionen behaftet. Zudem kostet derzeit die Traktionsenergie am Rad bei Dieselbetrieb mehr als das Doppelte gegenüber elektrischem Betrieb, was trotz annähernd gleicher Beschaffungskosten pro Kilowattstunde am deutlich höheren Wirkungsgrad des elektrischen Antriebs mit Versorgung aus der Oberleitung liegt. Darüber hinaus bieten elektrische Traktionsantriebe grundsätzlich die Möglichkeit der Rekuperation von Bremsenergie; auf nichtelektrifizierten Strecken müssten dann allerdings fahrzeugseitige elektrische Energiespeicher mitgeführt werden. Dies eröffnet wiederum die Möglichkeit des abschnittsweise emissionsfreien Fahrens, etwa in Gebieten mit Abgas- oder Lärmschutzanforderungen sowie bei Tunnelbetrieb.

Handlungsbedarf

Im Kontext der aktuellen umweltpolitischen Diskussion und langfristiger wirtschaftlicher Überlegungen besteht deshalb Handlungsbedarf für bisher nichtelektrifizierte Bahnverkehre. Grundsätzlich bieten sich dafür folgende Optionen an:

1. Weiterbetrieb mit klassischen Dieselfahrzeugen (verbunden mit dem Risiko, dass Anpassungsmaßnahmen oder betriebliche Einschränkungen während der Nutzungsdauer umzusetzen sind).
2. Streckenelektrifizierung und Einsatz klassischer Elektrofahrzeuge.
3. Einsatz von Zweikraftfahrzeugen Elektro/Diesel ohne elektrische Energiespeicher (sogenannte Dual-Mode-Fahrzeuge).
4. Diesel-/Batterie-Hybridfahrzeuge mit elektrischem Antrieb und Energiespeicher sowie Ladeinfrastruktur (Oberleitung, Ladeabschnitte, ggf. Stecker).
5. Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeuge mit elektrischem Antrieb, Energiespeicher und Ladeinfrastruktur (Oberleitung und Ladeabschnitte).

6. Wasserstoff-/Batterie-Hybridfahrzeuge mit elektrischem Antrieb und elektrischem Energiespeicher sowie Wasserstoff-Betankung.

Gegenwärtig gibt es für die o. g. Alternativen 3. bis 6. erste Technologie- und Anwendungsbeispiele, allerdings meist nur als Prototypen oder in Kleinserien.

Um die Veränderungen gegenüber dem heutigen Zustand zu erfassen und möglichen Handlungsbedarf zu identifizieren, ist es bei Analysen ratsam, den Ausgangszustand „Betrieb mit klassischen Dieselfahrzeugen“ als Vergleich (Benchmark) hinzuzuziehen.

Anforderungen an die Bewertungsmethodik

Bei der technischen und wirtschaftlichen Bewertung der o. g. Antriebskonzepte wird häufig der Fehler einer ausschließlich fahrzeugseitigen Betrachtung – etwa von Leistungsfähigkeit, Energie- und Instandhaltungskosten – begangen. Wesentliche wirtschaftliche Effekte ergeben sich bei allen Varianten aber auch auf Seiten der Infrastruktur, die langfristig wirksame Kostenanteile für die spezifische Nachlade- und Energieversorgungsinfrastruktur hervorruft.

Daher müssen für Vergleichsuntersuchungen geeignete Betrachtungszeiträume gewählt werden, da Oberleitungs- und Energieanlagen mit Nutzungsdauern von 30 Jahren bis zu 70 Jahren langfristige Investitionsgüter sind, deren wirtschaftlichen Vorteile sich nicht sofort, sondern erst über den Lebenszyklus einstellen. Dieser Lebenszyklus beträgt ein Mehrfaches der Fahrzeug- und vor allem der Speicherlebensdauern. Bei kürzeren Betrachtungszeiträumen z. B. der Fahrzeuglebensdauer oder der Verkehrsvertragslaufzeit, kann hierbei mit Restwertbetrachtungen für die Infrastrukturanlagen gerechnet werden.

Ein weiterer Aspekt für die Bewertung ist die Migrationsfähigkeit alternativer Antriebs- und Energieversorgungskonzepte in den bahntechnischen und bahnbetrieblichen Regelungsrahmen. Insofern ist für die angefragte Untersuchung eine Technologie-, Betriebs- und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung über den Lebenszyklus unter Berücksichtigung der aktuellen Regelwerke notwendig.

Die zu erwartenden Investitionskosten in Infrastruktur und Fahrzeuge gebieten außerdem die Einbeziehung von möglichen Förderprogrammen in die Finanzierungsstrategie. Die vorhandenen Fördermöglichkeiten sind deshalb auf ihre Förderziele, die finanziellen Kapazitäten und die Laufzeiten zu prüfen und ihre Anwendbarkeit für die Etablierung alternativer Antriebe im Schienenverkehr zu bewerten.

3 Marktüberblick Antriebstechnik

3.1 Mögliche Technologien alternativer Antriebe

Bei einer Neuvergabe eines Verkehrsvertrags in einem bestehenden Dieselnetz ergeben sich prinzipiell die folgenden Möglichkeiten bei der Fahrzeugwahl:

- **Weiterbetrieb mit klassischen Dieselfahrzeugen (DMU)**
 - Referenzfall als Basis für Kostenvergleich
 - Einsatz ohne zusätzliche Infrastruktur möglich
- **Einsatz klassischer Elektrofahrzeuge (EMU)**
 - Streckenelektrifizierung des Gesamtnetzes erforderlich
- **Oberleitungs-/Diesel-Hybridfahrzeuge (sog. Dual-Mode-Fahrzeuge)**
 - Fahrzeugausrüstung mit elektrischem Antrieb und zusätzlichem Dieselmotor-Generatorsatz für Fahrten auf nicht elektrifizierten Abschnitten
 - Kein elektrochemischer Energiespeicher
 - Einsatz ohne zusätzliche Infrastruktur möglich
- **Diesel-/Batterie-Hybridfahrzeuge**
 - Umbaufahrzeuge aus klassischen Dieseldieseltriebwagen
 - Fahrzeugausrüstung mit elektrischem Antrieb, ergänzt mit einem elektrochemischen Energiespeicher (Batterie) und einem Dieselmotor-Generatorsatz
 - Nachlade-Infrastruktur für wirtschaftlichen Betrieb erforderlich (Nutzung vorhandener Oberleitung plus ggf. Bau zusätzlicher Ladestationen)
 - **Bei aktuell eingesetzter Fahrzeuggröße Umbau vom Dieseldieseltriebzug zum Diesel-/Batterie-Hybridfahrzeug nicht umsetzbar**
- **Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeuge (BEMU)**
 - Fahrzeugausrüstung entsprechend klassischer Elektrofahrzeuge, erweitert um zusätzlichen elektrochemischen Energiespeicher (Batterie)
 - Nachlade-Infrastruktur erforderlich (Nutzung vorhandener Oberleitung plus ggf. Bau zusätzlicher Elektrifizierungsabschnitte bzw. Ladestationen)
- **Wasserstoff-/Batterie-Hybridfahrzeuge (FCMU)**
 - Fahrzeugausrüstung mit elektrischem Antrieb und elektrochemischem Energiespeicher (Batterie) sowie Brennstoffzelle
 - Wasserstoff-Tankinfrastruktur und -logistik erforderlich

Die aktuell eingesetzten Dieselfahrzeuge des Typs RegioShuttle RS1 Baureihe 650 des Herstellers Stadler eignen sich grundsätzlich nicht für die Umrüstung auf das Diesel-/Batterie-Hybridkonzept aufgrund der Fahrzeuggröße und den zusätzlich notwendigen technischen Systemen für die Hybridisierung. Da auch aktuell weder Neufahrzeuge angeboten noch von einem Hersteller angekündigt

oder geplant sind, wird das Konzept der Diesel-/Batterie-Hybridfahrzeuge kein Untersuchungsgegenstand dieser Studie. Die vorliegende Studie vergleicht in Abstimmung mit dem Auftraggeber die verschiedenen Technologien auf Basis einer einheitlichen Fahrzeuggröße von ca. 120 Sitzplätzen.

3.2 Marktübersicht in Deutschland

Das deutsche Schienennetz ist zu ca. 60 %¹ elektrifiziert. Dennoch wird mehr als 90 % der Verkehrsleistung (Personen- bzw. Tonnenkilometer) elektrisch erbracht. Der Betrieb auf nicht elektrifizierten Strecken beschränkt sich überwiegend auf den Regionalverkehr, der dadurch jedoch noch immer zu ca. 1/3 der Zugkilometer mit Dieselfahrzeugen (überwiegend Triebwagen) betrieben wird. Die hier eingesetzten Dieselfahrzeuge sind im Hinblick auf die Emissionsfreiheit des Verkehrssektors in Zukunft zu ersetzen.

Besonders für die Ausschreibungen mit Betriebsaufnahmen zwischen 2023 und 2032 ist die Frage nach einem entsprechenden alternativen Antrieb bereits jetzt zu treffen. Während bis 2023 noch überwiegend Dieseldieseltriebwagen zum Betriebsstart eingesetzt werden, ist die Traktionsart für Betriebsaufnahmen nach 2024 meist noch nicht endgültig festgelegt². Nach aktuellem Stand sind jedoch bereits einige Netze fest mit alternativ angetriebenen Fahrzeugen geplant. Diese verteilen sich wie folgt:

- 49,8 Mio. Zug-km für Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeuge
- 5,6 Mio. Zug-km für Wasserstoff-/Batterie-Hybridfahrzeuge
- 3,8 Mio. Zug-km für Batterie-Hybridfahrzeuge oder Wasserstoff-/Batterie-Hybridfahrzeuge (noch kein Ausschreibungsergebnis bekannt)
- 171 Mio. Zug-km ohne Entscheidung für eine Antriebstechnologie

Es ist erkennbar, dass ein Großteil der zum Betrieb mit alternativen Antrieben vorgesehenen Zugkilometer, für die bereits eine Technologieentscheidung getroffen wurde, mit Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeugen erbracht werden sollen.

Dies ist unter Berücksichtigung der Abbildung 1 und den heute möglichen Reichweiten der Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeuge nachvollziehbar. Die Abbildung charakterisiert die im Bezug zur Linienlänge vorhandenen Distanzen zwischen elektrifizierten Abschnitten, die jeweils mit einem alternativen Antriebskonzept oder Diesel überbrückt werden müssen. Während Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeuge nach aktuellem Stand wirtschaftlich etwa zwischen 50 und 100 km Reichweite bieten, sind mit Wasserstoff-/Batterie-Hybrid-

¹ <https://www.allianz-pro-schiene.de/themen/infrastruktur/daten-fakten/> [Abgerufen am 19. Mai 2020]

² Marktanalyse alternativer Antriebe im deutschen Schienenpersonennahverkehr, NOW GmbH, 2020.

Fahrzeugen (600 – 800 km Reichweite) Umlaufpläne möglich, die mit dem Dieselbetrieb vergleichbar sind. Die Reichweiten charakterisieren demzufolge die wirtschaftlich sinnvollen unterschiedlichen Einsatzgebiete dieser Technologien.

Je größer die Elektrifizierungslücke ist, desto höher ist die erforderliche Reichweite (sofern keine Nachlademöglichkeiten eingerichtet werden), insbesondere wenn am Linienendpunkt keine Fahrleitung vorhanden ist (Bedienung im Stich). Werden die Lücken größer als die überbrückbaren Reichweiten, können sich Wasserstoff-/Batterie-Hybridfahrzeuge anbieten.

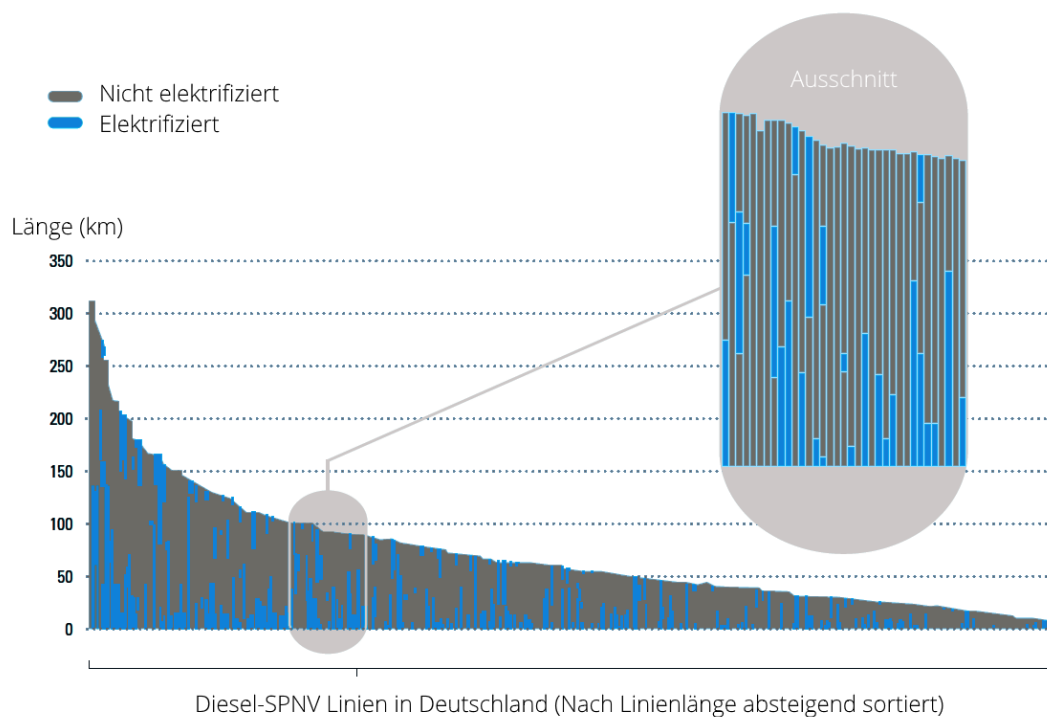


Abbildung 1: Diesel-SPNV Linien³

3.3 Fahrzeug und Anlagenkonzepte für den SPNV

3.3.1 Dieseltriebwagen (DMU)

Klassische Dieseltriebwagen mit geringer Leistung (bis max. 1 MW) stellen den Stand der Technik im Nahverkehr auf Nebenbahnen dar. Sie verfügen über meist mehrere kompakte und als gesamte Einheit schnell austauschbare Traktionsanlagen bestehend aus Motor, Getriebe, Kühlung etc., die in sogenannten PowerPacks zusammengefasst sind.

³ Marktanalyse alternativer Antriebe im deutschen Schienenpersonennahverkehr, NOW GmbH, 2020.

Funktionsweise klassischer Dieseltriebwagen als Bestands- bzw. Referenzfahrzeug



Abb. 3-1 Antriebsstrang dieselmechanisch (schematisch)

Traktion

Die Traktionsenergie wird vom Dieselmotor über einen mechanischen (in Einzelfällen auch elektrischen) Antriebsstrang zum Rad übertragen.

Bremsen

Die Bremsenergie wird durch verschleißfreie Retarder (in Einzelfällen bei elektrischem Antriebsstrang auch in Bremswiderständen) in Wärme gewandelt bzw. durch mechanische Bremsen aufgebracht. Die Wiederverwendung der Bremsenergie durch Speicherung ist nicht möglich.

Betriebliche Einschätzung

Betrieblich bietet die Technologie einige Vorteile: Eine hohe Reichweite von über 1000 km zwischen dem Tanken und eine flächendeckend vorhandene, technologisch einfache und kostengünstige Tankinfrastruktur ermöglichen einen flexiblen Einsatz auf allen Strecken. Dies gilt auch bei Veränderungen im Liniennetz, bei einer Umsetzung in andere Netze aufgrund von Betreiberwechseln sowie für Umleitungen/Linienkürzungen bei Baustellen.

Die technologisch einfache Umsetzung des Antriebes im Fahrzeug ermöglicht es außerdem, kurze und leichte Fahrzeuge (siehe aktuelles Bestandsfahrzeug) zu bauen sowie niedrige Streckenklassen zu befahren. Besonders auf Nebenbahnen sind die Streckenklassen A (Radsatzlast < 16 t/Radsatz) und B (Radsatzlast < 18 t/Radsatz) anzutreffen. Kurze Fahrzeuge mit geringer Sitzplatzkapazität können vor allem auf wenig ausgelasteten Strecken, wie es teilweise im Netz Westmecklenburg II der Fall ist, die Betriebskosten senken. Die geringe Masse und der daraus folgend niedrigere Energiebedarf sowie die geringere Anzahl an Drehgestellen und Traktionsanlagen (günstigere Instandhaltung) führen im Vergleich zu längeren Fahrzeugen zu geringeren Betriebskosten. Zudem können kurze Bahnsteiglängen bedient werden.

Größter Nachteil des Dieselantriebs sind die Emissionen von Schadstoffen wie Stickoxiden (NO_x) und Kleinstpartikeln (Feinstaub/ PM) sowie des klimaschädlichen Gases CO₂. Werden Neufahrzeuge in Betrieb genommen, so müssen diese seit 2019 den EU- Emissionsstandard Stage V erfüllen⁴. Dieser reduziert

⁴ <https://www.dieselnet.com/standards/eu/nonroad.php>. [Zugriff am 19 Mai 2020].

die Schadstoffemissionen erheblich verglichen mit Fahrzeugen mit Betriebsbeginn vor 1999 (Gültigkeitsbeginn des Emissionsstandards Stage 1).

Die Emission von CO₂ ist jedoch ausschließlich von der Verbrauchsmenge des Kraftstoffs abhängig. In diesem Bereich sind bei heutigen Dieselmotoren bereits nahezu alle physikalischen Grenzen ausgeschöpft, es kann deshalb allenfalls von einer begrenzten Reduzierung der CO₂-Emissionen durch den Einsatz von Neufahrzeugen ausgegangen werden.

Hinzu kommen erhebliche Schallemissionen, vor allem im Beschleunigungsvorgang. Verursacht werden diese durch erhöhte Drehzahlen der Dieselmotoren. Auch im Stillstand werden die tieffrequenten Motorengeräusche gegebenenfalls als störend wahrgenommen; ein Abschalten der Motoren ist aber häufig wegen der weiter notwendigen Heizung/Klimatisierung nicht möglich.

Alternative Kraftstoffe

Aktuell wird in Dieseltreibfahrzeugen ausschließlich fossiler Dieselmotorkraftstoff eingesetzt⁵. Die Beimischung von Biodiesel ist aufgrund zahlreicher Auswirkungen auf den Kraftstoff selbst, die Verbrennung sowie Teile des Motors und der Versorgungseinrichtungen nur begrenzt möglich. Da sich dadurch allenfalls eine Reduktion der CO₂ Emissionen, nicht jedoch eine vollständige Neutralität ergibt, ist eine ausschließliche Beimischung von Biokraftstoffen oder synthetischen Kraftstoffen nicht zweckmäßig.

Größere Relevanz könnten flüssige Kraftstoffe erreichen, die auf Basis von Power-to-X-Verfahren erzeugt werden. Diese ermöglichen die strombasierte Herstellung von Kraftstoffen und stellen einen möglichen Pfad der Sektorenkopplung zwischen erneuerbarer Energieerzeugung und dem Verkehrssektor dar. Eine bereits angewandte Variante ist hierbei die Elektrolyse zur Erzeugung von Wasserstoff. Durch weitere Verfahren können aus diesem gasförmigen Stoff auch flüssige Kraftstoffe synthetisiert werden (Power-to-Liquid (PtL)/Power-to-Fuels)⁶. Flüssige Kraftstoffe bieten gegenüber gasförmigem Wasserstoff den Vorteil der leichteren Handhabbarkeit im Betrieb und eine Speicherung auf dem Fahrzeug ohne Druckbehälter. Durch die geringen Prozesswirkungsgrade der Herstellung und der anschließenden Verbrennung im Dieselmotor ist der Gesamtwirkungsgrad sehr niedrig (< 25 %), so dass dies nur eine sinnvolle Anwendung bei Sektorenkopplung mit klimaneutral erzeugter elektrischer Energie eine sinnvolle Anwendung finden kann. Größte Herausforderung sind die geringen aktuell am Markt verfügbaren Kraftstoffmengen, die einen regulären Einsatz erheblich verteuern.

⁵ <https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/343542/> [Zugriff am 19. Mai 2020]

⁶ <https://www.energieagentur.nrw/tool/sektorenkopplung/information/power-to-x/power-to-gas-power-to-liquid.php> [Zugriff am 19. Mai 2020]

Fahrzeugbeispiele Dieseltriebwagen



Abb. 3-2 Beispiel Bestandsfahrzeug Siemens Desiro Classic, Baureihe 642 (Foto: Kriesel)

Der Fahrzeugtyp steht beispielhaft für mehrere Bestands-Fahrzeugtypen verschiedener Hersteller, wie diese derzeit in vielen Dieselnetzen eingesetzt werden. Sie wurden ab Ende der 1990er-Jahre bis ins neue Jahrtausend hinein in mittleren dreistelligen Stückzahlen je Baureihe beschafft. Die Fahrzeuge bieten noch ausreichend guten Fahrgastkomfort (Laufruhe, Klimaanlage, Barrierefreiheit), bei einem weiteren mehrjährigen Einsatz bietet sich jedoch eine Fahrgastraumauffrischung (Redesign) an. Sie erfüllen noch keinen EU-weit gültigen Emissionsstandard. Ein Einsatz für mindestens eine Hauptuntersuchungsperiode (8 Jahre) ist technisch gut möglich.



Abb. 3-3 Beispiel Neufahrzeug Alstom Lint 54, Baureihe 622⁷

Neufahrzeuge in klassischer Dieseltriebwagenteknik sind weiterhin beziehbar. Auf dem deutschen Markt bieten aktuell Alstom mit der Lint-Fahrzeugplattform sowie Pesa mit der Link-Plattform solche Triebwagen in ein- bis dreiteiliger Ausführung an. Die Sitzplatzanzahl variiert dabei zwischen ca. 70 (Einteiler) bis ca. 300 (Dreiteiler). Sie erfüllen die aktuellen Emissionsstandards, die für eine Zulassung in Deutschland Voraussetzung sind (EU Standard Stage V). Die üblichen Komfortmerkmale von modernen Schienenfahrzeugen sind vorhanden.

⁷ bahnbilder.de, Hans-Peter Kurz



Abb. 3-4 Beispiel Neufahrzeug ADtranz/ Stadler RegioShuttle RS 1⁸

Die Fahrzeuge des Typs RegioShuttle RS1 des Herstellers Stadler sind Einteiler mit bis zu 100 Sitzplätzen. Die kurze Länge von ca. 25 m⁹ und die geringe Masse ermöglichen einen kostengünstigen Betrieb auf Linien mit geringer Nachfrage. Deshalb wurden 497 Fahrzeuge für diverse Nebenbahnen in Deutschland und der Tschechischen Republik beschafft¹⁰. Die RegioShuttle Fahrzeuge der ODEG, welche zwischen 2002 und 2004 in Dienst gestellt wurden und die aktuellen Fahrzeuge auf den betrachteten Linien darstellen, sind wie bereits erwähnt, nicht für eine Umrüstung auf das Konzept eines Diesel-/ Batterie-Hybridfahrzeugs geeignet. Grundsätzlich ist aber eine Lebensdauer von ca. 25 - 30 Jahren zu erwarten, sodass ein Einsatz für mindestens eine Hauptuntersuchungsperiode (8 Jahre) technisch gut möglich ist.

Zusammenfassung

Dieseltriebwagen stellen das Rückgrat im nicht elektrifizierten SPNV dar. Aufgrund der geringen Infrastrukturanforderungen (Diesel-Tankstelle), der hohen Reichweite (bis zu 1000 km) und der nahezu uneingeschränkten betrieblichen Einsetzbarkeit sind sie weit verbreitet. Die Emission von CO₂ ist allerdings bei der Verbrennung von fossilem Kraftstoff unausweichlich. Mögliche Verfahren zur Herstellung von synthetischen Kraftstoffen aus Biomasse oder Elektroenergie sind zwar technisch möglich, aber noch nicht wirtschaftlich einsetzbar.

3.3.2 Elektrotriebwagen (EMU)

Elektrotriebwagen stellen das Rückgrat des elektrischen Nahverkehrs dar und werden aufgrund der Möglichkeit zur Installation von hoher, verteilter Antriebsleistung entlang des gesamten Zuges mittlerweile bevorzugt im Nahverkehr verwendet. Durch die hohe Anzahl an angetriebenen Radsätzen lässt sich eine

⁸ <https://www.vmv-mbh.de>

⁹ <https://www.odeg.de/unternehmen/fahrzeugflotte/regioshuttle>

¹⁰ <https://www.tagblatt.ch/wirtschaft/stadler-in-zahlen-vom-kmu-zum-weltkonzern-mit-8000-mitarbeitern-ld.1076347> [Abgerufen am 19. Mai 2020]

gute Übertragung der Antriebsmomente auf die Schiene erreichen. Dies ermöglicht eine hohe Spurtstärke. Ebenso ermöglicht die Antriebsverteilung eine höhere Rekuperation von Bremsenergie im Vergleich zu lokomotivbespannten Garnituren, da die Bremsmomente auf mehr angetriebene Radsätze verteilt sind.

Vorteilhaft sind sowohl das hohe Beschleunigungsvermögen als auch die Wartungsarmut der Antriebsanlage. Die Energiebezugspreise sind mit ca. 11 bis 12 ct/kWh¹¹ pro Kilowattstunde zwar preislich auf vergleichbarem Niveau mit der im Diesel gespeicherten Energie, die hohe Energieeffizienz des elektrischen Antriebs ermöglicht jedoch einen erheblich kostengünstigeren Betrieb (Faktor 2,5 bis 3 beim Energiebezug).

Grundvoraussetzung für den Betrieb von Elektrotriebwagen ist die Gesamtelektrifizierung einer Linie, die erhebliche Erstinvestitionen erfordert. Neben der Installation einer Fahrleitungsanlage entlang des gesamten Fahrwegs sind auch Fragen der Energiebereitstellung, der elektromagnetischen Verträglichkeit, notwendiger baulicher Anpassungen von Ingenieurbauwerken sowie der Herstellung von elektrotechnisch sicheren Personenverkehrsanlagen im Planungsprozess detailliert zu untersuchen.

Die ökologische Bilanz des Betriebs ist bei dem Elektrotriebwagen maßgeblich durch die Energieerzeugung bestimmt, die durch steigende erneuerbare Anteile kontinuierlich verbessert wird. Die Bewertung wird durch die Berechnung mit spezifischen Emissionsfaktoren (Emission/kWh Elektroenergie) durchgeführt. Die Geräuschemissionen sind im Vergleich zu Dieselfahrzeugen wesentlich geringer, insbesondere beim Beschleunigen. Darüber hinaus ist das Fahrzeug im Stillstand, abgesehen von den Hilfsbetrieben, nahezu geräuschlos.

Funktionsweise klassischer Elektrotriebzüge



Abb. 3-5 Antriebsstrang klassischer elektrischer Elektrotriebzug (schematisch)

Traktion

Die Traktionsenergie wird aus der Oberleitung über Stromabnehmer, Transformator und Stromrichter zu den elektrischen Fahrmotoren übertragen. Die konti-

¹¹ DB Energie GmbH, „Preistabelle DB Energie Bahnstrompreise Mittelspannung,“ DB AG, Berlin, 2019.

nuierliche, leistungsfähige Energieversorgung aus der Oberleitung ermöglicht hohe Geschwindigkeiten, schnelle Beschleunigung und geringe Traktionsenergiekosten.

Bremsen

Beim Bremsen kann das Fahrzeug die Bremsenergie durch die als Generator arbeitenden Fahrmotoren wiedergewinnen/rekuperieren, diese in die Oberleitung zurückspeisen und so anderen Fahrzeugen bereitstellen. Ein Teil der Bremsenergie wird direkt für die Verbraucher (maßgeblich Heizung, Klimaanlage) im Fahrzeug weiterverwendet.

Zusammenfassung

Die elektrische Traktion ist in Kombination mit einer Fahrleitung die energetisch günstigste Technologie. Keine Energiebereitstellung besitzt geringere Traktionsenergiekosten als die Bahnenergieversorgung (ca. 12 ct/kWh ab OL). Die hohe Effizienz und die Rückspeisefähigkeit der Fahrzeuge unterstreicht dies. Aus diesem Grund werden die meisten der betrieblich hoch ausgelasteten Strecken bereits elektrisch befahren. Der hohe Aufwand zur Errichtung der nötigen Infrastruktur steht allerdings nicht überall in einem wirtschaftlichen Verhältnis zum Nutzen. Üblicherweise ist eine Elektrifizierungswürdigkeit erst ab einer Verkehrsleistung von ca. 10 bis 20 Mio. Bruttotonnen/Jahr (Fahrzeugmasse + Ladungsmasse) gegeben.

3.3.3 Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeuge

Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeuge sind klassische Elektrotriebwagen, die um einen elektrochemischen Energiespeicher erweitert wurden. Dieser kann während der Fahrt sowie im Stand an der Oberleitung geladen werden und stellt auf oberleitungsfreien Abschnitten die gesamte benötigte Energie (Traktion, Hilfsbetriebe, Heizung bzw. Klimatisierung) für das Fahrzeug zur Verfügung. Bei vorhandener Elektrifizierung wird die Oberleitung wie bei einem Elektrotriebzug als Energieversorgung genutzt. Bei vorhandenen Elektrifizierungsperspektiven der zu befahrenden Strecken ist die Technologie zudem aufwärtskompatibel, da die Oberleitung dann auch dort zum Fahren und Laden genutzt werden kann. Zudem schreitet die Alterung der Batterien weniger schnell voran (bei geringerem Umfang der Entladetiefe), bei Vollelektrifizierung ist auch die Stilllegung der Batterieanlage möglich, ggf. gegen Ausgleich der fahrdynamisch und zulassungsrelevanten Batteriemasse.

Herausforderung ist, ausreichend Energie speichern zu können, um auch größere oberleitungsfreie Distanzen (40 – 80 km) zu überbrücken. Die Fahrzeughersteller setzen aktuell auf drei verschiedene Zelltechnologien (Nickel-Mangan-Cobalt-Oxide NMC, Lithium-Titanat-Oxid LTO, Lithium-Eisen-Phosphat LFP), die sich in Energiedichte (Energieinhalt pro Masse bzw. pro Volumen), Leistungsfähigkeit beim Entladen bzw. Laden (Lade- und Entladeleistung, aus-

gedrückt in der C-Rate), Alterungsverhalten (Lebensdauer) sowie Beschaffungskosten je Kilowattstunde (kWh) Energieinhalt unterscheiden.

Der technische Aufbau von Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeugen kann als Erweiterung des klassischen Elektrotriebwagens betrachtet werden:

Oberleitungsbetrieb

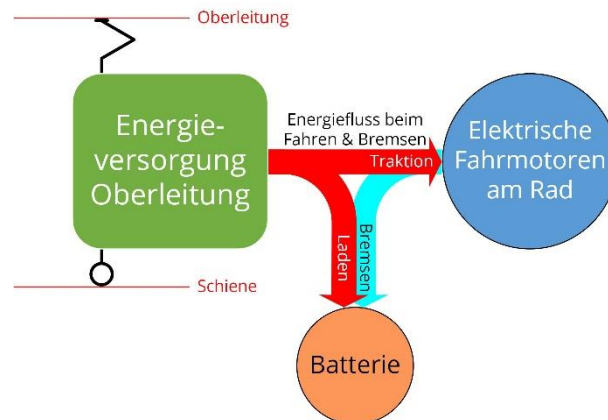


Abb. 3-6 Antriebsstrang Oberleitungs-/Batterie-Hybrid im Oberleitungsbetrieb (schematisch)

Traktion

Im Oberleitungsbetrieb unterscheidet sich der Oberleitungs-/Batterie-Hybrid nicht wesentlich vom klassischen Elektrotriebwagen. Erweitert wird dieser jedoch um das Laden der Batterie aus der Oberleitung sowohl im Stillstand als auch während der Fahrt.

Bremsen

Das Fahrzeug kann die Bremsenergie ebenfalls rekuperieren. Sie wird jedoch bei nicht voll aufgeladener Batterie zum Laden derselben bzw. für alle Verbraucher im Fahrzeug genutzt. Nur auf dem Fahrzeug nicht benötigte Energie wird in die Oberleitung zurückgespeist.

Batteriebetrieb

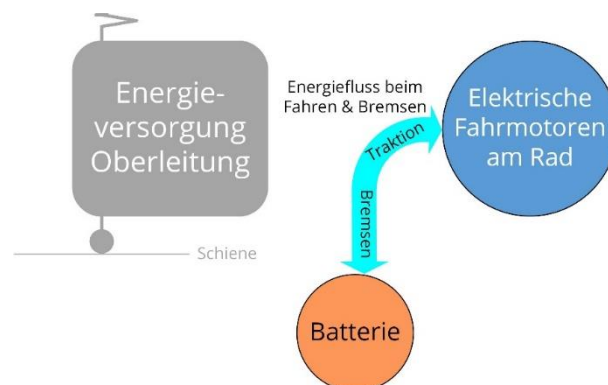


Abb. 3-7 Antriebsstrang Oberleitungs-/Batterie-Hybrid im Batteriebetrieb (schematisch)

Traktion

Der Energiebedarf für die Traktion sowie für alle weiteren Verbraucher (auch Heizung/Klimaanlage) im Fahrzeug wird aus der Batterie gedeckt. Die Reichweite hängt dabei maßgeblich von Topografie, Geschwindigkeits- und Fahrplanprofil, Außentemperaturen, Fahrzeugmasse und batteriespezifischen Größen ab.

Bremsen

Das Fahrzeug kann die Bremsenergie ebenfalls rekuperieren. Sie wird bei nicht voll aufgeladener Batterie zum Laden der Batterie bzw. für alle Verbraucher im Fahrzeug genutzt. Nicht benötigte Energie wird in Bremswiderständen verschleißfrei oder in Reibungsbremsen verschleißbehaftet in Wärme gewandelt.

Betriebliche Einschätzung

Die Oberleitungs-/ Batterie-Hybridtechnologie lässt höhere Fahrgeschwindigkeiten und Beschleunigungswerte zu als diese mit Dieseltriebwagen möglich sind. Dies gilt insbesondere im Betrieb unter der Oberleitung, da die Fahrzeuge hier als klassische Elektrotriebwagen verkehren. Da sich die Beschleunigungszeiten verkürzen können, wird eine Teilnahme am dichten Takt auf elektrifizierten Hauptstrecken möglich. Gegebenenfalls gibt es ebenso Fahrzeitverkürzungen auf im Batteriebetrieb befahrenen Abschnitten.

Die Ladeleistung der Fahrzeuge liegt im Stillstand bei ca. 1,0 - 1,2 MW pro Stromabnehmer. Sie wird dabei durch den maximal möglichen Stillstandsstrom von 80 A^{12} über die Kontaktstelle Oberleitung-Stromabnehmerschleifleiste begrenzt, da diese sonst zu heiß wird und der Fahrdraht mittelfristig entfestigt wird. Je nach Batterietechnologie und deren maximal möglicher Ladeleistung kann die Leistung in Fahrt jedoch deutlich höher liegen. Somit sind im Stillstand Ladezeiten für das volle Aufladen der Batterie von 10 bis 15 min realistisch, in Fahrt kann diese geringer ausfallen. Dies liegt am höheren zulässigen Strom am Stromabnehmer während der Fahrt (je nach Oberleitungsbauart mehrere hundert Ampere, mind. 600 A). Neue Anforderungen ergeben sich bei der Betriebsumstellung auf Fahrzeuge solchen Typs durch höhere zu erwartende Radsatzlasten. Die ca. 10 % höhere Masse durch die Ergänzung der Batterien im Vergleich zum Basiselektrofahrzeug sowie die ohnehin höhere Masse der elektrischen Komponenten (insbes. Trafo & Stromrichter) im Vergleich zum Dieseltriebwagen verursachen eine insgesamt erhöhte Fahrzeugmasse.

¹² DKE/UK 351.2: Ortsfeste Anlagen, Norm DIN EN 50367 (VDE 0115-605):2017-01 Tabelle 5, Berlin: VDE-Verlag GmbH, 2017.

Fahrzeugbeispiele Oberleitungs-/Batterie-Hybrid

Fahrzeugbeispiele Siemens Cityjet Eco/Mireo Plus B



Abb. 3-8 Beispiel Siemens Cityjet Eco¹³

Der Cityjet Eco (Fahrzeugplattform Desiro Mainline) existiert bereits als Prototyp und wird in Zusammenarbeit mit den Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB AG) zurzeit erprobt. Es wurde aus einer laufenden Produktionslinie klassischer Elektrotriebwagen der Desiro Mainline Fahrzeugplattform für die ÖBB AG entnommen. Siemens hat durch den fahrplanmäßigen Einsatz des Fahrzeugs umfangreich Daten ermitteln und Betriebserfahrung sammeln können, die in die nachfolgenden Fahrzeuge einfließen können. Die Fahrzeugplattform selbst kommt in Mecklenburg-Vorpommern als Elektrotriebwagen seit 2019 im Netz Ostseeküste Ost zum Einsatz.

Das Fahrzeug ist 75,2 m lang und verfügt über 244 Sitzplätze. Als Batterietechnologie werden LTO-Zellen eingesetzt. Die regelmäßige Reichweite wird vom Hersteller mit bis zu 80 km angegeben¹⁴. Dies ist bei einem Batterieenergieinhalt der verwendeten Batterietechnologie von aktuell 528 kWh realistisch. Die Höchstgeschwindigkeit beträgt im Batteriebetrieb 120 km/h, unter Oberleitung 140 km/h¹⁵.

Diese Fahrzeug-Plattform ist für Deutschland nicht mehr bei Ausschreibungen verfügbar. Als Ersatz wird von Siemens die Fahrzeugplattform Mireo in einer Variante „Plus B“ angeboten. Ausschließliche Oberleitungs-Fahrzeuge der Mireo-Plattform verkehren seit Juni 2020 im Fahrgastverkehr auf der Rheintalbahn¹⁶ und befinden sich derzeit auch in der sukzessiven Inbetriebnahme für die S-Bahn Rhein-Neckar¹⁷.

¹³ Siemens AG

¹⁴ <https://futurezone.at/b2b/14-tonnen-akku-statt-diesel-oebb-testen-oeko-zug-ab-2019/400114013> [Zugriff am 19. Mai 2020]

¹⁵ Siemens AG, „Factsheet Desiro ML ÖBB Cityjet eco,“ Siemens AG, München, 2018.

¹⁶ <https://www.urban-transport-magazine.com/erstzulassung-fuer-den-neuen-mireo-von-siemens-mobility-bislang-176-mireos-bestellt/>

¹⁷ Verkehrsverbund Rhein-Neckar, „Vertrag über die Verkehrsleistungen zur S-Bahn Rhein-Neckar Los 2 unterzeichnet,“ Verkehrsverbund Rhein-Neckar, Mannheim, 2017.



Abb. 3-9 Beispiel Siemens Mireo Plus B für das Netz Ortenau, Rendering¹⁸

Siemens konnte Ende 2019 die Ausschreibung im Netz Ortenau in Baden-Württemberg über 20 Fahrzeuge für sich entscheiden¹⁹. Die zweiteiligen Fahrzeuge sind mit ca. 46 m Länge und ca. 120 Sitzplätzen deutlich kleiner als die Fahrzeuge des Cityjet Eco und werden im steigungsreichen Netz regelmäßig eine Reichweite von ca. 58 km überbrücken. Sie sollen ab 2023 eingesetzt werden.

Fahrzeugbeispiel Bombardier Talent 3



Abb. 3-10 Beispiel Bombardier Talent 3 BEMU²⁰

Der „Talent 3 BEMU“ von Bombardier existiert bereits als Prototyp; die Entwicklung wurde mit Fördergeldern des Bundes unterstützt. Es wurde aus einer laufenden Produktionslinie klassischer Elektrotriebwagen für Baden-Württemberg entnommen. Die Zulassung ist bisher nicht erfolgt, ein Ersteinsatz im Probebetrieb soll für eine Tochter der DB AG in der Alb-Bodensee-Region erfolgen²¹.

Es ist 56,2 m lang und verfügt über 155 Sitzplätze. Als Batterietechnologie werden NMC-Zellen eingesetzt. Die regelmäßige Reichweite wird vom Hersteller

¹⁸ Siemens AG

¹⁹ <https://press.siemens.com/global/de/pressemitteilung/siemens-mobility-erhaelt-ersten-auftrag-fuer-batteriezuwege> [Zugriff 08. April 2020]

²⁰ Bombardier

²¹ <https://www.internationales-verkehrswesen.de/batteriezug-ab-2019-im-testbetrieb/> [Zugriff am 15. April 2020]

mit bis zu 40 km angegeben²². Dies ist bei einem Batterieenergieinhalt der verwendeten Batterietechnologie von aktuell 300 kWh realistisch (bis 440 kWh laut Quelle technisch möglich)²³. Die Höchstgeschwindigkeit beträgt im Batteriebetrieb 120 km/h, unter Oberleitung 160 km/h.

Fahrzeugbeispiel Stadler Flirt Akku



Abb. 3-11 Beispiel Stadler Flirt Akku²⁴

Das Fahrzeug existiert bereits und ist eine Eigenentwicklung der Firma Stadler. Laut Medienmitteilung des Herstellers verfügt das Fahrzeug bereits über eine eingeschränkte Zulassung für den Personenverkehr²⁵ durch die Entnahme aus der Flirt-Produktlinie. Die Entwicklung wurde mit Fördermitteln des Bundes unterstützt.

Es ist 58,6 m lang und verfügt über 154 Sitzplätze. Nach Aussagen des Herstellers sind sowohl LFP- als auch LTO-Zellen für die Installation im Fahrzeug geeignet. Die Höchstgeschwindigkeit beträgt im Batterie- und Oberleitungsbetrieb 140 km/h. Im Prototyp sind nach Daten der Professur für Elektrische Bahnen aktuell Batteriezellen mit einem Energieinhalt von 180 kWh eingebaut.

Stadler konnte im Juli 2019 die Ausschreibung zur Lieferung von 55 Fahrzeugen für das Land Schleswig-Holstein für sich entscheiden²⁶. Die zweiteiligen Fahrzeuge sind mit ca. 46 m Länge und ca. 120 Sitzplätzen kleiner als der Prototyp des Herstellers und werden in den Flachland-Netzen in Schleswig-Holstein regelmäßig eine Reichweite von ca. 80 km überbrücken. Sie sollen ab 2022 eingesetzt werden und verfügen laut Hersteller über eine Reichweite von ca. 80 km auch im gealterten Zustand der Batteriezellen.

²² <https://www.internationales-verkehrswesen.de/batteriezug-ab-2019-im-testbetrieb/> [Zugriff am 15. April 2020]

²³ <https://www.golem.de/news/bombardier-und-tu-berlin-triebzug-mit-akku-soll-dieselmotoren-ersetzen-1808-136240.html> [Zugriff am 15. April 2020]

²⁴ Stadler Rail Deutschland GmbH

²⁵ Stadler Deutschland, „Medienmitteilung Stadler lässt den FLIRT von der Leine,“ Stadler Deutschland, Berlin, 2018

²⁶ <https://www.stadlerrail.com/de/medien/article/stadler-liefert-55-flirt-akku-fuer-dennahverkehrsverbund-schleswig-holstein/530/> [Zugriff am 15. April 2020]



Abb. 3-12 Beispiel Stadler Flirt Akku für Schleswig-Holstein, Rendering²⁷

Fahrzeugbeispiel Alstom Coradia Continental BEMU



Abb. 3-13 Beispiel Alstom Coradia Continental BEMU, Rendering²⁸

Der Verkehrsverbund Mittelsachsen hat die Beschaffung von elf dreiteiligen Alstom Coradia Continental in der Oberleitungs-/Batterie-Hybridvariante 2019 beschlossen. Diese sollen ab 2023 auf der Strecke Chemnitz-Leipzig eingesetzt werden. Besonderheit des Einsatzes auf dieser Strecke ist eine notwendige zu erreichende Höchstgeschwindigkeit von 160 km/h und eine zu überbrückende Oberleitungslücke von ca. 80 km, was den Energiespeichern auf dem Fahrzeug hohe Leistungen und viel Energiebezug abverlangt. Es ist deshalb damit zu rechnen, dass die Fahrzeuge mit mindestens ca. 800 kWh Batterieenergieinhalt ausgestattet werden und über ca. 150 Sitzplätze bei ca. 56 m Fahrzeuglänge verfügen.

Der Bestellung beim Fahrzeughersteller Alstom erhöht zudem die Anzahl der Fahrzeuganbieter dieser Technologie auf dem deutschen Schienenverkehrsmarkt, da alle den Markt maßgeblich bestimmenden Lieferanten die Technologie im Portfolio anbieten. Alstom hatte vor der Bestellung maßgeblich auf das Wasserstoff-/ Batterie-Hybridfahrzeug iLint gesetzt.

²⁷ Stadler Rail Deutschland GmbH

²⁸ Alstom

Übersicht über Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeuge

Seit 2016 haben nahezu alle bedeutenden Hersteller von Triebwagen für den deutschen Markt BEMU Fahrzeuge entweder bereits vorgestellt oder zumindest angekündigt. Die folgende Übersicht zeigt einen Einblick in die Angebote dieser Hersteller:

Stadler

Der Schweizer Hersteller Stadler Rail AG erweiterte seine FLIRT-Plattform (Regionalzüge) um einen Batteriespeicher in zwei Größen. Bestellungen aus Deutschland sind bereits beim deutschen Ableger Stadler Pankow eingetroffen:

Anzahl der Fahrzeugglieder / Länge	2 / ca. 46.5 m	3 / 59 m
Höchstgeschwindigkeit (Fahrleitungs-/ Batterie-Modus)	160 km/h / 140 km/h	160 km/h / 140 km/h
Sitzplatzangebot	124	154
Reichweite	80 km (150 km bei optimalen Bedingungen)	
Bestellungen und geplanter Betriebsbeginn	55 Fahrzeuge durch den Aufgabenträger NAH.SH bestellt. Betriebsaufnahme 2022	1 Fahrzeug als Prototyp
Speichertechnologie	Zur Zeit angeboten: LTO oder LFP (abhängig von den vertraglichen Anforderungen)	
Erste öffentliche Vorstellung	Im Rahmen der Innotrans 2018	

Bombardier

Wie andere Hersteller hat Bombardier sein BEMU-Fahrzeug auf der Grundlage seiner bestehenden Elektrotriebzug-Plattform (TALENT 2) entwickelt, die nun in der dritten Version angeboten wird:

Anzahl der Fahrzeugglieder / Länge	3 / 56 m
Höchstgeschwindigkeit (Fahrleitungs-/ Batterie-Modus)	160 km/h / 140 km/h
Sitzplatzangebot	155
Reichweite	35 - 40 km (zur Zeit), 80 - 100 km (geplant)
Bestellungen und geplanter Betriebsbeginn	Keine (1 Prototyp wurde 2018 für Testzwecke in Baden-Württemberg hergestellt, noch keine Zulassung)
Speichertechnologie	3 Batteriemodule (NMC/C) mit einer Kapazität von 300 kWh. Möglich sind bis zu 440 kWh. Die geplante Lebensdauer der Batterie wird mit 5 bis 8 Jahren angegeben.
Erste öffentliche Vorstellung	Im Rahmen der Innotrans 2018

Siemens

Die Fahrzeugplattform Siemens Desiro Mainline (EMU) wurde durch die neu-entwickelte Mireo Plattform ersetzt. Diese wird aktuell zum Mireo Plus B als Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeug (BEMU) weiterentwickelt, wobei auch Wasserstoff-/Batterie-Hybridzüge (FCMU) und Standard Elektrotriebzüge (EMU) angeboten werden sollen.

Anzahl der Fahrzeug- glieder / Länge	2 / 46 m	3 / 71 m
Höchstgeschwindigkeit (Fahrleitungs-/ Batterie-Modus)	160 km/h / 140 km/h	
Sitzplatzangebot	120	165
Reichweite	35 - 40 km	60 - 120 km
Bestellungen und ge- planter Betriebsbeginn	20 Fahrzeuge wurden vom Land Baden-Württemberg für den Betriebsstart im Juni 2023 auf dem Ortenau-Netz be- schafft.	
Speichertechnologie	LTO Zellen mit einer geplanten Lebensdauer von 15 Jahren. Der Mireo plus B für das Ortenau Netz be- sitzt zwischen 400 und 450 kWh Batteriekapazität (Quelle: Siemens).	
Erste öffentliche Vor- stellung	Im Rahmen der Innotrans 2018 noch auf Basis der Cityjet-Fahrzeuge (Desiro Mainline) für die ÖBB. Erste Renderings und PowerPoint-Präsentationen für die Mireo-Plattform mit Batterie in 2018.	

Ein Fahrzeug basierend auf der Desiro-Mainline-Plattform wurde im Jahr 2018 für die ÖBB hergestellt. Die dort verwendeten LTO Zellen besitzen eine Kapazi-
tät von 528 kWh. Es befindet sich im stabilen Fahrgasteinsatz und die ÖBB
planen weitere Bestellungen.

Alstom

Alstom erweiterte die existente Coradia Continental Plattform, welche für den Regionalverkehr entwickelt wurde, und stattet die Elektrotriebwagen des Typs Coradia Continental mit Batterien aus.

Anzahl der Fahrzeugglieder / Länge	3 / 57 m
Höchstgeschwindigkeit (Fahrleitungs-/ Batterie-Modus)	160 km/h / 160 km/h
Sitzplatzangebot	150
Reichweite	70 - 120 km
Bestellungen und geplanter Betriebsbeginn	11 Fahrzeuge wurden durch den VMS (Verkehrsverbund Mittelsachsen) für den Betriebsstart in 2023 beschafft.
Speichertechnologie	Nicht bestätigte Quellen gehen von 800 kWh des LTO Zellentyps aus.
Erste öffentliche Vorstellung	Im Rahmen der Bestellung für die Linie Leipzig – Chemnitz im September 2019 als Rendering.

Auf dem deutschen Markt sind mehrere Betriebsstarts für BEMUs geplant. Die folgende Liste zeigt einige der Netze zusammen mit den Fahrzeugen, die zum Einsatz kommen werden:

- 2023: Ortenau Netz, 20 Siemens Mireo Plus B
- 2022/23: NAH.SH, 55 Stadler Flirt Akku
- 2023: Leipzig – Chemnitz (ZVMS), 11 Alstom Coradia Continental BEMU
- 2024 - 2026: Pfalznetz, 61-82 BEMU (Start Ausschreibung April 2020)

Da BEMUs derzeit noch nicht auf dem deutschen Netz im Einsatz sind, werden die belastbare Erfahrungen und Leistungsinformationen zu den Batterien in 6-8 Jahren verfügbar sein.

Es wird zudem erwartet, dass in den nächsten Jahren weitere Hersteller auf den deutschen Markt kommen werden:

- CAF, Spanien: Die angebotene Straßenbahn CAF Urbos 3 bietet die Möglichkeit, Batterien für oberleitungsfreie Abschnitte (wie bspw. in Birmingham) zu integrieren. Da CAF auch Regionalzüge anbietet, ist eine BEMU-Version zu erwarten.
- Hitachi, Japan: Die ersten BEMUs gingen im Oktober 2016 in Japan in Betrieb (360 kWh Li-Ion). Hitachi ist ein in Europa aktiver Hersteller (Bspw. Fertigung in Großbritannien und Italien). Daher ist es zu erwarten, dass dieser auch ein BEMU-Fahrzeug einführen wird. Die Teilnahme am deutschen Markt wird eigenen Angaben angestrebt.

- CRRC, China: Im Jahr 2018 bestellte die DB vier Hybrid-Rangierlokomotiven bei CRRC. Dies wurde als ersten Schritt auf den deutschen/ europäischen Markt angesehen. Die Einführung eines BEMU Fahrzeugs wird daher mittelfristig erwartet.

Darüber hinaus besteht auch die Nachfrage nach Straßenbahnen mit Batterieunterstützung. Dies ist auf diverse Gründe, maßgeblich jedoch die prägende städtebauliche Optik von Oberleitungen, zurückzuführen. Einige Beispiele zeigen die Nachfrage nach batteriegestützten Straßenbahnen, die prinzipiell den Herstellern Knowhow-Aufbau für BEMU-Fahrzeuge für den Regionalverkehr ermöglichen. Auf folgende Unterschiede zwischen Straßenbahn- und Vollbahnfahrzeuge muss dennoch hingewiesen werden:

- Wesentlich kürzere Elektrifizierungslücken/Haltestellenabstände
- Geringere Fahrgeschwindigkeiten
- Häufigeres Beschleunigen und Bremsen

Dies führt in Summe zu einem geringeren Bedarf an Batteriekapazität bei dem Einsatz in Straßenbahnen. Die längste batterieelektrisch gefahrene Strecke wurde von der Stadler Avenio Tram im Jahr 2011 zurückgelegt. Die Entfernung von ca. 19 km zeigt allerdings im Vergleich zu den Reichweiten derzeitig angebotener BEMUs deutlich die unterschiedlichen Bedürfnisse. Auch eine 2007 in Nizza eröffnete Straßenbahnlinie enthält einen fahrdrahtlosen Abschnitt. Der Betrieb auf diesem erfolgt mit Batterien des Typs NiMH und verlief bisher ohne größere Probleme.

Zusammenfassung

Oberleitungs-/ Batterie-Hybridfahrzeuge sind technisch rein elektrische Triebfahrzeuge, welche durch die Ergänzung um Energiespeicher auch außerhalb elektrifizierter Strecken betreibbar sind. Aufgrund der hohen Effizienz der Batterie, des elektrischen Antriebs sowie der Energiezuführung auf das Fahrzeug durch kontaktierende Systeme sind geringe Energiekosten, insbesondere an der Oberleitung, zu erwarten. Die chemisch bedingte geringe Energiedichte der Energiespeicher (ggü. Diesel) sorgt für eine hohe Batteriemasse bei gleichzeitig geringerer Reichweite. Hieraus resultiert, dass der Betrieb mit batterieelektrischen Fahrzeugen (auch bei Wasserstoff-/Batterie-Hybridfahrzeugen) immer auch ein Infrastrukturthema darstellt. Durch die Errichtung von zusätzlicher Ladeinfrastruktur kann Energie in das Fahrzeug zugeführt werden. Diese bewirkt zusätzliche Investitionskosten und höhere Energiebezugskosten durch den zusätzlichen Speicherungsschritt und dezentralen (ggf. teureren) Energiebezug. Beide Faktoren werden durch die Wahl des Bezugsnetzes (50 Hz Landesnetz bzw. 16,7 Hz Bahnenergie) determiniert. Die Speicherfähigkeit und Ladegeschwindigkeit der Batterien kann durch die gewählte Zellchemie beeinflusst werden. Grundsätzlich unterliegen Batterien nach heutigen Stand allerdings regelmäßigen Austauschzyklen aufgrund der Alterungsprozesse.

3.3.4 Oberleitungs-/Diesel-Hybrid (Dual-Mode)

Bei Oberleitungs-/Diesel-Hybridfahrzeugen handelt es sich um Züge, die sowohl als vollwertiges Oberleitungsfahrzeug als auch als vollwertiges Dieselfahrzeug eingesetzt werden können. Sie verfügen über keinen elektrochemischen Traktionsenergiespeicher und kommen ausschließlich mit langjährig erprobten Standardkomponenten aus. Durch die in Teilen doppelte Fahrzeugausrüstung für zwei getrennte Systeme haben die Fahrzeuge eine hohe Masse (bis zu Streckenklasse C2 mit bis zu 20 t Radsatzlast).

Betrieblich bieten die Fahrzeuge jedoch Vorteile bei Linienläufen mit Streckenabschnitten in beiden Systemen, da ein Übergang fließend, mit marginalem Zeitaufwand und hoher Flexibilität durchgeführt werden kann. Eine Reichweitereinschränkung gibt es nur durch die Menge getankten Dieselmotorkraftstoffs, die jedoch für Fahrzeugumläufe meist unkritisch ist.

Funktionsweise Oberleitungs-/ Diesel-Hybrid (Dual-mode)

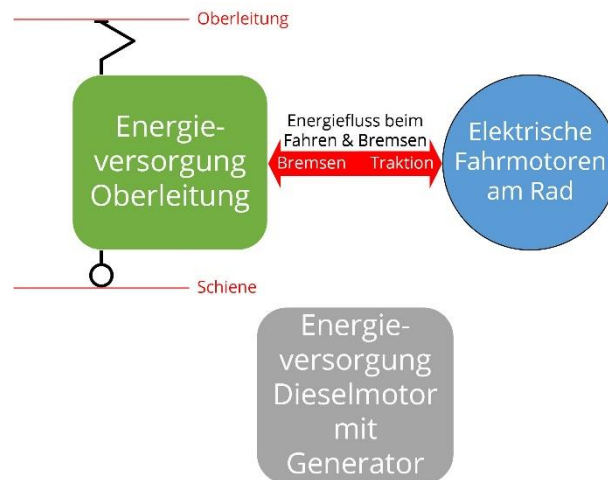


Abb. 3-14 Antriebsstrang Oberleitungs-/Diesel-Hybrid (Dual-mode) im Oberleitungsbetrieb (schematisch)

Traktion

Im Oberleitungsbetrieb unterscheidet sich der Oberleitungs-/Diesel-Hybrid nicht vom klassischen Elektrotriebwagen.

Bremsen

Das Fahrzeug kann die Bremsenergie ebenfalls rekuperieren und diese in die Fahrleitung zurückspeisen. Ein Teil der Bremsenergie wird direkt für alle Verbraucher (insbesondere Heizung, Klimaanlage) im Fahrzeug weiterverwendet.

Der Fahrzeugtyp behält die Dieselantriebstechnik auf den nicht elektrifizierten Strecken bei, was ggf. zu einer ablehnenden Haltung bei Trägern öffentlicher Belange und Anwohnern führt. Die CO₂-Emissionen steigen durch die höhere Fahrzeugmasse für die Doppelausstattung der zwei Systeme und das dadurch längere Fahrzeug; die Schadstoffemissionen entsprechen bei Neufahrzeugen jedoch dem aktuellen Emissionsstandard Stage V. Eine Speicherung reku-perierter elektrischer Bremsenergie im Dieselbetrieb ist mangels Batterie nicht möglich. Es ist lediglich vorgesehen, die Energie für Verbraucher wie Heizung und Klimaanlage zu verwenden.

Dieselsbetrieb

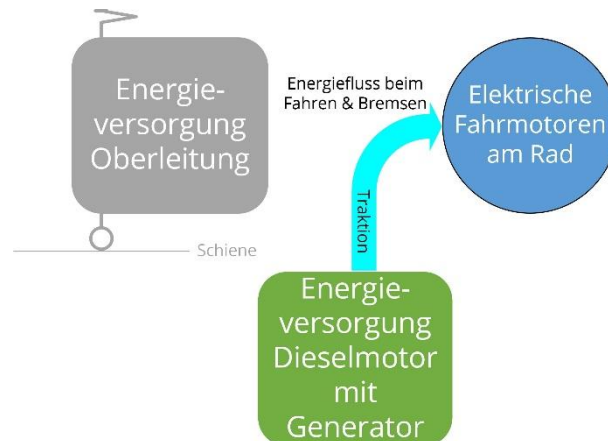


Abb. 3-15 Antriebsstrang Oberleitungs-/Diesel-Hybrid (Dual-mode) im Dieselsbetrieb (schematisch)

Traktion

Die Fahrzeuge sind auf der Basis klassischer Elektrotriebzüge aufgebaut. Sie führen für den Betrieb auf nichtelektrifizierten Strecken Dieselmotor-Generator-Einheiten als mobile Bereitsteller elektrischer Energie mit. Dies entspricht dem Prinzip der dieselektrischen Leistungsübertragung leistungstärkerer Dieseltriebfahrzeuge.

Der Energiebedarf für Traktion sowie für die weiteren Verbraucher im Fahrzeug wird aus mehreren (meist auf dem Dach angebrachten) Dieselmotor-Generator-Einheiten und elektrischer Leistungsübertragung gedeckt.

Bremsen

Das Fahrzeug kann die Bremsenergie ebenfalls rekuperieren. Ein Teil der wiedergewonnenen Energie wird direkt für die Verbraucher im Fahrzeug weiterverwendet. Nicht benötigte Bremsenergie wird in Bremswiderständen verschleißfrei oder verschleißbehaftet mit Reibungsbremsen in Wärme gewandelt.

Fahrzeugbeispiele Oberleitungs-/Diesel-Hybrid (Dual-Mode)



Abb. 3-16 Beispiel Stadler Flirt für Greater Anglia, GB²⁹

²⁹ Stadler Rail AG



Abb. 3-17 Unterbringung der Komponenten der 2. Traktionsart in weiterem Wagenkasten³⁰

Der Fahrzeugtyp existiert bereits als Serienfahrzeug in Großbritannien und steht seit 2019 im Einsatz. Es basiert auf der Fahrzeugplattform Flirt, die auch in Deutschland angeboten wird.

Für die Umsetzung des Dual-Mode-Betriebes wird ein klassischer Elektrotriebzug um einen kurzen Wagenkasten ergänzt, in dem die Dieselmotor-Generatorsätze zur Bereitstellung elektrischer Energie untergebracht sind. Das Konzept repräsentiert eine der beiden Einbaumöglichkeiten für leistungsstarke Dieselmotor-Generatorsätze. Sie wird in Großbritannien vor allem deshalb notwendig, weil das zulässige Fahrzeugumgrenzungsprofil deutlich kleiner als in Mitteleuropa ist. Eine Unterbringung der Diesel-Antriebsanlagen auf dem Dach scheidet dort aus.

Die Technologie ermöglicht grundsätzlich auch den nachträglichen Austausch der Dieselmotor-Generatorsätze durch Batterien zur Gestaltung eines Oberleitungs-/Batterie-Hybridzuges.



Abb. 3-18 Beispiel Alstom Coradia Polyvalent³¹

Der Fahrzeugtyp wird in Frankreich in verschiedenen Ausführungen bereits seit mehreren Jahren im Regional- und Fernverkehr eingesetzt. Verschiedene Fahrzeugkonfigurationen in Länge, Ausstattung und Leistung sind möglich.

Nahezu die gesamte Antriebstechnik bis auf die elektrischen Fahrmotoren ist auf dem Dach des Fahrzeugs untergebracht, auch die Dieselmotor-Generator-Sätze für den Dieselbetrieb. Die Fahrzeuge existieren in vier- und sechsteiliger

³⁰ bahnonline.ch, Jürg D. Lüthard

³¹ ParYoyo697—Travailpersonnel, CC BY-SA 4.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=56332543>

Ausführung mit ca. 220 bzw. ca. 350 Sitzplätzen. Die Fahrzeuge haben im Dieselmotorbetrieb eine geringere Leistung (ca. 50 % thermisch) als elektrisch, erreichen jedoch in beiden Betriebsmodi 160 km/h Höchstgeschwindigkeit³².

Die Fahrzeugtechnologie kommt in Europa vor allem in Frankreich bereits seit mehreren Jahren zur Anwendung. Dort sind mehr als 150 Fahrzeuge des Typs Alstom Coradia Polyvalent (Markenname Régiolis) im Einsatz, die als Oberleitungs-/Diesel-Hybride ausgeführt sind. Die Fahrzeuge sind aktuell nur für den Betrieb mit einer Wechselspannung von 25 kV 50 Hz, einer Gleichspannung von 1,5 kV und den Dieselmotorbetrieb ausgelegt.

Im Mai 2019 hat außerdem der Zweckverband Schienenpersonennahverkehr Rheinland-Pfalz Süd beschlossen, zusammen mit der Région Grand Est Fahrzeuge dieses Typs auch für den Einsatz im grenzüberschreitenden Verkehr mit Deutschland durch Alstom entwickeln zu lassen³³. Diese sind auch für Oberleitungsbetrieb mit 15 kV, 16,7 Hz und Dieselmotorbetrieb in Deutschland ausgelegt und werden bis zum dortigen Verkehrsvertragsstart Mitte der 2020er-Jahre verfügbar und zugelassen sein. Eine Zulassung für ein Fahrzeug dieser Technologie liegt in Deutschland aktuell jedoch noch nicht vor.

Die Fahrzeugtechnologie ist unabhängig von Entwicklungen am Batteriemarkt. Ein nachträglicher Ersatz der Dieselmotor-Generator-Sätze durch elektrochemische Energiespeicher ist bei Verfügbarkeit leistungsfähigerer Batterien (v. A. Reichweite) jedoch technisch möglich.

Zusammenfassung

Oberleitungs-/Diesel-Hybridfahrzeuge können als Symbiose von Diesel- und Elektrotriebwagen angesehen werden. Auf elektrifizierten Strecken verkehren sie rein elektrisch (siehe Elektrotriebwagen) während sie auf Abschnitten ohne Oberleitung rein dieselgetrieben verkehren (siehe Dieselmotorwagen). Nachteilig ist auf beiden Abschnitten die höhere Masse aufgrund der nötigen Fahrzeug-ausrüstung. Eine Zwischenspeicherung von Energie ist in diesem Fahrzeug-konzept aktuell nicht implementiert, wobei insbesondere jüngere Fahrzeuge des Typs ggf. mit Batterien anstatt von Dieselmotor-Generatorsätzen nachgerüstet werden können. Dennoch kann im Dieselmotorbetrieb regenerierte Bremsenergie für die Versorgung der Hilfsbetriebe verwendet werden.

3.3.5 Diesel-/Batterie-Hybridfahrzeuge

Diesel-/Batterie-Hybridfahrzeuge entsprechen einem Konzept, welches aus dem Automobilbau als Plug-In-Hybrid bekannt ist. Ein elektrischer Antriebs-

³² Alstom, „Product sheet Coradia Polyvalent Low-floor electric or dual-mode multiple unit,“ Alstom, Saint-Ouen, 2015

³³ https://www.zspnv-sued.de/fileadmin/user_upload/zweckverband/versammlungen/sued/59/Protokoll_59_VV_o__ffentliche_Sitzung.pdf. [Zugriff am 15. April 2020]

strang wird durch eine oder mehrere Dieselmotor-Generator-Einheiten mit elektrischer Energie versorgt. Der Dieselmotor kann einen Teil des Leistungsbedarfes des Zuges decken (Wegfall einer oder zweier Dieselmotor-Generator-Sätze beim Umbau auf Hybrid). Äquivalent dazu befindet sich eine Batterie im Fahrzeug, die den verbleibenden Leistungsbedarf deckt. Grundbedingung ist, dass die Batterie jederzeit ausreichend geladen ist, um selbst zum Traktionsleistungsbedarf des Fahrzeugs beitragen zu können. Die Batterie kann dafür vor oder während einer Fahrt durch den Dieselmotor oder eine Einspeisung von außen (Oberleitung, Stecker) nachgeladen werden. Eine Ladung in Fahrt muss im Fahrzeugkonzept explizit vorgesehen sein. Im Zusammenspiel von Dieselmotor und Batterie steht so immer genügend Traktions- und Nebenverbraucherleistung zur Verfügung. Je nach von außen nachgeladener Energiemenge wird ein entsprechender Anteil des Energiebedarfes während der Zugfahrt aus der Batterie bzw. der Dieselmotor-Generator-Einheit bereitgestellt.

Oberleitungsbetrieb (wenn im Fahrzeugkonzept vorgesehen)

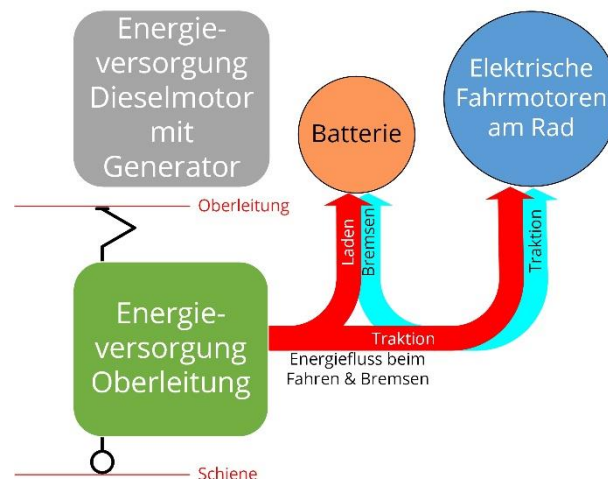


Abb. 3-19 Antriebsstrang Diesel-/ Batterie-Hybrid im Oberleitungsbetrieb (schematisch)

Traktion

Ist im Konzept ein Oberleitungsbetrieb während der Fahrt vorgesehen, unterscheidet sich der Diesel-/Batterie-Hybrid nicht wesentlich vom klassischen Elektrotriebzug. Erweitert wird dieser jedoch um das Laden der Batterie aus der Oberleitung sowohl im Stillstand als auch in Fahrt.

Das Konzept eignet sich besonders für den Umbau von bestehenden Dieseltriebzügen. Diese haben jedoch meist wenig Reserve für zusätzliche Massen im bzw. am Fahrzeug. Ein Transformator zum Betrieb an der Oberleitung mit 15 kV und 16,7 Hz, wie in Deutschland üblich, hat eine hohe Masse. Zur Massereduzierung könnte eine geringere Trafoleistung beitragen. Die Trafoleistung ist dann nur zum Nachladen ausreichend, nicht jedoch gleichzeitig als Traktionsenergiequelle zum Fahren. Je nach Umsetzung des Konzepts kann es deshalb vorkommen, dass auch bei Fahrt mit angelegtem Stromabnehmer unter Ober-

leitung ein Teil des Traktionsleistungsbedarfs aus der Batterie oder dem Dieselmotor bereitgestellt werden muss.

Das Konzept kann außerdem vorsehen, die Batterie über eine leistungsfähige Steckerlösung aufzuladen. Sie kann dann jedoch ausschließlich im Stand wieder aufgeladen werden, eine Fahrt während des Ladens ist nicht möglich. Diese Einschränkung kann betriebliche Nachteile (Standzeit für Ladung, wenig Reichweite) hervorrufen. Für Werkstattaufenthalte ist die Vorsehung dieser Schnittstelle jedoch immer sinnvoll.

Bremsen

Das Fahrzeug kann die Bremsenergie ebenfalls rekuperieren. Sie wird bei nicht voll aufgeladener Batterie zum Laden derselben bzw. für alle Verbraucher im Fahrzeug genutzt. Nur im Fahrzeug nicht benötigte Energie wird in die Oberleitung zurückgespeist, verschleißfrei in Bremswiderständen oder verschleißbehaftet durch Reibungsbremsen in Wärme gewandelt.

Diesel-/Batterie-Hybridbetrieb

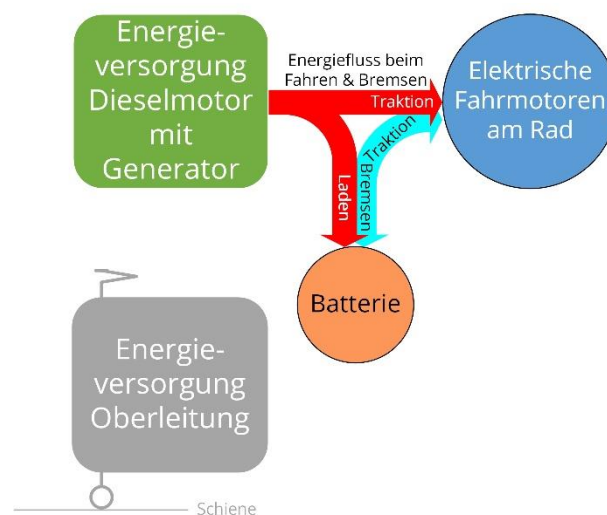


Abb. 3-20 Antriebsstrang Diesel-/Batterie-Hybrid im Diesel-/Batterie-Hybrid-Betrieb (schematisch)

Traktion

Die Fahrzeuge führen für den Betrieb auf nichtelektrifizierten Strecken Dieselmotor-Generator-Einheiten, also mobile Bereitsteller elektrischer Energie, mit. Dies entspricht dem Prinzip der dieselektrischen Leistungsübertragung in leistungstärkeren Dieseltreibfahrzeugen. Sie decken mit der Batterie gemeinsam den Traktions- und Zusatzleistungsbedarf des Fahrzeugs und können so meistens im optimalen Drehzahlbereich betrieben werden, da die Batterie wechselnde Leistungen bereitstellt, während der Motor die Grundlast trägt. Ist keine Ladeinfrastruktur vorhanden, dienen die Dieselmotor-Generator-Sätze auch als Nachlademöglichkeit für die Batterie, allerdings mit ungünstigem Wirkungsgrad.

Bremsen

Das Fahrzeug kann die Bremsenergie ebenfalls rekuperieren. Sie wird bei nicht voll aufgeladener Batterie zum Laden derselben bzw. für die Versorgung aller Verbraucher im Fahrzeug genutzt. Nur im Fahrzeug nicht benötigte Energie wird verschleißfrei in Bremswiderständen oder verschleißbehaftet durch Reibungsbremsen in Wärme gewandelt.

Batteriebetrieb

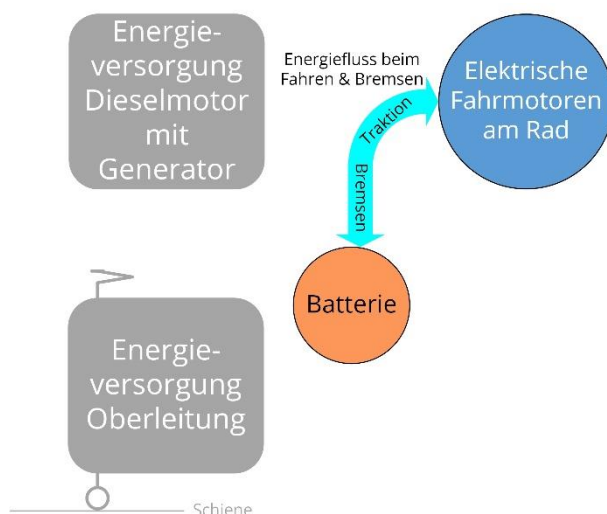


Abb. 3-21 Antriebsstrang Diesel-/Batterie-Hybrid im Batteriebetrieb (schematisch)

Traktion

Für Abschnitte, auf denen Geräusch- und Schadstoffemissionen als besonders unerwünscht eingestuft werden (Bahnhofsabfahrten, Ortsdurchfahrten, Nähe zu Krankenhäusern, Schulen, etc.), kann auf den Dieselmotor verzichtet und nur aus der Batterie gefahren werden. Die Traktionsart wird vor allem durch die Energiemenge der Batterie begrenzt, ggf. auch das Beschleunigungsverhalten im oberen Geschwindigkeitsbereich durch die Batterieleistung.

Bremsen

Das Fahrzeug kann die Bremsenergie ebenfalls rekuperieren. Sie wird bei nicht voll aufgeladener Batterie zum Laden derselben bzw. für die Versorgung aller Verbraucher im Fahrzeug genutzt. Nur im Fahrzeug nicht benötigte Energie wird verschleißfrei in Bremswiderständen oder verschleißbehaftet durch Reibungsbremsen in Wärme gewandelt.

Diesel-/Batterie-Hybride sind vor allem für Umbaukonzepte interessant, ein Neubau von Fahrzeugen ist bei den in Deutschland vertretenen Herstellern nicht angekündigt. Ziel des Umbaus ist vor allem eine mögliche Weiternutzung noch nicht am Lebensdauerende befindlicher Dieseldieseltreibwagen, die bei Ausschreibungen durch den Verlust von Verkehrsverträgen freigesetzt werden. Aufgabenträger können für Neuverträge heute die Rekuperationsfähigkeit der Fahrzeuge, also die Möglichkeit der Rückgewinnung der beim Bremsen frei-

werdenden Energie, vorschreiben. Reine dieselmotorisch angetriebene Fahrzeuge können dies technologisch nicht, sodass sie sich für eine Bewerbung durch den Betreiber ohne vorherigen Umbau nicht eignen.



Abb. 3-22 Beispiel DB Erzgebirgsbahn EcoTrain mit Oberleitungs-Nachladung (Fotomontage)³⁴

Der Fahrzeugtyp steht beispielhaft für ein solches Umbaukonzept, bei dem Fahrzeuge der Plattform Siemens Desiro Classic bei der DB Erzgebirgsbahn unter dem Produktnamen EcoTrain zu Diesel-/Batterie-Hybriden umgebaut wird. Der Hybridantrieb wird technologisch umgesetzt, indem ein neues Power-Pack mit einem Dieselmotor-Generator-Satz und integriertem elektrischem Fahrmotor einen der Dieselmotoren ersetzt. Der zweite Dieselmotor wird durch einen Batteriesatz und einen weiteren elektrischen Fahrmotor ersetzt. Der Dieselmotor hat eine ähnliche Leistung wie die vorher verbauten Anlagen. Der Energiegehalt der Lithium-Ionen-NMC-Batterien beträgt ca. 150 kWh.

Zur Nachladung der Batterie wird in einer ersten Stufe des Projekts eine Steckerlösung auf Basis eines bahnzugelassenen Standards (UIC 552) eingesetzt, wenn nötig kann zudem mit dem Dieselmotor nachgeladen werden. In einer zweiten Stufe soll das Fahrzeug einen Stromabnehmer zur Nachladung der Batterie aus der Oberleitung erhalten, der im Fahrzeug für die Steckerladung integrierte Transformator ist dafür bereits ausgelegt. Die Zulassungsfahrten des Prototyps sollen nach Projektangaben noch in 2020 beginnen.



Abb. 3-23 Eco Train mit deutlich erkennbarem zusätzlichem Dachaufbau³⁵

³⁴ Falk Angermann, Professur für Elektrische Bahnen

³⁵ Nyascha Thomas Wittemann, Professur für Elektrische Bahnen

Wie aus Abb. 3-23 hervorgeht, ist eine erhebliche Anzahl an Komponenten für den Umbau erforderlich. Diese können im Falle des EcoTrain problemlos auf dem Dach montiert werden. Das Fahrzeug ist aufgrund seiner konstruktiven Ausführung und Länge fähig, diese aufzunehmen, da es auch als elektrisches Fahrzeug in andere europäische Länder geliefert wurde.

Die Bestandsfahrzeuge von Typ Stadler RegioShuttle RS1 lassen sich allerdings nicht derartig umbauen und werden deshalb im Rahmen dieser Studie in Abstimmung mit dem Auftraggeber nicht als Diesel-/Batterie-Hybridfahrzeuge untersucht.

Zusammenfassung

Diesel-/Batterie-Hybridfahrzeuge können einerseits durch einen Dieselmotor und andererseits durch eine Batterie angetrieben werden. Letztere kann entweder im Stand über einen Stecker, in Fahrt durch den Motor oder beim Bremsen durch regenerierte Energie geladen werden. Aufgrund der Vielzahl der nötigen Komponenten besitzt das Fahrzeug eine höhere Masse. Aktuell existiert dieses Fahrzeugkonzept nur als Umbauversion im Rahmen einer Demonstration. Neufahrzeuge werden z. Z. nicht angeboten.

3.3.6 Wasserstoff-/ Batterie-Hybridfahrzeuge (FCMU)

Wasserstoff-/Batterie-Hybridfahrzeuge wandeln in einer Brennstoffzelle die im Wasserstoff gespeicherte Energie in Kombination mit Luftsauerstoff im Prozess der sogenannten kalten Verbrennung in elektrische Energie um. Diese wiederum wird dann in einem Elektromotor in mechanische Energie umgewandelt. Abgas ist Wasserdampf bzw. kondensiertes Wasser. Da in einem elektrischen Netzwerk immer eine ausgeglichene Energiebilanz zwischen Leistungsangebot und -bezug herrschen muss, Brennstoffzellen jedoch zur Reduzierung der Alterungserscheinungen immer möglichst in einem konstanten Leistungsbereich belastet werden³⁶, muss für den ständig schwankenden Leistungsbedarf ein Zwischenspeicher integriert werden. Insbesondere bei Traktionsspitzen übernimmt dieser die wechselnden Lasten. Hierzu verfügt der Wasserstoff-/Batterie-Hybrid über Batterien. Leistungsfähige Brennstoffzellen sind für den nutzbaren Betrieb als Stapel aus mehreren Zellen aufgebaut, von denen jede einzelne für sich eine Brennstoffzelle darstellt. Diese Stapel werden Stacks genannt, die einzelnen Zellen sind darin in Reihe geschaltet. Die Stapelung ist notwendig, um eine ausreichend hohe Spannung am Systemausgang des Stacks bereitstellen zu können. Eine Alterung tritt bei Brennstoffzellen maßgeblich an der protonenleitenden Membran im Innern der Zelle auf. Bei der Instandhaltung werden deshalb vor allem die Zellmembranen überarbeitet bzw. getauscht, die

³⁶ O. Uluc, „Wasserstoff als Energieträger, Ballard Power Systems,“ in DMG Seminar E1, Berlin, 2018

Zellumgebung kann bestehen bleiben. Die Standdauer der Zellmembran wird im Rahmen dieser Studie als Lebensdauer bezeichnet.

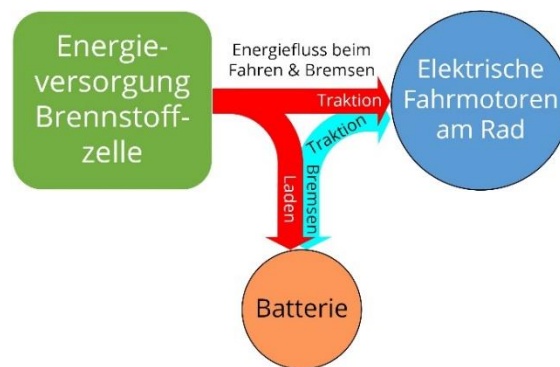


Abb. 3-24 Antriebsstrang eines Wasserstoff-/Batterie-Hybrid

Traktion

Der Leistungsbedarf wird durch ein Zusammenspiel der Batterie und der Brennstoffzelle (BZ) gedeckt. Vor allem bei Leistungsspitzen für Beschleunigungsphasen werden dabei große Anteile aus der Batterie entnommen, da die Leistung der BZ kleiner ist als jene des Antriebes. In traktionsarmen Phasen wird die Batterie wieder aus der BZ aufgeladen. Der benötigte Wasserstoff wird in Tanks mitgeführt, die unter mehreren 100 Bar Druck stehen und den Wasserstoff so in großen Mengen speichern können.

Bremsen

Das Fahrzeug kann die Bremsenergie ebenfalls rekuperieren. Sie wird bei nicht voll aufgeladener Batterie zum Laden derselben bzw. für alle Verbraucher im Fahrzeug genutzt. Nicht benötigte Energie wird in Bremswiderständen verschleißfrei oder in Reibungsbremsen verschleißbehaftet in Wärme gewandelt. Bei in Betrieb befindlichen BZ lädt diese während des Bremsvorgangs die Batterie zudem weiter auf.

Fahrzeugbeispiele Wasserstoff-/Batterie-Hybrid

Fahrzeugbeispiel Alstom iLint



Abb. 3-25 Beispiel Alstom iLint³⁷

³⁷ Alstom

Der Fahrzeugtyp ist seit 2018 im planmäßigen Fahrgasteinsatz mit zwei Vorse-
rienfahrzeugen in Norddeutschland. Er basiert auf der Dieseltriebwagen-
Plattform Coradia Lint der Firma Alstom. Die PowerPacks des Fahrzeugs wur-
den durch Elektromotoren ersetzt. Die Beschleunigungswerte entsprechen an-
nähernd jenen von Dieseltriebzügen.

Der Fahrzeugtyp wurde im Jahr 2018 außerdem in einer Stückzahl von 26
durch den Rhein-Main-Verkehrsverbund (RMV) für das Taunusnetz bestellt.
Niedersachsen hat außerdem weitere 14 Fahrzeuge bestellt.

Das Fahrzeug verfügt über 150 Sitzplätze, ist 54,3 m lang und hat eine Höchst-
geschwindigkeit von 140 km/h. Die elektrische Energie stellen zwei PEM
Brennstoffzelleneinheiten (PEM – Proton Exchange Membrane Fuel Cell) auf
dem Dach, jeweils bestehend aus mehreren BZ-Stacks, bereit. Diese bringen in
Zusammenspiel mit zwei Fahrzeugbatterien die nötige Traktionsleistung auf.
Nach Herstellerangaben haben die Brennstoffzellen jeweils eine Leistung von
200 kW, der Energieinhalt der zwei Batterien liegt bei insgesamt 220 kWh. Ca.
260 kg netto Wasserstoff sorgen für eine Reichweite im Bereich der Dieseltrieb-
züge zwischen 800 und 1000 km pro Tankfüllung. Eine Überarbeitung der
Brennstoffzellenmembran hat nach Aussage des Fahrzeugherstellers nach
15.000 h (~20.000 h Betriebsstunden des Zuges) zu erfolgen, dies entspricht
ca. 4 bis 5 Jahre. Hersteller der Brennstoffzellen ist Hydrogenics.

Fahrzeugbeispiel Siemens Mireo Plus H



Abb. 3-26 Beispiel Siemens Mireo Plus H, Rendering³⁸

Das Fahrzeugkonzept basiert auf der Mireo-Plattform der Firma Siemens. Ein
Prototyp existiert bisher nicht, die Entwicklung der nötigen Brennstoffzellen ist
jedoch mit dem vorgesehen Hersteller Ballard bereits angestoßen. Als Wasser-
stofffahrzeug wird der Mireo in der Variante „Plus H“ angeboten. Oberleitungs-
Fahrzeuge der Mireo-Plattform befinden sich bereits im Planbetrieb im Rheintal.

Das Fahrzeug soll über zwei Traktionsanlagen mit den jeweils zugehörigen
Batterien und Brennstoffzellen verfügen, 160 km/h erreichen und als 2-Wagen-
Zug mit 120 bzw. 3-Wagen-Zug mit 165 Sitzplätzen angeboten werden und
über bis zu 600 km bzw. 900 km Reichweite verfügen³⁹.

³⁸ Fotomontage: Siemens AG

³⁹ J. Steinbauer, „Mireo - Ein starker Zug wird jetzt noch stärker,“ München, 2019.

Angestrebt wird nach Aussage des Brennstoffzellenanbieters Ballard, die notwendige Überarbeitung der Brennstoffzellenmembran erst nach circa 30.000 h⁴⁰ (~40.000 h Betriebsstunden des Zuges), durchzuführen, dies entspricht 7 - 9 Jahren.

Fahrzeugbeispiel Stadler Schmalspurfahrzeug



Abb. 3-27 Beispiel Stadler H2-Triebzug Zillertalbahn, Österreich, Rendering⁴¹

Der Fahrzeugtyp wird als Schmalspurfahrzeug für die Zillertalbahn in Österreich entwickelt. Er soll als vierteiliger Gliedertriebzug ausgeführt werden und noch im Jahr 2020 für erste Testfahrten verfügbar sein. Geplante Betriebsaufnahme ist 2022.

Das Fahrzeug soll über vier Brennstoffzellen mit jeweils ca. 100 kW Leistung sowie über zwei Energiespeicher verfügen. Die Energiespeicher bestehen jeweils aus einer hybriden Struktur (Batterie plus Kondensator) mit ca. 80 bis 100 kWh Energieinhalt. Die Druckbehälter sollen ca. 150 kg netto Wasserstoff mitführen können, sodass einmaliges Tanken pro Tag für den Fahrzeugumlauf ausreichend ist⁴².

Das Fahrzeug ist für einen Einsatz im normalspurigen Eisenbahnnetz nicht geeignet, die Wasserstofftechnologie kann jedoch übertragen werden.

Zusammenfassung

Wasserstoff-/Batterie-Hybridfahrzeuge sind technisch Elektrotriebwagen, die ohne Fahrleitung verkehren können. Die Energieversorgung erfolgt auf diesen Strecken, ähnlich wie bei Dieseltriebwagen durch Umwandlung eines chemischen Energieträgers in elektrische Energie. Im betrachteten Fall handelt es sich um Wasserstoff, ein Gas welches auf mehrere Arten hergestellt werden kann.

CO₂-neutral ist dies aktuell nur durch Elektrolyse von reinem Wasser unter Verwendung elektrischer Energie möglich. Dies kann durch Sektorenkopplung

⁴⁰ O. Uluc, „Wasserstoff als Energieträger, Ballard Power Systems,“ in DMG Seminar E1, Berlin, 2018.

⁴¹ https://www.meinbezirk.at/tirol/c-lokales/infoveranstaltung-bzgl-zillertalbahn_a3182976

⁴² H. Schreiner, „Strategische Überlegungen der Zillertalbahn zum Einsatz von Wasserstoff als Energieträger,“ in DMG Seminar E1, Berlin, 2018.

mit erneuerbaren Energien gut umgesetzt werden. Eine Erzeugung mittels Elektrolyse mit dem aktuellen deutschen Strommix ist jedoch CO₂-intensiver als der Dieselantrieb. Aufgrund der geringen Dichte von Wasserstoff muss dieser zunächst verdichtet und in dieser Form gelagert werden. Auch die Betankung des Fahrzeugs findet unter Hochdruck statt. Die anschließend in der Brennstoffzelle erzeugte Elektroenergie kann dann für die Versorgung des Fahrzeugs verwendet werden. Eine große Batterie zur Zwischenspeicherung ist immer notwendig, um die aus der Traktionsanforderung resultierende Dynamik der Leistungsanforderung nicht direkt an die Brennstoffzelle weiterzugeben. Aufgrund der zweistufigen Wandlung der elektrischen Energie im Erzeugungsprozess und im Fahrzeug und der damit verbundenen Verluste ist eine Betrachtung der Energieerzeugung in diesem Fall besonders ausschlaggebend (vgl. Abb. 3-28).

3.4 CO₂-Emissionsvergleich

Ein direkter Vergleich aller Technologien ist aufgrund der hohen Infrastrukturabhängigkeit nur streckenspezifisch umsetzbar und valide. Dennoch soll zur Erhellung der aktuellen Debatte zur Klimaerwärmung eine Betrachtung der Emissionen des klimawirksamen CO₂ Gases als vergleichende Größe durchgeführt werden, um so eine valide Vergleichsbasis der einzelnen Technologien zu schaffen. Mittels dieser kann ein „Einsparpotenzial“ abgeschätzt werden.

Aufgrund des komplexen Prozesses der Energiebereitstellung und der breiten Spannweite an Bereitstellungsmöglichkeiten ist bei einigen Technologien eine aufgeschlüsselte Betrachtung nach diesen Technologien notwendig. Diese zeigt die starke Abhängigkeit der CO₂-Emissionen von der Energieerzeugung. Dies wird insbesondere beim Oberleitungs-/Batterie-Hybrid deutlich, welcher technologisch bedingt lokal CO₂-neutral ist, jedoch ggf. am Erzeugungsort der elektrischen Energie vor allem bei Umwandlung von Braunkohle umfangreiche CO₂ emittiert. Abb. 3-28 zeigt den Verlauf der CO₂ Emissionen für eine beispielhafte Strecke von 100 km Länge über einem Betrachtungsverlauf von 25 Jahren für die verschiedenen alternativen Antriebstechnologien.

Die Basis der CO₂-Emissionsberechnung stellt ein Werkzeug zur Berechnung linienspezifischen CO₂-Emissionen der Professur für Elektrische Bahnen dar. Die Anwendung auf die untersuchten Linien kann gesondert beauftragt werden.



Technologiespezifische CO₂-Emissionen im Betrachtungszeitraum 25 Jahre

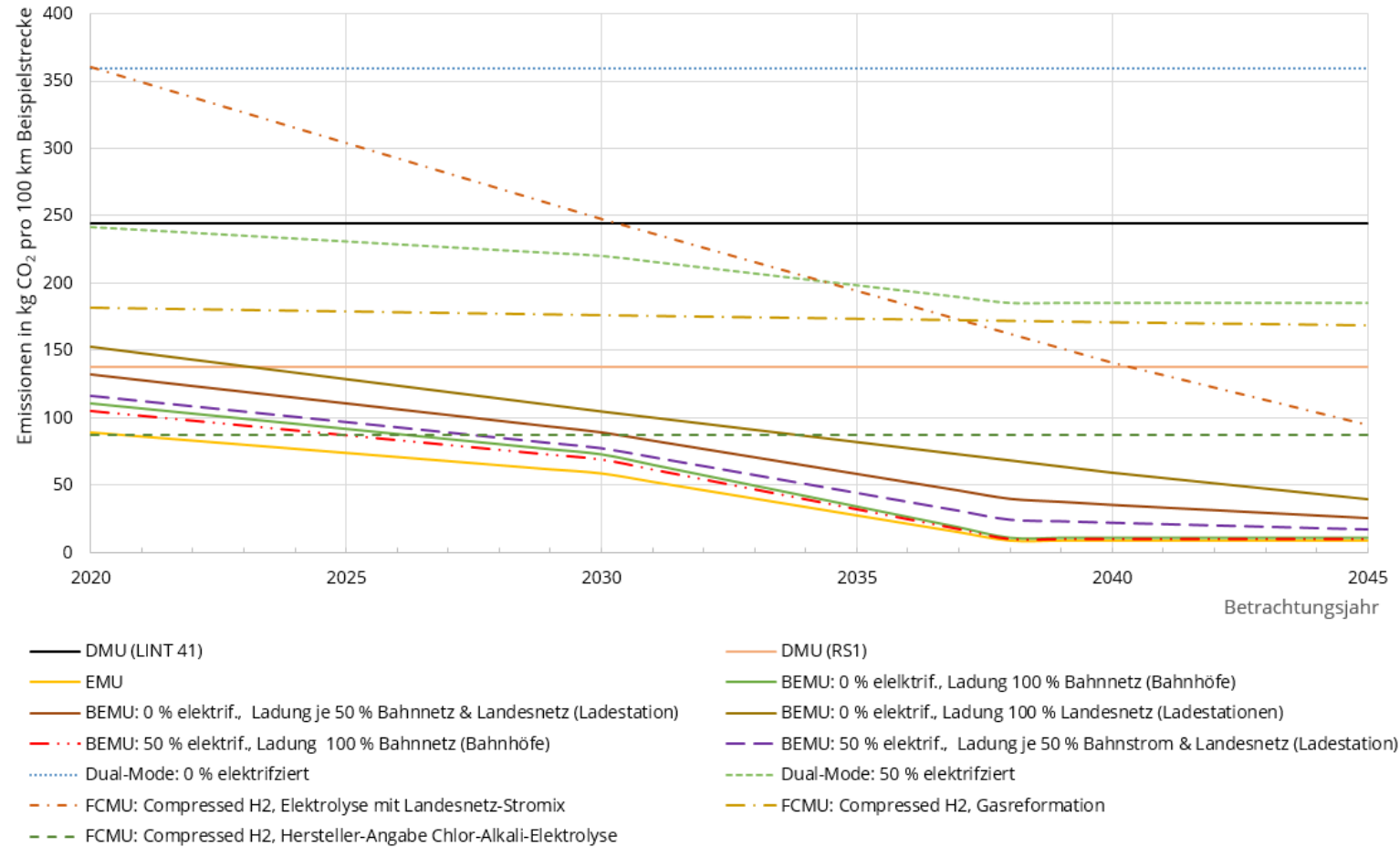


Abb. 3-28: Technologiespezifische CO₂-Emissionen im Betrachtungszeitraum 25 Jahre

Die Berechnungen erfolgten mit den für die Wirtschaftlichkeitsberechnung angenommen Fahrzeugen. Für die korrekte Interpretation der Abbildung sind folgende Hinweise zu beachten:

- **DMU (Dieseltriebwagen):** Die CO₂ Emissionen und die Menge des verbrannten Kraftstoffs sind aus chemischen Gründen proportional und bei gleichbleibender Fahrzeugkonfiguration (Effizienz, Masse, Energiebedarf, etc.) über den Zeitraum konstant.
- **EMU (Elektrotriebwagen):** Da elektrische Triebwagen die Energie aus der Oberleitung beziehen, werden die CO₂ Emissionen der Bahnenergieerzeugung über dem Betrachtungszeitraum für die Berechnung angesetzt. Diese werden nach dem Klimaschutzplan der zum Deutsche Bahn Konzern gehörenden DB Energie ab 2038 klimaneutral sein. Dies fällt mit dem geplanten Kohleausstieg zusammen. Bereits bis 2030 soll eine achtzigprozentige Klimaneutralität erreicht sein⁴³. Der Bahnstrommix ist in seinen CO₂-Emissionen heute schon CO₂-ärmer als die Landesenergieversorgung. Wird ein Augenmerk auf den Strommix in Mecklenburg-Vorpommern gelegt (in diesem Bundesland wird der Bahnstrom überwiegend dezentral durch Umformer und Umrichter in die Oberleitung eingespeist), wäre der CO₂-Emissionsfaktor sogar noch besser.
- **BEMU (Oberleitungs-/Batterie-Hybrid):** Analog zum EMU bezieht der Oberleitungs-Batterie-Hybrid seine Energie aus dem Fahrleitungsnetz. Je nach örtlicher Gegebenheit wird dies entweder durch das Netz der Bahnenergieversorgung oder der öffentlichen Energieversorgung gespeist. Diese sind mit unterschiedlichen Entwicklungen zur CO₂-Emission in den nächsten 25 Jahren belegt. Bei einer Aufteilung auf beide Energieversorgungen erfolgt die Berechnung der CO₂ Emission jeweils anteilig. Ein höherer Elektrifizierungsanteil sorgt grundsätzlich für einen geringeren Energiebedarf auf diesen Abschnitten (und somit auch in Summe), da die Wirkungsgrad-Verluste des Energiespeichers durch Laden und wieder Entladen entfallen.
Für den Oberleitungsanteil der Fahrt wird der bei den EMU-Fahrzeugen beschriebene Klimaschutzplan der DB Energie für die Prognose der zu erwartenden CO₂-Emissionen angesetzt. Für die Nachladung an Ladestationen wird das Klimaschuttszenario des Ökoinstituts bzw. der Fraunhofer-Gesellschaft ISI⁴⁴ angesetzt. Dieses sieht eine Reduzierung der CO₂-Emissionen um 80 % im Vergleich zu 1990 vor und wird als besonders passend zu den aktuellen Ausbau- und Ausstiegsszenarien eingeschätzt.

⁴³ https://www.deutschebahn.com/resource/blob/267812/66cba64017fc242d66a71ebb64d2f1e1/themendienst_klimaschutzziel-data.pdf, abgerufen im Juni 2020.

⁴⁴ <https://www.oeko.de/oekodoc/2451/2015-608-de.pdf>, Berlin 2015.

- **Dual-Mode: Dual-Mode Fahrzeuge** fahren als DMU auf nicht-elektrifizierten Strecken und als EMU unter der Oberleitung. Die höhere Masse sorgt auf beiden Abschnitten für einen höheren Energiebedarf gegenüber den artreinen Fahrzeugen. Der jeweilige Emissionsfaktor wird für Oberleitungsfahrt entsprechend eines Oberleitungsfahrzeugs und für eine Fahrt im Dieselbetrieb entsprechend eines DMU angenommen.
- **FCMU (Wasserstoff-/Batterie-Hybrid):** Der Wasserstoff-/Batterie-Hybrid erzeugt per se keine CO₂ Emissionen am Ort des Transports, ist also lokal emissionsfrei. Die Menge des emittierten CO₂ wird daher grundsätzlich über die Erzeugung des Wasserstoffs bemessen. Hierfür gibt es unterschiedliche Varianten, die in der Grafik entsprechend berücksichtigt werden. Hierbei wird insbesondere mit der Gasreformation, bei der aus Erdgas Wasserstoff gewonnen wird, eine hohe CO₂-Emission bewirkt. Aktuell ist jedoch die Erzeugung aus dem deutschen Strommix (d. h. inklusive aller Kohlestromanteile) noch Emissionsintensiver. Die Erzeugung aus elektrischem Strom hat jedoch den Vorteil, dass dieser kurzfristig auf den Bezug von erneuerbaren Energiequellen umgestellt werden kann und somit eine CO₂-Neutralität erreicht werden kann. Hierzu bietet sich eine Sektorenkopplung mit der Windenergieerzeugung an (siehe Abschnitt 6.6.2).
Die Herstellerangabe einer Chlor-Alkali-Elektrolyse bezieht sich auf einen üblichen Herstellungsprozess in der chemischen Industrie, meist zur Herstellung von Chlor. Wasserstoff fällt dabei als Nebenprodukt an, so dass diesem ein geringer CO₂-Emissionsfaktor (entsprechend des wirtschaftlichen Wertes) zugewiesen wird.

4 Fördermöglichkeiten

4.1 Ziel und Vorgehen

Zum aktuellen Zeitpunkt ist die Förderung immer noch an die Technologieentwicklung gekoppelt. Alternative Antriebe sind oft erst noch wenig erprobt und es gibt keine umfangreiche Betriebserfahrung. Betreiber alternativer Antriebe wirken in Teilen noch an der Entstehung der Systeme mit und die Förderung kann die Aufwände für den Erfahrungsaufbau und die Weiterentwicklung kompensieren.

Um die Mehrkosten alternativer Antriebsverfahren zumindest teilweise auffangen zu können, wurde national und international nach Fördermöglichkeiten gesucht. Ziel ist eine Übersicht aktueller und aktuell in Entwicklung befindlicher Förderinstrumente inkl. Förderbedingungen.

Hierzu wurden die Fördermöglichkeiten in den Bereichen Regionalförderung, Umwelt- und Nachhaltigkeit, Wirtschaftsentwicklung etc., bei Verbänden (VDV Verband Deutscher Verkehrsunternehmen, VDB Verband der Bahnindustrie in Deutschland), Fördermittel-/Projekträger (z. B. DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, TÜV Rheinland, NOW Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, ggf. Wirtschaftsministerium Mecklenburg-Vorpommern, Europäische Institutionen, z. B. EWSA Europäischer Wirtschafts- und Sozialausschuss, AdR Europäischer Ausschuss der Regionen, Landesvertretung Mecklenburg-Vorpommern beim Bund und in Europa, Landesbanken und KfW Kreditanstalt für Wiederaufbau) abgefragt. Die vollständige Liste der angesprochenen potenziellen Fördermittelgeber findet sich in Kapitel 4.3.

In einem ersten Schritt wurden in einer Internetrecherche in Frage kommende Organisationen, soweit nicht schon bekannt, recherchiert und die konkreten Adressaten ermittelt.

Jeder ermittelte Fördermittelgeber wurde per E-Mail und daraufhin telefonisch angesprochen, bei fehlender Reaktion wurde innerhalb einer Woche die Kontaktaufnahme einmalig wiederholt. Hierzu wurde eine E-Mail mit der Bitte um Auskunft verfasst, die an jeden potenziellen Fördermittelgeber verschickt wurde. Bei aussichtsreicher Antwort wurden bei diesen Organisationen Fördermotivation, Förderrichtung, Förderbedingungen telefonisch und ggf. per E-Mail abgefragt.

4.2 Zusammenfassung des Befragungsablaufes

Insgesamt wurden 30 Kontakte bei 22 Organisationen angeschrieben bzw. angesprochen. Diese Organisationen wurden gebeten, bis 17. April 2020 zu antworten. Einige Organisationen wurden erst später bekannt und angeschrieben,

so dass sie gebeten wurden, bis 22. April 2020 zu antworten. Fünf Organisationen, von denen keine Rückmeldung eingegangen war, wurden am 22. April 2020 erneut um eine Antwort gebeten. Mit Stand vom 20. Mai 2020, dem Ende der Befragungsaktion, lagen von 18 Organisationen Antworten vor.

Die Organisationen, die interessante Zusatzinformationen in ihren Antworten in Aussicht gestellt hatten, wurden detailliert telefonisch befragt. Das waren NOW, BAG SPNV, mofair e. V., KfW sowie das BMVI. Alle Organisationen mit potenziell passenden Fördermöglichkeiten sind in Kapitel 4.4 mit den wesentlichen Angaben zur Förderung beschrieben.

4.3 Übersicht der kontaktierten Organisationen und deren Antworten

Die folgende Tabelle enthält alle kontaktierten Organisationen und in Kurzform deren Antworten. Für die im Rahmen der Befragung ermittelten Fördermittelgeber finden sich die Details in Kapitel 4.4.

Tabelle 1: Übersicht der kontaktierten Organisationen

Nr.	Kontaktierte Fördermittelgeber	Antwort
1	Förderinfo Bundesregierung	Verweist auf geplante Förderrichtlinie des BMVI
2	VDV	Keine Rückmeldung
3	Bundesanstalt für Verwaltungsdienstleistungen (BAV)	Es wird entsprechend der Richtlinie über die Förderung der Energieeffizienz des elektrischen Eisenbahnverkehrs lediglich die Zusatzinvestition zur Verbesserung der Energieeffizienz der Elektrotraktion gefördert. (siehe Kapitel 4.4.2)
4	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU)/KfW	KfW sieht zwei in Frage kommende Förderprogramme (siehe Kapitel 4.4.2)
5	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Projektträger, Energie und Mobilität	Sieht keine passenden Fördermöglichkeiten beim DLR
6	VDI/VDE Innovation + Technik GmbH	Keine Rückmeldung
7	Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW)	Förderinformationen (siehe Kapitel 4.4.1)
7.1	Bundesförderung Wasserstoff und Brennstoffzelle / Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP)	Förderinformationen (siehe Kapitel 4.4.1)

Nr.	Kontaktierte Fördermittelgeber	Antwort
7.2	Bundesförderung Ladeinfrastruktur (LIS)	Förderinformationen (siehe Kapitel 4.4.1)
8	Projektträger Jülich / Forschungszentrum Jülich GmbH	Vorhaben passt nicht in die Kommunalrichtlinie des Forschungszentrums Jülich
8.1	Nationale Klimaschutzinitiative (BMU)	Vorhaben passt nicht in die Kommunalrichtlinie des Forschungszentrums Jülich
8.2	Elektromobilität (BMVI)	Verweist auf Nr. 7 NOW (siehe Kapitel 4.4.1)
9	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)	Verweist auf Nr. 7 NOW (siehe Kapitel 4.4.1)
10	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI)	Verweist auf geplante Förderrichtlinie des BMVI
11	Bundesarbeitsgemeinschaft der Aufgabenträger des SPNV e.V. (BAG SPNV)	Verweist auf geplante Förderrichtlinie des BMVI
12	Interessensverband mofair e. V.	Verweist auf geplante Förderrichtlinie des BMVI, Neu: Allianz pro Schiene und die Fahrzeughersteller
13	EU-Generaldirektion Mobilität und Verkehr	Keine Rückmeldung
14	Kommissionsvertretung der EU in Deutschland	Keine Rückmeldung
15	EU-Verbindungsbüro der KfW	Verweis auf geplante Förderrichtlinie des BMVI
16	Europäische Investitionsbank (EFSI-Europäischer Fonds für strategische Investitionen) → Per Kontaktformular angeschrieben	Fördert die europäische Integration und den sozialen Zusammenhalt Verwaltung durch die einzelnen Bundesländer
17	Europäischer Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) → Per Kontaktformular angeschrieben	Fragliche Förderprogramme, Horizont nur bis 2020 und Förderung KMU Verwaltung durch die einzelnen Bundesländer
18	Europäischer Sozialfonds (ESF) → Per Kontaktformular angeschrieben	Fragliche Förderprogramme, Horizont nur bis 2020 und Förderung KMU Verwaltung durch die einzelnen Bundesländer

4.4 Ermittelte Fördermittelgeber

Als Ergebnis der Befragung konnten die folgenden Fördermittelgeber mit passenden Programmen für die Förderung alternativer Antriebe für Fahrzeuge und Infrastruktur im ÖPNV ermittelt werden.

Ergänzt werden die Ergebnisse um die Fördermittel aus dem Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetz (GVFG) und die Förderung des Landes Mecklenburg Vorpommern.

4.4.1 Die Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW)

Die Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW GmbH) mit ihren Unterabteilungen NIP und LIS vertritt die Bundesförderung sowohl für Fahrzeuge als auch Infrastruktur im Zusammenhang mit Ausschreibungen des ÖPNV mit alternativen Antrieben und zwar unabhängig von Elektromobilität, Wasserstoff und Brennstoffzelle, jedoch keine Streckenelektrifizierung.

Das BMVI verfolgt eine technologieoffene Förderung und hat in den vergangenen Jahren mehrere Entwicklungsprojekte für alternative Antriebe bei Triebwagen aus den einschlägigen Förderrichtlinien für die Elektromobilität mit Batterie- bzw. Wasserstoff-/Brennstoffzellentechnologie gefördert. Dies umfasst wasserstoffbetriebene Brennstoffzellenfahrzeuge, Batterie-/Oberleitungs-Hybride und Diesel-/Batterie-Hybride. Zudem unterstützt das BMVI die Beschaffung dieser Fahrzeuge.

Mit dem Bundeshaushalt 2019 wurde eigens ein neuer technologieoffener Titel „Zuschüsse zur Förderung alternativer Antriebe im Schienenverkehr“ verankert. Das BMVI entwickelt zurzeit eine dem Haushaltstitel entsprechende Förderrichtlinie für Schienenfahrzeuge mit alternativen Antrieben (Batterie, Wasserstoff und Brennstoffzellen).

Eine Förderrichtlinie des Bundes sollte bereits zum Jahresende 2019 vorliegen. Sie wird gegen Ende des ersten Halbjahres 2020 erwartet, aber der genaue Fertigstellungstermin ist bisher unbekannt.

Die Förderung wird kumulativ zu etwaigen weiteren Förderungen gewährt.

Die genauen Förderbedingungen und das Fördervolumen sind derzeit noch in intensiven Verhandlungen, so dass keine genauen Aussagen möglich sind. Insbesondere auch die Frage, wer genau der Zuwendungsempfänger wäre, muss geklärt werden (Betreibermodell).

Bisher wurden durch die NOW Busse und PKW gefördert, eine Studie zum SPNV liegt jedoch vor.



Eine konkrete Förderung kann nur erfolgen, wenn zum Zeitpunkt der Ausschreibung eine verabschiedete Förderrichtlinie vorliegt.

Weitere Auskünfte sind zu erhalten unter:

Oliver Hoch, Programm Manager Elektromobilität, Fasanenstr. 5, 10623 Berlin
Telefon: +49 30 311 61 16 – 38, Mobil: +49 152 042 19 007
E-Mail: oliver.hoch@now-gmbh.de

bzw.

Elena Hof, Programm Managerin Wasserstoff und Brennstoffzelle,
Fasanenstr. 5, 10623 Berlin, Telefon: +49 30 311 61 16 - 39,
Mobil: +49 173 23 20 906, E-Mail: elena.hof@now-gmbh.de

4.4.2 Die KfW Bankengruppe

Die KfW Bankengruppe hat für Investitionen in alternative Antriebstechnologien im Schienenpersonennahverkehr (Fahrzeuge und Infrastruktur) je nach Antragstellerkreis zwei Kreditprodukte im Programm. Beide Förderprodukte sind allgemeine Investitionskredite ohne spezielle Anforderungen an die Vorhaben nicht nur mit Bezug auf den öffentlichen Verkehr mit deren Fahrzeugen und Infrastruktur.

Auskünfte zu den beiden im Folgenden erläuterten Förderprodukten erteilt das Infocenter der KfW Bankengruppe (Ansprechpartner: Marion Hofmann und Stephan Schmitz), Ludwig-Erhard-Platz 1 - 3, 53179 Bonn, Servicrufnummer: 0800 539 9008, Fax: 0228 831-9500 sowie im Internet: www.kfw.de bzw. per E-Mail: infocenter@kfw.de.

4.4.2.1 Investitionskredit Kommunen

Investitionen kommunaler Gebietskörperschaften in die kommunale Infrastruktur werden in dem Produkt 208 "IKK - Investitionskredit Kommunen" (208) gefördert.

Mögliche Fördermittelempfänger sind hier kommunale Gebietskörperschaften, rechtlich unselbständige Eigenbetriebe von kommunalen Gebietskörperschaften, Gemeindeverbände und Zweckverbände, die wie kommunale Gebietskörperschaften behandelt werden können (Riskogewicht Null).

Gefördert werden Investitionen sowie Investitionsfördermaßnahmen im Rahmen des Vermögenshaushaltes/-planes des aktuellen Haushaltsjahres inklusive Haushaltsreste des Vorjahres in die kommunale und soziale Infrastruktur.



Die Kombination mit öffentlichen Fördermitteln ist zulässig, sofern die Summe aus Krediten, Zuschüssen und Zulagen die Summe der Aufwendungen nicht übersteigt.

Der Kredithöchstbetrag in diesem Förderprogramm beträgt 150 Millionen Euro pro Jahr pro Antragsteller.

Der Finanzierungsanteil beträgt bei Krediten über 2 Millionen Euro maximal 50 % der förderfähigen Investitionskosten pro Vorhaben. Bei Krediten bis 2 Millionen Euro kann der Finanzierungsanteil bis zu 100 % der förderfähigen Investitionskosten pro Vorhaben betragen.

Es stehen Laufzeitvarianten von bis zu 10, 20 oder 30 Jahren zur Verfügung, wobei die ersten 1 - 5 Jahre je nach Laufzeit tilgungsfrei sind. Der Programmzinssatz orientiert sich an der Kapitalmarktentwicklung und wird an jedem Bankarbeitstag aktualisiert. Die jeweils geltenden Zinssätze können der Homepage der KfW unter kfw.de/208-Zinsen entnommen werden.

Die Kredite werden mit dem Antragsformular, Formularnummer 600 000 0166, direkt bei der KfW in Berlin beantragt: KfW Niederlassung Berlin, 10865 Berlin.

4.4.2.2 Investitionskredit Kommunale und Soziale Unternehmen

Investitionen von Unternehmen mit mehrheitlich kommunalem Gesellschafterhintergrund (z. B. kommunale ÖPNV-Unternehmen) in die kommunale Infrastruktur werden in dem Produkt 148 "IKU - Investitionskredit Kommunale und Soziale Unternehmen" gefördert.

Mögliche Fördermittelempfänger sind hier Unternehmen mit mindestens 50-prozentigem kommunalen Gesellschafterhintergrund, gemeinnützige Organisationen, Körperschaften des öffentlichen Rechts, Unternehmen unabhängig von Rechtsform und Beteiligungsverhältnissen sowie natürliche Personen im Rahmen von Investor-Betreiber-Modellen (öffentlich-private Partnerschaften, Contracting, sonstige Investor-Betreiber-Modelle).

Es können grundsätzlich alle Investitionen in die kommunale und soziale Infrastruktur in Deutschland finanziert werden. Dazu gehören beispielsweise Investitionen in die Verkehrsinfrastruktur inklusive öffentlichen Personennahverkehrs und Maßnahmen zur Energieeinsparung und Umstellung auf umweltfreundliche Energieträger. Im Bereich der kommunalen Daseinsvorsorge kann der Erwerb von Beteiligungen, zum Beispiel im Rahmen der Rekommunalisierung, durch Unternehmen mit mehrheitlich kommunalem Hintergrund mitfinanziert werden.

Die Kredite werden vorhabensbezogen vergeben. Bei Großprojekten ist eine Gliederung in räumliche, sachliche und/oder zeitliche Vorhabensabschnitte möglich. Mehrjährige Vorhaben werden in Bauabschnitte gegliedert, die einen

Zeitraum von 12 Monaten nicht unter- und von 36 Monaten nicht überschreiten dürfen. Betriebsmittelfinanzierungen sind ebenfalls möglich.

Zu den Förderausschlüssen gehören beispielsweise reine Kapitalanlagen und reine (Eigen-)Kapitalausstattungen, sofern diese nicht dem Erwerb oder der Übernahme von Beteiligungen/Kommanditanteilen dienen und Leasingfinanzierungen.

Die Kombination eines Kredits und/oder Investitionszuschusses aus dem Programm IKU – Investitionskredit Kommunale und Soziale Unternehmen mit anderen Fördermitteln (Kredite oder Zulagen/Zuschüsse) ist grundsätzlich möglich, sofern die Summe aus Krediten, Zuschüssen und Zulagen die Summe der Aufwendungen nicht übersteigt.

Der Kredithöchstbetrag in diesem Förderprogramm beträgt 50 Millionen Euro pro Vorhaben. Es werden bis zu 100 % der förderfähigen Kosten finanziert.

Es stehen Laufzeitvarianten von bis zu 10, 20 oder 30 Jahren zur Verfügung, wobei die ersten 1 - 5 Jahre je nach Laufzeit tilgungsfrei sind. Der Zinssatz orientiert sich an der Kapitalmarktentwicklung und wird unter Berücksichtigung der wirtschaftlichen Verhältnisse des Kreditnehmers festgelegt. Die jeweils geltenden Konditionen können der Homepage der KfW unter kfw.de/konditionen entnommen werden.

Die KfW gewährt Kredite aus diesem Programm über Finanzierungspartner. Ihren Antrag stellen Sie bei einem Finanzierungspartner Ihrer Wahl vor Beginn des Vorhabens.

4.4.3 Richtlinie über die Förderung der Energieeffizienz des elektrischen Eisenbahnverkehrs (Bundesanstalt für Verwaltungsdienstleistungen [BAV])

Die Bundesanstalt für Verwaltungsdienstleistungen ist mit der Umsetzung der Richtlinie über die Förderung der Energieeffizienz des elektrischen Eisenbahnverkehrs als Bewilligungsbehörde beauftragt.

Im Rahmen der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung (MKS) fördert das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) mit einem Programm die Energieeffizienz auf der Schiene. Die Förderrichtlinie hat die Steigerung der Energieeffizienz durch den Einsatz effizienterer Technologien und Techniken und durch die bessere Ausschöpfung betrieblichen Optimierungspotenzials zum Fördergegenstand.

Mit insgesamt bis zu 500 Millionen Euro werden Eisenbahnverkehrsunternehmen im Sinne des § 2 Absatz 1 und 2 des Allgemeinen Eisenbahngesetzes über fünf Jahre unterstützt, wenn sie Maßnahmen zur Verbesserung ihrer Effizienz beim Traktionsstromverbrauch und festgelegte Effizienzerfolge nachwei-

sen. Die Förderung der Unternehmen ist gekoppelt an jährlich erreichte prozentuale Verbesserungen der Energieeffizienz beim Traktionsstromverbrauch gegenüber dem Vorjahr (bis 2020 um 1,75 %, danach bis 2022 um 2,00 %). Die Förderung erhöht sich, wenn eine Verbesserung von 3,00 % erreicht wird.

Gefördert werden insbesondere Investitionen in energieeffizienteres rollendes Material, Maßnahmen der Automatisierung oder Digitalisierung, zur Verbesserung der Auslastung von Zügen mit Personen/Gütern, zur Vermeidung von Leerfahrten und Verbesserungen in der Bremsenergieerückspeisung.

Es handelt sich also im engeren Sinne um eine Förderung neuer Techniken im Bereich der Elektrotraktion und nicht alternativer Antriebstechnologien. Jedoch werden im Förderkatalog Hybridlösungen und die Anschaffung moderner und effizienterer Fahrzeuge und Fahrzeugtechnik zur Steigerung der Energieeffizienz und zur CO₂-Emission genannt, so dass eine Inanspruchnahme der Fördermittel durchaus möglich erscheint.

Nicht gefördert wird die für die Fahrzeuge notwendige Infrastruktur.

Der Antrag ist über das Förderportal des Bundes „easy-Online“ zu erstellen.

Nähere Auskünfte sind unter Energieeffizienz-Bahn@bav.bund.de zu erhalten.

4.4.4 Investive Schienenpersonennahverkehrsförderrichtlinie – InvestSPNVFöRL M-V - Land Mecklenburg-Vorpommern

Das Land Mecklenburg-Vorpommern gewährt nach Maßgabe des § 8 Absatz 3 des Gesetzes über den öffentlichen Personennahverkehr in Mecklenburg-Vorpommern Zuwendungen für Investitionen zur Verbesserung des Schienenpersonennahverkehrs. Die Richtlinie über die Gewährung von Zuwendungen für Investitionen zur Verbesserung des Schienenpersonennahverkehrs (Investive Schienenpersonennahverkehrsförderrichtlinie) regelt die Zuwendungen.

Gefördert werden Maßnahmen im Zusammenhang mit Vorhaben, die auf die Stärkung der Infrastruktur des SPNV ausgerichtet und zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit oder der Attraktivität des SPNV bestimmt sind.

Dies sind ausschließlich sehr weit gefasste Infrastrukturmaßnahmen z. B. in den Fahrwegausbau, Signalanlagen, Bahnstromversorgung, Werkstätten, P&R-Plätze, Verknüpfungssysteme, Fahrgastinformationssysteme, etc.

Ausgaben für Fahrzeuge sind nach dieser Verwaltungsvorschrift nicht zuwendungsfähig.

Zuwendungsempfänger können Betreiber öffentlicher Eisenbahnen, die einen Verkehrsvertrag mit dem Land Mecklenburg-Vorpommern haben und Eisenbahninfrastrukturunternehmen sein.

Die Zuwendung wird im Rahmen der Projektförderung als Anteilfinanzierung oder in Ausnahmefällen als Vollfinanzierung in Form eines nicht rückzahlbaren Zuschusses gewährt. Der Zuwendungssatz beträgt bei einer Anteilfinanzierung bis zu 75 Prozent der zuwendungsfähigen Ausgaben. Der Höchstbetrag ist individuell im Zuwendungsbescheid zu bestimmen.

Der Antrag muss vor Beginn der Arbeiten bei der zuständigen Behörde in einem formalen Verfahren gestellt werden.

Die genannten Infrastrukturmaßnahmen können gefördert werden, wenn sie im erheblichen Interesse des Landes Mecklenburg-Vorpommern liegen und in den Planungen des Landes Berücksichtigung finden.

Ein Rechtsanspruch auf Gewährung der Zuwendung besteht nicht. Vielmehr entscheidet die Bewilligungsbehörde aufgrund ihres pflichtgemäßen Ermessens im Rahmen der verfügbaren Haushaltsmittel.

4.4.5 Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetz (GVFG)

Das Gemeinde-Verkehrs-Finanzierungs-Gesetz (GVFG) wurde Anfang der 70er-Jahre geschaffen, um mit Geldern aus der Mineralölsteuer den Ausbau der Verkehrs-Infrastruktur (Straßen und ÖPNV) in den Kommunen finanziell zu unterstützen.

Zur Förderung der Landesprogramme für kommunale Straßen und kleinere ÖPNV-Projekte und Fahrzeugförderung, die den Hauptteil des GVFG ausmachten, gab es in der Folge für die Länder die „Entflechtungsmittel“ in Höhe von 1,335 Mrd. €/Jahr bis Ende 2019, ab 2020 dann eine entsprechende Erhöhung des Anteils an der Umsatzsteuer.

Auf Bundesebene blieb nur das GVFG-Bundesprogramm für große ÖPNV-Ausbaumaßnahmen im Schienenbereich (ab 50 Mio. €, also Stadtbahnen, U-Bahnen, S-Bahnen u. ä.), ab 1997 mit einem gleichbleibenden Volumen von rund 330 Mio. € im Jahr. Die Länder haben durchgesetzt, dass das Bundesprogramm auch nach 2019 fortgesetzt wird. Der max. Fördersatz war bisher 60 %. Im Bundesprogramm gibt es keine Landesquoten, sondern eine bundesweite Projektliste, aber mit Zustimmung der jeweiligen Länder zu den Projekten.

Die Neufassung des GVFG 2020

Das Volumen des Bundesprogramms wird in 2020 auf 665 Mio. € verdoppelt, von 2021 bis 2024 weiter auf 1 Mrd. € erhöht, ab 2025 dann auf 2 Mrd. € mit jährlicher Erhöhung um 1,8 %.

Der Förderkatalog wird nun neu gefasst: Förderfähig sind Neu- und Ausbau der Strecken von Straßenbahnen, U-Bahnen, Eisenbahnen u.ä (wie bisher) sowie die Reaktivierung oder Elektrifizierung bzw. Tank-/Ladeinfrastruktur für alterna-

tive Antriebe von Eisenbahnstrecken sowie Maßnahmen zur Kapazitätserhöhung (z. B. Digitalisierung). Für Elektrifizierungsmaßnahmen im Bahnbereich einschließlich Tank- und Ladeinfrastruktur für alternative Antriebe sowie Reaktivierung von Schienenstrecken ist die Förderschwelle schon bei 10 Mio. € erreicht.

Neben elektrischen Güterbahnen bezieht sich der zweite Förderstrang auf Regionalstrecken, die von den Ländern vorgeschlagen werden. Hier ist eine Höchstförderung des Bundes von bis zu 90 % der Investitionssumme nach dem GVFG-Bundesprogramm vorgesehen.

"Nachrangig" und bis 2030 begrenzt können auch Haltestellen, Bahnhöfe und Umsteigeanlagen (nur wenn dort E-Autos geladen werden können) sowie die Grunderneuerung von Schienen-Verkehrswegen gefördert werden. Bei letzterem ist ein Nachweis nötig, dass die Instandhaltung nicht vernachlässigt wurde, dafür ist aber keine neue gesamtwirtschaftliche Bewertung nötig. Bei diesen Maßnahmenarten liegt der Fördersatz bei 50 – 60 %.

Bei der Bewertung der Projekte kann der Bund Klimaschutz und Verkehrswende im Einzelfall künftig höher gewichten, z. B. um teure innerstädtische Projekte zu fördern. Die grundsätzliche Beschränkung auf Ballungsräume ist jedoch aufgehoben, damit sind auch Schienenstrecken in der Fläche und sogar grenzüberschreitende Bahnstrecken förderfähig.

Die max. Fördersätze werden für Neu-/Ausbaumaßnahmen von 60 % auf 75 % erhöht, für Reaktivierungen und Elektrifizierungen sogar auf 90 %. Die Untergrenze der Förderung wird für Neu- und Ausbau von Strecken auf 30 Mio. €, für andere Maßnahmen auf 10 Mio. € gesenkt, wobei auch die Bündelung von Maßnahmen zu einem Projekt möglich ist.

Für Neu- und Ausbauprojekte sind auch Planungskosten förderfähig, für Sanierungen jedoch nicht.

Weiterhin sind neben kommunalen Maßnahmen auch Projekte der DB förderfähig, z. B. S-Bahnen. Explizit werden jetzt auch Großknoten (z. B. Köln) und Deutschland-Takt genannt.

Aber auch in Zukunft ist die Förderfähigkeit von Projekten vom Nachweis der Wirtschaftlichkeit abhängig. Das hierzu existierende „Standardisierte Verfahren“ ist nicht mehr zeitgemäß und wird daher zur Zeit überarbeitet und neu entwickelt.

5 Machbarkeitsfeststellung durch linienbezogene Prüfung - Untersuchungsmethodik

5.1 Randbedingungen

Alle Betrachtungen zur Beurteilung der Investitionsvorhaben in alternative Antriebssysteme unterliegen den spezifischen Randbedingungen des Netzes Westmecklenburg II bzw. der Darßbahn. Dazu gehören die Streckengegebenheiten und der betriebliche Ablauf auf Grundlage der vom Auftraggeber zur Verfügung gestellten Fahrpläne und Bildfahrpläne sowie Angaben zu Linien-durchbindungen bzw. Durchläufen von Fahrzeugen, zu geplanten Angebotserweiterungen und streckenbezogene Angaben.

Zur Bewertung der untersuchten Antriebskonzepte wird die Wirtschaftlichkeit über den gesamten Lebenszyklus herangezogen. Die hierfür genutzte Kapitalwertmethode ist im Abschnitt 5.4.3 beschrieben.

Die zur Ermittlung der Fahrzeug- und Infrastrukturkostenanteile benötigten Einzelkosten werden im Abschnitt 0 ausführlich hergeleitet.

Die sich für die untersuchten Fahrzeug- und Antriebskonzepte ergebenden Kapitalwerte werden in Abschnitt 7.2 berechnet. Hierbei wird unterschieden, ob die Infrastrukturkosten vom Aufgabenträger getragen werden müssen oder durch Dritte finanziert werden.

Die Ergebnisse der Kapitalwertberechnung werden im Abschnitt 7.2 aus wirtschaftlicher Sicht bewertet. Dabei ergibt sich eine Rangfolge der betrachteten Technologien hinsichtlich ihrer Kapitalwerte für jede einzelne Strecke. Das gesamtheitliche Betrachtungsergebnis des Netzes resultiert aus der Summierung der Einzelkapitalwerte pro Strecke.

5.2 Ablauf der Untersuchung

Zur Bestimmung der wirtschaftlich optimalen Technologie in den beiden Teilnetzen wird ein dreistufiges Verfahren angewendet, das in Abb. 5-1 dargestellt ist.

Zuerst wird eine Analyse des Netzes durchgeführt, die Aussagen über den aktuell dort stattfindenden Betrieb, vorhandene Infrastruktur, benötigte Fahrzeuganzahlen etc. bereitstellt. Diese Analyse wird für jede einzelne Linie des Netzes durchgeführt und basiert ggf. vorhandenen Bild- und Onlinequellen, Umlauf- und Fahrplänen, Netzplänen, Angaben des Betreibers und weiteren Quellen.

Anschließend wird in der zweiten Stufe des Verfahrens linienspezifisch die jeweils wirtschaftlich optimal einzusetzende Technologie ermittelt. Für die ver-

schiedenen Linien werden dabei je nach Betrachtungszeitraum unterschiedliche Optima erwartet.

Die Ergebnisse der linienspezifischen Untersuchungen werden in der dritten Stufe des Verfahrens zu einer netzweiten Gesamtsumme je Technologie zusammengeführt, die Aussagen über Wirtschaftlichkeit jeder Technologie für das Gesamtnetz ermöglicht.

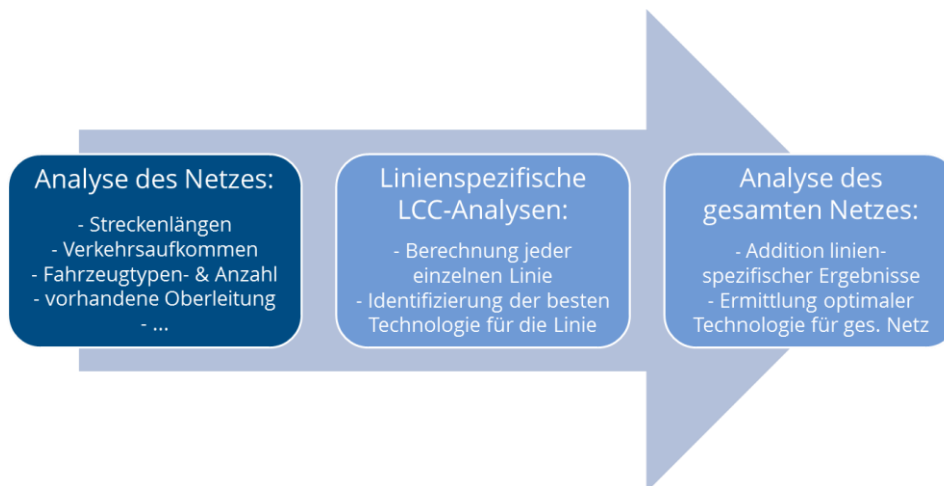


Abb. 5-1 Vorgehensweise zur Bestimmung technologiespezifischer Kapitalwerte

5.3 Definition der Bewertungsszenarien

5.3.1 Linienspezifische Parameter

Die betrachteten Linien im Netz werden hinsichtlich ihrer topologischen und betrieblichen Gegebenheiten bewertet. Zudem fließen die vorhandene Infrastruktur und geplante Infrastrukturmaßnahmen in die Bewertung ein.

Die verschiedenen Linien unterscheiden sich hinsichtlich folgender Kriterien:

- Linienlänge und Topologie
- Elektrifizierungsgrad
- tägliche Einsatzdauer der Fahrzeuge
- Anzahl der Fahrzeuge im Betrieb
- tägliche Fahrzeugkilometer
- Tankfahrten pro Woche
- vorhandene Infrastruktur und geplante Infrastrukturmaßnahmen

Alle betrieblichen Daten, wie **Einsatzdauer und Anzahl der Fahrzeuge** sowie **Fahrzeugkilometer pro Tag** sind abgeleitete Parameter aus den vom Auftraggeber zur Verfügung gestellten Fahrplänen und daraus durch den Auftragnehmer abgeleiteten angenommen Umlaufplänen. Vorteilhaft ist hierbei der über-

wiegende Einsatz von Einfach-Traktionen, die eine Ableitung der Umläufe des einzelnen Fahrzeugs aus den Fahrplänen ermöglichen (Doppel-Traktionen würden im Fahrplan nicht ausgewiesen). Daraus ergibt sich ein linien spezifisches Belastungsprofil. Die Betriebszeit vom fahrplanmäßigen Beginn bis zum fahrplanmäßigen Ende des Umlauftages wurde durch einen in Summe dreißigminütigen Vorbereitungs- und Abschlussdienst (Komponentenbetriebszeit während dieser Dienste) ergänzt und um die Betriebspausenanteile mit einer Länge von mehr als einer Stunde reduziert. Die an Wochenenden veränderten täglichen Fahrzeugkilometer und Betriebszeiten wurden durch eine anteilige Gewichtung berücksichtigt. Die Mittelwerte aus den Fahrzeugkilometern und den Betriebszeiten der Fahrzeuge je Linie bilden die allgemeinen Betriebsdaten ab.

Durch vom Auftraggeber beigestellte Daten, Kontakte zu Herstellern und eigene Daten der Professur für Elektrische Bahnen wurden notwendige **Infrastrukturmaßnahmen zur Nachladung bzw. Betankung** für das gesamte Netz Westmecklenburg II bzw. die Darßbahn ermittelt und für die Untersuchung übernommen. Die Maßnahmen betreffen Oberleitungs- bzw. Wasserstoffbereitstellungsanlagen und werden für die Untersuchung als gegebene Randbedingungen definiert, die je Linie anteilig in die Kostenanalysen einfließen. So setzt sich beispielsweise der **Elektrifizierungsgrad** der einzelnen Linien aus der vorhandenen Elektrifizierung und den zusätzlichen Oberleitungs-/Ladestationsmaßnahmen zusammen.

Die Anzahl der **Tankfahrten** bestimmt maßgeblich die Tankkosten (Personalkosten, anteiliger Verbrauch) für die jeweiligen Fahrzeugsysteme. Die Anzahl hängt von der Linienlänge und der Reichweite der Fahrzeugsysteme ab und wird für jede Linie gesondert bestimmt.

5.3.2 Betrachtungszeiträume und Varianten der Infrastrukturfinanzierung

In Absprache mit dem Auftraggeber waren folgende Szenarien pro betrachteter Strecke zu beurteilen:

- Betrachtung für **15 Jahre**
- Betrachtung für **35 Jahre**

In beiden Fällen werden die Betrachtungen sowohl **inklusive** als auch **exklusive** der Infrastrukturkosten durchgeführt, sodass sich insgesamt vier Hauptvarianten ergeben.

Die Betrachtungsdauer von 15 Jahren spiegelt eine übliche Verkehrsvertragsdauer, von 35 Jahren die allgemeine Lebensdauer eines Schienenfahrzeugs wieder. Für beide Betrachtungszeiträume finden die Infrastrukturkosten explizit Berücksichtigung, um über die fahrzeugspezifischen Kosten hinaus das vollständige System in einer volkswirtschaftlichen Gesamtkostenanalyse zu bewerten. Die Betrachtung ohne Infrastrukturkosten hingegen beschreibt jeweils ein

Szenario, bei dem systemspezifische Infrastrukturmaßnahmen durch den Infrastrukturbetreiber, Dritte oder durch Förderungen bereitgestellt werden. Bei den auf Ladeinfrastruktur angewiesenen Technologien wird so die Investition für diese Betrachtungsvariante als bereits erfolgt angesetzt. Für den Wasserstoff-/Batterie-Hybrid gilt die Besonderheit, dass im für die Studie angesetzten Wasserstoffpreis von 5 €/kg zwar die Transportkosten zur gleisnahen Tankstelle, nicht jedoch die Infrastrukturinvestitionen enthalten sind und getrennt angesetzt werden. Wird eine Betrachtung exklusive Infrastruktur durchgeführt, wird die Tankinfrastruktur ebenfalls als durch Dritte finanziert angenommen. Die Tankinfrastruktur wird dann als Teil der durch den Infrastrukturbetreiber bereitgestellten Lieferkette nur genutzt, ähnlich einer Dieseltankstelle.

5.4 Lebenszykluskosten-Berechnungen (Life Cycle Costing LCC)

5.4.1 Zielsetzung der LCC-Analyse

Die Investitionsrechnung dient generell der Vorbereitung von Investitionsentscheidungen, nimmt jedoch selbst keine quantifizierbare Entscheidung vorweg. Die nachstehende Untersuchung hat das Ziel der Feststellung einer relativen Vorteilhaftigkeit sich ausschließender Investitionsvorhaben unter bestimmten Voraussetzungen. Voraussetzung der relativen ist die absolute Vorteilhaftigkeit.⁴⁵ Die absolute Vorteilhaftigkeit im Sinne dieser Studie bedeutet, dass jede Entscheidungsvariante für alternative Antriebssysteme durch die politische Entscheidung hin zu emissionsarmen Antrieben grundsätzlich vorteilhaft ist.

Zur Bewertung der Vorteilhaftigkeit kommt das Modell der dynamischen Investitionsrechnung zum Einsatz. Aufgrund der Berücksichtigung des Zinseszinses und der Teuerungsrate bei zeitlich unterschiedlichem Anfall von Ein- bzw. Auszahlungen in einer langen Betrachtungsdauer können aussagekräftige Ergebnisse zur Wirtschaftlichkeit einer Investition vorgenommen werden. Die Kapitalwertmethode stellt entsprechend empirischer Studien ein hierbei häufig verwendetes Berechnungsverfahren innerhalb der Investitionsrechnung dar.⁴⁵⁴⁶

Die sich ausschließenden Investitionsvorhaben im Sinne dieser Untersuchung bestehen aus den verschiedenen Technologieoptionen, beschrieben im Marktüberblick. Für diese wird eine relative Vorteilhaftigkeit ermittelt, indem für jede Technologie ein Kapitalwert für den gesamten Lebenszyklus bestimmt wird. Dieser umfasst alle **Kosten, die im Lebenszyklus anfallen**, sodass der **geringste Kapitalwert** in dieser Untersuchung der **relativ vorteilhafteste** ist.

⁴⁵ Blohm, H., Lüder, K., Schaefer, C.: Investition. Schwachstellenanalyse des Investitionsbereichs und Investitionsrechnung, Verlag Franz Vahlen, München 2012.

⁴⁶ Grae, J., Däumler, K.-D.: Grundlagen der Investitions- und Wirtschaftlichkeitsrechnung, Neue Wirtschafts-Briefe GmbH&Co.KG, Ettenheim 2007.

5.4.2 Normen- und Vorschriftenlage

Derzeit gibt es unterschiedliche Normen und Vorschriften zur Anwendung einer Lebenszykluskostenanalyse, jedoch gibt es nach ⁴⁵ keinen standardisierten Ablauf, der normativ einheitlich gültig ist. Für die durchzuführende Untersuchung wurden daher in Abschnitt 5 Rahmenbedingungen definiert, die für die Lebenszykluskostenanalyse unterschiedlicher Antriebssysteme unter Berücksichtigung der zugehörigen Infrastruktur angewendet werden. Die einzelnen Arbeitsschritte orientieren sich an den nachfolgend aufgeführten Normen:

- DIN EN 60300-3-3:2005 Zuverlässigkeitsmanagement Teil 3-3: Anwendungsleitfaden Lebenszykluskosten
- VDI Richtlinie 6025:2012 Betriebswirtschaftliche Berechnungen für Investitionsgüter und Anlagen
- VDMA Einheitsblatt 34160:2006-06 Prognosemodell für die Lebenszykluskosten von Maschinen und Anlagen (inkl. VDMA 34160 Berichtigung 1:2007-03)
- VDI Richtlinie 2884:2005-12 Beschaffung, Betrieb und Instandhaltung von Produktionsmitteln unter Anwendung von LCC Life-Cycle-Costing
- VDI Richtlinie 2693:1996 Blatt 1 Investitionsrechnung bei Materialflussplanungen mit Hilfe statischer und dynamischer Rechenverfahren

In allen Normen werden die auftretenden Gesamtkosten in unterschiedliche Phasen unterteilt, die sich vereinfacht in Beschaffungskosten, Betriebs- und Instandhaltungskosten sowie Entsorgungskosten zusammenfassen lassen. Neben der Möglichkeit zur Identifikation von Kostentreibern auf die Dauer des Lebenszykluses mit Hilfe einer Sensitivitätsanalyse wird übereinstimmend die finanzmathematische Berechnung nach dem **dynamischen Investitionsberechnungsverfahren** genannt. Das auch **Kapitalwertmethode** genannte Verfahren wird als Grundprinzip für alle Methoden der Investitionsbeurteilung vorgestellt und besitzt gemäß ⁴⁷ ⁴⁸ ⁴⁹ u.a. folgende Charakteristika:

- Bezug der Zahlungen auf den Beginn (Jahr 0) des Betrachtungszeitraumes (sogenannter Barwert bzw. Gegenwartswert)
 - durch Abzinsung (Diskontierung), wenn die Zahlung zeitlich nach dem Beginn des Betrachtungszeitraumes erfolgt,
 - durch Aufzinsung (Askontierung), wenn die Zahlung zeitlich vor dem Beginn des Betrachtungszeitraumes erfolgt.

⁴⁷ Blohm, H., Lüder, K., Schaefer, C.: Investition. Schwachstellenanalyse des Investitionsbereichs und Investitionsrechnung, Verlag Franz Vahlen, München 2012.

⁴⁸ Grae, J., Däumler, K.-D.: Grundlagen der Investitions- und Wirtschaftlichkeitsrechnung, Neue Wirtschafts-Briefe GmbH&Co.KG, Ettenheim 2007.

⁴⁹ Götze, U.: Investitionsrechnung. Modell und Analysen zur Beurteilung von Investitionsvorhaben, Springer Verlag, Berlin 2008.

- Anfall der laufenden Ein- und Auszahlungen zum Ende der jeweiligen Periode (z.B. eines Jahres)
- wahlweise: Anfall der Anschaffungsauszahlung zeitlich vor dem Beginn des Betrachtungszeitraumes ODER Anfall der Anschaffungsauszahlung zu Beginn der ersten Periode (Jahr 0)
- Einheitlicher Kalkulationszins i
- Existenz des sogenannten vollkommenen Kapitalmarktes
- „die für Investitionszwecke zur Verfügung stehenden finanziellen Mittel sind nicht beschränkt – zum (einheitlichen und vom einzelnen Investor nicht beeinflussbaren) Kapitalmarktzinssatz können jederzeit Mittel aufgenommen werden, und – es können unbeschränkt Finanzinvestitionen zum [...] Kapitalmarktzinssatz getätigt werden“⁵⁰
- Berücksichtigung der Differenzinvestition, wenn verschiedene sich ausschließende Investitionsalternativen unterschiedliche Anschaffungsausgaben sowie Lebensdauern aufweisen
 - Kriterium eines relativen wirtschaftlichen Vorteils,
 - Voraussetzung ist, dass die unterschiedlichen Investitionsalternativen einen absoluten wirtschaftlichen Vorteil nach Ende der Lebenszyklusdauer aufweisen, d.h. es wird angesetzt, dass es bei jeder untersuchten Technologie per se Sinn ergibt, die Investition zu tätigen,
 - Einheitlicher Betrachtungszeitraum,
 - Berücksichtigung von Nachfolgeinvestitionen bei unterschiedlicher Lebensdauer,
 - Berücksichtigung von Liquidationserlösen (Restwert) der noch funktionsfähigen Anlagen.

5.4.3 Lebenszyklusphasen und Berechnungsmethode

Grundsätzlich setzt sich der Lebenszyklus eines Produkts aus sechs Hauptphasen zusammen⁵¹:

- a) Konzept und Definition
- b) Entwurf und Entwicklung
- c) Herstellung
- d) Einbau
- e) Betrieb und Instandhaltung
- f) Entsorgung

⁵⁰ Blohm, H., Lüder, K., Schaefer, C.: Investition. Schwachstellenanalyse des Investitionsbereichs und Investitionsrechnung, Verlag Franz Vahlen, München 2012.

⁵¹ DIN EN 60300-3-3: Zuverlässigkeitsmanagement-Teil 3-3: Anwendungsleitfaden-Lebenszykluskosten, 2014.

In Bezug auf die schwierig zu ermittelten Teilkosten der Hauptphasen a) bis d) werden diese zu **Anschaffungskosten** und die Hauptphase e) zu **Besitzkosten** zusammengefasst. Da es nicht möglich ist plausible Vorhersagen zu treffen, welche Kosten bei neuartigen (bisher teils nur als Konzept existierenden) Antriebskonzepten für die **Entsorgung bzw. Verwertung** anfallen würden, werden diese Kostenteile in der vorliegenden Untersuchung nicht betrachtet.

Übergeordnet entfallen alle Zahlungen und Faktoren, die für jede Investitionsalternative gleich sind bzw. „keine einfach anwendbaren Prüfkriterien zur eindeutigen Feststellung der Notwendigkeit [...] zur Verfügung stehen“.⁵² Somit entfallen unter anderem Betrachtungen von:

- Versicherungszahlungen
- Umsatzsteuerzahlungen
- Einnahmen durch den Betrieb
- Trassenkosten
- Zugpersonalkosten (außer für Tankfahrten)
- Abstellkosten
- Reinigungskosten

Zudem entfällt die Betrachtung von Tilgungszahlungen und Zinsaufwänden aufgrund der Annahme, dass für die Anschaffungszahlungen kein Fremdkapital aufgenommen werden muss.

Zusammenfassend betrachtet die Untersuchung den zeitlichen Verlauf der anfallenden Beschaffungs- und Besitzkosten unterteilt in Fahrzeug- und Infrastrukturkosten unter Berücksichtigung der Restwerte.

5.4.4 Kapitalwertmethode

Wie in Abschnitt 5 erwähnt bildet die Kapitalwertmethode den Kern der LCC-Analyse. Der Kapitalwert ist der Geldvermögenszuwachs „den das Investitionsobjekt zu Beginn des Planungszeitraumes unter Berücksichtigung von Zinsen erbringt“.⁵³

Die Berechnung erfolgt über die Aufsummierung der Anschaffungszahlungen, dem Barwert der Rückflüsse und dem Barwert des Restwertes (vgl. Gl. (5-1) und Gl. (5-2)).

⁵² Blohm, H., Lüder, K., Schaefer, C.: Investition. Schwachstellenanalyse des Investitionsbereichs und Investitionsrechnung, Verlag Franz Vahlen, München 2012.

⁵³ DIN EN 60300-3-3: Zuverlässigkeitsmanagement-Teil 3-3: Anwendungsleitfaden-Lebenszykluskosten, 2014.

$$KW = -AZ_0 + BW_{RF} + BW_{RW} \quad \text{Gl. (5-1)}$$

$$KW = -AZ_0 + \sum_{t=1}^{LD} \left(\frac{EZ_t - AZ_t}{(1 + i/100)^t} \right) + \frac{RW_{LD}}{(1 + i/100)^{LD}} \quad \text{Gl. (5-2)}$$

$$i = \frac{100 \cdot (i_n - r)}{r + 100} \quad \text{Gl. (5-3)}$$

Tabelle 5-1 Parameter für die Kapitalwertberechnung

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
KW	Kapitalwert	€
AZ_0	Anschaffungsauszahlung zum Zeitpunkt $t = 0$ Jahre	€
EZ_t	Einzahlung zum Zeitpunkt t	€
AZ_t	Auszahlung/Kosten zum Zeitpunkt t	€
i	Kalkulationszinssatz	%
i_n	Nominalzins	%
t	Zeitpunkt	a
RW_{LD}	Restwert am Betrachtungsdauerende	€
r	Preissteigerungsrate	%
LD	Betrachtungsdauerende	a
BW_{RF}	Barwert der Rückflüsse	€
BW_{RW}	Barwert des Restwertes	€

Die Anschaffungsauszahlung ist eine zum Bezugszeitpunkt fällige Einmalzahlung und ist als Kostenposition positiv zu betrachten. Der Barwert des Restwertes berechnet sich zum Betrachtungsdauerende. Die Barwerte der Rückflüsse errechnen sich aus der Differenz von Ein- (Erlöse) und Auszahlungen (Kosten). Aufgrund der ausschließlichen Betrachtungen der Auszahlungen bildet der Barwert der Rückflüsse lediglich die abgezinsten Kosten ab. Hinsichtlich dieser Methode und aus Darstellungsgründen werden die Anschaffungs- und Auszahlungen positiv abgetragen. Darüber hinaus wird der Kapitalwert zum Betrachtungszeitraumende um den Barwert des Restwertes vermindert. Die Abb. 5-2 zeigt schematisch die Berechnungsmethode des Kapitalwertes.

Zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit wird das Vorteilhaftigkeitskriterium der LCC-Analyse nach der Kapitalwertmethode herangezogen, welches lautet:

Im Falle einer Differenzinvestition ist diejenige Investitionsalternative mit dem höheren Kapitalwert vorteilhafter gegenüber der anderen Investitionsalternative (*relative Vorteilhaftigkeit*). Aufgrund der hier positiv gewählten Darstellung der eigentlich negativen Auszahlungen ist in der in Abb. 5-2 dargestellten Betrachtung das System mit dem **niedrigeren Kapitalwert das relativ Vorteilhaftere**.

Demnach setzt sich der Kapitalwert hauptsächlich aus den Auszahlungen über die Lebenszyklusdauer zusammen. Infolge der Differenzinvestitionsrechnung kann ausschließlich die relative Vorteilhaftigkeit eines Produktes gegenüber dem zu vergleichenden Produkt ermittelt werden. (vgl. ⁵⁴).

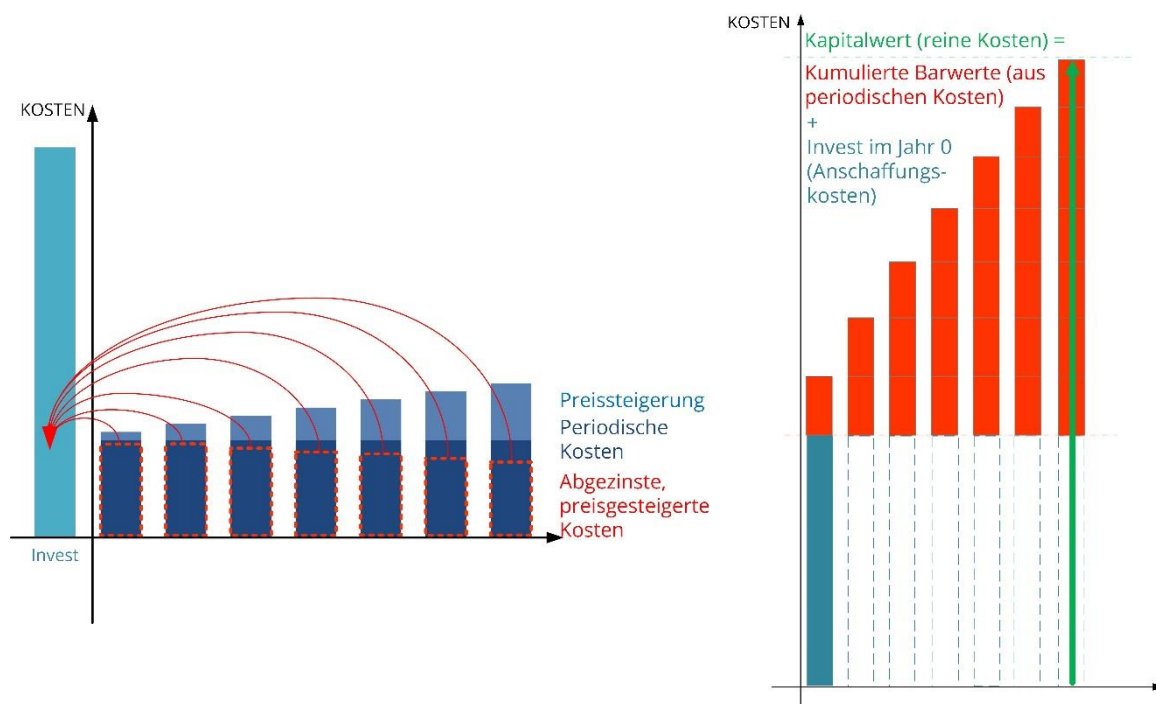


Abb. 5-2 Schematische Darstellung der Kapitalwertberechnung

5.4.5 Restwert eines Investitionsgutes

Aufgrund einer möglichen Benachteiligung investitionsintensiver Antriebssysteme bei kurzen Betrachtungszeiträumen oder verschiedener Lebensdauern ist es wichtig, den Restwert einer Investition dem Berechnungssystem zuzuordnen. Der Restwert setzt sich zum Betrachtungszeitende ausfolgenden Kostenpositionen zusammen:

- Fahrzeugrestwert
- Infrastrukturrestwerte (Tankstellen, Oberleitung, Ladestationen)

⁵⁴ Blohm, H., Lüder, K., Schaefer, C.: Investition. Schwachstellenanalyse des Investitionsbereichs und Investitionsrechnung, Verlag Franz Vahlen, München 2012.

Der Restwert bildet den **betriebswirtschaftlichen** und **nicht den erzielbaren Wert** des Investitionsgutes ab. Davon ausgehend ist er abhängig vom Abschreibungszeitraum der jeweiligen Kostenposition. Der betriebswirtschaftliche Wertverfall wird als eine linear fallende Gerade angenommen, beginnend beim Investitionszeitpunkte in Höhe des Investitionsvolumens und endend beim Erreichen der Abschreibungsdauer. Dem entgegen steht die reale Lebensdauer einer Investition, beispielsweise die Schienenfahrzeuglebensdauer von bis zu 35 Jahren. Zwischen der Reinvestition der jeweiligen Kostenposition erst nach Erreichen der Lebensdauer und dem Erreichen des Abschreibungszeitraumes beträgt der Restwert der Investition buchhalterisch null.

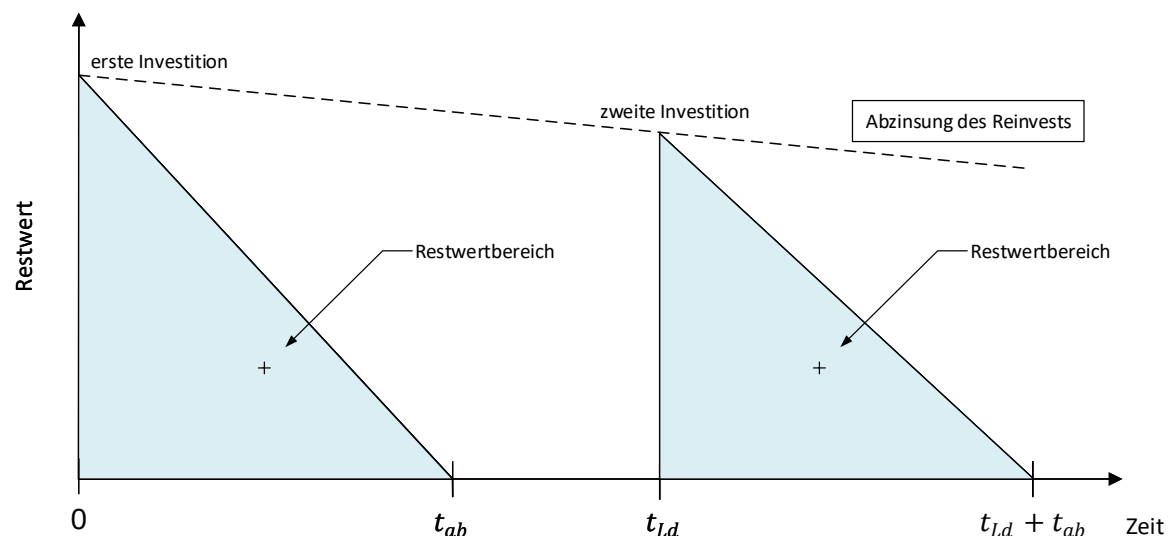


Abb. 5-3 schematische Betrachtung des Restwertverlaufes

Abb. 5-3 zeigt den beschriebenen Verlauf der Restwerte für aufeinanderfolgende Investitionen. Die farbig gekennzeichneten Flächen markieren den Bereich noch vorhandener Restwerte. Die Reinvestition unterliegt der Abzinsung gemäß der Gl. (5-2).

Tabelle 5-2 Parameter der Restwertbetrachtung

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
t_{ab}	Abschreibungszeitraum	a
t_{Ld}	Lebensdauer	a

Die Abschreibungszeiträume für Infrastrukturmaßnahmen werden aufgrund der Vergleichbarkeit mit 19 Jahren angenommen. Darüber hinaus werden alle Fahrzeuge auf 20 Jahre abgeschrieben.

5.4.6 Kalkulationszins

Der reale Kalkulationszinssatz setzt sich aus dem Nominalzinssatz und der Preissteigerungsrate zusammen. Der Nominalzinssatz berücksichtigt den Zinssatz, bei dem eine geforderte Mindestverzinsung pro Jahr erwirtschaftet wird (meist zwischen 5 % und 12 %). Es ist hierbei sinnvoll, die Kenngröße des Leitzinses der Europäischen Zentralbank (EZB) zu nutzen. Dieser beeinflusst im Wesentlichen die allgemeine Zinsentwicklung. Als Leitzinsen im Eurosystem gelten die Zinssätze für das Hauptrefinanzierungsgeschäft, für die Einlagefazilität und für die Spitzenrefinanzierungsfazilität. Diese sind Zinssätze kurzfristiger Interbankkredite. Sie haben ebenso einen Einfluss auf die längerfristigen Zinssätze, die sogenannten Kapitalmarktzinsen. Aufgrund der Vielzahl der zu unterscheidenden langfristigen Zinssätze wird häufig die Rendite der umlaufenden festverzinslichen Wertpapiere als Kapitalmarktzinssatz verwendet.⁵⁵

Das streng korrelierende Regulierungsausmaß der durch die Zentralbank festgelegten Leitzinsen auf die kurzfristigen Zinsen, kann nicht im gleichen Maße auf die Gestaltung der langfristigen Zinssätze übertragen werden. Weitere Einflüsse sind die Entwicklung der Weltwirtschaft oder die Intensität des Wettbewerbs. Der Kapitalmarktzinssatz in Deutschland betrug im Mittel der letzten 10 Jahre 2,84 %. 2018 lag er bei 0,4 %, 2019 sogar bei -0,25 %.⁵⁶

Im arithmetischen Mittel (01/1999 bis 02/2019) betrug der Zinssatz der EZB für Hauptrefinanzierungsgeschäfte 1,86 Prozent. Im arithmetischen Mittel der letzten 10 Jahre betrug der Zinssatz der EZB für Hauptrefinanzierungsgeschäfte 0,5 Prozent. Der aktuelle Zinssatz liegt seit 03/2016 bei 0,00 Prozent.⁵⁷

Der Nominalzinssatz für die LCC-Analyse wird mit 2,0 Prozent angenommen. Es ist davon auszugehen, dass der Leitzins der EZB innerhalb der Betrachtungszeiträume (15 u. 35 Jahre) wieder steigt. Abhängig vom Zeitpunkt des Anstiegs ist es realistisch, dass er wieder in den Bereich der vorherigen Werte steigt (1,5 – 2,5 %). Aufgrund der aktuellen Zinslage kann keine genauere Annahme auf Grundlage des Wirtschaftsintervalls getroffen werden.

Da der Betrachtungszeitraum in der vorliegenden LCC-Analyse sehr groß ist, ist es wichtig Preisänderungen für wiederkehrende Zahlungen zu berücksichtigen. Dies lässt sich in Form einer Preisänderungsrate (auch bezeichnet als Preisänderungssatz/Teuerungsrate/Zahlungsänderungssatz/Inflationsrate) berücksich-

⁵⁵ Entwicklung des Kapitalmarktzinssatzes in Deutschland in den Jahren von 1975 bis 2018: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/201419/umfrage/entwicklung-des-kapitalmarktzinssatzes-in-deutschland/>, 2019.

⁵⁶ Deutsche Bundesbank - Die Geldpolitik des Eurosystems: <https://www.bundesbank.de/de/service/schule-und-bildung/schuelerbuch-geld-und-geldpolitik-digital/die-geldpolitik-des-eurosystems--613884>, 2019.

⁵⁷ Entwicklung des Zinssatzes der Europäischen Zentralbank für das Hauptrefinanzierungsgeschäft von 1999 bis 2019: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/201216/umfrage/ezb-zinssatz-fuer-das-hauptrefinanzierungsgeschaefte-seit-1999/>, 2019.

tigen. Jene gibt an, um wieviel Prozent die Zahlung in der Folgeperiode höher oder niedriger ist, als die Zahlung in der Periode zuvor. Die Schätzung der Preisänderungsrate ist insbesondere bei langen Betrachtungszeiträumen einer Wirtschaftlichkeitsanalyse mit Unsicherheiten behaftet. Aufgrund des exponentiellen Verlaufs der Wertänderung der Zahlungen darf diese nicht zu hoch angesetzt werden, um unrealistisch hohe Beträge am Ende des Betrachtungszeitraums zu vermeiden. Es ist zudem zu erwarten, dass die Preisentwicklung in der Vergangenheit keine direkte Übertragung auf die zukünftige Preisentwicklung zulässt.

Für die vorliegende Studie ist es deshalb zweckmäßig die Inflationsrate zu Grunde zu legen. Die Änderung des Verbraucherpreisindex dient insbesondere der Messung der gesamtwirtschaftlichen Preisstabilität. Eine Differenzierung der Preisänderungsraten der einzelnen Kostenpositionen wird nicht als Basis der vorliegenden Wirtschaftlichkeitsrechnung gewählt, da eine präzisere Prognose für einzelne Kostenpositionen mit hohen Unsicherheiten behaftet ist.

In der vorliegenden Wirtschaftlichkeitsanalyse wird eine Preissteigerungsrate von 1,5 Prozent p.a. gewählt. Jene entspricht damit der derzeitigen (vor-Corona) Inflationsrate (12/2019: 1,5 %), ermittelt durch das Statistische Bundesamt, und liegt geringfügig unterhalb der vom Statistischen Bundesamt ausgewiesenen durchschnittlichen Inflationsrate der letzten 10 Jahre.

Entsprechend der obigen Ausführung ergeben sich nachfolgende Parameter für die Bildung des Kalkulationszinssatzes gemäß Gl. (5-3) der Kapitalwertmethode.

Tabelle 5-3 Parameter für die Bildung des Kalkulationszinssatzes

Parameter	Nominalzins	Preissteigerungsrate	Kalkulationszinssatz
Zinssatz in %	2,00	1,50	0,49

6 Infrastrukturbedarf der Netze

6.1 Vorhandene Infrastruktur Netz Westmecklenburg II & Darßbahn

Das Netz Westmecklenburg II besteht aus zwei (bzw. drei Linien) im Südwesten des Landes Mecklenburg-Vorpommern in sehr flachem Gelände. Außerdem soll die wiederaufgebaute Darßbahn, die die Halbinsel Zingst (Prerow) mit Velgast und Stralsund verbindet, untersucht werden. Charakteristisch für alle Linien ist, dass diese immer wieder vorhandene Oberleitungsabschnitte erreichen. Dies wird noch erweitert, indem die RB-Linien 13 und 14 betrieblich durchgebunden sind. Dies bedeutet, dass die Fahrzeuge auf diesen Linien durchfahren und unterwegs in Parchim nur die Liniennummer wechseln. Eine Ausnahme ist die Linie RB 19, die nur im Saisonverkehr verkehrt und in die Umläufe der Linien RB 13 und RB 14 an ca. 20 Wochenenden im Jahr betrieblich eingebunden wird. Diese wird im Rahmen dieser Studie als Einheit mit der Linie RB 14 betrachtet. Die Dieselverkehre werden über drei Diesel-Tankstellen versorgt. Die Oberleitung wird über Unterwerke mit dezentraler Frequenzumwandlung von 50 Hz in 16 2/3 Hz in Stralsund, Rostock Schwerin und Wittenberge versorgt. Die betrachteten Linien, die vorhandene Infrastruktur und die bahnbetrieblichen Abkürzungen der relevanten Betriebsstellen sind in Abb. 6-1 dargestellt.

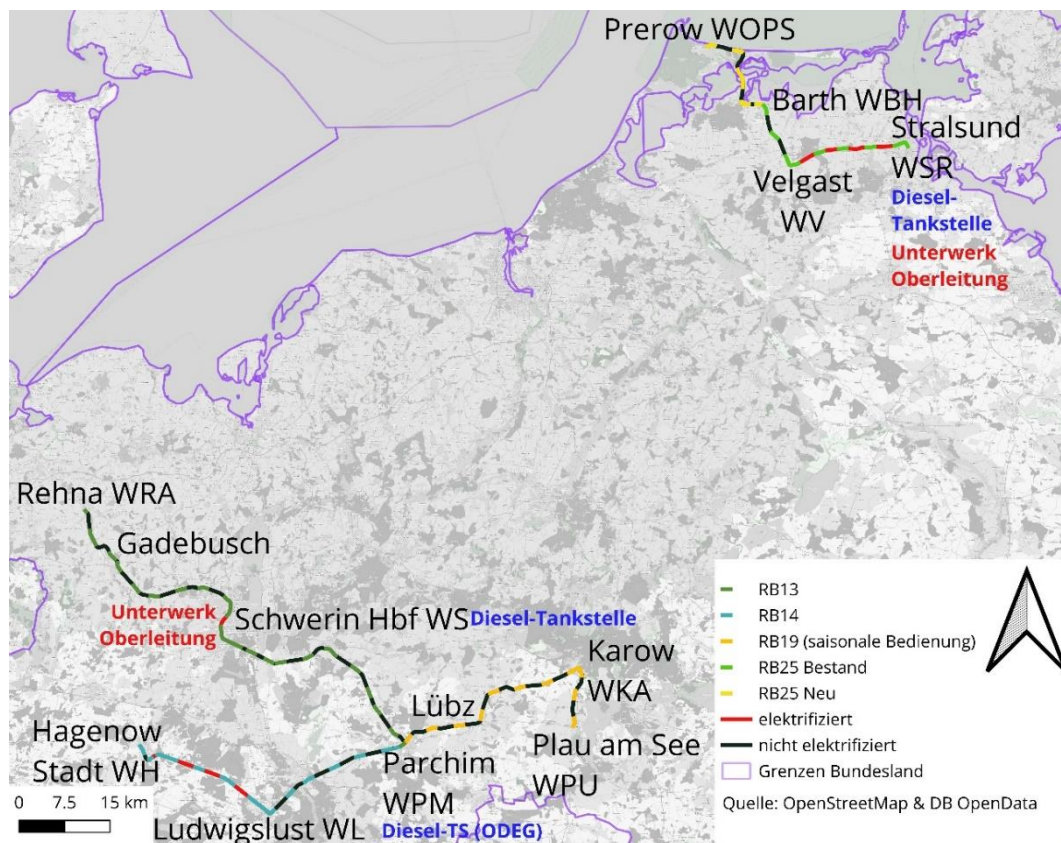


Abb. 6-1 Betrachtete Strecken in Mecklenburg-Vorpommern

Netzbetreiber ist zwischen Rehna, Schwerin und Parchim sowie zwischen Parchim, Ludwigslust und Hagenow Land die DB Netz AG. Zwischen Hagenow Land und Hagenow Stadt übernimmt dies die TME-Torsten Meincke Eisenbahn GmbH. Zwischen Parchim und Plau am See ist die Regio Infra Nord-Ost GmbH & Co. KG (RIN) als Netzbetreiberin verantwortlich.

6.2 Dieseltriebwagen

Im reinen Dieselmotorbetrieb wird davon ausgegangen, dass für diesen keine weitere Infrastruktur benötigt wird. Die Tankstellen, die für die heutige Leistungserbringung benötigt werden, sind bereits vorhanden. Diese sind in Schwerin und Stralsund, zusätzlich gibt es eine Tankstelle der ODEG in Parchim.

6.3 Oberleitungs-/ Batterie-Hybrid

6.3.1 Allgemeine Anforderungen zur Elektrifizierung

Bei allen Elektrifizierungsvorhaben, unabhängig ob als Nachladestation oder als Vollelektrifizierung ausgeführt, sind zunächst maßgebliche technische Randbedingungen zu prüfen. Diese basieren auf normativen Anforderungen des elektrischen Bahnbetriebs sowie Randbedingungen der Leit- und Sicherungstechnik.

Anforderungen aus der Sicherungstechnik

In dieser Studie wird davon ausgegangen, dass bei einer Elektrifizierung und den daraus resultierenden Traktionsströmen bzw. Rückströmen keine Beeinflussungen der Leit- und Sicherungstechnik auftreten, die eine grundlegende Erneuerung derselben notwendig machen, ggf. jedoch einzelne Schutzmaßnahmen der zum Überspannungsschutz nachgerüstet werden müssen. Grund dafür ist, dass die verwendete Technik auch auf elektrifizierten Strecken zum Einsatz kommt, da es sich um Komponenten üblicher Leit- und Sicherungstechnik handelt. Dies ist in einer vertiefenden Untersuchung jedoch im Rahmen der Planung nochmals detailliert zu prüfen. Betroffene Bahnhöfe dieser Studie sind Parchim und Plau am See. Diese sind die einzigen Bahnhöfe im Netz, die über Stellwerkstechnik verfügen, die ggf. neu beeinflusst werden kann durch die Ergänzung von Ladestationen. Rehna verfügt über keine Sicherungstechnik, Prerow Süd wird ohnehin neu gebaut und würde bereits im Planungsprozess entsprechend ausgelegt werden.

Der Bahnhof Parchim wurde im Rahmen einer Vor-Ort-Begehung eines sachkundigen Projektfremden als sehr wahrscheinlich umrüstbar eingeschätzt, da hier keine Gleisstromkreise, sondern handelsübliche SEL-Achszähler zur Gleisfreimeldung genutzt werden. Die zum Einsatz kommende Stellwerkstechnik der Bauart Gs II DR mit HI-Signalen kommt so auch auf elektrifizierten Strecken

zum Einsatz. Die verwendete Relais-technik der Signale Bauform II Siemens ist ebenfalls grundsätzlich kompatibel. Gleiches gilt für den Relaisblock Rb II 60 von und nach Lübz.

In Plau am See ist ein S&H 1912-Stellwerk (Siemens und Halske, Bauart 1912) mit Lampenüberwachung⁵⁸ mit HI-Signal-Außenanlagen eingerichtet. Für solche Stellwerke gelten üblicherweise aufgrund ihres Alters Umrüstverbote, da weder Komponenten noch Planungsleistungen für die abgekündigte Technik ausreichend verfügbar sind. Aufgrund des wenigen Zugverkehrs in Plau am See wäre aus Sicht dieser Studie eine Rückrüstung des Betriebsablaufs auf Technisch unterstützen Zugleitbetrieb (TuZ) zu prüfen. Dieser macht die Stellwerkstechnik obsolet, jedoch verbunden mit einer Reduzierung der Strecken-Leistungsfähigkeit.



Abb. 6-2 Südliches Ausfahrtsignal L in Parchim aus Gleis 2, rot markierter Achszähler (Foto: Steinfeldt)

Anforderungen des Personenschutzes im Fall eines Kurzschlusses oder Fahrleitungsrisses

⁵⁸ <http://www.stellwerke.de/bilder/wpu.html>, abgerufen 20.06.2020

Der Betrieb einer Oberleitung mit 15 kV 16,7 Hz kann im Kurzschlussfall (zum Beispiel bei Fahrzeugfehlern oder Fahrdrahtrissen) hohe Ströme in der Rückleitung (Schienen) zur Folge haben. Die Rückleitung muss diese mit geringer Impedanz (komplexer Widerstand) zum Unterwerk zurückführen. Die niedrige Impedanz ist notwendig, um den auftretenden Spannungsfall vom Eintrittsort des Stromes bis zum Unterwerk über den Schienen so gering wie möglich zu halten. Trotzdem können beim Eintritt eines Kurzschlusses in der direkten Umgebung hohe Potenzialdifferenzen in der Erde auftreten. Diese setzen sich in Form eines sogenannten Potenzialtrichters (sehr steiles Absinken der Spannung mit größer werdenden Abstand kreisförmig zum Kurzschluss) fort. Dieser Potenzialtrichter muss aber möglichst flach abfallen, sodass eine Person, die einen Schritt tätigt, keinen großen Potenzialdifferenzen (d. h. einer hohen Spannung → sogenannte Schrittspannung) ausgesetzt ist. Dies ist normativ durch die Begrenzung der Berührungsspannungen⁵⁹ detailliert geregelt. Um den Potenzialtrichter möglichst weit auszubreiten und so die Schrittspannungen klein zu halten, müssen alle metallischen Anlagen ((Licht-)Masten, Dächer, Geländer (dort auch parallel zum Gleis zu verbinden), Bänke, Bahnsteigmöblierung, Zäune etc.) kurzschlussfest mit der Rückleitung verbunden werden. Dies gilt auch für naheliegende Bauwerke wie Brücken (Stahlbewehrung) oder Tunnel. Die Maßnahmen dort sind im Einzelfall zu prüfen.

Die Verbindung der gesamten Bahnsteigmöblierung mit der Rückleitung stellt ein gängiges Verfahren bei Elektrifizierungen dar. Die Nachrüstung (vgl. Abb. 6-3, Abb. 6-4, Abb. 6-5) ist einfach möglich und im Rahmen der Kostenschätzungen mit einem festen Kostensatz pro Bahnsteig jeweils berücksichtigt. Die Beispielbilder wurden aus einem Bestandsprojekt entnommen, da eine Vor-Ort-Besichtigung durch die Corona-Pandemie des Jahres 2020 verhindert wurde.

Die leitfähige Verbindung mit der Rückleitung dient außerdem im Fall des Risses einer Oberleitung dazu, dass diese immer sicher auf einen metallischen Gegenstand fällt, der einen gut leitfähigen Kurzschluss bildet. Die gute Leitfähigkeit führt dazu, dass hohe Kurzschlussströme fließen, die man zuverlässig messen und anschließend in kürzester Zeit abschalten kann. Der Oberleitungsbereich, der im Fall eines Risses als Auftreffensfläche angenommen werden muss, kann verkleinert werden, wenn statt klassischer Oberleitung Stromschienenoberleitungen verwendet werden. Diese sind mechanisch nicht durch einen einfachen Fahrdrahtriss zu beschädigen und können nicht auf den Erdboden herunterfallen. Für kurze Ladeabschnitte im Stillstand sind diese deshalb zu empfehlen.

⁵⁹ Kießling; Puschmann; Schmieder: Fahrleitungen elektrischer Bahnen, Siemens, Erlangen 2014.



Abb. 6-3 Nicht mit der Rückleitung verbundener Beleuchtungsmast, Schraubverbindungsanschlüsse zur Nachrüstung erkennbar (Foto: Wittemann)



Abb. 6-4 Nicht mit der Rückleitung verbundene Bahnsteigmöblierung (Foto: Wittemann)



Abb. 6-5 Geländer ohne Längsverbindung, jedoch mit hierfür vorgesehenen Laschen (Foto: Wittemann)

6.3.2 Ladeinfrastruktur zum Einsatz von Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeugen

Die Technologie der Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeuge benötigt zum Nachladen der Fahrzeugenergiespeicher eine Nachladeinfrastruktur. Die Energie kann hierbei über diverse Möglichkeiten dem Fahrzeug zugeführt werden. Diejenige Variante, die mit einem aktuell teilweise elektrifizierten Netz die größte Kompatibilität aufweist und bei einer Erweiterung desselben ebenfalls die größte Migrationsfähigkeit besitzt, ist die Ladung über einen Oberleitungs-Stromabnehmer-Kontakt, wie er bei klassischen Elektrofahrzeugen vorhanden ist. Diese kann in Form von Oberleitungsabschnitten für die Ladung in Fahrt oder Ladestationen für Standladung ausgeführt werden. Die bereits vorhandene Oberleitung wird hierzu zunächst ohne Ausbau als gegeben angenommen. Die Standortbestimmung für Ladestationen ist mit folgenden Rahmenbedingungen durchgeführt worden:

- Die einzusetzenden Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeuge haben eine regelmäßige Reichweite im Batteriebetrieb von 40 – 45 km (450 kWh) bei kleinerem Speicher und bei größerem Speicher bis zu 70 – 75 km, die auch bei gealterten Batterien überbrückt werden können (aktuell außerhalb des Gebirges realistischer Werte).
- Jede Linie soll mit Oberleitungs-/ Batterie-Hybridfahrzeugen befahren werden können. Dies impliziert, dass die Linien mindestens eine Ladestation erhalten müssen, wenn keiner der Endpunkte im elektrifizierten Netz liegt.
- Linienendpunkte mehr als 35 km (ergibt 70 km hin und zurück) vom Ausgangsbahnhof entfernt, werden zur Abwicklung eines stabilen Betriebs mit einer Nachlademöglichkeit ausgerüstet (bei kleineren Speichern 20 km). Zum stabilen Betrieb zählen auch Faktoren wie mögliche Bauzustände, planmäßige- und außerplanmäßige Streckensperrungen mit eingekürztem Betrieb, Verstärkerleistungen, die ggf. nur einen der Endpunkte der Linie erreichen etc. (siehe Tabelle 6-1)
- Die Standorte werden so gewählt, dass sie keine zusätzlichen langen Aufenthaltszeiten an Zwischenstationen der Linien nötig machen und so planmäßige Haltezeiten nicht erheblich verlängert werden müssen.
- Die Eingriffe in Landschaft und Lebensräume sollen so gering wie möglich sein.

Neben diesen Kriterien ist auch die Energieversorgung aus dem Landes- oder Bahnstromnetz zu berücksichtigen. Die vorhandene Bahnstromversorgung mit dezentralen Umformern hat ausreichend Leistungsreserve, um auch batterieelektrische Fahrzeuge im Stand und während der Fahrt unter Oberleitung aufladen zu können, außerdem kann die Energie mit 11 bis 12 ct/kWh⁶⁰ im Oberleitungsnetz erheblich günstiger bezogen werden als aus dem Landesnetz (17 –

⁶⁰ DB Energie GmbH, „Preistabelle DB Energie Bahnstrompreise Mittelspannung,“ DB AG, Berlin, 2019.

20 ct/kWh⁶¹). Die Oberleitung im nahezu gesamten Bundesland Mecklenburg-Vorpommern wird dezentral über sogenannte dezentrale Umformer bzw. Umrichter versorgt, die am Ort ihrer Aufstellung aus 50-Hz-Landesstrom den für die Bahn notwendigen 16-2/3-Hz-Bahnstrom erzeugen. Ähnlich können Ladestationen und kurze Oberleitungsabschnitte mit Energie versorgt werden, jedoch sind dafür deutlich weniger leistungsfähige Anlagen ausreichend. Aktuelle Fachdiskussionen lassen erwarten, dass an Oberleitungs(insel-)abschnitten Energie ebenfalls zu Bahnstrompreisen bezogen werden kann. Für Ladestationen zur Ladung im Stand ist angesichts der dort umgesetzten verhältnismäßig geringen Energiemengen bei sehr hohen Bezugsleistungen jedoch nach aktuellem Stand von anzusetzenden Energiepreisen des Landesnetzes auszugehen.

Bei allen Elektrifizierungen sind auch normative und elektrotechnische Randbedingungen zu beachten. Diese werden jeweils berücksichtigt und im Rahmen der Einzelkostenkalkulation sichtbar. Hierzu gehören beispielsweise Erdungsmaßnahmen im Bahnhofsbereich, auf Brücken und in Tunneln oder die Überprüfung von entsprechenden Schutzabständen zwischen spannungsführenden Bauteilen und geerdeten Anlagen.

Als Speisespannung und –frequenz werden zwei Szenarien berechnet:

- Einerseits **15 kV 16,7 Hz** mit einem Vollumrichtersystem und Ladung über Oberleitung und Stromabnehmer. Dies stellt das in Deutschland für Streckenelektrifizierungen übliche System dar. Vollumrichter sind jedoch für die volle Ladeleistung (mind. für ein Zug in Doppeltraktion verkehrend in Doppeltraktion oder zwei sich begegnende Fahrzeuge, d. h. ca. 2,5 MW Gesamtladeleistung) auszulegen. Dies sorgt für hohe Kosten. Die Umrichter sind sowohl auf der Eingangs- als auch auf der Abgangsseite des Umrichters mit ebenso kostenintensiven Transformatoren auszustatten und stellen deshalb die kostenintensivste Lösung dar. Zu erwarten sind Kosten für einen 2,5-MW-Umrichter von ca. 3,5 bis 4 Mio. € anzusetzen.
- Andererseits wird deswegen eine Speisung der Oberleitung mit **15 kV 50 Hz** berechnet. Diese wird über Transformatoren direkt an die Landesenergieversorgung angeschlossen. Es muss jedoch sichergestellt werden, dass es durch den zweipoligen Anschluss der Oberleitung an das dreipolige Landesenergieversorgungsnetz nicht zu unzulässig hohen sogenannten unsymmetrischen Lasten kommt. Außerdem müssen die Fahrzeuge auch für diese mögliche Speisefrequenz **bereits bei der Bestellung** explizit bestellt werden. Durch die Beibehaltung von 15 kV müssen keine Isolationsveränderungen an den Fahrzeugen vorgenommen werden. Es lassen sich durch die Einsparung eines Transformators und den erheblich leistungsschwächeren Symmetrienumrichter (im Ver-

⁶¹ Eurostat/statista.com, „Statista - Industriestrompreis in Deutschland in den Jahren 2000 bis 2018 (in Euro-Cent pro Kilowattstunde),“ Statista GmbH, Juni 2020 (dort Angabe ohne Steuern/Umlagen). Abrufbar unter:
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/155964/umfrage/entwicklung-der-industriestrompreise-in-deutschland-seit-1995/>

gleich zum Vollumrichter, dieser muss nur die Unsymmetrie ausgleichen) relevante Einsparungen erzielen. Im Rahmen dieser Studie werden Kosten von ca. 2 Mio. € für ein solches System angenommen. Ein solches System soll ab 2021 in Annaberg-Buchholz durch Rail Power Systems erprobt werden.

- Ist das vorgelagerte Landesenergieversorgungsnetz (Mittelspannungsebene) leistungsfähig genug, kann sogar auf den Symmetrierumrichter verzichtet werden. Der Oberleitungshersteller Furrer & Frey erprobt aktuell ein solches System mit einem speziellen Transformator. Hier kann mit Kosten zwischen 1,3 bis max. 1,5 Mio. € eine weitere Einsparung erzielt werden. Bei Ladung einer Doppeltraktion oder zweier Einzelfahrzeuge kann die Unsymmetrie durch die beiden ladenden Fahrzeuge über den gewählten Spezialtransformator ausgeglichen werden, sodass auch hier ca. 2,4 MW Ladeleistung möglich werden. Dieses System wird nicht explizit in den Berechnungen berücksichtigt, die Einsparung kann jedoch problemlos vom Kapitalwert der Varianten abgezogen werden um in einer guten Näherung eine Kostenabschätzung treffen zu können.
- Für eine kostengünstige Ladung bei längerer Standzeit (z. B. ca. 40 min in Plau am See) wird eine klassische 1000-V-Zugvorheizanlage (50 Hz) mit ca. 0,8 MW Leistung vorgesehen, die auf einer Steckerlösung nach der Richtlinie UIC 552 basiert. Durch die lange Standzeit können der Ein- und Aussteckvorgang durch den Triebfahrzeugführer und die notwendige Ladezeit gleichermaßen realisiert werden. Auch die Ladung über eine solche Schnittstelle muss **bei der Bestellung der Fahrzeuge** explizit bestellt werden.

Tabelle 6-1 Maßgebliche Längen der nichtelektrifizierten Abschnitte pro Linie⁶²

Linie	Elektrifiziert/ Nicht-Elekt./ Gesamt in km
	4,6 / 74,5 / 79,1
RB13 (Rehna – Parchim)	Maßgebliche nicht elektrifizierte Längen: Rehna – Schwerin 33,9 km Schwerin-Görries– Parchim 39,9 km
	21,0 / 29,5 / 50,5
RB14 (Hagenow Stadt – Parchim)	Maßgebliche nicht elektrifizierte Längen: Ludwigslust – Parchim 25,9 km Hagenow Stadt – Hagenow Land 3,6 km
RB19 (Parchim – Plau am See)	0 / 44,5 / 44,5
RB25 ohne Durchbindung nach Stralsund (Velgast – Prerow Süd)	0,3 / 30,8 / 31,1
RB25 mit Durchbindung nach Stralsund (Stralsund – Velgast – Prerow Süd)	19,2 / 30,8 / 50,0

⁶² Verlag Schweers+Wall 2017 Eisenbahnatlas Deutschland sowie Daten des VMV

Tabelle 6-1 zeigt, dass unter den oben genannten Randbedingungen in Parchim, Rehna, Plau am See und Prerow Süd jeweils Nachlademöglichkeiten vorzusehen sind, wenn mit kleineren Energiespeichern gefahren werden soll. Mit größeren Speichern wird ein Verzicht in Rehna sowie Prerow Süd möglich. Aufgrund der Elektrifizierung auf den Streckenabschnitten Schwerin Hbf – Schwerin Görries, Hagenow Land – Ludwigslust und Stralsund Hbf – Velgast kann hier die Nachlademöglichkeit als gegeben angenommen werden.

6.3.3 Linie RB 13: Rehna – Parchim (Variante mit kleinerem Speicher)

Für den Betrieb mit Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeugen sind infrastrukturelle Ausbaumaßnahmen erforderlich, konkret die Einrichtung von Nachlademöglichkeiten in Rehna und Parchim. Der Streckenabschnitt Schwerin Hbf – Schwerin Görries ist elektrifiziert und bietet, neben der Bereitstellung von Traktionsenergie auf diesem Abschnitt, auch eine Lademöglichkeit für die Batterien im Fahrzeug am Mittelpunkt der Linie. Aus diesem Oberleitungsabschnitt sind auch die verkürzten Hin- und Rückleistungen nach Crivitz und Gadebusch abgedeckt.

6.3.4 Linie RB 13: Rehna – Parchim (Variante mit größerem Speicher)

Im Gegensatz zur Variante mit kleinerem Speicher kann auf die Nachlademöglichkeit in Rehna verzichtet werden. Die relevante zu überbrückende Lücke steigt von ca. 40 km auf ca. 68 km. Dies kann nach Angaben der Hersteller Siemens, Alstom und Stadler mit deren Fahrzeugen und verfügbaren Energiespeichern regelmäßig und auch bei besonderen Wetterverhältnissen (tiefe Kälte, Hitze) bewältigt werden. Auf die Nachlademöglichkeit in Parchim (Schwerin – Parchim – Ludwigslust sind ca. 66 km Strecke) kann trotz der betrieblichen Durchbindung der Linien RB 13 und RB 14 nicht verzichtet werden, da nicht alle Umläufe durchgebunden sind. Außerdem wäre im Bau- oder Störfall eine Rückkehr auf demselben Linienweg (Schwerin – Parchim) nach Schwerin ggf. nicht mehr möglich. Hinzu kommt, dass die Linie RB 19 nach Plau am See aus der Linie RB 14 durchgebunden werden soll. Diese benötigt für eine durchgehende Befahrung von Ludwigslust nach Plau am See eine Nachlademöglichkeit in Parchim.

Der Bahnhof **Parchim** liegt nahe des Ortskerns des gleichnamigen Ortes. Die Anschlusssituation ist in der folgenden Grafik dargestellt. Ein Umspannwerk von der Hochspannungsebene mit 110 kV zum Mittelspannungsring mit 20 kV der Stadt Parchim findet sich nahe des Bahnhofs. An selber Stelle kann eine Ladestation angeschlossen werden, für die sich allerdings wieder als Standort ehemaliges Bahngelände anbietet. Parchim verfügte über ein Bahnbetriebswerk, dessen Flächen noch heute für Stellwerkstechnik genutzt wird. Auf diesem lässt sich ohne Zukauf von Fläche eine Ladestation errichten. Diese liegt ca. 1 km vom Umspannwerk entfernt. Siehe dazu Abb. 6-8.

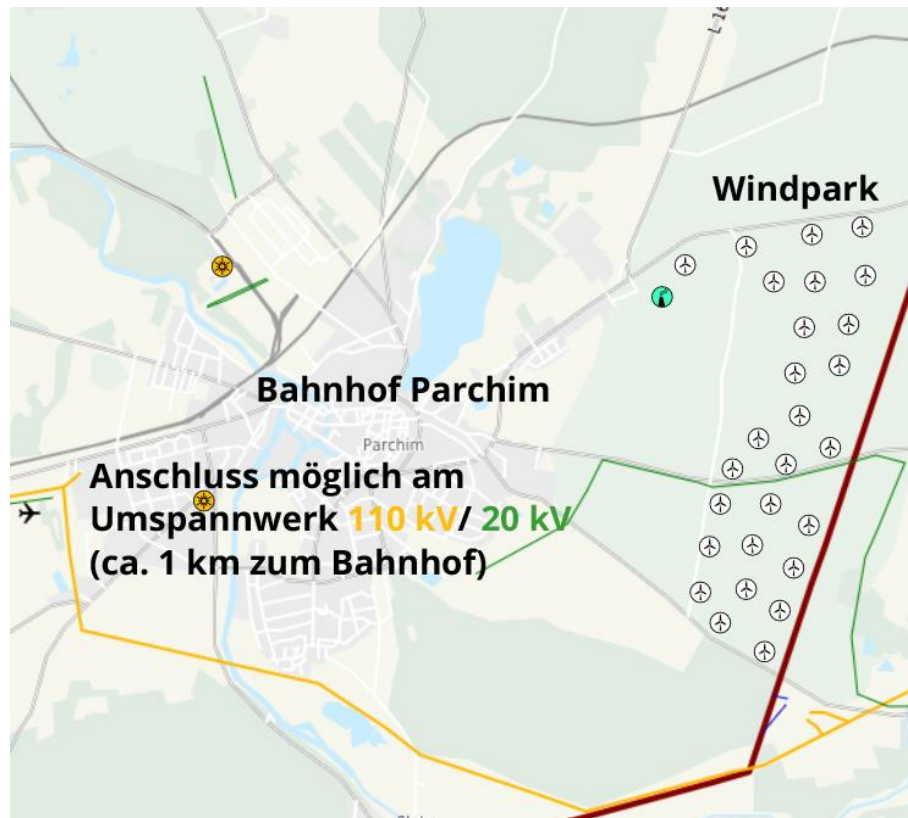


Abb. 6-6 Anschlusssituation Ladestation Bahnhof Parchim⁶³

Diese Nachladung wird in Form einer Ladestation mit Oberleitungsbespannung aller Bahnsteiggleise für diese Untersuchung angenommen. Zur Freihaltung des erforderlichen Arbeitsraumes des Stromabnehmers sowie Einhaltung entsprechender elektrischer Schutzabstände ist eine Anpassung der Bahnsteigdächer erforderlich, da diese den Arbeitsraum einschränken. Siehe hierfür Abb. 6-7.

Die Nachladung in Parchim ist nach dem aktuellen Fahrplanentwurf für 2021 (bereitgestellt durch den Auftraggeber) mit einer Nachladezeit von ca. 4 min zu knapp bemessen. Eine Prüfung in Absprache mit dem Auftraggeber des nach dem Deutschlandtakt vorgesehenen Fahrplans sieht hier nach aktuellem Stand Verschiebungen vor, die bis zu 10 min Ladezeit in Parchim ermöglichen würden. Dies muss im detaillierten Fahrplankonzept genauer untersucht werden, zumal zwischen Parchim und Schwerin im Entwurf des Deutschlandtakts Ausbauten auf 100 km/h vorgesehen sind, die ggf. Reserven schaffen.

⁶³Quelle: <https://www.flosm.de/html/Stromnetz.html>, bearbeitet durch Prof. EB, TU Dresden



Bahnsteiggleis 1



Bahnsteiggleis 2



Bahnsteiggleis 3

Abb. 6-7 Bahnhof Parchim, zu kürzende Bahnsteigdächer (Fotos: Steinfeldt)



Abb. 6-8 ehemaliges Bahnbetriebswerk Parchim, Sicht vom Bahnsteig 3 (Fotos: Steinfeldt)

Der Bahnhof **Rehna** liegt am Ortsrand des gleichnamigen Dorfes, sodass die Ladestation wahlweise durch eine von zwei unmittelbar angrenzende Mittelspannungsleitungen gespeist werden könnten, wobei die nördlichere sich eher anbietet. Die Anschlusssituation ist in der folgenden Grafik dargestellt. Die ebenfalls sichtbare 110-kV-Hochspannungsleitung versorgt die Mittelspannungsleitungen in der Ortslage von Gadebusch.

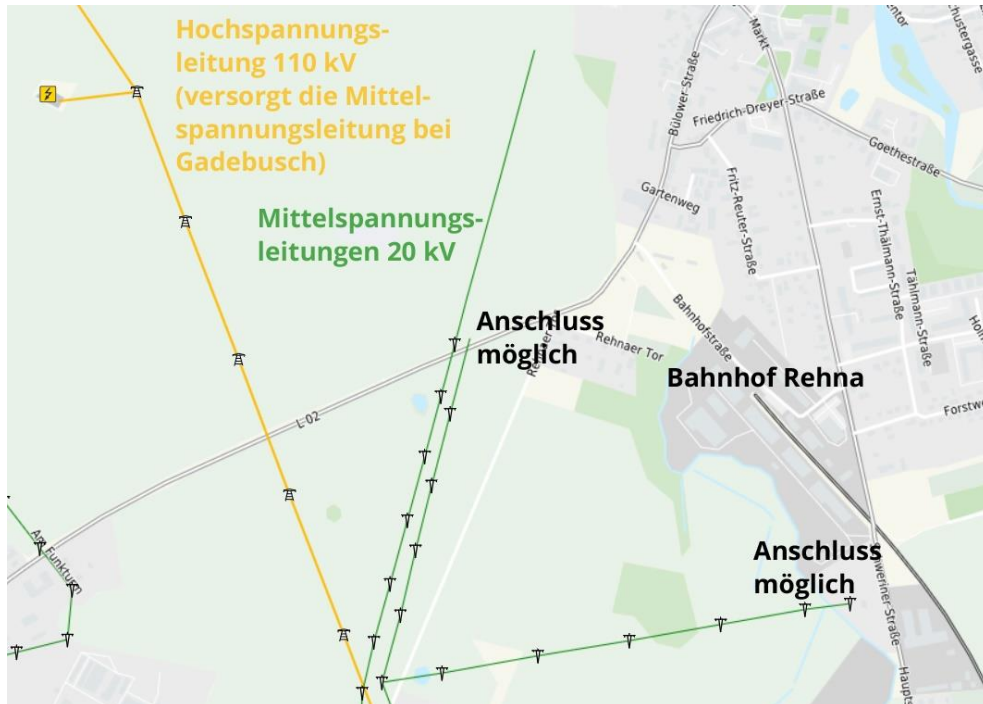


Abb. 6-9 Anschlusssituation Ladestation Bahnhof Rehna⁶⁴



Abb. 6-10 Bahnhofsgebäude, Bahnsteig und alte Bahnstrecke Rehna⁶⁵

Die ehemalige Fläche des zweiten Gleises gegenüber des Bahnhofsgebäudes jenseits des heutigen Bahnsteiggleises in Rehna eignet sich ideal für die Errichtung der Oberleitungs- und Ladestationsanlagen. Wie auf Abb. 6-10 zu sehen, müssen am neuwertigen Bahnsteig der vorhandene Zaun sowie die Bahn-

⁶⁴Quelle: <https://www.flosm.de/html/Stromnetz.html>, bearbeitet durch Prof. EB, TU Dresden

⁶⁵Quelle: <https://alterbahnhof-rehna.de/>, abgerufen Juni 2020.

steigmöblierung mit der Rückleitung (Gleis) verbunden werden. Die Fläche des ehemaligen zweiten Gleises ist am linken Bildrand zu sehen. In Verlängerung der Gleisfläche im Hintergrund befindet sich der nördliche Anschlusspunkt an die Mittelspannung.

6.3.5 Linie RB 14: Hagenow Stadt – Parchim (ohne Durchbindung nach Plau am See)

Die Linie RB 14 kann die für die Linie RB 13 beschriebene Ladeinfrastruktur (Abschnitt 6.3.4) in Parchim mitnutzen. Kostenseitig wird diese Fahrzeugkilometerabhängig auf beide Linien aufgeteilt. Weitere Veränderungen sind nicht erforderlich.

6.3.6 Linie RB 14 & RB 19: Hagenow Stadt – Parchim (mit Durchbindung nach Plau am See)

Da die Linie RB 19 als Durchbindung der Linie RB 14 betrieben wird, werden diese gemeinsam betrachtet. Zusätzlich zur im Abschnitt 6.3.4 beschriebenen Ladestation in Parchim muss in Plau am See eine Nachlademöglichkeit vorgesehen werden, da eine Überbrückung von Hin- und Rückweg von ca. 88 km aktuell nicht realistisch erscheint, insbesondere mit der kleineren Speichergröße. Durch die Bedienung dieser Verbindung aktuell an lediglich ca. 40 – 50 Tagen im Jahr sind jegliche Investitionen in örtliche Infrastruktur auf ein Minimum zu begrenzen. Es wird deshalb eine nach dem UIC-552-Standard ausgeführte „Zugvorheizanlage“ (ehemals zur Vorheizung von Reisezügen entwickelt) vorgeschlagen, die mit ca. 800 kW Ladeleistung über einen Stecker Fahrzeuge laden kann. Diese wird trotzdem als erheblicher Kostenfaktor in die Bilanz des Ausflugsverkehrs eingehen, sodass es hierfür sinnvoll erscheint bei der Variante mit größerem Energiespeicher ggf. Alterungs- und Sonderfallreserven sowie die Reserven in der Entladetiefe der Energiespeicher für eine Überbrückung der Hin- und Rückdistanz als seltene Ereignisse zuzulassen. Dies kann aktuell jedoch nicht angenommen werden, da entsprechende Herstellerangaben zu Reichweiten oberhalb von 80 km noch nicht validiert sind und müsste auf eine Machbarkeit mit dem zu ermittelnden Fahrzeuglieferanten abgestimmt werden.

Der Anschluss an eine oberirdische Mittelspannungsleitung der Zugvorheizanlage ist südlich des Bahnhofs Plau am See möglich und müsste gleisparallel ca. 200 m an das Bahnhofsgelände herangeführt werden. Mit hoher Wahrscheinlichkeit liegt allerdings am Bahnhofsgelände selbst auch in der Bahnhofstraße eine Mittelspannungsleitung an, die zur Versorgung der Ladestation genutzt werden könnte, da umliegend überwiegend Gewerbe angesiedelt ist. Dieses benötigt ohnehin eine leistungsfähigere Energieversorgung.



Abb. 6-11 Anschlusssituation Ladestation Bahnhof Plau am See⁶⁶

6.3.7 Linie RB 25 (Stralsund –) Velgast – Prerow (Variante mit kleinerem Speicher)

Für den Betrieb mit Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeugen ist eine infrastrukturelle Ausbaumaßnahme erforderlich, konkret die Einrichtung einer Nachlademöglichkeiten in Prerow. Bei Verzögerungen der Reaktivierung der Strecke bis Prerow ist eine Bedienung des Streckenabschnittes Velgast – Barth jedoch schon heute ohne infrastrukturelle Anpassungen befahrbar.

Da noch keine abschließende Positionierung des geplanten Endpunktes Prerow Süd erfolgt ist, wird zunächst von einem Endpunkt in der Nähe des alten Bahnhofes ausgegangen. Eine Verschiebung der Ladestation im Rahmen des Genehmigungsverfahrens stellt jedoch nur eine geringe Hürde dar. Wenn notwendig kann der Anschluss der Ladestation als Kabel gleisparallel vom alten Bahnhof zum neuen Endpunkt mitgeführt werden.

Der alte Bahnhof bietet sich als Anschlusspunkt für die Ladestation insbesondere an, da er nahe am örtlichen Klinikum liegt, das üblicherweise über einen leistungsfähigen Mittelspannungsanschluss verfügt. Dieselbe Anschlussleitung würde auch für die Ladestation Verwendung finden. Siehe dazu Abb. 6-12.

⁶⁶Quelle: <https://www.flosm.de/html/Stromnetz.html>, bearbeitet durch Prof. EB, TU Dresden



Abb. 6-12 Anschlusssituation Ladestation Bahnhof Prerow bzw. Prerow Süd⁶⁷

Der Streckenabschnitt Stralsund Hbf – Velgast sowie alle Gleise des Bahnhofs Velgast sind elektrifiziert und bieten, neben der Bereitstellung von Traktionsenergie auf dem Abschnitt, auch eine Lademöglichkeit für die Batterie im Fahrzeug. Durch den vollständig elektrifizierten Bahnhof sind auch verkürzte Leistungen mit Beginn und Ende in Velgast möglich, entsprechende Ladezeiten vorausgesetzt.

Die Aufenthaltszeit im Bahnhof Velgast ist mit ca. 30 min nach Angaben des vorgesehen Fahrplans im Deutschlandtakt⁶⁸ ausreichend, um eine vollständige Ladung der Energiespeicher zu ermöglichen.

Prüfung der Ergänzung der Fahrleitung ab Velgast Richtung Prerow

Zur Verlängerung der Tauschintervalle der Energiespeicher oder ggf. auch möglichen Verkleinerung derselben wurde geprüft, ob eine Elektrifizierung ab Velgast möglich ist ähnlich jener bei der Übernahme durch die Usedommer Bäderbahn demontierten Anlage zwischen Velgast und Barth.

Hierzu wurde zunächst anhand der Naturschutzkarten des Landes Mecklenburg-Vorpommern geprüft, wo entlang der Strecke nationale, europäische und geplante Schutzgebiete liegen. Ergebnis dieser Prüfung war ein nahezu durchgehender Schutzstatus auf europäischer Ebene nördlich Saatel. Die entsprechenden Auszüge aus den Karten sind in den folgenden Abbildungen (Abb. 6-13, Abb. 6-14 und Abb. 6-15) dargestellt.

⁶⁷ Quelle: <https://www.flosm.de/html/Stromnetz.html>, bearbeitet durch Prof. EB, TU Dresden

⁶⁸ Quelle: SMA. bereitgestellt durch den Auftraggeber.

Realistisch mit geringem Aufwand umsetzbar wäre also nur eine Fahrleitungsanlage von Velgast bis Saatel, da im Anschluss erhebliche raumordnerische Widerstände zu erwarten sind. Außerdem verläuft die Strecke vor allem im neu zu errichtenden Abschnitt deutlich näher an Wohnbebauung mit entsprechenden Betroffenheiten.



Abb. 6-13 Europäische Schutzgebiete rund um Velgast mit beginnendem Naturschutzgebiet in Saatel Quelle: Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern



Abb. 6-14 Nationale Schutzgebiete rund um Velgast Quelle: Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern

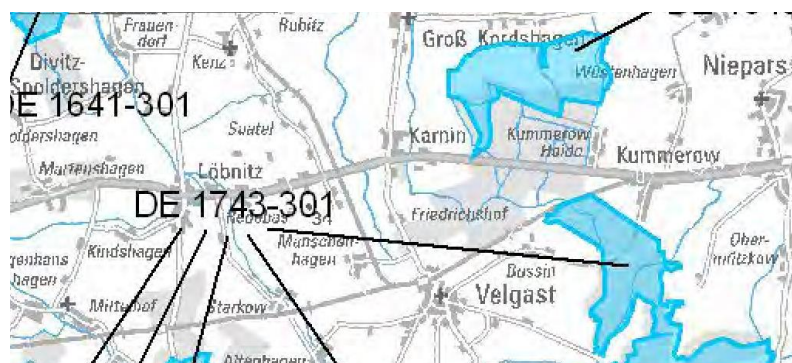


Abb. 6-15 Geplante Schutzgebiete rund um Velgast Quelle: Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern

Die leicht und kostengünstig umsetzbare Fahrleitungsanlage hat aufgrund ihrer geringen Ausdehnung von lediglich ca. 3 km Länge (wirksam durch Hin- und

Rückweg ca. 6 km) nur eine geringe Minderungswirkung auf die notwendige Speichergröße, sodass die Untersuchung demzufolge nicht weiter verfolgt wurde. Eine entsprechende Darstellung der geprüften zusätzlichen Fahrleitungsanlage findet sich im Folgenden in Abb. 6-16.

Sollte es sich ergeben, dass für die Linie RB 25 als einzelne Linie Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeuge beschafft werden, so kann jedoch eine Prüfung der Minderungswirkung über die Fahrzeuglebensdauer sinnvoll sein. Hierzu sind Simulationen für detailliertere Ansätze sinnvoll, die den Rahmen dieser Studie jedoch sprengen würden.

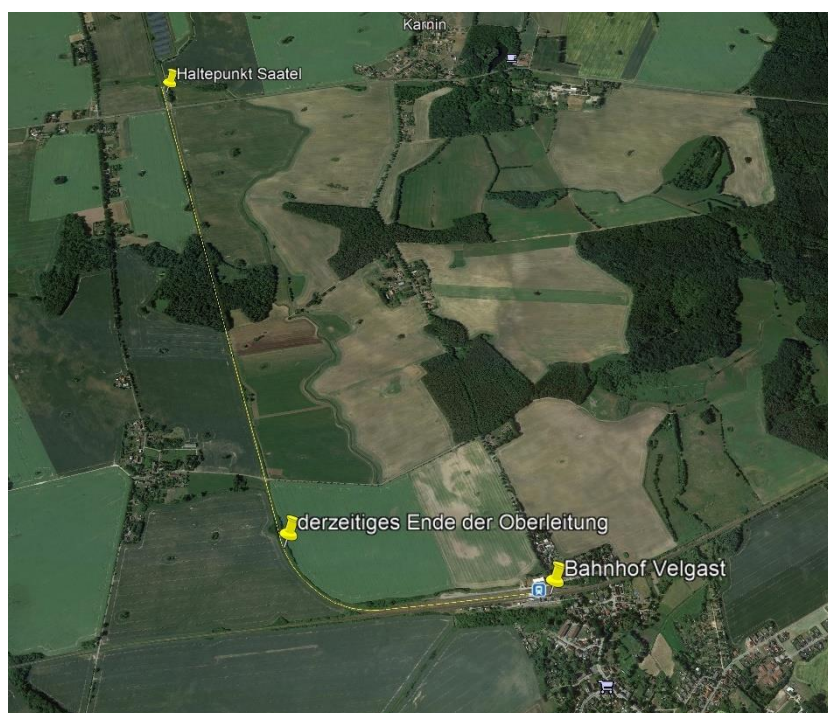


Abb. 6-16 Streckenverlauf Velgast – Saatel als Ladeabschnitt ohne Beeinträchtigung von bewohnten Flächen, ca. 2700 neue Oberleitung Quelle: Google Earth

6.4 Vollelektrifizierung

Bei der Vollelektrifizierung aller Strecken sind zusätzlich zu den im Abschnitt 6.3 beschriebenen Maßnahmen noch weitere Kriterien für die entsprechenden Abschnitte zu prüfen. Dazu zählen durchfahrene Schutzgebiete und die Ausweitung der Erdungsmaßnahmen auf alle Bahnsteige und die gesamten Strecken. Eine Erweiterung der Leistungsfähigkeit der Energieversorgung durch stationäre Unterwerke ist variantenabhängig, kann aber auf allen Linien nach einer überschlägigen Prüfung mit den vorhandenen dezentralen Unterwerken in Stralsund, Schwerin und Wittenberge mittels Mitführung von Speiseleitungen, Rückleiterseilen und ggf. Spannungstützern durch schaltbare Kondensatorbänke an den Linienendpunkten sichergestellt werden. Zusätzliche Einspeisepunkte in die Fahrleitungsanlagen sind demzufolge nicht vorgesehen bzw. ein-

kalkuliert. Dies hängt mit den relativ geringen Leistungsanforderungen der kleinen Fahrzeuge zusammen, die verglichen mit Fern- oder Güterverkehrs-Zuggarnituren nur geringe Leistungen aus der Fahrleitung beziehen. Da es sich bei allen Linien des Netzes Westmecklenburg II sowie der Darßbahn um relativ selten befahrene Streckenabschnitte handelt, wurde zur Beschränkung des Aufwandes mit kilometerspezifischen Werten eine Abschätzung zu den jeweiligen Elektrifizierungskosten getroffen. Diese sind im Anhang für die einzelnen Linien dargestellt.

6.5 Wasserstoff-/ Batterie-Hybrid

6.5.1 Netz Westmecklenburg II

Brennstoffzellenfahrzeuge bieten die Möglichkeit, lokal vollständig emissionsfrei zu verkehren. Ihr Vorteil liegt dabei vor allem in den hohen Reichweiten ohne Notwendigkeit des Nachtankens oder der Nachladung. Größte Herausforderung ist aktuell die ausreichende und stabile Versorgung mit Wasserstoff. Es gibt dabei verschiedene Verfahren zur Herstellung, die entweder CO₂-neutral (Wasser-bzw. Chloralkali-Elektrolyse mit CO₂-neutralem Strom) oder CO₂-emittierend (Reformation von Erdgas/anderen Kohlenwasserstoffen, Wasser-bzw. Chloralkali-Elektrolyse ohne CO₂-neutralen Strom) industriell Anwendung finden. Diese finden meist zentral in großen Anlagen mit hoher Ausstoßmenge Anwendung, Elektrolyse für Wasser-Elektrolyse sind aber auch dezentral in kleinen Anlagen gleisnah realisierbar. Für die dezentrale Wasserstoffversorgung bietet sich in windreichen Regionen auch eine Sektorenkopplung mit der Erzeugerwirtschaft der Windenergie als Speichermöglichkeit für überschüssige elektrische Energie an (siehe dazu Kapitel 6.6).

Die Prüfung der notwendigen Tankstellenstandorte muss maßgeblich betrieblich durchgeführt werden, da die Reichweite der Fahrzeuge für einen Tagesumlauf ausreicht. Bei Prüfung der durch die TU Dresden aufgrund der bereitgestellten Fahrpläne und Bildfahrpläne nachvollzogenen Umlaufpläne ist festzustellen (diese beschreiben, wann welches Fahrzeug wo ist bzw. welche Zugleistung es fährt und enthalten üblicherweise auch Reinigungs- und Tankzeiten), dass nachts die Fahrzeuge heute meist je hälftig in Schwerin und zusammenfassend in den Endpunkten Parchim abgestellt werden, teilweise auch zur Erreichung des Werkstattstandortes der ODEG in Parchim. In der Nacht werden sie in Schwerin und Parchim mit Diesel betankt.

Folgende Kriterien für eine Standortwahl wurden berücksichtigt:

- Es kommen nur Standorte in Frage, an denen Linien planmäßig enden bzw. beginnen, sodass keine Linienläufe gebrochen werden müssen oder nächtliche Überführungen entlang der Linie wenn möglich nicht erforderlich werden.

- Es sollen möglichst viele Tageseinsätze der Fahrzeuge am Standort beginnen bzw. enden, sodass in der Nachtpause die Fahrzeuge lokal betankt werden können.
- Die Standorte der Tankstellen sollen in der Nähe zur Herstellungsanlage liegen, um die Überführungskosten und –risiken des Wasserstoffs zu minimieren.
- Die Umgestaltung der heutigen Umlaufpläne ist ggf. notwendig und zulässig, daraus kann ein Fahrzeugmehrbedarf resultieren. Dieser wird nicht mitbetrachtet.

Das Ergebnis der Standortwahl, der Betriebshof Haselholz der Nahverkehr Schwerin GmbH, ist in der Karte in Abb. 6-18 dargestellt. Die Standortwahl für die Umsetzung im Netz Westmecklenburg II wurde die Errichtung einer Wasserstofftankstelle einem Vorschlag des Auftraggebers folgend auf dem Gelände der Werkstatt der Nahverkehr Schwerin GmbH angenommen. Diese soll das Betanken mit gasförmigem Wasserstoff unter hohem Druck ermöglichen. Für die Belieferung der Tankstelle mit Wasserstoff wurde eine Anlage zur Sektorenkopplung angenommen, die sich an der Anlagengestaltung des Energieparks Mainz (www.energiepark-mainz.de) orientiert.

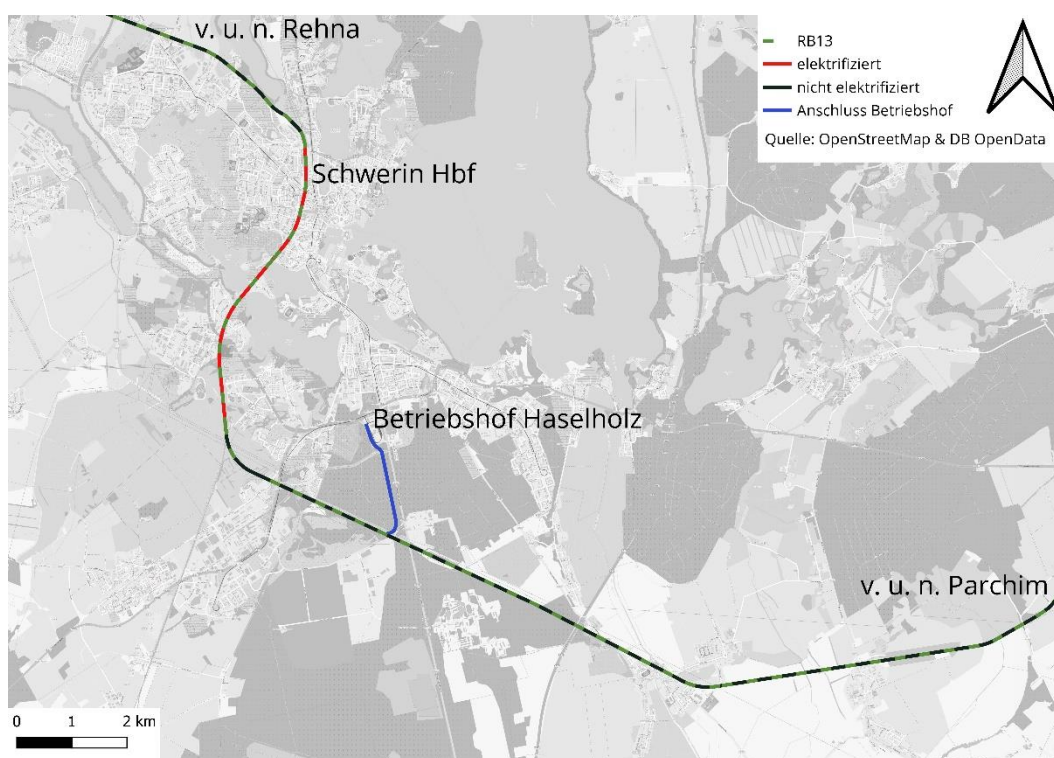


Abb. 6-17 Lage im Netz Westmecklenburg II des NVS Betriebshof Haselholz



Abb. 6-18 Grundstück des NVS-Betriebshof Haselholz

Das im Rahmen der Studie erdachte Konzept zur Wasserstoffbereitstellung des Netzes Westmecklenburg II sieht die Betankung mit Wasserstoff aus einer zentralen Produktionsanlage vor, konkret am bereits mit einem EBO-Gleisanschluss ausgestatteten Betriebshof der Nahverkehr Schwerin GmbH (NVS) Schienenfahrzeugwerkstatt im NVS-Betriebshof Haselholz. Eine Abstimmung mit der NVS GmbH bzw. dem Energieversorger und Netzbetreiber WEMAG AG ist nicht erfolgt. Als einziger Bezugspunkt würde die Wasserstofftankstelle den Bedarf aller Fahrzeuge im Netz decken. Auf Basis der Umlaufkilometer, Fahrzeugeinsatz und einer Energiebedarfsermittlung ergibt sich eine Versorgungsleistung von ca. 225 t pro Jahr. Pro Werktag ergibt sich ein höherer Bedarf von ca. 700 kg als am Wochenende mit ca. 350 kg. Bei einer Durchbindung nach Plau am See steigt der Tagesbedarf am Wochenende auf ca. 430 kg.

Die in Abb. 6-18 erkennbare Fläche südlich des Werkstattkomplexes würde ggf. die Errichtung einer entsprechenden Wasserstoff-Erzeugeranlage mittels Elektrolyse eignen. Hierzu sind weitere Untersuchungen erforderlich, die den Rahmen dieser Arbeit übersteigen. Grundsätzlich sind jedoch Anbieter am Markt verfügbar, die entsprechende Anlagen entwerfen, planen, bauen und auch betreiben können. Häufige Anbieter sind die großen Lieferanten für technische Gase (Air Liquide, Linde etc.) sowie im Konsortium angeschlossen entsprechende Lieferanten der Erzeugungsanlagen.

6.5.2 Darßbahn

Für die Darßbahn wurde im Rahmen dieser Studie vereinfachend angenommen, dass in Stralsund eine gleisnahe Tankstelle für Wasserstoffschienefahrzeuge geschaffen wird. Die für den Kfz-Verkehr bereits in Rostock bestehende

Wasserstofftankstelle wird durch die die H2-Mobility-Initiative, ein Konsortium aus sechs Firmen (Air Liquide, Daimler, Linde, OMV, Shell und Total⁶⁹) die Mitversorgung einer Fahrzeugtankstelle für Schienenfahrzeuge in Stralsund mit übernehmen würde. Hintergrund ist, dass eine Neuerrichtung einer Erzeugeranlage in Stralsund für aktuell 3 – 4 Fahrzeuge (geplant) auf der Darßbahn nicht wirtschaftlich erscheint. Die Transportkosten der Versorgung der weit entfernten Tankstelle am Instandhaltungsstandort der Züge in Stralsund wurde nicht berücksichtigt, würde den Wasserstoffpreis mutmaßlich jedoch über 5 €/kg anheben. Der aktuelle Verkaufspreis für Kfz-Wasserstoff liegt bei ca. 9 €/kg und damit deutlich über dem angenommenen Zielpreis von 5 €. Üblicherweise werden ähnliche Anlagen im Industrieinsatz über Druck-LKW-Trailer versorgt, die entsprechend des Bedarfs über die Straße zugeführt werden. Dies müsste bei der anzusetzenden Verbrauchsmenge von Wasserstoff mehrmals wöchentlich erfolgen (ca. 1170 kg/Woche ohne Durchbindung nach Stralsund, ca. 1843 kg/Woche mit Durchbindung nach Stralsund).

Alternativ ist auch eine Versorgung aus der in Abschnitt 6.6.2 beschriebenen Anlage am Standort Schwerin von Wasserstoff denkbar. Hier stellt sich ebenfalls die Frage der Versorgung per Straßentransport in Druck-Trailern, dann jedoch mit einem noch weiteren Anfahrtsweg. Ein alternativer Transport per Schiene erscheint aus wirtschaftlichen Gründen (weniger als 1 Güter-Wagen pro Tag) nicht sinnvoll.

Die Region Rügen-Stralsund wurde im Jahr 2019 für zwei Jahre zur „HyStart“-Wasserstoffregion im Rahmen des Bundes-Programms „HyLand“. Das Programm ist angesiedelt bei der NOW GmbH, gefördert durch das Nationale Innovationsprogramms Wasserstoff und Brennstoffzellentechnologie (NIP). Im Status „HyStart“ als eine von drei aufeinander aufbauenden Stufen sollen zunächst „vor allem sämtliche Akteure vor Ort vernetzt sowie ein Konzept mit konkreten Projekten erarbeitet werden“⁷⁰. Eine Projektentwicklung hinsichtlich einer Wasserstoffherzeugungsanlage in der Region zur Versorgung von Verkehrsprojekten auf Straße und Schiene könnte in diesem Programm sehr attraktiv sein, ggf. unter Nutzung von Sektorenkopplung. Hürde hierbei bleibt die hohe notwendige Investitionssumme, die auch bei einer ausschließlich anteiligen Förderung durch das NIP, hohe absolute Werte im zweistelligen Millionenbereich erreicht.

⁶⁹ <https://www.ostsee-zeitung.de/Nachrichten/MV-aktuell/Diese-Wasserstoff-Tankstelle-kostete-Hunderttausende-und-hat-in-MV-nur-zwei-Kunden>, abgerufen im Juni 2020.

⁷⁰ <https://www.foederal-erneuerbar.de/news-detail/items/ruegen-stralsund-wird-hyland-wasserstoffregion>, abgerufen im Juli 2020.

6.6 Bewertung der Eignung für Sektorenkopplung

6.6.1 Einordnung der Sektorenkopplung

Im Sektor der erneuerbaren Energien sind enorme Fortschritte zu erkennen. Sie deckten in Deutschland 2019 nach Daten des Umweltbundesamtes bereits ca. 42,1 %⁷¹ des elektrischen Energiebedarfs. Das Ziel der vorliegenden Studie war neben der grundsätzlichen Einschätzung der Machbarkeit alternativer Antriebe im Schienenverkehr auf bestimmten Linien in Mecklenburg-Vorpommern die Einschätzung der Eignung der einzelnen Technologien für Sektorenkopplung.

Sektorenkopplung beschreibt die Zusammenführung und gemeinsame Optimierung von Technologien und Prozessen der Energiewirtschaft und der Industrie. Ziel ist die Optimierung in einem gemeinsamen Ansatz zum Nutzen beider. Bekanntestes Beispiel hierfür ist die immer wieder thematisierte Überschussenergie, die insbesondere die erneuerbaren Energien bei guten Windverhältnissen bzw. guter Sonnenstrahlung bereitstellen, jedoch zum aktuellen Zeitpunkt nicht abgenommen werden können. Viele Forschungsansätze versuchen diese nahezu kostenlos verfügbare Energie für industrielle Zwecke nutzbar zu machen und gleichzeitig eine Speichermöglichkeit für die in Form elektrischer Energie nicht speicherbaren Energiemengen zu finden.

Hierzu bietet sich die Wasserstoffherzeugung als Power-to-Gas-Prozess (Strom zu Gas) besonders an. Ziel ist, mithilfe der Umwandlung der elektrischen Energie in Wasserstoff die überschüssige Energie einerseits zu speichern und so für spätere Anwendungen nutzbar zu machen. Wasserstoff eignet sich hierfür besonders gut, da er in einem verhältnismäßig einfachen Prozess aus nahezu überall verfügbarem Wasser das Speichermedium erzeugen kann und eine hohe Energiedichte von ca. 33,33 kWh/kg aufweist (im Vergleich Diesel ca. 9,7 kWh/l, allerdings auf kleinerem Volumen).

Im Folgenden kann beispielsweise in einem Umkehrprozess wieder Strom erzeugt werden oder der erzeugte Wasserstoff dem Erdgasnetz zugeführt werden. Diese „minderwertige“ Nutzung des mit Wirkungsgradverlusten (Wirkungsgrad ca. 0,8⁷²) hergestellten Wasserstoffs zur Stromerzeugung ist allerdings unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten zu hinterfragen, zumal alle Umkehrprozesse mit noch höheren Wirkungsgradverlusten behaftet sind⁷³. Es wird deshalb nach Anwendungsmöglichkeiten für den erzeugten Wasserstoff gesucht, die höhere Gewinne versprechen und im Allgemeinen höherwertigen Nutzen ha-

⁷¹ https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/372/bilder/anteile_agee-stat.png, abgerufen im Juni 2020.

⁷² <https://www.helmholtz.de/energie/wasserstoff-aus-sonnenlicht/>, abgerufen im Juni 2020.

⁷³ <https://www.energieagentur.nrw/brennstoffzelle/brennstoffzelle-wasserstoff-elektromobilitaet/wirkungsgrad>, abgerufen im Juni 2020.

ben. Hier kann die Wasserstofferzeugung für batterieelektrische Züge eine sinnvolle Anwendung darstellen.

6.6.2 Wasserstofferzeugung

Wasserstoff lässt sich in verschiedenen Verfahren herstellen. Eines davon ist die sogenannte Elektrolyse, bei der Wasser in H_2 und O_2 aufgespaltet wird. Benötigt wird hierzu ein sogenannter Elektrolyseur. Zur Speicherung des Wasserstoffs muss das Gas außerdem hochverdichtet werden (ca. 350 bis 700 bar Druck), um auf kleinem Volumen gespeichert werden zu können und eine Betankung von Fahrzeugen zu ermöglichen. Beides muss am Erzeugungsort umgesetzt werden. Die Technologie kann bei ausreichender Energieversorgung aus dem Energienetz und ausreichenden Wassermengen nahezu überall umgesetzt werden. Ein besonderer Vorteil ergibt sich deshalb bei der Nutzung von Windenergie, da die Anlage in das lokale Netz eines Windparks integriert werden kann. Dies hat zur Folge, dass die im öffentlichen Stromnetz anfallenden Umlagen für die Durchleitung der Energie sowie Teile der sonstigen Abgaben entfallen können. Die Bundesnetzagentur hält jedoch fest, dass „die Eigenversorgung (...) einen in der Praxis verbreiteten Unterfall eines selbsterzeugten Letztverbrauchs“ darstellt und dass auch für diesen „Eigenversorger, grundsätzlich die EEG-Umlage“⁷⁴ zu zahlen ist. Eine Reduzierung dieser höchsten Stromumlage, die im Moment bei ca. 6,756 ct/kWh⁷⁵ liegt, auf 40 % ist jedoch möglich. Folgende Voraussetzungen sind nach ⁷⁴ erforderlich:

- eine strikte Personenidentität zwischen dem Betreiber der Stromerzeugungsanlage, der den Strom selbst erzeugt, und dem Letztverbraucher, der diesen Strom selbst verbraucht,
- ein unmittelbarer räumlicher Zusammenhang,
- die Zeitgleichheit von Erzeugung und Verbrauch,
- keine Durchleitung durch ein Netz der allgemeinen Versorgung.

Diese Anforderungen können bei einer räumlich nahe an Wind- oder Solar-kraftwerken angeordneten Erzeugeranlage für Wasserstoff vollumfänglich erfüllt werden. Dies macht die Sektorenkopplung für die Herstellung von Wasserstoff interessant, da hier Einsparungen im unteren zweistelligen Prozentbereich durch die Reduzierung der EEG-Umlage und den Entfall von Durchleitungsgebühren und anderen Abgaben (z. B. Förderung der Kraft-Wärme-Kopplung) möglich sind.

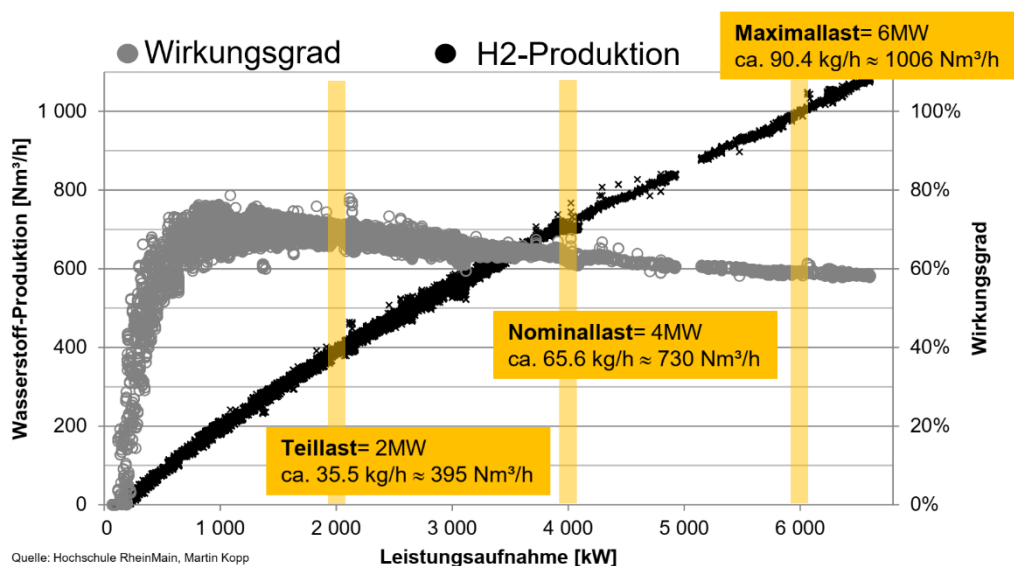
⁷⁴ https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/ErneuerbareEnergien/Datenerhebung_EEG/Eigenversorger/Daten_EEG_Eigenversorger_node.html, abgerufen im Juni 2020.

⁷⁵ <https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/FAQs/DE/Sachgebiete/Energie/Verbraucher/Energielexikon/EEGUmlage.html>, abgerufen im Juni 2020.

Energiepark Mainz

Ein Best-Practice-Beispiel für die Sektorenkopplung zwischen Energiewirtschaft und Wasserstoffherstellung ist der Energiepark Mainz, der seit 2015 errichtet wurde und sich seit 2017 im Regelbetrieb befindet. Die Errichtungskosten betrugen ca. 17 Mio. Euro⁷⁶. Ergänzt wurde das Projekt 2019 um eine erste Wasserstofftankstelle für Busse für den Regelbetrieb in Wiesbaden im Wert von ca. 2,7 Mio. Euro⁷⁷. Das Forschungsprojekt wird getragen von einem Konsortium der Hochschule RheinMain, der Siemens AG, der Linde AG und der Stadtwerke Mainz AG.

Die Nominalkapazität der Anlage beträgt als Nominallast bzw. Nominalerzeugung ca. 65,6 kg/h, wobei in Spitzenstunden bis zu 90,4 kg/h Leistung bereitgestellt werden können (kurzzeitig). Die Nennkapazität entspricht ca. drei 2-MW-Windrädern im Dauerbetrieb.⁷⁸ Siehe hierzu auch die folgende Abb. 3-1. Der grün erzeugte Wasserstoff wird für den Busbetrieb in Wiesbaden aktuell zu einem Preis von 7 €/kg⁷⁹ abgegeben. Sollen ähnliche Kosten wie für den Diesel am Rad erreicht werden, so muss der Wasserstoff auf Dauer für ca. 5 €/kg abgegeben werden.



⁷⁶ <https://www.energiepark-mainz.de/artikel-detailseite/article/langfristige-zukunft-fuer-den-energiepark-mainz/>, abgerufen im Mai 2020.

⁷⁷ <https://www.hessenschau.de/wirtschaft/wasserstoff-tankstelle-eroeffnet---kundschaft-gibt-es-keine,wasserstofftankstelle-wiesbaden-100.html>, abgerufen im Mai 2020.

⁷⁸ https://www.m-r-n.com/neuigkeiten/2017/20171019-Regionalkonferenz%20Energie%20-%20Umwelt/F3_Aichinger_Mainz%20E-Park.pdf, abgerufen im Juni 2020.

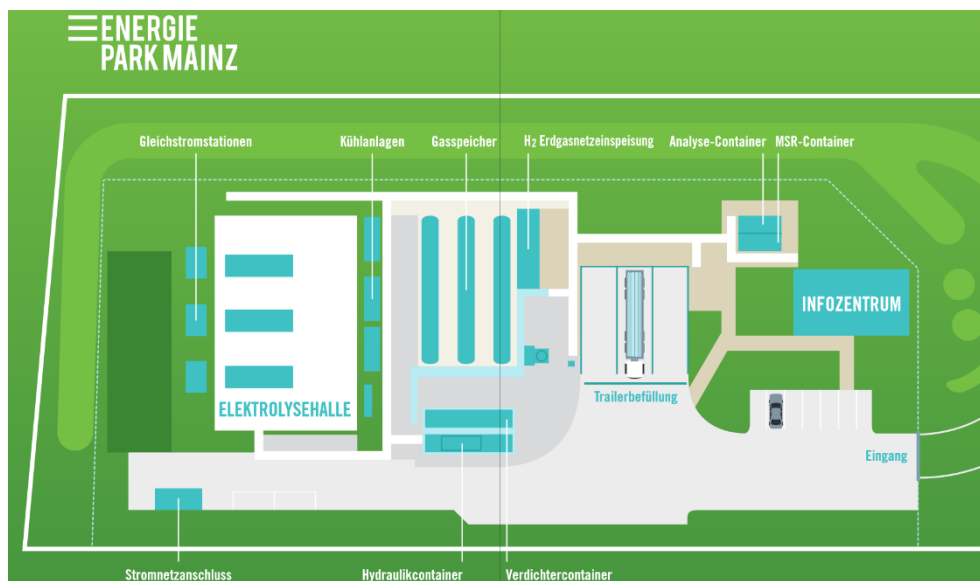
⁷⁹ <https://www.hessenschau.de/wirtschaft/wasserstoff-tankstelle-eroeffnet---kundschaft-gibt-es-keine,wasserstofftankstelle-wiesbaden-100.html>, abgerufen im Mai 2020.

Abb. 6-19 Leistungsfähigkeit der Anlage im Energiepark Mainz⁸⁰

Geht man davon aus, dass die Anlage nicht permanent unter Nennkapazität gefahren werden kann, da Abhängigkeiten zu den Erzeugern bestehen, so entspricht diese Leistungsfähigkeit sehr gut dem Bedarf der in der Studie untersuchten Linien mit ca. 700 kg Tagesverbrauch an Werktagen. Neben der Abgabe an andere kommunale Einrichtungen und dritte Nutzfahrzeuge und Kfz ist ausreichend Leerlaufzeit pro Tag möglich, um auch Instandhaltungsfenster generieren zu können (abhängig von Lagerkapazitäten).

Abb. 6-20 zeigt die Gestaltung des Energieparks mit den notwendigen Einrichtungen für die Wasserstoffherzeugung, -verdichtung und -lagerung sowie zur Befüllung von LKW-Trailern, die eine Versorgung der eigentlichen Tankstellenanlagen, von Industriebetrieben und sonstigen Kunden ermöglicht.

Zu weiteren Details des Energieparks Mainz sei an dieser Stelle auf die entsprechende Website (www.energiepark-mainz.de) verwiesen. Dort finden sich auch Hinweise zu entsprechenden Genehmigungsverfahren, Ansprechpartner sowie technische Beschreibungen der einzelnen Komponenten.



⁸⁰ https://www.m-r-n.com/neuigkeiten/2017/20171019-Regionalkonferenz%20Energie%20-%20Umwelt/F3_Aichinger_Mainz%20E-Park.pdf, abgerufen im Juni 2020.



Abb. 6-20 Gestaltung des Energieparks Mainz⁸¹ (Quelle: Energiepark Mainz)

Für eine Anwendung des im Energiepark Mainz verwendeten Konzepts eignet sich die Region um Schwerin sehr gut. So befinden sich südlich von Schwerin zwei größere Windparks bei Neu Zachun und Lübesse mit jeweils ca. 10 Windanlagen, die prinzipiell eine Speisung einer entsprechenden Elektrolyseanlage ähnlich jener im Energiepark Mainz ermöglichen würden (siehe Abb. 6-21). Für eine detaillierte Prüfung müssten allerdings die Eigentümer der Anlagen einbezogen werden, da diese dann entsprechende Einspeiserechte in das Landesnetz verlören.

⁸¹ https://www.energiepark-mainz.de/fileadmin/user_upload/energiepark-mainz-broschuere-2018, abgerufen Juni 2020.



Abb. 6-21 Erzeugungsanlagen erneuerbare Energien südlich von Schwerin⁸²

Neben den Windparks befinden sich im städtischen Industriepark Göhrener Tannen umfangreiche Photovoltaikanlagen zur Einspeisung in das Landesnetz. Auch eine solche Häufung von Anlagen kann zur Erzeugung von Wasserstoff genutzt werden, allerdings müssen dann für einen dauerhaften Betrieb mit entsprechender Ausstoßmenge und somit gesicherter Wirtschaftlichkeit für die Nachtstunden, insbesondere im Winter, alternative Quellen mit angebunden werden. Diese würden wiederum mit hoher Wahrscheinlichkeit aus den umliegenden Windanlagen kommen, jedoch über das öffentliche Übertragungsnetz übertragen werden müssen. Dies schränkt den Nutzen der Sektorenkopplung nach aktueller Rechtslage stark ein, da dann sämtliche Abgaben für die bezogene elektrische Energie abgeführt werden müssen.

Neben den vorhandenen Erzeugeranlagen im Industriepark spricht jedoch auch die grundsätzliche Widmung und Eignung eines Industriegebietes für die Errichtung einer entsprechenden Erzeugeranlage am Standort. Ggf. kann über die Neuerrichtung von Windkraftanlagen in unmittelbarer Umgebung eine Versorgung des Windparks auch in Zeiten ohne Sonnenschein überwiegend gewährleistet werden.

Für eine sichere Versorgung des Zugbetriebes sind zudem große Wasserstoffspeicher zur Pufferung von windschwachen Zeiten vorzusehen, die durch eine hohe Erzeugungsleistung in den windreichen Zeiten ausreichend gut gefüllt

⁸²Quelle: <https://www.flosm.de/html/Stromnetz.html>, bearbeitet durch Prof. EB, TU Dresden.

werden können. Alternativ kann das Elektrolysewerk auch aus dem Landesnetz bei Bedarf versorgt werden, wobei dann alle Umlagen anfallen und ggf. nicht erneuerbare Energie genutzt werden muss.

6.6.3 Elektrische Versorgung der Nachladestationen

Grundsätzlich eignet sich Mecklenburg-Vorpommern unter dem Gesichtspunkt der Nutzung erneuerbarer Energie für die Nachladestationen am besten von allen deutschen Bundesländern. Hintergrund ist, dass Mecklenburg-Vorpommern mehr als doppelt so viel Strom erneuerbar erzeugt, wie es selbst verbraucht.⁸³

Dies macht jeglichen bezogenen Bahnstrom sowohl aus der Oberleitung, für die die Energie in Nordostdeutschland dezentral aus dem Landesnetz bezogen und umgeformt wird, wie auch an dezentralen Ladestationen in Mecklenburg-Vorpommern besonders CO₂-arm, auch wenn dies bilanziell über Deutschland gerechnet noch nicht der Fall ist (siehe dazu Abschnitt 3.4).

Eine direkte Kopplung von Ladestationen an Windkraftparks oder Solarparks ist aufgrund des Lastverhaltens der Ladestation allerdings nicht möglich. Dort wird ggf. mehrmals pro Stunde aber immer nur für wenige Minuten eine sehr große Last von ca. 1,2 MW (bei mehreren Fahrzeugen entsprechend mehr) bezogen. Hierzu wird das Landesnetz als Puffer benötigt, das die hohen Leistungen kurzzeitig in der Mittelspannungsebene bereitstellen kann und in der Umgebung der Ladestationen maßgeblich aus Wind-, Biomasse und Solarkraftwerken gespeist wird, jedoch die entstehenden Leistungsspitzen großflächig über viele Erzeuger verteilt.

Nichtsdestotrotz sei in den folgenden Abbildungen jeweils die Situation der vorhandenen Erzeuger im Umkreis der Ladestationen gezeigt. Wird durch den Fahrzeug- bzw. Netzbetreiber erneuerbare Energie bestellt, so kommt diese aus physikalischen Gründen aus den nächstgelegenen Erzeugeranlagen (Widerstand der Zuleitung am geringsten), sofern diese leistungsfähig genug sind. Eine Einsparung der Abgaben durch Sektorenkopplung mit einzelnen Erzeugeranlagen ist hier jedoch nicht möglich. Soll erneuerbare Energie bezogen werden, so stellen sowohl die DB Energie, als auch andere Bahnstromlieferanten (z. B. Stadtwerke Tübingen) entsprechende „Ökostrom“-Tarife auch für Bahnstromkunden bereit. Dies muss jedoch vom Aufgabenträger explizit in Ausschreibungen gefordert werden, da die Betriebskosten höher werden.

⁸³ <https://www.zfk.de/energie/strom/artikel/oekostrom-produktion-weiter-kraeftig-gestiegen-besonders-windkraft-2018-10-15/>, abgerufen im Mai 2020.

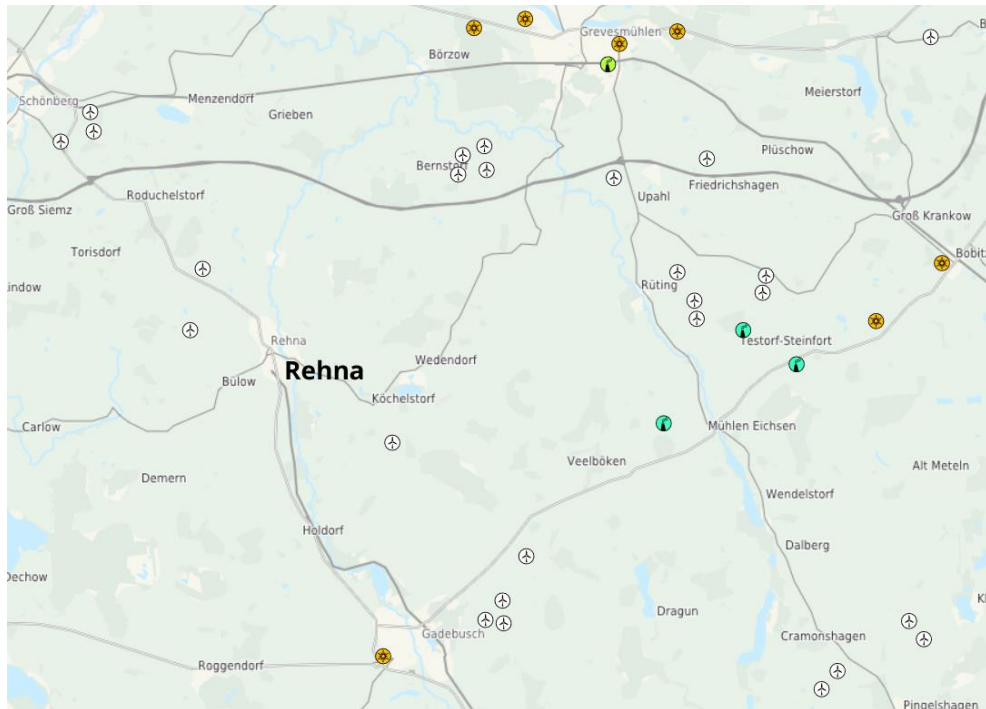


Abb. 6-22 Windparkanlagen rund um Rehna (weiße Symbole) sowie Photovoltaikanlagen (Sonnensymbole) und Biogasanlagen (grüne Symbole)⁸⁴

Die Ladestation in **Rehna** (siehe Abb. 6-22) ist in der weiteren Umgebung von mehr als 20 Windkraftanlagen umgeben, außerdem sind Biogasverbrennungsanlagen und Solarkraftwerke an der Erzeugung der benötigten elektrischen Energie beteiligt. Diese speisen überwiegend ins Mittelspannungsnetz (20 kV) ein, aus dem die geplante Ladestation die elektrische Energie wieder entnimmt.

Die geplante Ladestation am Bahnhof **Parchim** (siehe Abb. 6-23) kann ohne Einschränkung dem Windpark östlich der Ortslage Parchim zugeordnet werden, wobei auch hier die Nutzung des puffernden Mittelspannungsnetzes, welches auch bei Windstille genügend Leistung bereitstellen kann, notwendig ist.

⁸⁴Quelle: <https://www.flosm.de/html/Stromnetz.html>, bearbeitet durch Prof. EB, TU Dresden.

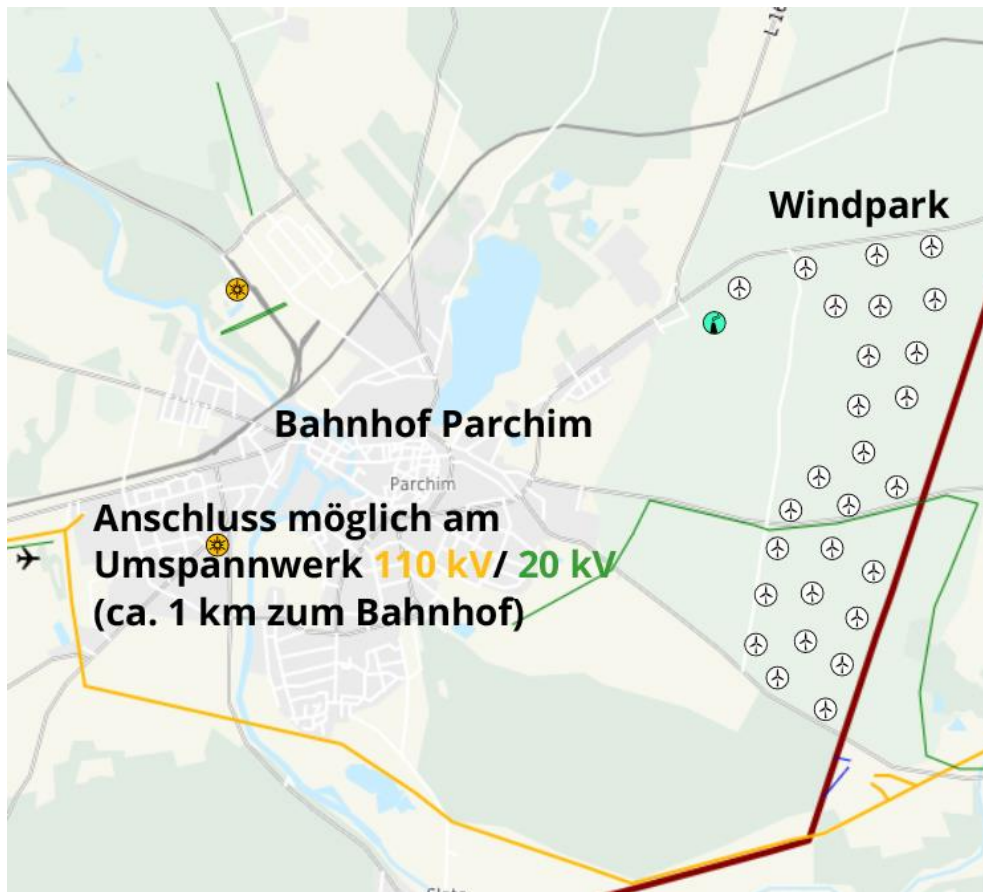


Abb. 6-23 Windparkanlage östlich der Ortslage Parchim⁸⁵

Aufgrund der Lage von **Prerow** (siehe Abb. 6-24) im Schutzgebiet der Halbinsel Zingst ist dort kaum Windenergieerzeugung vorhanden oder umsetzbar. Die nächstliegenden entsprechenden Erzeugeranlagen finden sich nahe der Ortslage von Barth. Trotzdem kann von umfangreicherer Nutzung von erneuerbarer Energie aufgrund des Mecklenburg-Vorpommerischen Strommixes ausgegangen werden, jedoch ohne direkte Zuordnungsmöglichkeit zu Windkraft- oder Photovoltaikanlagen.

Die verhältnismäßig selten genutzte Anlage in **Plau am See** (siehe Abb. 6-25) kann hingegen zwei nahe der Ortslage befindlichen Windparks zugeordnet werden. Auch hier gilt allerdings aus Gründen der Versorgungssicherheit in windstillen Zeiten, dass die Ladestation zwar physikalisch nahezu direkt immer aus den Windparks versorgt werden wird, jedoch ein Anschluss an das Landesnetz zu bevorzugen ist.

⁸⁵Quelle: <https://www.flosm.de/html/Stromnetz.html>, bearbeitet durch Prof. EB, TU Dresden.

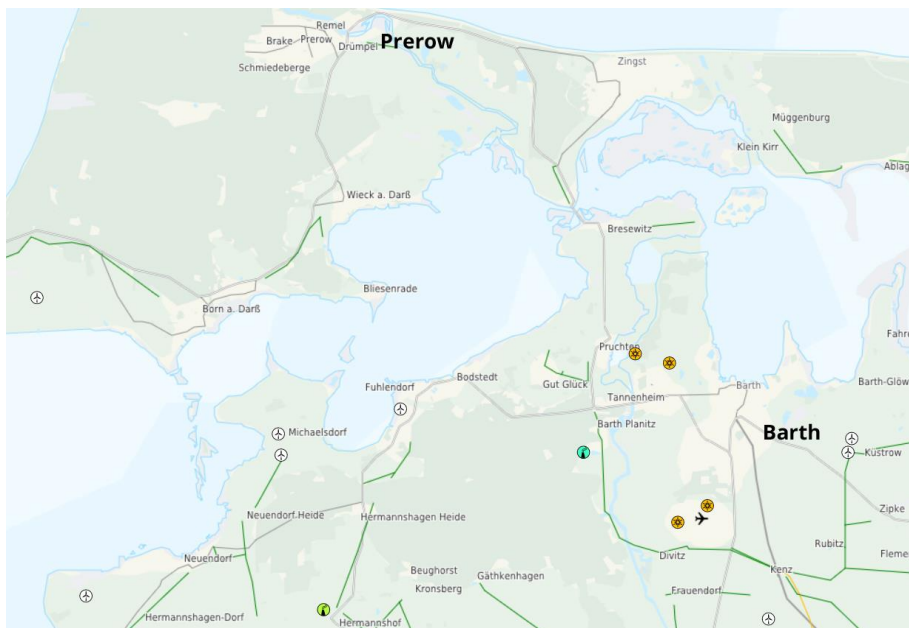


Abb. 6-24 Erzeugungsanlagen erneuerbarer Energien im Umkreis des Ortes Prerow⁸⁶

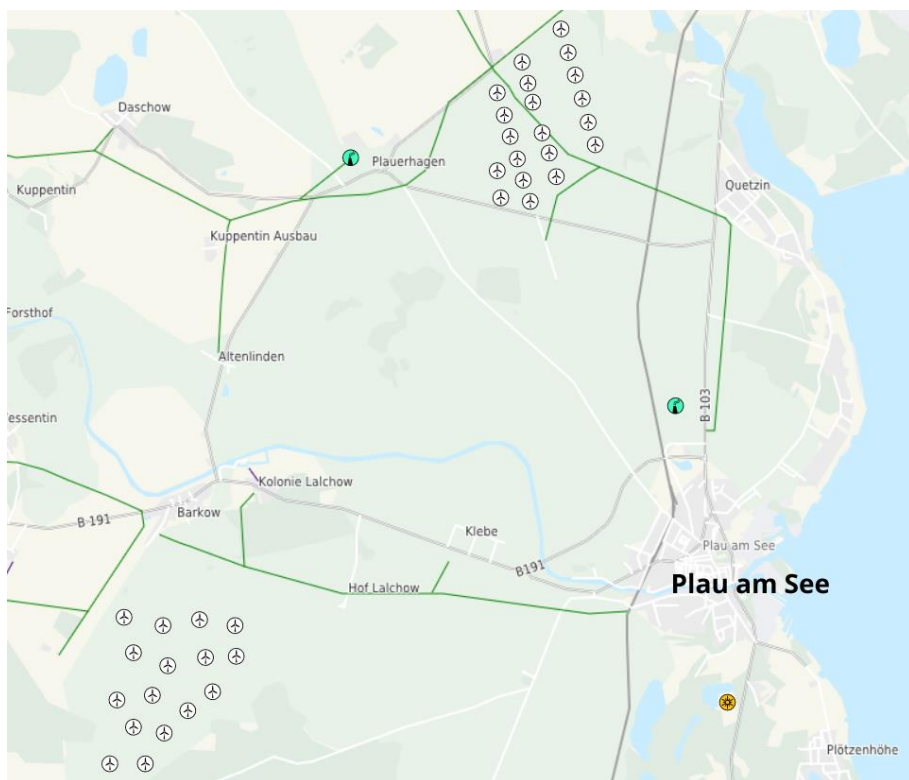


Abb. 6-25 Erzeugungsanlagen erneuerbarer Energien im Umkreis des Ortes Plau am See⁸⁶

⁸⁶Quelle: <https://www.flosm.de/html/Stromnetz.html>, bearbeitet durch Prof. EB, TU Dresden.

6.6.4 Zusammenfassung Sektorenkopplung

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Sektorenkopplung im Netz Westmecklenburg II vor allem durch eine Errichtung einer Elektrolyseanlage für die Wasserstoffproduktion umgesetzt werden kann. Neben der direkten Nutzung der vor Ort bereitgestellten erneuerbaren Energie, die eine grüne Wasserstoffversorgung sichern kann und so dem Urgedanken der Sektorenkopplung folgt, kann durch einen effizienten Betrieb der Anlage auch eine Versorgung von kommunalen Fahrzeugen (Müllabfuhr, Busse, Bauhoffahrzeuge etc.) mit angeschlossen werden. Dies erweitert den Absatzmarkt des Wasserstoffs erheblich und erhöht die Wirtschaftlichkeit einer solchen Anlage. Da die Erzeugungs- und Betankungsanlagen sehr preisintensiv sind, ist dies die Basis für eine wirtschaftliche Nutzung der Sektorenkopplung zwischen der Wind- und Solarenergiebranche und dem Schienenverkehr als möglicher Nutzer der Wasserstofftechnologie.

Für die Darßbahn bietet sich eine solche Sektorenkopplung nur als Juniorpartner an, da die Verbrauchsmengen dort erheblich geringer sind als im Netz Westmecklenburg II. Ggf. kann jedoch die Anlage in Schwerin auch zur Versorgung der Darßbahn mittels LKW-Transport unter perspektivischer Nutzung von zur Zeit in der Entwicklung befindlichen Wasserstoff-LKW genutzt werden und so einen CO₂-neutralen Betrieb auf der Darßbahn ermöglichen.

Zur Nachladung von Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeugen ist eine direkte Sektorenkopplung unter Nutzung der wirtschaftlichen Vorteile einer direkten elektrischen Verbindung von Erzeugung und Verbraucher ohne die Nutzung öffentlicher Netze nicht möglich, da die Lastcharakteristik der ladenden Züge hierfür nicht geeignet ist.

Jedoch ist Mecklenburg-Vorpommern einer der Spitzenreiter in der Erzeugung erneuerbarer Energie in Deutschland und exportiert sogar große Mengen in andere Bundesländer. Diese vorhandene Infrastruktur kann zielgerichtet auch zur Versorgung von Schienenwegen verwendet werden, da sich durch die räumliche Nähe ohnehin eine Anbindung an dieselbe Mittelspannungsversorgung anbietet, in die die Windkraft- und Photovoltaikanlagen einspeisen.

7 Wirtschaftliche Betrachtung

7.1 Ermittlung aller Einzelkosten

7.1.1 Übersicht der betrachteten Kostenpositionen

Um der Komplexität der untersuchten Antriebssysteme gerecht zu werden ist es nötig, Kostenpositionen vergleichbar und zugleich zugeschnitten auf das Antriebssystem zu bilden. In den Abb. 7-1 und Abb. 7-2 sind die Kostenstrukturen schematisch anhand der DIN 60300 dargestellt⁸⁷. Jede Kostenposition, die keine jährlichen auftretenden Kosten verursacht, wird mit Hilfe eines Intervallindikators zeitbasiert betrachtet. Beispielsweise sind die Anschaffungskosten des Fuhrparks zu Beginn der Betrachtung zu entrichten und wiederkehrend mit dem Erreichen der Fahrzeuglebensdauer. Somit ist die Lebensdauer des Fahrzeugs der Intervallindikator. Die jeweiligen Kostenpositionen und Intervallindikatoren sind in Tabelle 7-1 aufgeführt. Es können so auch erst später hinzukommende Veränderungen, wie beispielsweise der Zubau weiterer elektrifizierter Abschnitte auf einem Linienweg, berücksichtigt werden.

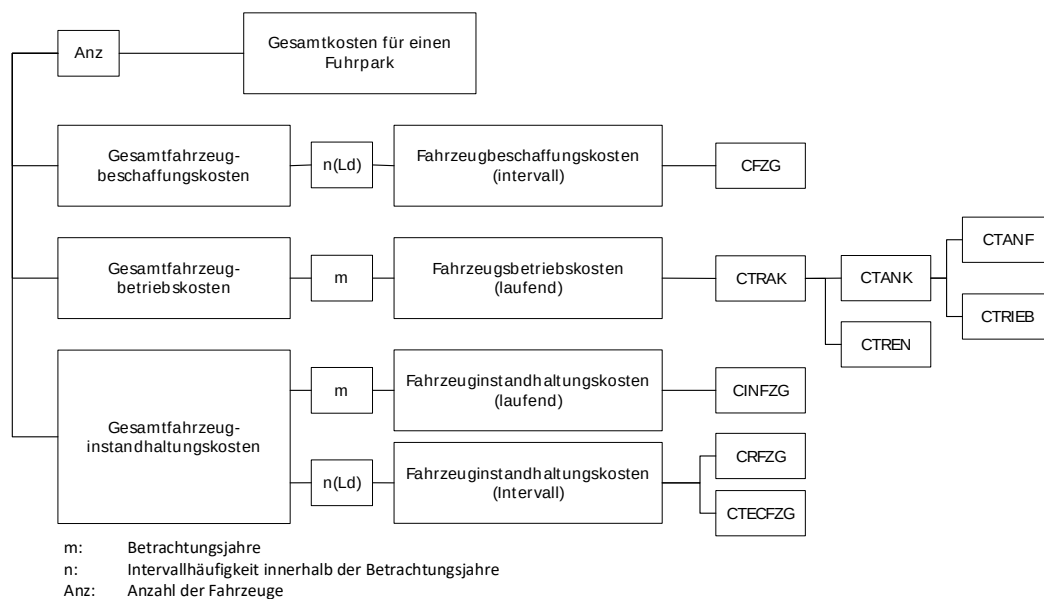


Abb. 7-1 Fahrzeugkostenstruktur

⁸⁷ DIN EN 60300-3-3: Zuverlässigkeitsmanagement-Teil 3-3: Anwendungsleitfaden-Lebenszykluskosten, 2014.

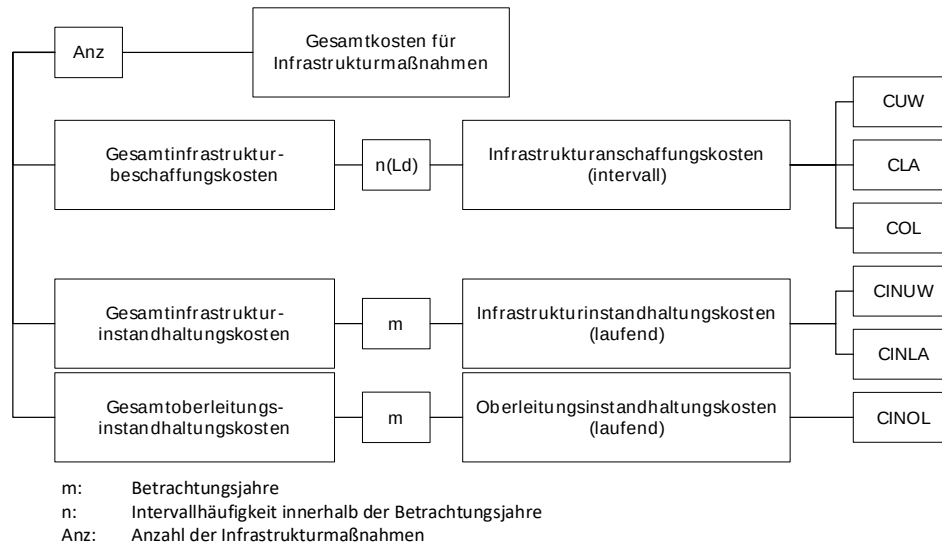


Abb. 7-2 Infrastrukturkostenstruktur

Tabelle 7-1 Parameter der Kostenpositionen

Kostenposition	Intervallindikator	Abkürzung
Fahrzeuganschaffung [€]	Lebensdauer	CFZG
Fahrzeuginstandhaltung [€/km]	-	CINFZG
Traktionskosten [€]	-	CTRAK
Tankkosten [€]	-	CTANK
Tankfahrt [-]	-	CTANF
Triebfahrzeugführer [€/h]	-	CTRIEB
Traktionsenergie [€/kWh, €/l, €/kg]	-	CTREN
Fahrzeugrevision [€]	Revisionsintervall	CRFZG
Technologieaustausch [€,€/kWh]	Lebensdauer/Laufleistung	CTECFZG
Unterwerkanschaffung [€]	Lebensdauer	CUW
Ladestationsanschaffung [€]	Lebensdauer	CLA
Oberleitungsanschaffung [€]	Lebensdauer	COL
Unterwerksinstandhaltung [€/a]	-	CINUW
Ladestationsinstandhaltung [€/a]	-	CINLA
Oberleitungsinstandhaltung [€/a/km]	-	CINOL

7.1.2 Antriebsspezifische Kosten Fahrzeuge und Betrieb

7.1.2.1 Beschaffungskosten

Tabelle 7-2 führt die Beschaffungskosten nach den betrachteten Antriebssystemen auf. Dabei sind in Abstimmung mit dem Aufgabenträger vergleichbare Fahrzeuggrößen für alle Technologien mit ca. 110 – 125 Sitzplätzen zugrunde gelegt.

Die angegebenen Werte entstammen der Datenbasis der Professur für Elektrische Bahnen, die u. a. durch Auswertungen von Fahrzeugbeschaffungen der vergangenen Jahre im gesamten Bundesgebiet und Kontakte zu Herstellern gewonnen wurden. Die Fahrzeuganschaffungskosten wurden dabei auf das Erstellungsjahr der Studie bezogen. Dabei wurden potenzielle Förderungen einzelner Fahrzeuge nicht berücksichtigt.

Tabelle 7-2 Kostensätze zur Berechnung Fahrzeugkostenanteile für verschiedene Antriebskonzepte

Technologie	Elektrotriebzug	Dieselttriebzug	Oberleitungs-/ Batterie-Hybrid mit größerem Speicher (450 kWh)	Oberleitungs-/ Batterie-Hybrid mit kleinerem Speicher (600 kWh)	Oberleitungs-/ Diesel-Hybrid	Wasserstoff-/ Batterie-Hybrid
Fahrzeugbeschaffung [Mio. €]	4,7	4,3	5,3	5,45	6,2	5,4
Instandhaltung pro Fahrzeug [€/km]	0,47	0,65	0,51	0,51	0,74	0,59
Fahrzeugrevision bei HU [T€]	231	248	248	248	281	265
Austausch der PowerPacks [T€]	-	160	-	-	160	-
Austausch der Traktionsbatterien [T€]	-	-	450	600	-	170
Austausch der Brennstoffzellen [T€]	-	-	-	-	-	150

Die Höhe der Beschaffungskosten sowie Anteile der Kosten für die Instandhaltung richten sich maßgeblich nach der Anzahl der zu beschaffenden Fahrzeuge, da hier Skaleneffekte erzielt werden. Als Basis der Untersuchung wurde deshalb für das gesamte Netz eine einheitliche Antriebstechnologie angesetzt. Mehrere Technologien im Netz führen zu höheren Kosten. Eine einheitliche Fahrzeugflotte sichert eine erhöhte Wirtschaftlichkeit und die Flexibilität des

Betriebs unabhängig der Technologie. Die oben angegebenen Kosten referenzieren deshalb auf das Gesamtvolumen (9 - 10 im Netz Westmecklenburg II bzw. 12 - 13 Fahrzeuge inkl. Darßbahn) der im Netz benötigten Fahrzeuge.

7.1.2.2 Laufende Instandhaltungskosten

Die laufenden Instandhaltungskosten bilden die betriebsnahe Instandhaltung (Inspektion, Wartung, planmäßige und außerplanmäßige Instandsetzung) ab. Die angegebenen Werte entstammen der Datenbasis der Professur für Elektrische Bahnen, die u. a. durch Auswertungen von Instandhaltungsaufwendungen mehrerer Betreiber gewonnen wurden. Für neue Hybridtechnologien wie Oberleitungs-/Batterie-Hybrid und Wasserstoff-/Batterie-Hybrid wurden Prognosen auf Basis bestehender Fahrzeugkonzepte erweitert um die jeweiligen zusätzlichen Komponenten erstellt.

7.1.2.3 Revisionskosten für Hauptuntersuchung (HU)

Für die Revisionskosten, die alle acht Jahre im Zuge der Hauptuntersuchung anfallen, liegen der Professur für Elektrische Bahnen Kostensätze von Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) vor. Die Hauptuntersuchungskosten eines Dieselmotortriebzuges der im Netz angenommenen Größe belaufen sich auf ca. 248.000 € und sind damit ca. 17.000 € teurer als bei einem Elektrotriebzug. Aufgrund der unzureichenden Datenlage und Felderfahrung für die Hybridsysteme werden Vereinfachungen getroffen. Es wird davon ausgegangen, dass der Oberleitungs-/Batterie-Hybrid ca. 7,5 % höhere Revisionskosten verursacht wie ein Elektrotriebzug, da die zusätzlichen Aufwendungen für den Batterieteil in den zyklischen Tauschkosten abgebildet sind, jedoch zusätzliche Stromrichter, Kühler etc. vorhanden sind. Für Wasserstoff-/Batterie-Hybride werden aufgrund der vorhandenen Druckbehälter und ihrer Prüfung ca. 15 % höhere Kosten angesetzt. Für Dual-Mode-Fahrzeuge ergeben sich ca. 25 % höhere Kosten durch die für den Dieselantrieb zusätzlich benötigten Anlagen (Kraftstofftanks, PowerPack-Demontagen etc. im Fahrzeug) und die bei der gewählten Fahrzeuggröße auch erheblich größere Gefäßgröße (ca. 56 m Länge gegenüber 41 – 46 m Länge anderer Technologien) zur Unterbringung aller Komponenten.

7.1.2.4 Kostensätze für den Austausch von Technologiekomponenten

PowerPacks

Erfahrungen von EVU zeigen, dass die Aufarbeitung **eines** Power Packs ca. 80.000 € kostet. Der Tausch erfolgt abhängig von der Fahrzeug-Laufleistung nach ca. 480.000 km. Vergleichend mit den Traktionsenergiekosten richtet sich das Austauschintervall nach dem Antriebssystem und den Infrastrukturegegebenheiten. Daher ist das Tauschintervall des verbliebenen PowerPacks eines

Oberleitungs-/Diesel-Hybrid, abhängig von der Oberleitungsnutzung, größer als das eines herkömmlichen Dieselfahrzeuges.

Traktionsbatterien

Lithium-Ionen-Zellen aller Technologien (siehe auch Abschnitt 3.3.3) altern je nach Betriebsverfahren sowie betrieblichen Anforderungen und Belastungen schneller oder langsamer. Vier Größen sind dafür maßgeblich:

- Anzahl der Lade- und Entladezyklen (enthalten darin sind Voll- und Teilzyklen)
- Entladetiefe der Batterie (DoD – Depth of Discharge; Anteil des gespeicherten Energieinhalts, der beim Entladen regelmäßig im Betrieb entnommen wird)
- Temperatur in der Zelle (konstant im optimalen Bereich oder ständig wechselnd)
- Entnommene Leistung bzw. Stromhöhe in der Zelle (wirkt v. a. auf Temperatur)

Hinzu kommt die kalendarische Alterung der Zellen. Jede dieser Größen wirkt sich bei unterschiedlichen Batterie- und Antriebstechnologien mehr oder weniger stark auf deren Lebensdauerverhalten aus. Im Hinblick auf den Umfang dieser Studie können deshalb nur qualifizierte Abschätzungen getroffen werden. Basis für die Abschätzung ist die Annahme, dass alle Fahrzeuge des Netzes eine Batterie mit gleichem Energieinhalt besitzen, auch wenn auf manchen Linien geringere Batteriegrößen ausreichend wären. Ziel ist, die hohe betriebliche Flexibilität zum Tausch der Fahrzeuge zwischen den Linien zu erhalten.

Nach Daten der Professur für Elektrische Bahnen müssen spezifische Kosten von ca. 1.000 €/kWh bei der Neuanschaffung einer Lithium-Ionen-NMC-Batterie angenommen werden. Dies führt zu hohen zyklisch anfallenden Kosten des Batterietauschs, sodass dessen Häufigkeit eine hohe Bedeutung bei wirtschaftlichen Analysen zukommt. Die Herausforderung besteht darin, die Lebensdauer der Batterien für die verschiedenen Antriebssysteme abzuschätzen. Diese liegt immer deutlich unterhalb der Fahrzeuglebensdauer.

Der **Oberleitungs-/Batterie-Hybrid** besitzt für diese Untersuchung einen NMC-Energiespeicher in zwei Varianten: mit kleinerem Speicher beträgt der Nenn-Energiegehalt der Batterie ca. 450 kWh, mit größerem Speicher beträgt er ca. 600 kWh. Das führt im Hinblick auf die spezifischen Batteriekosten zu hohen Austauschkosten für die Batterie. Aufgrund dessen muss eine Lebensdauerdifferenzierung anhand der Belastung durchgeführt werden. Die Batterie entlädt sich entsprechend der durch die Strecke hervorgerufenen Belastung verschieden tief und wird im Zielbahnhof oder an Lademöglichkeiten entlang der Strecke wieder vollständig aufgeladen. Jede Batterie besitzt eine Zyklenfestigkeit, die vom Hersteller angegeben wird. Diese ist wiederum abhängig vom sogenannten „depth of discharge“ (DoD). Der DoD gibt das Verhältnis der Entladetiefe zur Gesamtkapazität der Batterie an. So ist es möglich, bei einer bestimmten Entla-

detiefe die Anzahl der verfügbaren Zyklen zu bestimmen. Daraus folgend kann die Lebensdauer berechnet werden. Die in der Studie verwendete Zyklenfestigkeit unterliegt folgender Formel und orientiert sich an aktuell für den Kraftfahrzeugbereich (voraussichtlich auch für Bahnmarkt bis Vertragsstart verfügbar) nach Daten der Professur für Elektrische Bahnen am Markt verfügbaren NMC-Zellen⁸⁸:

$$N = 4699 \cdot DoD^{-1,38} \quad \text{Gl. (7-1)}$$

Tabelle 7-3 Parameter der Zyklenfestigkeit

Parameter	Bezeichnung	Einheit
N	Zyklenanzahl	–
DoD	depth of discharge (Entladetiefe)	%

Die zyklische Belastung der Batterie ist präzise nur durch eine exakte Simulation des Fahrspiels zu ermitteln. Dies würde den Rahmen dieser Untersuchung überschreiten. Jedoch können basierend auf früheren Simulationen an der Professur für Elektrische Bahnen belastbare Annahmen zu den Zyklenzahlen im Netz Westmecklenburg II bzw. auf der Darßbahn linienspezifisch getroffen werden. Die Zyklenfestigkeiten weichen zwischen den verschiedenen Batterie-Herstellern ab, anhand der gewählten Annahmen lassen sich jedoch durch Studien plausibilisierte Lebensdauern berechnen. Diese werden anschließend für die LCC-Analyse umgesetzt.

Die Tabelle 7-4 zeigt die Intervallindikatoren und die Lebensdauern der untersuchten Technologien.

Der **Wasserstoff-/Batterie-Hybrid** besitzt einen Energiespeicher zur Pufferung der von der Brennstoffzelle abgegebenen Energie zur Deckung von Lastspitzen, zur Aufnahme von Bremsenergie sowie zur kontinuierlichen Belastung der Brennstoffzelle auch bei geringem Traktionsleistungsbedarf. Die Lebensdauer wird durch das Lastmanagement des Fahrzeugs determiniert und von einem Hersteller mit ca. 10 Jahren angegeben.

Brennstoffzelle

Die Brennstoffzelle verfügt über eine Protonaustauschmembran (PEM) und andere Komponenten, die einer Alterung unterliegen. Die Lebensdauer dieser Komponenten wird in Betriebsstunden der Brennstoffzelle angegeben und liegt nach Herstellerangaben bei ca. 15 000 Stunden. Dies entspricht einer Fahr-

⁸⁸ Melzer, Dr.-Ing Michael: Dissertation - Entwicklung von Werkzeugen zur automatisierten Traktionsspeicherdimensionierung auf dieselelektrisch angetriebenen Schienenfahrzeugen, TU Dresden 2014.

zeugbetriebsdauer von ca. 20 000 Betriebsstunden, was ca. drei bis fünf Jahren entspricht.

Tabelle 7-4 Intervallindikatoren der Fahrzeugkosten

Intervallindikator	Elektrotriebzug	Dieselttriebzug	Oberleitungs-/ Batterie-Hybrid	Oberleitungs-/ Diesel-Hybrid	Wasserstoff-/ Batterie-Hybrid
Fahrzeuglebensdauer [a]	35	35	35	35	35
Instandhaltungsintervall (betriebsnahe IH) [a]	1	1	1	1	1
Fahrzeugrevisionsintervall [a]	8	8	8	8	8
Laufleistung des Power Packs [T km]	-	480	-	480**	-
Batterielebensdauer	-	-	5–9*	-	10
Betriebsstunden Brennstoffzellen Stack [h]	-	-	-	-	15.000***

* je nach Linie bzw. Fahrzeugkilometer und sich daraus ergebender Belastung der Batterie

** km werden nur gerechnet, wenn das Fahrzeug im Dieseltbetrieb verkehrt

*** entspricht ca. ⅓ der in der Lebensdauer gelegenen Fahrzeugbetriebsstunden

7.1.2.5 Einfluss der Batteriealterung beim Oberleitungs-/Batterie-Hybrid auf die Kostenbetrachtung

Die auf Basis der zu erwartenden Vollzyklenanzahl je Linie variierend angesetzten Lebensdauern bei Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeugen für eine 600-kWh-NMC-Batterie je Fahrzeug ergeben im Mittelwert der Linien 7-8 a Lebensdauer, für 450-kWh-NMC-Batterie ca. 5 - 6 a Lebensdauer. Grundlage ist ein freizügiger Einsatz der Fahrzeuge auf allen Linien im Netz (umlaufbedingt gegeben). Die Lebensdauer kann jedoch bei Zellen mit LTO- bzw. LFP-Technologie stark abweichen. Im Optimalfall sollte aus Gründen des Skaleneffekts auch die Beschaffung für die Darßbahn und das Netz Westmecklenburg II gemeinsam erfolgen. Dies senkt die Kosten und schafft einen gemeinsamen Reservepark.

Insbesondere die jeweils sehr unterschiedlichen Lebensdauern und Invest- bzw. Reinvestkosten der Batterie-Technologien wirken sich stark auf die wirtschaftliche Vorteilhaftigkeit der einzelnen Batterie-Technologien bei unterschiedlichen Betrachtungszeiträumen aus. Für die Gesamtbewertung in einem

Ausschreibungsverfahren wird es so notwendig, dass die Restbetriebsdauern der Batterien nach Verkehrsvertragsauslauf mit in die Bewertung einbezogen werden. Dies ist zielführend, da die Betrachtungszeiträume einer Wirtschaftlichkeitsrechnung und die gewählte Verkehrsvertragslaufzeit meist abweichend von der Lebensdauer (oder einem Vielfachen davon) der Batterien bestimmter Technologie sind. Steht bei einer Batterie-Technologie kurz vor Ende des Verkehrsvertrages eine Neubeschaffung an, so würde diese rechnerisch bei Außerachtlassung des Restwertes deutlich höhere Kosten verursachen, als eine Batterie, die passend zum Vertragsende ihr Nutzungsdauerende erreicht. Sinnvoll kann hier eine Wiedereinsatzgarantie für die Fahrzeuge im Zielnetz oder die Betrachtung der Restwerte der Batterien auf dem Fahrzeug sein, die dann in die Kostenrechnung als Einzahlung einfließen können. Es wird so die Weiternutzbarkeit des Fahrzeugs bzw. der Komponente Batterie mitberücksichtigt. Auch eine Planung zum Einsatz der Fahrzeuge im Gesamtnetz für die Fahrzeuglebensdauer und eine entsprechende Auslegung der Kostenkalkulation stellt dies sicher.

7.1.2.6 Traktionskosten

Grundsätzlich setzen sich die Traktionskosten aus Traktionsenergie- und Tankkosten zusammen.

Die Betrachtung der **Traktionsenergiekosten** erfolgt antriebspezifisch. Die Linie unterteilt sich hinsichtlich der vorhandenen Infrastrukturen und örtlichen Begebenheiten, wie in Abb. 7-3 gezeigt, in elektrifizierte (L1) und nicht elektrifizierte (L2) Abschnitte. Je nach betrachtetem System und Streckenabschnitt unterscheidet sich der Energiebedarfswert. Dementsprechend variieren die Traktionsenergiekosten. Die Gesamttraktionsenergiekosten (vgl. Gl. (7-2)) setzen sich dabei aus den einzeln berechneten Traktionsenergiekosten der in den unterschiedlichen Betriebsarten (Dieselbetrieb, Oberleitungsbetrieb, Batteriebetrieb, Wasserstoff-/Batterie-Hybridbetrieb) je Technologie befahrenen Linienabschnitte zusammen.

Unterschieden werden elektrifizierte und nicht elektrifizierte Abschnitte. Die Traktionsenergiekosten des Oberleitungs-/Batterie-Hybrids für im Batteriebetrieb befahrene Abschnitte teilen sich entsprechend der Anteile der nachgeladenen Energie aus der Oberleitung bzw. aus Ladestationen auf. Für Wasserstoff-/Batterie-Hybride werden für die gesamte Linie einheitliche Traktionsenergiekosten angesetzt.

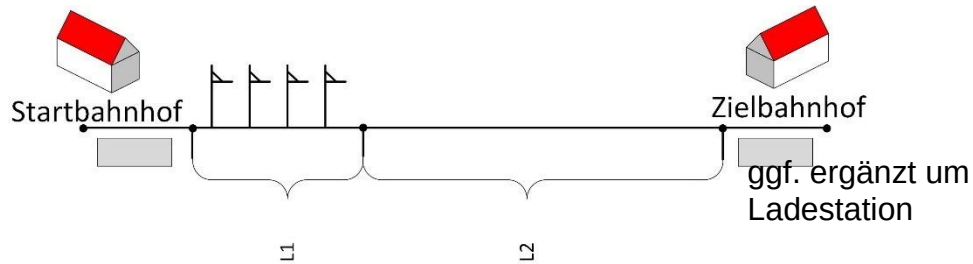


Abb. 7-3 Streckeneinteilung (Beispiel)

$$Kost_{energie} = \frac{Fzg_{km}}{L_{Str}} \cdot \sum Kost_{energie}(Antrieb, L_x) \quad \text{Gl. (7-2)}$$

$$Kost_{energie(Antrieb)} = ver_{Fzg} \cdot preis_{energie} \cdot L_x \quad \text{Gl. (7-3)}$$

Tabelle 7-5 Parameter der Traktionsenergieberechnung

Parameter	Bezeichnung	Einheit
$Kost_{energie}$	Traktionsenergiekosten	€/a
ver_{Fzg}	antriebsspezifischer Energiebedarf	$\frac{Wh}{km}, \frac{l}{km}, \frac{kg}{km}$
$preis_{energie}$	antriebsspezifischer Energiepreis	$\frac{€}{l}, \frac{€}{kg}, \frac{€}{kWh}$
L_{Str}	Gesamtlinienlänge	km
Fzg_{km}	Fahrzeugkilometer	km/a
L_x	Streckenabschnitt	km

Sind die Traktionsenergiekosten für eine einzelne Fahrt bestimmt, werden diese mit der Befahrungshäufigkeit der Linie (vgl. Gl. (7-3)) pro Jahr und Fahrzeug multipliziert. Es ergeben sich die Gesamttraktionsenergiekosten je Technologie und Jahr.

Aufgrund der an der Professur Elektrische Bahnen vorliegenden Energiebedarfswerte für Elektrotriebzüge in unterschiedlichen Einsatzfällen und Topologien können die Energiebedarfswerte der anderen Technologien über statische Wirkungsgradketten auch für die charakteristische Topologie der Strecken in Mecklenburg-Vorpommern hinreichend genau bestimmt werden.

Der angesetzte Referenzwert für den Energiebedarf spiegelt auf den einzelnen Linien einen Regionalbahnverkehr wieder, d.h. kurze Haltestellenabstände mit

hohen Beschleunigungswerten und steigungsreicher Topologie. Der Energiebedarf bei Fahrt unter Oberleitung wird mit dem spezifischen Referenzbedarfs-
wert des Elektrotriebzuges angesetzt.

Für Fahrten im Batteriebetrieb wird anhand der Wirkungsgradkette des Batterie-
stranges mit einem Aufschlag von ca. 10 % gerechnet. Aufgrund der nicht
exakt bestimm-
baren Aufteilung zwischen Oberleitungsladung und Ladung an
der Ladestation wird angesetzt, dass die Batterie zu 50 % aus dem Bahnstrom-
netz und zu 50 % aus dem öffentlichen Netz geladen wird, wenn an einem En-
de eine klassische Oberleitung und entlang der Linie eine Ladestation zur Ver-
fügung steht. Steht an keinem Ende eine Oberleitung zur Verfügung, wird die
Ladung zu 100 % an einer Ladestation aus dem öffentlichen Netz angesetzt.
Bei ausschließlicher Ladung aus der Oberleitung entsprechend 100 % Bahns-
trompreise.

Der Quotient der Wirkungsgrade von Elektro- und Dieseltriebwagen ergibt einen
Faktor von ca. 2,7, mit dem der Referenzbedarfs-
wert des Elektrotriebzuges für
alle Dieselbetriebe beaufschlagt wird. Da es einem Dieseltriebzug nicht möglich
ist Energie zu rekuperieren, wird darüber hinaus eine Erhöhung des Energiebe-
darfs um weitere 30 % unterstellt.

Die genannten und hergeleiteten Werte sind in der Tabelle 7-6 dargestellt.

Tabelle 7-6 Angesetzte Größen zur Traktionsenergiekostenberechnung

Bezeichnung	Wert	Einheit
Energiebedarf Elektrotriebzug	ca. 34	Wh/tkm
Energiebedarf Wasserstoff-/ Batterie-Hybrid	0,16	kg/km
Bahnstrompreis	0,12	€/kWh
öffentlicher Strompreis	0,20	€/kWh
Dieselpreis	1,00	€/l
Wasserstoffpreis inkl. Transport zur Tankstelle	5,00	€/kg

Die **Tankkosten** sind in Tankfahrt- und Triebfahrzeugführerkosten (vgl. Gl. (7-4)
und Gl. (7-5)) untergliedert.

$$Kost_{trak} = Kost_{energie} + Kost_{tank} \quad \text{Gl. (7-4)}$$

$$Kost_{tank} = Kost_{Fahrt} + Kost_{Tf} \quad \text{Gl. (7-5)}$$

Die **Tankfahrtkosten** berücksichtigen die zusätzlichen Kosten, die durch die
Fahrt zur Tankinfrastruktur entstehen. Die Ermittlung erfolgt anhand des spezi-
fischen Verbrauchs des jeweiligen Antriebssystems. Der Professur für Elektri-

sche Bahnen liegen Daten von EVU vor, aus denen hervorgeht, dass für Tankfahrten von Dieselfahrzeugen ein Mehraufwand von 3 % hinsichtlich der gefahrenen Gesamtkilometer berücksichtigt werden muss. Auf dieser Grundlage werden alle kraftstoffbenötigenden Systeme (Diesel und aufgrund ähnlicher Reichweiten und Tankzeiten auch Wasserstoff) mit diesem Mehraufwand, in Bezug auf die mit diesem Kraftstoff zusätzlich zurückgelegte Strecke, beaufschlagt. Des Weiteren zählen zu den Tankkosten auch die **Triebfahrzeugführerkosten**. Diese Kostenposition berücksichtigt ausschließlich den zeitlichen Mehraufwand, den ein Triebfahrzeugführer benötigt, um die Tankfahrt und den Tankvorgang zu bewältigen. Die Triebfahrzeugführerkosten werden wie folgt ermittelt:

$$Kost_{Tf} = Lohn_{Tf} \cdot Anz_{tank} \cdot zeit_{tank} \cdot zeit_{fzg_{nutz}} \quad \text{Gl. (7-6)}$$

Tabelle 7-7 Parameter zur Berechnung der Triebfahrzeugführerkosten

Parameter	Bezeichnung	Einheit
$Lohn_{Tf}$	Lohn des Triebfahrzeugführers	€/h
Anz_{tank}	Anzahl der Tankvorgänge	1/7d
$zeit_{tank}$	Tankdauer	h
$zeit_{fzg_{nutz}}$	Fahrzeugnutzungsdauer	d/a

Laut der Eisenbahn- und Verkehrsgewerkschaft sind 30 €/h für einen Triebfahrzeugführer inkl. Lohnnebenkosten (ohne Nacht- oder Wochenendzuschläge), zu berücksichtigen. Für den gesamten Tankvorgang inklusive Fahrzeugzuführung wird eine Stunde veranschlagt. Abhängig von der Reichweite des Antriebssystems und der Betriebsbedingungen variiert die Anzahl der Tankvorgänge pro Woche je nach Linie.

7.1.2.7 Wasserstoffpreis

Der Wasserstoffpreis muss ca. 5 €/kg zur Erreichung äquivalenter Traktionsenergiekosten zum Dieserverkehr betragen. Diese Angabe gilt unter Berücksichtigung einer überschlägigen Wirkungsgradkette. Angaben von Herstellern, die der Professur für Elektrische Bahnen vorliegen, ergeben bei nicht klimaneutraler Herstellung aktuell (Chlor-Alkali-Elektrolyse) 5,50 – 6,00 €/kg und bei äquivalentem Einkauf von CO₂-Zertifikaten ca. 6,00 – 6,50 €/kg.

Für diese Studie wurden 5,00 €/kg Wasserstoffkosten angenommen. Aktuelle Wasserstoffkosten im Kfz-Bereich liegen demgegenüber bei etwa 9 €/kg.

Das Verhältnis wird sich durch die Einführung der CO₂-Bepreisung je nach Erzeugungspfad des Wasserstoffs nochmals verschieben, wobei eine klimaneutrale Wasserstoffherzeugung höhere Wasserstoffkosten ermöglicht. Am Beispiel der Bus-Wasserstofftankstelle Wiesbaden liegt der klimaneutrale Bezugspreis aus Wasser-Elektrolyse bei ca. 7,00 €/kg⁸⁹.

7.1.3 Infrastrukturkosten

Die Infrastrukturkosten ergeben sich aus den Streckengegebenheiten und den erforderlichen Infrastrukturmaßnahmen für das jeweilige System.

7.1.3.1 Tankstellenkosten

Die betrachteten Technologien Dieselfahrzeuge, Oberleitungs-/Diesel-Hybrid sowie Wasserstoff-/Batterie-Hybrid benötigen Tankstellen zur Kraftstoffversorgung. Die Kostensätze und Intervallindikatoren sind in Tabelle 7-8 angegeben. Die angeführten Kosten ergeben sich aus Daten der Professur für Elektrische Bahnen.

Für das Wasserstoff-/Batterie-Hybridfahrzeug wird eine Tankstelle für das betrachtete Netz Westmecklenburg II angesetzt. Es werden zwei Varianten untersucht: Eine umfasst lediglich die Kosten für eine Tankstelle zur Befüllung der Züge zu einem Kostensatz von ca. 3 Millionen Euro (Referenz Wasserstofftankstelle für Busse in Wiesbaden für 2,7 Mio. Euro + eine Reserve für die bahntechnische Zulassung). Die Kosten werden anteilig auf die Linien RB 13 und RB 14 aufgeteilt.

Andererseits wird eine Variante untersucht, bei der auch die Erzeugeranlage ähnlich der Anlage im Energiepark Mainz (Kosten ca. 17 Mio. Euro) als durch den Verkehrsvertrag zu tragen angenommen wird. Die Kosten werden anteilig auf die Linien RB 13 und RB 14 aufgeteilt.

Anhand der aktuellen Situation im Netz wird davon ausgegangen, dass die vorhandenen zwei Dieseltankstellen erhalten bleiben, die im Reinvest anteilig auf die Linien umgelegt werden. Da das Alter der bestehenden Dieseltankstellen nicht bekannt ist, wurde für die LCC-Betrachtung von einer Neuerrichtung zu Vertragsstart ausgegangen.

⁸⁹ <https://www.hessenschau.de/wirtschaft/wasserstoff-tankstelle-eroeffnet---kundschaft-gibt-es-keine,wasserstofftankstelle-wiesbaden-100.html>, abgerufen im Mai 2020.

Tabelle 7-8 Kostensätze und Intervallindikator für Tankstellen

Bezeichnung	Wasserstoff Variante 1	Wasserstoff Variante 2	Diesel	Einheit
Investitionskosten	3.000.000	17.000.000	350.000	€
Reinvestitionskosten	3.000.000	17.000.000	350.000	€
Betriebskosten	15.000	85.000	20.000	€/a
Lebensdauer	35	35	25	a
Abschreibungszeitraum	20	20	15	a
Anzahl	je 1 (Stralsund / Schwerin → wird Fahrzeugkilometerabhängig auf RB 13 & RB 14 aufgeteilt)	1 in Schwerin: (wird Fahrzeugkilometerabhängig auf RB 13 & RB 14 aufgeteilt)	1 Parchim 1 Stralsund	-

7.1.3.2 Kosten für eine vollständige Elektrifizierung der Linien bzw. Strecken

Die wirtschaftliche Bewertung der möglichen Elektrifizierungsvorhaben muss im Rahmen der jeweiligen Betriebsvarianten auf den Linien betrachtet werden. Die Lebensdauer einer Oberleitung wird mit 70 Jahren, der Abschreibungszeitraum mit 50 Jahren angesetzt, was dem Abschreibungsrahmen der AfA-Tabellen des Bundesministeriums für Finanzen entspricht. Diese sehen je nach Technologieeinsatz unterschiedliche Elektrifizierungslängen vor, die im Folgenden dargestellt werden:

Tabelle 7-9 Ermittelte Kosten für eine Vollelektrifizierung der einzelnen Linien

Linie	Elektrifizierungsabschnitte	Summe
RB13	Rehna – Schwerin	52,27 Mio. €
Rehna - Parchim	Schwerin Görries – Parchim	
RB14	Ludwigslust – Parchim	21,68 Mio. €
Hagenow Stadt – Parchim		
RB19	Parchim – Plau am See	38,68 Mio. €
Parchim – Plau am See	(enthält einen dann notwendigen 5-MW-Umrichter in Parchim für ca. 4,58 Mio. €)	
RB25	Velgast – Prerow Süd	24,44 Mio. €
Velgast – Prerow Süd		

Eine detaillierte Herleitung der Kosten ist im Anhang gegeben.

7.1.3.3 Infrastrukturkosten für Ladestationen

Alle Infrastrukturmaßnahmen, die nach Netzanalyse im Abschnitt 6.3 notwendig sind, werden im Folgenden als Kosten für Ladestationen zusammengefasst. Die Kosten umfassen sowohl die Errichtungskosten für die Energiezuführung (Oberleitung, Speiseleitungen, Erdung etc.) als auch der Energiebereitstellungsanlagen (Unterwerk, Umrichter, Netzanschluss etc.) sowie deren Instandhaltungskosten.

Die Instandhaltungskosten der Energieversorgungskomponenten werden nach Expertenschätzung mit 0,5 % der Erstinvestitionen angenommen. Das Reinvestitionsvolumen berechnet sich aus den zu erneuernden Komponenten, nachdem diese ihre Lebensdauer erreicht haben. Beispielhaft müssen Netzanschlusskosten nur einmalig betrachtet werden und entfallen bei Reinvestitionen.

Wie bereits im Abschnitt 6.3 ersichtlich, wird für alle Linien sowohl ein Konzept mit größeren Energiespeichern (ca. 600 kWh Energieinhalt) als auch für kleinere Energiespeicher (450 kWh) untersucht. Hinzu kommt eine Differenzierung nach Vollumrichtertechnik mit Ladestationen, die 16,7-Hz-Bahnstrom bereitstellen und nach Ladestationen, die mit Symmetrienumrichtertechnik 50-Hz-Landesstrom bereitstellen. Für die 50-Hz-Ladetechnik wird vorausgesetzt, dass die Fahrzeuge technisch in der Lage sind, eine andere Frequenz zu verarbeiten. Dies ist zulässig, da es sich maßgeblich um eine Softwareanpassung auf den Fahrzeugen handelt, da die Fahrzeugtechnik selbst grundsätzlich dafür geeignet ist.

Es werden jeweils Ladestationen mit einer Leistung von 2,4 MW (für zwei Fahrzeuge) angenommen.

Tabelle 7-10 Infrastrukturkosten Ladestationen Westmecklenburg II

Linie	Maßnahme	RB 13 mit 450 kWh Speicher		RB 13 mit 600 kWh-Speicher		RB 14 mit beiden Speichergrößen		Kosten Ersterichtung	Reinvest nach 25 a
		16,7 Hz	50 Hz	16,7 Hz	50 Hz	16,7 Hz	50 Hz	Mio. €	Mio. €
RB 13	WRA	X						3,32	2,00
	WRA mit 50-Hz-Technik		X					2,06	0,50
	WPM anteilig	X		X				2,52	1,25
	WPM anteilig mit 50 Hz		X		X			1,23	0,31
RB 14	WPM anteilig					X		1,52	0,75
	WPM anteilig mit 50 Hz						X	0,74	0,19
Summe (Mio €)		5,84	3,29	2,52	1,23	1,52	0,74		

Tabelle 7-11 Infrastrukturkosten Ladestationen Westmecklenburg II (RB 19) sowie Darßbahn

Linie	Maßnahme	RB 19	RB 25 <u>nur</u> mit 450 kWh mit & ohne Durchbindung nach Stralsund (600-kWh-Speicher ohne Maßnahmen)		Kosten Erster- richtung	Reinvest nach 25 a
		50 Hz	16,7 Hz	50 Hz	Mio. €	Mio. €
RB19	WPU	X			0,51	0,10
RB25	WPOS		X		3,43	2,00
	WPOS mit 50- Hz-Technik			X	2,18	0,50
Summe (Mio €)		0,51	3,43	2,18		

Eine detaillierte Herleitung der Kosten ist im Anhang gegeben.

7.1.3.4 Infrastrukturkosten für die Wasserstoffherstellung

Für die Berechnung der Infrastrukturkosten der Wasserstoffherstellung wird durch den Auftraggeber ein Finanzierungsmodell angestrebt, dass die Errichtung und Betrieb der Wasserstoffherstellungsinfrastruktur durch eine externe Betreibergesellschaft vorsieht. Diese übernimmt die Investitionskosten und das unternehmerische Risiko für den Betrieb. Alle Kosten werden auf den Abgabepreis umgelegt zuzüglich einer marktüblichen Gewinnmarge.

Es entstehen Erstinvestitionskosten für die Reinigungs-, Verdichtungs- und Befüllanlage am Erzeugungsort sowie eine gleisnahe Dispenser-Anlage mit einer ähnlich der Investitionssumme des Energieparks Mainz angesetzten Gesamtsumme von 17 Mio. €. Jährlich sind zudem ca. 85.000 € Instandhaltungskosten bei einem üblichen Satz von 0,5 % der Erstinvestition zu leisten. Legt man diese Kosten auf den jährlichen Bedarf von ca. 225 t Wasserstoff und 35 Jahre Nutzungsdauer um, wären ca. 2,16 € der Verkaufskosten auf die Abschreibung der Erzeugeranlage zurückzuführen. Diese sind im angenommenen Wasserstoffpreis von 5 €/kg nicht enthalten, werden jedoch als ein Szenario des Netzes Westmecklenburg II mitberechnet und ausgewiesen.

7.2 Bestimmung der LCC für unterschiedliche Szenarien

7.2.1 Kosten je Linie

Die LCC-Analyse erfolgt für jede einzelne Linie. Über die Betrachtungszeit summieren sich die Einzelkapitalwerte zu einem Gesamtkapitalwert für das gesamte Netz auf.

Die Einzelbetrachtung per Linie erfordert, dass die Investitionen für die Tankstellen für das gesamte Netz wirtschaftlich zu gleichen Teilen auf die jeweils beteiligten bzw. profitierenden Linien gleichmäßig nach Fahrzeugkilometern verteilt werden. Dies gilt insbesondere für die Tankstellen des Netzes, da es hier eine Mehrfachnutzung der Infrastruktur durch mehrere Linien gibt. Ladestations- und Elektrifizierungsmaßnahmen sind meist ausschließlich für eine Linie nutzbar und werden deshalb nicht aufgeteilt.

Die Anzahl der benötigten Fahrzeuge und deren Fahrleistung entstammen den durch die TU Dresden aus den Bildfahrplänen und Fahrplänen wie vom Auftraggeber bereitgestellt abgeleiteten Umlaufplänen. Die Streckendaten selbst beruhen auf den Daten des Open-Data-Portals der DB AG (Quelle Hintergrundkarte: OpenStreetMap).

Tabelle 7-12 Streckendaten

Linie	RB 13 WRA-WPM	RB 14 WH-WPM	RB 19 WPM-WPU	RB 25 WSR-WPOS	RB 25 WV-WPOS
Länge [km]	79	51	44	50	32
Elektrifiziert [km]	4,5	21	0	18	0,3
Anzahl Fahrzeuge	6	3	1 (enthalten in RB 14)	4	3
Fahrleistung [km/d] (365 d)	395.1	455,3	21,8 (als RB 14 Durchbindung: 477,1)	347.9	411.4
Tankfahren [1/7d]	DMU: 3 FCMU: 4	DMU: 3 FCMU: 4	DMU: 3 FCMU: 4	DMU: 3 FCMU: 4	DMU: 3 FCMU: 4

7.2.2 Linienspezifische Betrachtung Bsp. RB 13 Rehna – Parchim (WRA – WPM) (50-Hz-Ladestationen/ großer BEMU-Energiespeicher)

Aufgrund der Vielzahl an berechneten Daten wird stellvertretend die Strecke Rehna-Parchim im Folgenden detailliert dargestellt und ausgewertet. Abb. 7-4 zeigt die Kapitalwertentwicklung entlang des Betrachtungszeitraums von 35 Jahren. Zu beachten ist die Einrechnung der Restwerte noch nicht abgeschriebener Infrastrukturinvestitionen am Ende des Betrachtungszeitraums. Die betrachtete Strecke ist ca. 79 km lang und zu ca. 6 % elektrifiziert.

Für alle weiteren Linien befinden sich die entsprechenden Darstellungen in den Anhängen B bis F.

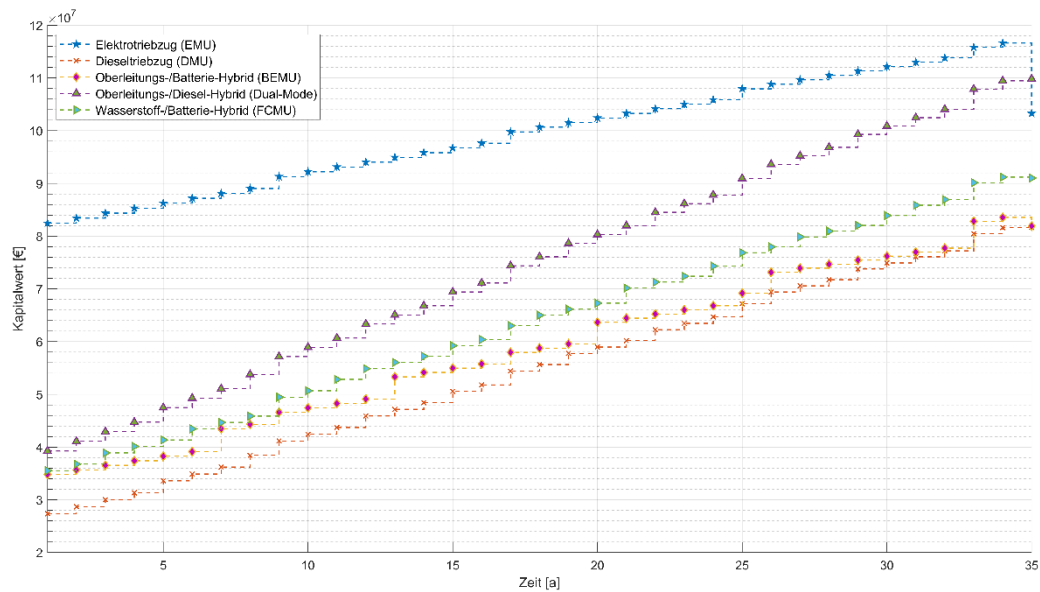


Abb. 7-4 Entwicklung Kapitalwerte der Linie RB 13 WRA-WPM, großer BEMU-Speicher, 35 a

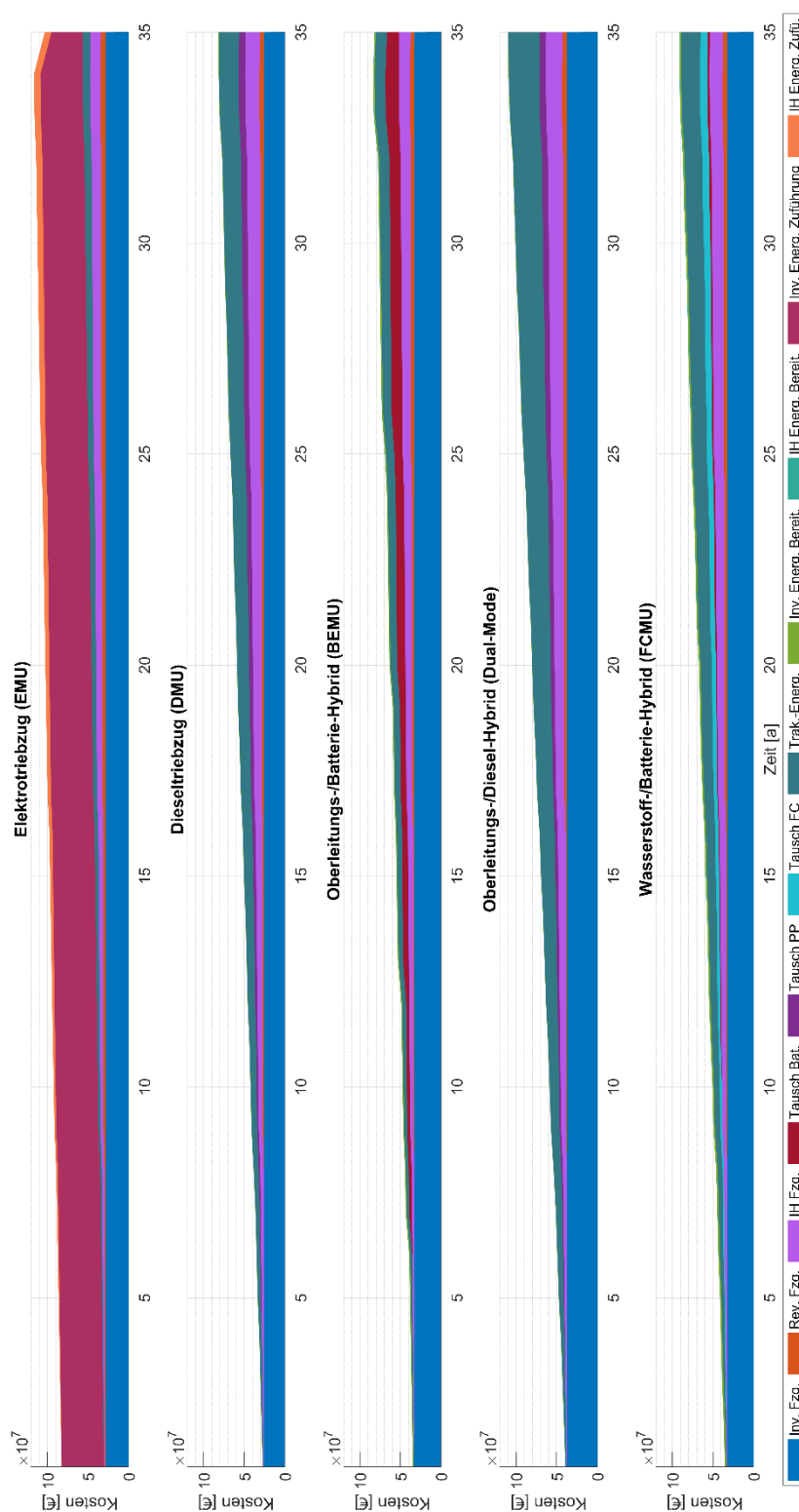


Abb. 7-5 Entwicklung Kapitalwerte der Linie RB 13 WRA-WPM, großer BEMU-Speicher, 35 a mit Detail der einzelnen Kostenparameter

Als Aufkommensstärkste Linie im gesamten untersuchten Netz ist die Linie repräsentativ für das gesamte Netz. In Abb. 7-4 wird die Gesamtübersicht der

Kapitalwertentwicklung aller Technologien über 35 Jahre Betrachtungsdauer dargestellt. Gut erkennbar ist einerseits die grundsätzliche Aussage, welche Technologie den kostengünstigsten Kapitalwert aufweist und damit am Vorteilhaftesten ist, andererseits lassen sich die Einflüsse einzelner singulärer Investitionen wie der Tausch von Batterien oder Brennstoffzellen als deutliche Hübe im Verlauf ablesen. Abb. 7-5 stellt die Kostenanteile der einzelnen Betriebsausgaben und Investitionen übersichtlich dar und dient der besseren Erkennbarkeit der einzelnen Kostentreiber. Abb. 7-6 ermöglicht einen Überblick über die jährlich zu leistenden Ausgaben.

7.2.2.1 Oberleitungsfahrzeuge (EMU)

Oberleitungsfahrzeuge bilden in diesem Beispiel die im Erstinvestitionsvolumen kostenintensivste Technologie, am Ende des Betrachtungszeitraums ergibt der hohe rechnerische Restwert der Fahrleitungsanlage von 30 % noch eine Verbesserung gegenüber dem noch kostenintensiveren Oberleitungs-/Dieselhybridfahrzeug (Dual-Mode).

Die Technologie benötigt das größte Erstinvestitionsvolumen. Vor allem durch die Investitionen in die benötigte Infrastruktur zur Herstellung der Betriebsfähigkeit liegt das System zur Betriebsaufnahme oberhalb aller anderen betrachteten Systeme. Oberleitungsfahrzeuge sind bezüglich der Erstinvestition die zweitgünstigsten Neufahrzeuge, da sie technisch im Vergleich zu den alternativen Antrieben weniger komplex sind, jedoch komplexer als vergleichbare Dieselfahrzeuge. Aufgrund der kontinuierlichen Energieversorgung aus dem Oberleitungsnetz, das mit ca. 12 ct/kWh sehr kostengünstige Energie bereitstellt, und eines hohen Wirkungsgrads von ca. 80 % sind die jährlichen Traktionsenergiekosten niedrig. Obwohl die Linie die Verbindung mit der höchsten Verkehrsleistung im Netz Westmecklenburg II darstellt und somit große Energiemengen benötigt werden, kann sich der Effekt günstiger Energiebezugspreise nicht ausreichend bemerkbar machen. Auch der Effekt der nicht notwendigen kostenintensiven Tauschzyklen von Hochtechnologiekomponenten wie Batterien bei anderen Technologien hat aufgrund der geringen Fahrzeuganzahl kaum Gewicht. Das hohe Erstinvestitionsvolumen für die Oberleitungsanlagen können die EMU-Fahrzeuge deshalb nicht kompensieren.

7.2.2.2 Dieselfahrzeug (DMU)

Dieseltriebzüge sind bezüglich der Erstinvestition die günstigsten Neufahrzeuge. Zudem benötigen Dieselfahrzeuge, abgesehen von wenigen Tankstellen, keine zusätzliche Infrastruktur. Aufgrund der fehlenden Rekuperationsfähigkeit gegenüber anderen Systemen und einem relativ hohen Energiebedarf aufgrund einer schlechten Wirkungsgradkette sind die jährlichen Traktionsenergiekosten vergleichsweise hoch. Zudem fallen kostenintensiven Tauschzyklen zur Überholung der PowerPacks nach Erreichen ihrer Laufleistung an. Zusammenfassend profitiert der Dieselzug jedoch maßgeblich vom geringen Erstinvestitions-

volumen, insbesondere in Bezug auf die Infrastruktur und kompensiert so die hohen Energiebedarfskosten und erreicht im Vergleich der Lebenszykluskosten der Technologien so zusammen mit den Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeugen den ersten Rang. Besonders zu beachten ist, dass die untersuchten DMU-Fahrzeuge erheblich größer sind als die aktuell eingesetzten RegioShuttle RS 1, sodass für vergleichbare einteilige Fahrzeuge weiterhin Dieseltriebzüge die günstigste Technologie auf dieser Linie darstellen.

7.2.2.3 Oberleitungs-/ Batterie-Hybrid

Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeuge weisen verhältnismäßig hohe Erstinvestitionskosten für die benötigte Ladeinfrastruktur auf, trotz der hier dargestellten Verwendung der kostengünstigeren 50-Hz-Ladestationstechnik mit Symmetrierumrichter. Trotz dieses anfänglichen Nachteils ergibt sich für das System der niedrigste Kapitalwert und damit im Lebenszyklus eine realistische Umsetzungsperspektive auf der betrachteten Linie für alternative Antriebssysteme im Aufkommensschwachen Netz Westmecklenburg II. Die Technologie profitiert vom guten Wirkungsgrad des elektrischen Antriebsstrangs, der sich in niedrigen Energiebedarfen widerspiegelt. Zudem profitiert das System von bereits elektrifizierten Streckenabschnitten, die kostengünstig zum Laden genutzt werden können (Schwerin Hbf – Schwerin Görries). Durch die Verwendung des großen Energiespeichers kann auf die Ladestation in Rehna verzichtet werden, sodass ca. 71 % der nachzuladenden Energie aus dem bestehenden Oberleitungsnetz bezogen werden kann. An der zusätzlich zu installierenden Ladestation in Parchim ist im Gegensatz dazu der Energiebezug aus der singulären Ladestation, versorgt aus dem öffentlichen Landesnetz, um ca. 67 % preisintensiver. Aufgrund der günstigen Lage der vorhandenen Oberleitung in Linienmitte können die Traktionsenergiekosten die erheblichen Tauschkosten der Batterien kompensieren. Das Konzept bedarf eines vergleichsweise hohen Investitionsvolumens, ist jedoch über 35 Jahre Betrachtungsdauer wirtschaftlichste alternative Antriebstechnologie auf dieser Linie.

7.2.2.4 Oberleitungs-/Diesel-Hybrid (Dual-mode)

Der Oberleitungs-/Diesel-Hybrid (Dual-Mode) ist das betrieblich flexibelste alternative Antriebssystem. Diese Flexibilität erfordert sowohl beim Fahrzeuginvestitionsvolumen als auch bei der Fahrzeugmasse Kompromisse. Die Technologie kann sich jedoch auf die nicht notwendigen Infrastrukturmaßnahmen stützen. Diese umfassen lediglich wenige Dieseltankstellen als Reinvestition im Lebenszyklus und sind identisch zum Dieselfahrzeug. Die Vorteilhaftigkeit der Technologie hängt stark vom Elektrifizierungsgrad der Linie ab. Unter einer bestehenden Oberleitung erreicht das System in Bezug auf die Energiebedarfskosten Werte ähnlich denen eines Elektrotriebzuges. Die erheblich höhere Fahrzeugmasse durch das nicht verfügbare vergleichbar kleine Fahrzeugvolumen wie dies für die anderen Technologien verfügbar ist, lässt jedoch trotzdem den Energiebedarf und die Instandhaltungskosten steigen. Aufgrund der höhe-

ren Masse liegt der Energiebedarf im Dieselbetrieb ebenfalls oberhalb dessen eines konventionellen Dieselfahrzeuges. Auf der betrachteten Linie reicht der bereits elektrifizierte sehr kurze Abschnitt von Schwerin Hbf. nach Schwerin Görries nicht aus, um die Fahrzeuginvestitionskosten und den erhöhten Energiebedarf im Dieselbetrieb zu kompensieren. Somit liegt der Kapitalwert nach 35 Jahren Betrachtungsdauer auf dieser Strecke deutlich höher als der eines konventionellen Dieselfahrzeugs und unter Einbeziehung der Restwerte der Oberleitung auf dem letzten Platz.

7.2.2.5 Wasserstoff-/Batterie-Hybrid

Der Wasserstoff-/Batterie-Hybrid besitzt ein ähnliches Fahrzeuginvestitionsvolumen wie die anderen Neufahrzeuge mit alternativem Antrieb, jedoch ebenfalls vom Aufgabenträger zu leistende Infrastrukturmaßnahmen. Somit liegt das System zu Beginn auf ähnlichem Kostenniveau wie die Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeuge. Wie der Dieselszug kann der Wasserstoff-/Batterie-Hybrid die vorhandene Elektrifizierung zum „günstigen Tanken“ nicht nutzen. In Kombination mit den höheren Bezugskosten für die Traktionsenergie durch den Wasserstoffpreis von 5,00 €/kg verglichen mit Diesel und elektrischer Energie steigt der Kapitalwert überproportional. Des Weiteren liegen die Instandhaltungskosten oberhalb jener der anderen Systeme, da in diesen Kosten der Tausch bzw. die Revision dreier Hochtechnologiekomponenten (Batterie, Brennstoffzelle, Hochdrucksysteme) enthalten ist. Die zu den anderen Technologien ähnliche Erstinvestition und die gleichzeitig höheren Betriebskosten für Energie und Instandhaltung führen dazu, dass der Wasserstoff-/Batterie-Hybrid auf dieser Linie wirtschaftlich keine Vorteile aufweist.

Wichtig anzumerken ist, dass die dargestellte Variante der Linie RB 13 **ohne die Wasserstoffherzeugungsanlage**, sondern lediglich mit einer gleisnahen Tankstelle dargestellt ist. Kämen die zugkilometerabhängigen Anteile der Erzeugungsanlage hinzu, würde der Kapitalwert um weitere ca. 10,6 Mio. € steigen und sich die Distanz zum Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeug und den Dieselstriebzügen nahezu verdoppeln. Siehe dazu auch Abschnitt 7.2.2.7 und 7.2.2.8.

7.2.2.6 Zusammenfassung zum Beispiel anhand der Linie RB 13

Die betrachtete Linie dient zur Verdeutlichung der Vorgehensweise bei der Analyse der Lebenszykluskosten des Netzes Westmecklenburg II und der Darßbahn. Die Darstellungsform aus den Abb. 7-4, Abb. 7-5 und Abb. 7-6 finden sich im Anhang für jede betrachtete Linie wieder. Das hier dargestellte Ergebnis lässt sich wegen der unterschiedlichen Randbedingungen nicht auf alle Linien des Netzes verallgemeinern.

Bereits bei der Betrachtung dieser einen Linie zeigt sich jedoch der hohe Einfluss vorhandener Elektrifizierung, die auf allen Linien des Netzes in unter-

schiedlichen Elektrifizierungsgraden mit den dort erreichbaren niedrigen Energiebezugskosten vorhanden ist. Im Falle des Dieseltriebzuges und des Wasserstoff-/Batterie-Hybrids kann der starke Einfluss von Energiepreis und Wirkungsgradkette auf den Energiebedarf und die Traktionsenergiekosten aufgezeigt werden.

Besonders hervorzuheben ist außerdem, dass die Kosten zum Tausch der Hochtechnologiekomponenten beim Wasserstoff-/Batterie-Hybrid sowie beim Oberleitungs-/ Batterie-Hybrid wie erwartet als Kostentreiber zu identifizieren sind.

Die sich ergebenden Kapitalwerte jeder Technologie auf jeder Linie zum Ende des Betrachtungszeitraumes dienen später als Summand für den Gesamtkapitalwert je Technologie für das Gesamtnetz.

Um die Nachvollziehbarkeit der Betrachtungen der einzelnen Kostenpositionen und deren Einfluss auf den Kapitalwert zu verbessern, wurden zusätzlich zur Darstellung in Abb. 7-4, die einen genauen Rückschluss auf die Entwicklung der Kapitalwerte mit direkter Vergleichbarkeit der einzelnen Technologien je Jahr ermöglicht, zwei weitere Diagramme (Abb. 7-5, Abb. 7-6) erstellt. Abb. 7-4 ermöglicht im Speziellen Aussagen, ab wann sich eine Technologie gegenüber einer anderen Technologie als vorteilhafter erweist, die Gesamtkosten also günstiger geworden sind.

Abb. 7-6 ermöglicht zudem, jahresgenau die jeweils zu zahlenden Kosten nach Kostenpositionen aufzuschlüsseln. Dies ermöglicht auch Rückschlüsse auf Erneuerungszyklen in verschiedenen Kostenpositionen je Linie und Technologie. Aus Darstellungsgründen wurde eine logarithmische Achseneinteilung für die Kosten gewählt.

Aus der Darstellung der Kostenpositionen in Abb. 7-6 lassen sich ebenfalls einzelne Kostentreiber ermitteln, jedoch erst Abb. 7-5 kann diese übersichtlich durch die Höhe der jeweiligen Kostenverlaufsanteile aufzeigen. Aufgrund der Gestalt der Graphen ist erkennbar, dass die Unterschiede in den Fahrzeuginvestitionskosten nur einen kleinen Anteil der Kapitalwertdifferenz zwischen den Technologien ausmachen, da alle Fahrzeugbeschaffungskosten der Hybridsysteme in ähnlichen Preisbereichen liegen. Der starke Einfluss des Austausches der Batterien des Oberleitungs-/Batterie-Hybrid sticht allerdings deutlich hervor.

Wie erwartet zeigt sich der geringere Kostenanteil für den elektrischen Traktionsenergiebezug im Gegensatz zu kraftstoffabhängigen Systemen. Je länger der Betrachtungszeitraum andauert, umso maßgeblicher wird der Einfluss der Energiebedarfskosten auf den Gesamtkapitalwert.

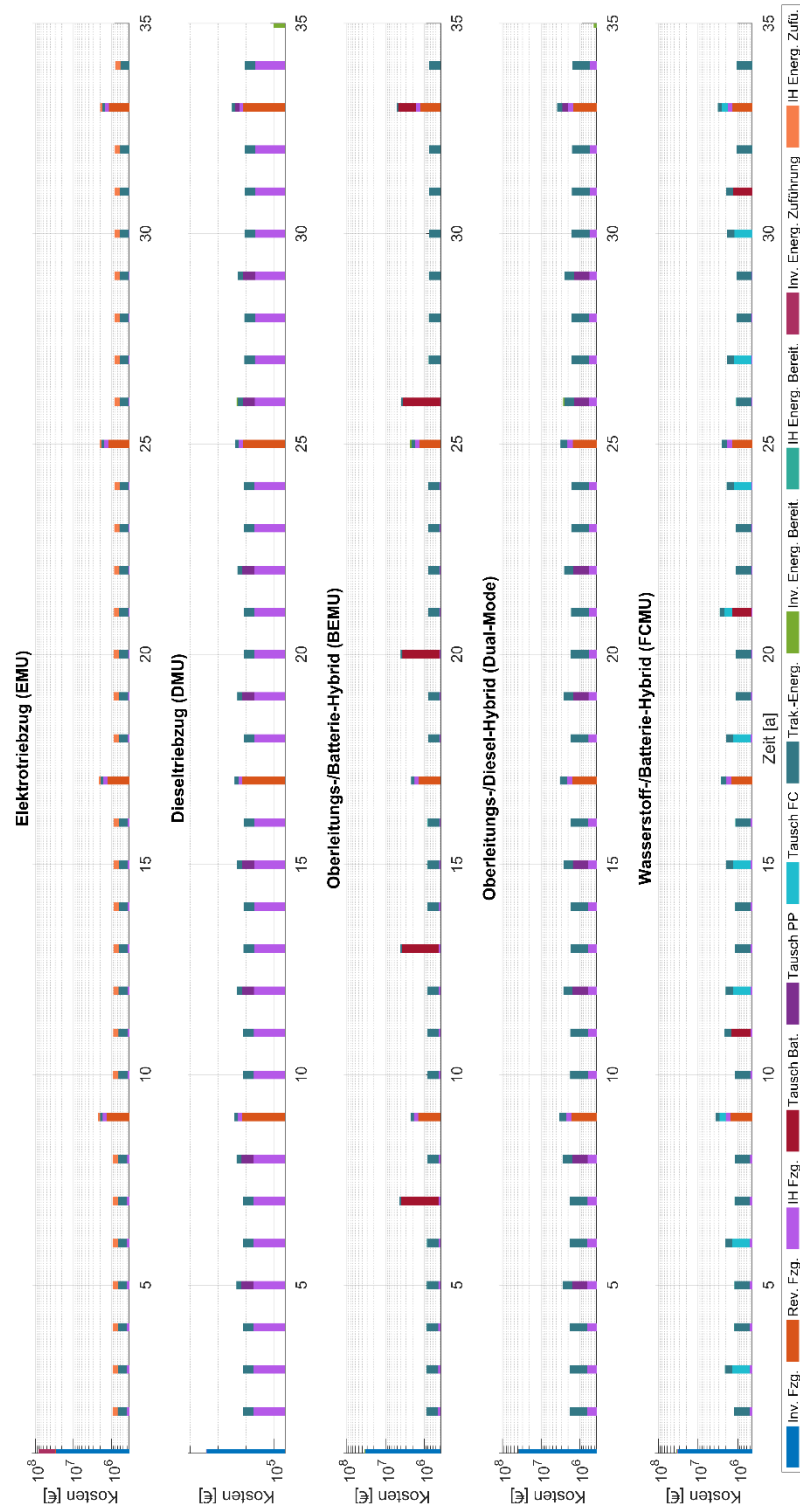


Abb. 7-6 Kostenpositionen Rehna – Parchim mit 50-Hz-Ladetechnik und größerem BEMU-Energiespeicher

7.2.2.7 Reduzierung der Wasserstoffkosten auf 3 €/kg auf der RB 13

In Absprache mit dem Auftraggeber sollte analysiert werden, ab welchem Wasserstoffpreis eine gleiche Wirtschaftlichkeit wie für Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeug erzielt wird.

Diese ist für das gewählt Beispiel der Linie RB 13 im Folgenden dargestellt. Durch die im Vergleich zu den anderen Linien hohe Verkehrsleistung aufgrund der Linienlänge ergibt sich auf der Linie RB 13 ab ca. 3 €/kg eine gleiche Wirtschaftlichkeit.

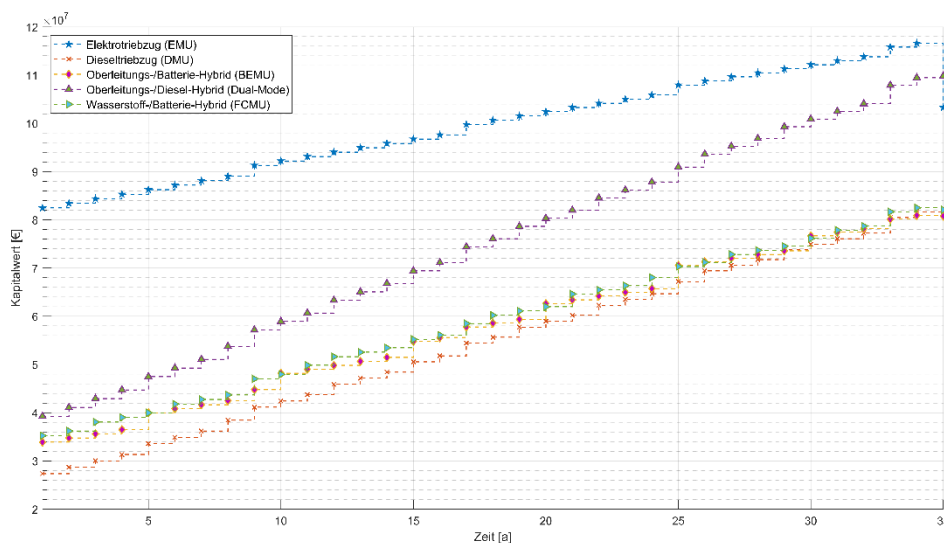


Abb. 7-7 Entwicklung Kapitalwerte der Linie RB 13 WRA-WPM, großer BEMU-Speicher, 35 a und Veränderung des Wasserstoffpreises auf 3 €/kg

Zu beachten ist, dass die Herstellungsanlage für Wasserstoff nicht in die obere Darstellung eingerechnet ist. Die gleisnahe Tankstelle mit ca. 3 Mio. € einmaligen Investitionskosten ist jedoch enthalten.

7.2.2.8 Integration der Kosten der Herstellungsanlage

Nach aktuellem Stand kostet der Wasserstoff an der Tankstelle der Stadtverkehrsbusse in Wiesbaden, versorgt aus dem Energiepark Mainz auf Basis der Nutzung von erneuerbaren Energien ca. 7€/kg. Dieser Preis enthält bereits die umgelegten Kosten der Abschreibung einer Erzeugeranlage. Einen ähnlichen Kostensatz pro Kilogramm Wasserstoff erhält man, wenn die jährlich benötigte Wasserstoffmenge im Netz Westmecklenburg und der Darßbahn auf 35 Jahre abgeschrieben wird und auf den Wasserstoffpreis von 5 €/kg aufaddiert wird.

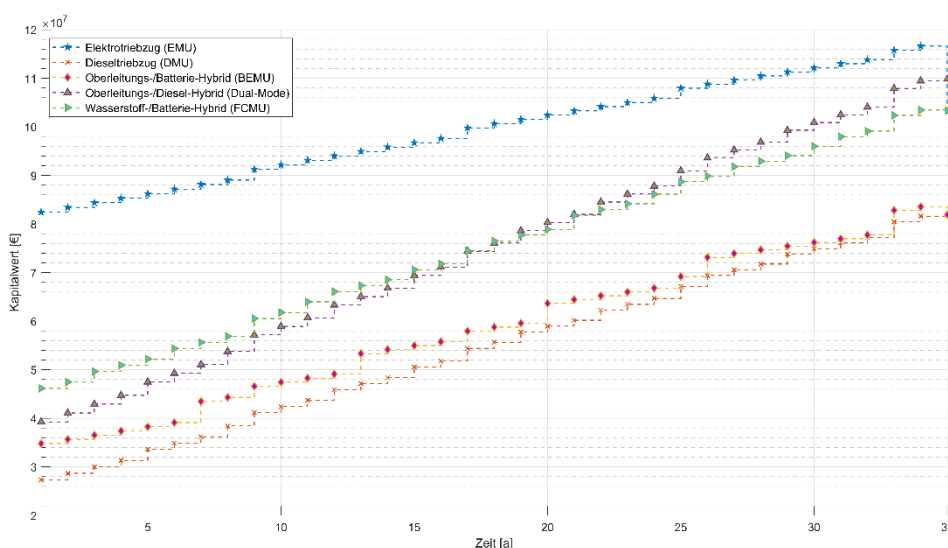


Abb. 7-8 Entwicklung Kapitalwerte der Linie RB 13 WRA-WPM, großer BEMU-Speicher, 35 a und Einrechnung der Wasserstoffherstellungsanlage

7.2.3 Gesamtnetzbetrachtung

Die Gesamtbetrachtung erfolgt differenziert nach den Betrachtungszeiträumen (35 und 15 Jahre) sowie nach den Infrastrukturrandbedingungen (Kostenrechnung inklusive bzw. exklusive Infrastruktur) sowie mehrerer Variationen der angesetzten Infrastruktur. Die Darstellungen sind in gezoomter Form abgebildet, d. h. nicht bei 0 € beginnend, da die hohen Gesamtsummen eine Differenzierung der Technologien sonst erschweren.

Übersichtsdarstellungen mit einer Ausweisung der einzelnen Linienanteile sind im Anhang A zu finden.

7.2.3.1 Netz Westmecklenburg II

Betrachtungszeitraum 35 Jahre Die Gesamtbetrachtung über 35 Jahre in Abb. 7-9 zeigt, dass von den alternativen Technologien zum Dieselfahrzeug die Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeuge den höchsten wirtschaftlichen Vorteil bieten, wenn die Infrastruktur als maßgebliches Element aller alternativen Antriebssysteme mit betrachtet wird. Sie weisen den geringsten Kapitalwert auf. Unter der Voraussetzung der Übernahme der Infrastrukturmaßnahmen durch Dritte wären Oberleitungsfahrzeuge aufgrund der niedrigen Betriebskosten besonders vorteilhaft, gefolgt von den Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeugen. Da eine Umsetzung einer Vollelektrifizierung im Netz Westmecklenburg II als nahezu ausgeschlossen gelten kann, wird die Technologie der Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeuge als wirtschaftlich vorteilhafteste Variante festgestellt. Die alternative Antriebstechnologie erreicht sogar knapp bessere Werte (bzw.

nahezu identische Werte) als die als Referenz berechneten Dieselfahrzeuge, trotz hoher Kosten für die Energiespeicherung mittels Batterien. Es ist jedoch anzumerken, dass die als Referenz berechneten Dieselfahrzeuge eine deutlich größere Gefäßgröße als die derzeit im Netz eingesetzten aufweisen (ca. 42 m gegenüber ca. 25 m Fahrzeuglänge).

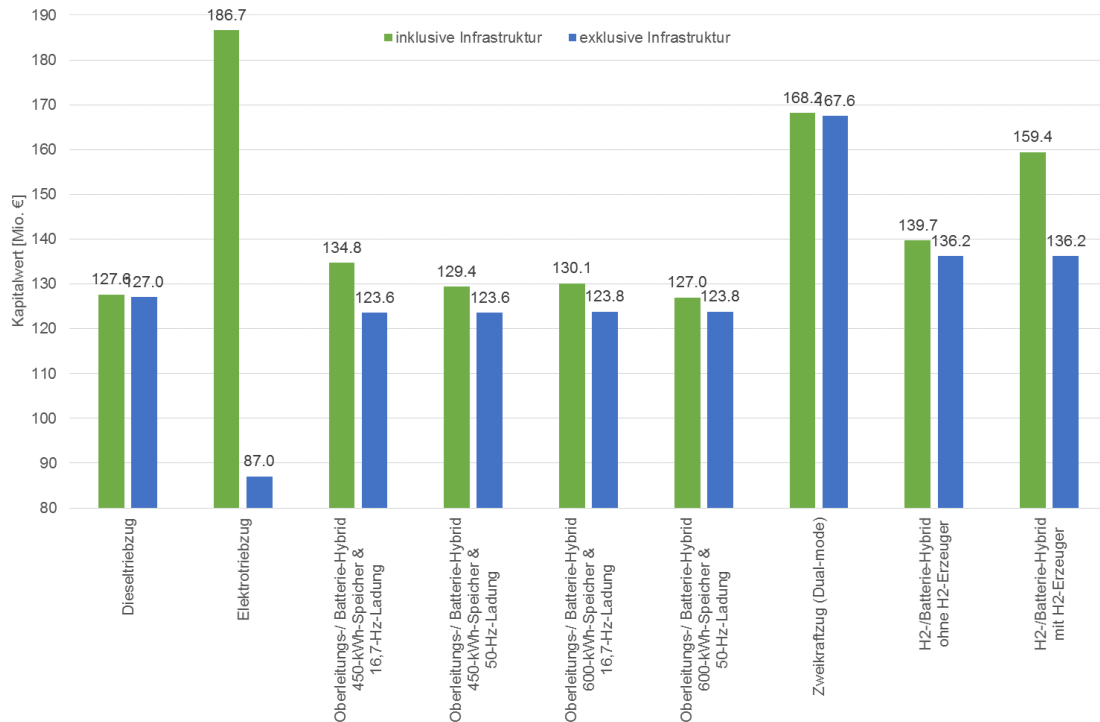


Abb. 7-9 Kapitalwerte im Netz Westmecklenburg II (35 Jahre Betrachtungszeit)

Besondere Relevanz hat auch die Erkenntnis, dass Fahrzeuge mit größeren Energiespeichern (600 kWh) und dafür einer geringeren Anzahl von Lademöglichkeiten einen in Summe geringeren Kapitalwert aufweisen, also wirtschaftlich vorteilhafter sind. Hintergrund dessen ist, dass die Entladetiefe bezogen auf die gesamte Batteriekapazität (Depth of Discharge DoD) stark zur Alterung beiträgt. Wird der Energiespeicher also größer ausgelegt, während gleichzeitig die Lademöglichkeit in Parchim notwendigerweise bestehen bleibt, so wird aus der Batterie zwar als Absolutwert jeweils weiterhin die gleiche Menge Energie entnommen, die Entladetiefe DoD bezogen auf die Nennkapazität ist jedoch geringer. Dies führt zu einem verbesserten Alterungsverhalten. Die Batterielebensdauer wird also verlängert, die Wiederbeschaffungszyklen werden länger. Diese Verbesserung wird durch den Wegfall der Ladestation in Rehna und die dortige stärkere Belastung der Batterien nicht ausgeglichen, sodass im Kapitalwert die größeren Energiespeicher ein besseres Ergebnis darstellen.

Dass im Allgemeinen die günstigeren 50-Hz-Ladestationen den Einspar-Effekt noch verstärken, ist ersichtlich und nachvollziehbar. Grundsätzlich lässt sich jedoch festhalten, dass beide Batteriegrößen eine ähnlich gute Kostenbilanz in einer Betrachtungszeit von 35 Jahren aufweisen.

Betrachtungsdauer 15 Jahre

Grundlage für eine Verkürzung der Betrachtungsdauer von 35 Jahren auf 15 Jahre (übliche Dauer eines Verkehrsvertrages) ist die wirtschaftliche Beachtung der Restwerte der Fahrzeuge und Infrastrukturkomponenten, die für die einzelnen Technologien zusätzlich errichtet werden müssen. Diesen haben bei Ablauf des V Betrachtungsdauer nach 15 Jahren noch erhebliche Restwerte (Fahrzeuge ca. 25 % des Neupreises, Oberleitungsanlagen sogar ca. 70 %).

Bei einer Betrachtungsdauer von 15 Jahren ergibt sich ein ähnliches Bild mit ähnlicher Reihenfolge wie für 35 Jahre Betrachtungsdauer, wie Abb. 7-10 zeigt. Auch hier sind die Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeuge gegenüber den anderen betrachteten alternativen Antriebssystemen wirtschaftlich vorteilhafter, auch wenn der Dieselverkehr im kurzen Betrachtungszeitraum noch knapp wirtschaftlicher bleibt. Der geringfügige Vorteil des Diesels ist eine maßgebliche Folge des Energiebezugspreises, der sich erst über einen langen Zeitraum, d. h. viele gefahrene Fahrzeugkilometer, besonders bemerkbar machen kann.

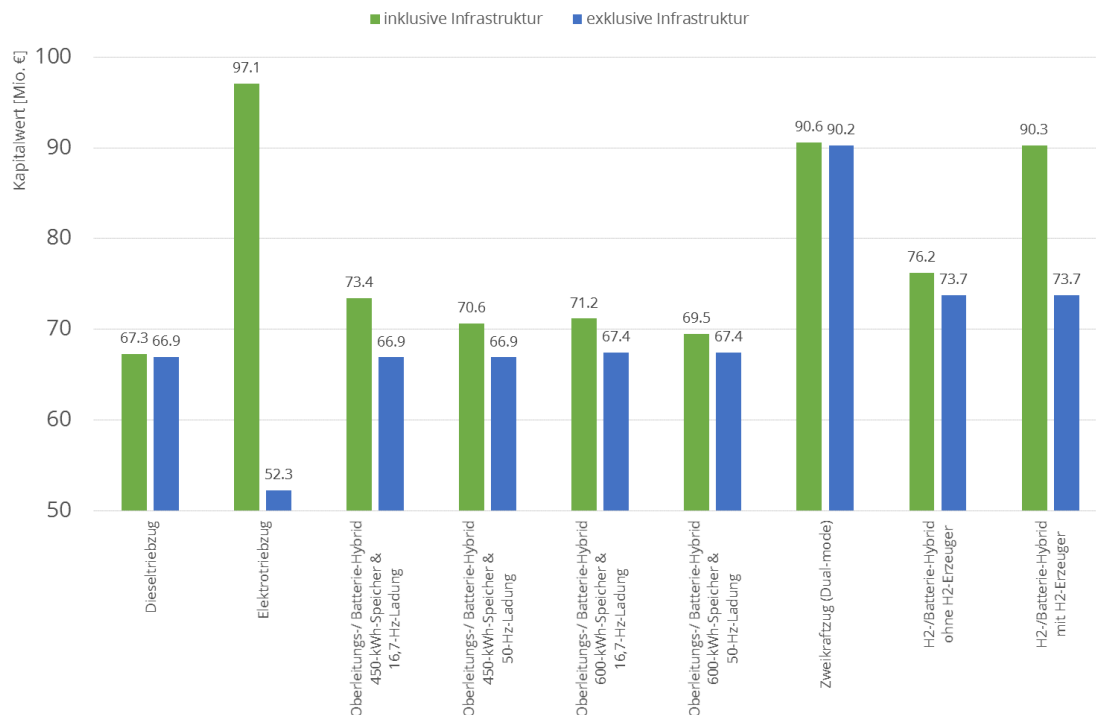


Abb. 7-10 Kapitalwerte im Netz Westmecklenburg II (15 Jahre Betrachtungszeitraum)

Kapitalwerttabelle Netz Westmecklenburg II

Tabelle 7-13 fasst die Kapitalwerte des Netzes Westmecklenburg II der verschiedenen Betrachtungszeiträume jeweils inklusive und exklusive Infrastruktur zusammen. Die wirtschaftliche Vorteilhaftigkeit von Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeugen gegenüber den anderen betrachteten alternativen Antriebssystemen zum heutigen Dieselverkehr wird deutlich, auch wenn der Dieselverkehr insbesondere bei kurzen Betrachtungszeiträumen (15 Jahre) und unter

Berücksichtigung der Infrastruktur für alternative Antriebe noch wirtschaftlicher bleibt. Dieser Vorteil würde noch deutlicher, wenn der Vergleich zu den kleineren Bestandsfahrzeugen geführt würde. Die Vorteile des kostengünstigeren Energiebezugs können sich erst bei einer langen Einsatzdauer stärker auswirken, sodass die in der Erstinvestition kostenintensivere Technologie der Oberleitungs-/ Batterie-Hybridfahrzeuge hier noch hinter der Dieseltechnologie liegt. Sie ist jedoch bereits kostengünstiger als die anderen alternativen Antriebstechnologien.

Tabelle 7-13 Kapitalwertübersicht des Netzes Westmecklenburg II für alle Betrachtungsvarianten **inklusive** der Durchbindung der RB 14 auf die RB 19 und inklusive betrachteter Restwerte

	35 Jahre mit Infrastruktur [Mio. €]	35 Jahre ohne Infrastruktur [Mio. €]	15 Jahre mit Infrastruktur [Mio. €]	15 Jahre ohne Infrastruktur [Mio. €]
Dieseltriebzug	127.65	127.04	67.29	66.92
Elektrotriebzug	186.66	87.04	97.05	52.25
Oberleitungs-/ Batterie-Hybrid 450 kWh-Speicher 16,7-Hz-Laden	134.76	123.62*	73.40	66.90
Oberleitungs-/ Batterie-Hybrid 450 kWh-Speicher 50-Hz-Laden	129.42	123.62*	70.65	66.90
Oberleitungs-/ Batterie-Hybrid 600 kWh-Speicher 16,7-Hz-Laden	130.14	123.83**	71.16	67.40
Oberleitungs-/ Batterie-Hybrid 600 kWh-Speicher 50-Hz-Laden	127.01	123.83**	69.45	67.40
Oberleitungs-/ Die- sel- Hybrid (Dual-mode)	168.16	167.55	90.61	90.23
H ₂ -/Batterie-Hybrid ohne Erzeugeranlage	139.68	136.20	76.21	73.73
H ₂ -/Batterie-Hybrid mit Erzeugeranlage	159.42	136.20	90.27	73.73

*/** Die Kosten des Bahnstrombezuges beziehen sich auf die Bezugsquelle (Landesnetz oder Oberleitungsnetz). Diese ist für alle Ladestationstechnologien gleich, lediglich die Kostenstruktur der Ladestationerrichtung ändert sich.

In satterem grün wurde die jeweils vorteilhafteste alternative Antriebstechnologie markiert, Fette Schrift stellt das wirtschaftlich günstigste Ergebnis dar. In hellem grün wird jeweils Rang 2 dargestellt.

Über einen Betrachtungszeitraum von **35 Jahren** sind Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeuge inklusive Berücksichtigung der Infrastrukturkosten 13 – 41 Millionen Euro günstiger als der Betrieb mit Neufahrzeugen anderer Antriebstechnologien, wenn deren Wasserstoff-Erzeugeranlage nicht mit finanziert werden muss. Im selben Betrachtungszeitraum exklusive Berücksichtigung der Infrastrukturkosten ist die Technologie 13 – 43 Millionen Euro günstiger als andere alternative Technologien, jedoch ca. 36 Mio. Euro kostenintensiver als der Betrieb mit einer Vollelektrifizierung und Elektrotriebwagen.

Über einen Betrachtungszeitraum von **15 Jahren** ist die Technologie inklusive Berücksichtigung der Infrastrukturkosten 7 – 21 Millionen Euro günstiger, wenn deren Wasserstoff-Erzeugeranlage nicht betrachtet wird. Im selben Betrachtungszeitraum exklusive Berücksichtigung der Infrastrukturkosten ist die Technologie 6 – 23 Millionen Euro günstiger.

Tabelle 7-14 Kapitalwertübersicht des Netzes Westmecklenburg II für alle Betrachtungsvarianten **exklusive** der Durchbindung der RB 14 auf die RB 19 inklusive betrachteter Restwerte

	35 Jahre mit Infrastruktur [Mio. €]	35 Jahre ohne Infrastruktur [Mio. €]	15 Jahre mit Infrastruktur [Mio. €]	15 Jahre ohne Infrastruktur [Mio. €]
Dieseltriebzug	126.48	125.87	66.77	66.39
Elektrotriebzug	152.47	86.42	81.67	51.97
Oberleitungs-/ Batterie-Hybrid 450 kWh-Speicher 16,7-Hz-Laden	129.08	118.58*	71.09	65.01
Oberleitungs-/ Batterie-Hybrid 450 kWh-Speicher 50-Hz-Laden	123.75	118.58*	68.34	65.01
Oberleitungs-/ Batterie-Hybrid 600 kWh-Speicher 16,7-Hz-Laden	125.70	120.03**	69.29	65.95
Oberleitungs-/ Batterie-Hybrid 600 kWh-Speicher 50-Hz-Laden	122.56	120.03**	67.58	65.95
Oberleitungs-/ Die- sel- Hybrid (Dual-mode)	161.84	161.23	87.96	87.59
H ₂ -/Batterie-Hybrid ohne Erzeugeranlage	138.61	135.12	75.73	73.25

*/** Die Kosten des Bahnstrombezuges beziehen sich auf die Bezugsquelle (Landesnetz oder Oberleitungsnetz). Diese ist für alle Ladestationstechnologien gleich, lediglich die Kostenstruktur der Ladestationerrichtung ändert sich.

In satterem grün wurde die jeweils vorteilhafteste alternative Antriebstechnologie markiert, fette Schrift stellt das wirtschaftlich günstigste Ergebnis dar. In hellem grün wird jeweils Rang 2 dargestellt.

Eine Betrachtung **ohne** die Durchbindung der RB 14 als RB 19 nach Plau am See, wie in Tabelle 7-14 dargestellt, ergibt keine Verschiebungen in der Reihenfolge und bestätigt die Wirtschaftlichkeit der Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeuge auch bei der im Verhältnis zur Fahrleistung kostenintensiven Infrastruktur. Durch den Betrachtungszeitraum über der Lebensdauer ist diese jedoch nur ein kleiner Anteil und wird somit wirtschaftlich.

7.2.3.2 Darßbahn

Betrachtungsdauer 35 Jahre

Für die Darßbahn wurden einerseits ebenfalls zwei unterschiedliche Speichergrößen analysiert, andererseits wurde zusätzlich zur Verbindung Velgast – Prerow die Durchbindung über Velgast hinaus nach Stralsund untersucht. Auch hier zeigt sich ein deutlicher Vorteil der Oberleitungs-/Batterie-Hybride, die in der Ausführung mit großem Energiespeicher und dem damit möglichen Verzicht auf die Ladestation in Prerow ohne Infrastrukturausbauten sogar ebenfalls Einsparungen im Vergleich zum Referenz-Dieselbetrieb (Fahrzeuglänge ca. 42 m) ermöglichen.

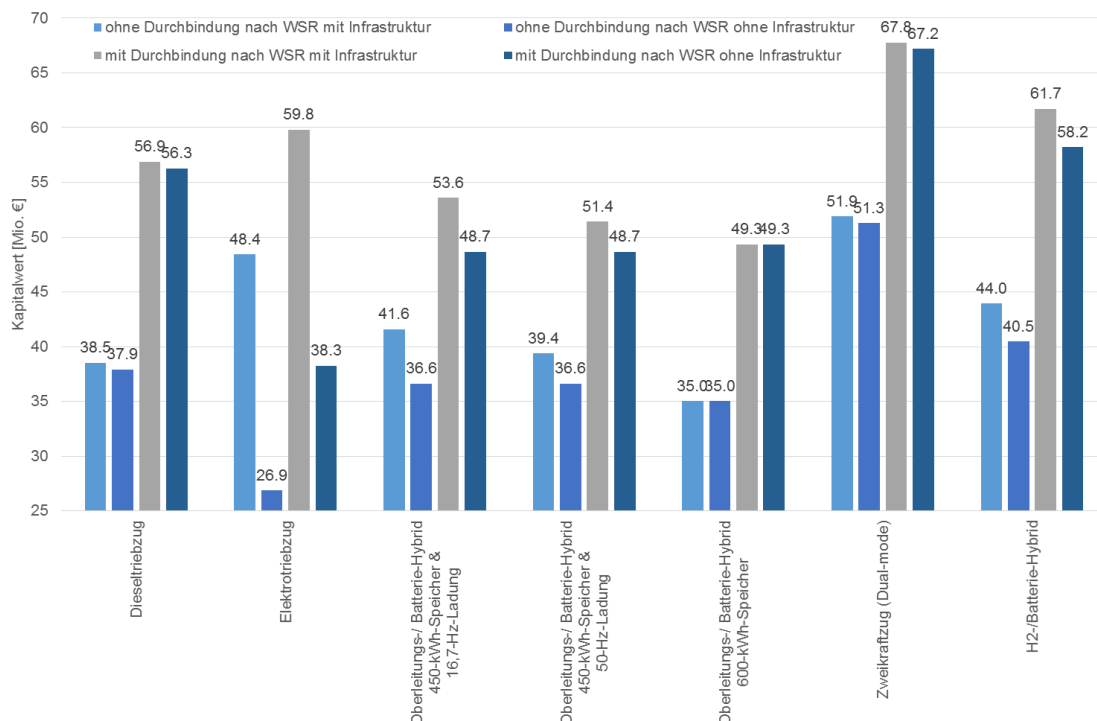


Abb. 7-11 Kapitalwerte Darßbahn mit und ohne Durchbindung nach Stralsund (WSR) (35 Jahre Betrachtungszeit)

Größter Vorteil für die Technologie ist die Ladung an der in Velgast auf allen Gleisen vorhandenen Oberleitung, die eine Ladung zum günstigen Bahnstrompreis ohne Infrastrukturinvestitionen ermöglicht. Gleiches gilt für die Durchbindung nach Stralsund, bei der die Oberleitung zwischen Velgast und Stralsund genutzt werden kann. Dies bietet mit nur einem Fahrzeug einen regelmäßigen für die Fahrgäste komfortablen Stundentakt ohne Umstieg direkt in die Urlaubsregion Fischland Darß-Zingst. Die vorhandene Oberleitungs-Infrastruktur zwischen Stralsund und Velgast ermöglicht während der Fahrt die gleichzeitige Ladung der Energiespeicher zu günstigen Bahnstromkonditionen, die erhebliche Einsparungen beim Energiebezug ermöglichen, im Vergleich zu einer Ladung an einer Ladestation in Prerow. Dort müssten ca. 67 % Merkosten pro kWh durch die Versorgung aus dem Landesnetz kalkuliert werden.

Betrachtungsdauer 15 Jahre

Für die Darßbahn ergibt sich bereits bei 15 Jahren Betrachtungsdauer ein in Reihenfolge und Ergebnis gleiches Bild wie bei 35 Jahren Betrachtungsdauer. Dies gilt sowohl für die verkürzte Variante zwischen Velgast und Prerow, als auch für die Durchbindung nach Stralsund. Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeuge, die über einen großen Energiespeicher verfügen und demzufolge eine Reichweite von ca. 65 km aufweisen sind für beide Varianten der RB 25 am wirtschaftlichsten. Sie ermöglichen einen Verzicht auf die Ladestation in Prerow.

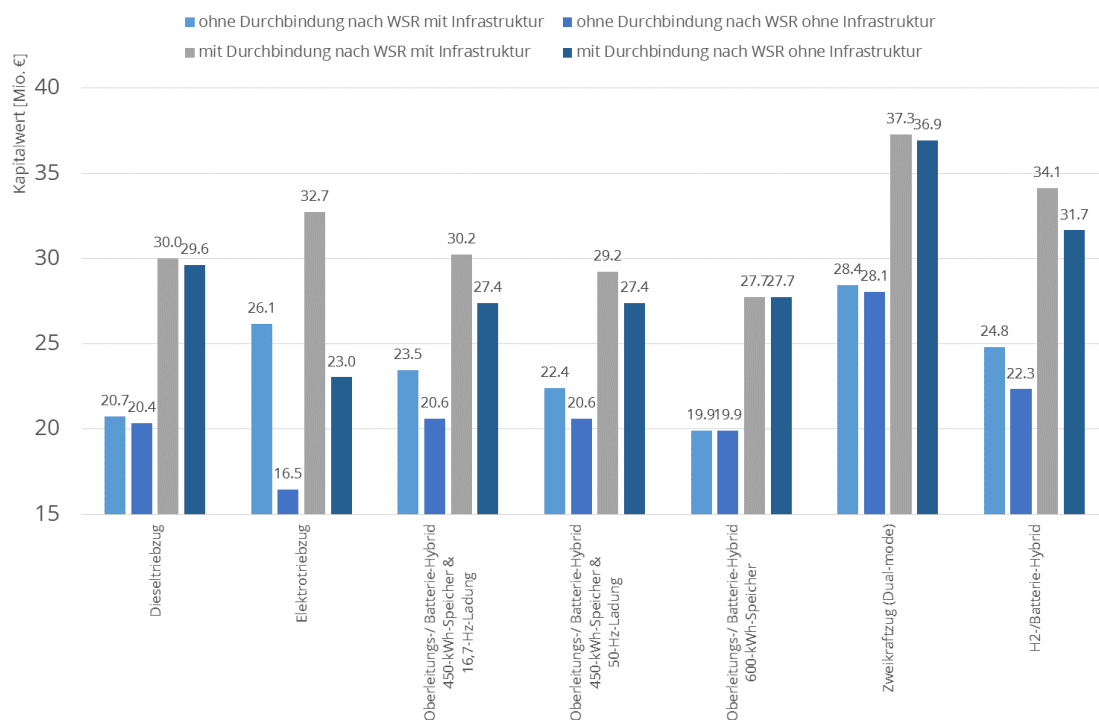


Abb. 7-12 Kapitalwerte Darßbahn mit und ohne Durchbindung nach Stralsund (WSR) (15 Jahre Betrachtungszeitraum)

Die Wahl größerer Energiespeicher hat im Zuge der Reaktivierung der Darßbahn zusätzlich noch den Vorteil, dass auch bei einer etappenweise Wiederaufnahme des Betriebes bereits mit den neuen Fahrzeugen der volle Betrieb abgewickelt werden kann (beispielsweise bei Reaktivierung zunächst bis Bresewitz oder Zingst), ohne dass Interimslösungen geschaffen werden müssen.

Kapitalwerttabelle Darßbahn

Für die Darßbahn zeichnet sich ein ähnliches Bild ab, wie dies im Netz Westmecklenburg II vorhanden ist. Tabelle 7-15 zeigt, dass sowohl mit als auch ohne Durchbindung nach Stralsund bei Mitbetrachtung der Infrastruktur Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeuge mit großem Energiespeicher, für die keine Infrastruktur errichtet werden muss, die wirtschaftlich günstigste Technologie auf der Darßbahn darstellen. Wird die Infrastruktur durch dritte bezahlt (z. B. Bund), so ist die Vollelektrifizierung wirtschaftlich günstiger.

Tabelle 7-15 Kapitalwertübersicht der Darßbahn (**ohne** Durchbindung nach Stralsund jeweils oberer Wert/ **mit** Durchbindung jeweils **unterer** Wert) **inklusive** betrachteter Restwerte

	35 Jahre mit Infrastruktur [Mio. €]	35 Jahre ohne Infrastruktur [Mio. €]	15 Jahre mit Infrastruktur [Mio. €]	15 Jahre ohne Infrastruktur [Mio. €]
Dieseltriebzug	38.52	37.91	20.74	20.36
	56.89	56.28	30.02	29.64
Elektrotriebzug	48.43	26.87	26.15	16.46
	59.82	38.27	32.73	23.04
Oberleitungs-/ Batterie-Hybrid 450 kWh-Speicher 16,7-Hz-Laden	41.59	36.63	23.45	20.62
	53.61	48.66	30.24	27.41
Oberleitungs-/ Batterie-Hybrid 450 kWh-Speicher 50-Hz-Laden	39.40	36.63	22.42	20.62
	51.43	48.66	29.21	27.41
Oberleitungs-/ Batterie-Hybrid 600 kWh-Speicher keine Ladeinfrastr.	35.02	35.02	19.91	19.91
	49.34	49.34	27.74	27.41
Oberleitungs-/ Die- sel- Hybrid (Dual-mode)	51.87	51.26	28.44	28.06
	67.78	67.17	37.29	36.91
H ₂ -/Batterie-Hybrid ohne Erzeugeranlage	43.95	40.47	24.82	22.34
	61.73	58.24	34.14	31.66



In satterem grün wurde die jeweils vorteilhafteste alternative Antriebstechnologie markiert, fette Schrift stellt das wirtschaftlich günstigste Ergebnis dar. In hellem grün wird jeweils Rang 2 dargestellt.

Die Technologie der **Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeuge** mit einzelnen Ladestationen wurde deshalb als die insgesamt am **wirtschaftlich vorteilhaftesten** alternative Antriebstechnologie für das Netz Westmecklenburg II und die Darßbahn ermittelt. Die Fahrzeuge müssen für die wirtschaftlichste Variante und den möglichen Verzicht auf die Ladestationen in Prerow und Rehna über einen großen Energiespeicher verfügen. In dieser Untersuchung wurde hierfür mit ca. 600 kWh Nennenergieinhalt inkl. ca. 70 % Nutzbarkeit dieses Energieinhalts und einer Alterungsreserve von 20 % bezogen auf den ungealterten Speicher verfügen. Solche Fahrzeuge sind bereits heute am Markt verfügbar.

Es erscheint aufgrund des einheitlichen Ergebnisses sinnvoll, eine gemeinsame Fahrzeugbestellung für beide Netze auszulösen und so von größeren Stückzahlen beim Fahrzeugbezugspreis profitieren zu können.

8 Zusammenfassung und Fazit

8.1 Wirtschaftliche Bewertung

Oberleitungs-/Batterie-Hybrid-Fahrzeuge sind in der Gesamtnetzbetrachtung sowohl für das Netz Westmecklenburg II als auch die Darßbahn im Vergleich der Antriebssysteme am wirtschaftlichsten. Der Gesamtkapitalwert des Systems liegt nahe knapp unterhalb der Bestandstechnologie mit Dieseltriebzügen, deren Kapitalwert für gleich große Fahrzeuge (ebenfalls ca. 120 Sitzplätze) als Referenz dient. Würden die heute eingesetzten kleineren Fahrzeuge mit noch günstigeren Kosten angesetzt, blieben Dieseltriebzüge allerdings weiterhin die wirtschaftlichste Technologie.

Der wirtschaftliche Vorteil der Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeuge nimmt über längere Betrachtungszeiträume zu (Betrachtungsdauer bis zu 35 Jahren). Insbesondere der höhere Wirkungsgrad vollelektrischer Systeme verbunden mit günstigen Energiebezugskosten durch Ladung an der Oberleitung wirkt sich bei längerfristigen Betrachtungen auf den Kapitalwert aus. Zudem sind alle Fahrzeugtechnologien nach Ende des langen Betrachtungszeitraums vollständig abgeschrieben. Verstärkt wird dies, wenn eine Durchbindung auf bereits elektrifizierte Streckenabschnitte (Stralsund Hbf – Velgast) stattfindet.

Ähnlich wie bei einer Vollelektrifizierung sind Oberleitungs-/Batterie-Hybride bei bereits vorhandener Elektrifizierung günstig (auf allen Linien außer der Linie RB 19, diese jedoch indirekt über die betriebliche Durchbindung mit der Linie RB 14), da die Ladung der Traktionsbatterien dort an der Oberleitung erfolgt. Dies ermöglicht einen kostengünstigen Energiebezug, was insbesondere bei hohen Laufleistungen maßgebliche Auswirkungen hat.

8.2 Kostentreiber

Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeuge einschließlich Infrastruktur können den Bereich der Wirtschaftlichkeit von Dieselfahrzeugen erreichen. Einen großen Einfluss auf die Rangfolge der Technologien haben die Traktionsenergiekosten. Dabei sind spezifische Energiekosten und Antriebswirkungsgrade entscheidend für die Effizienz und damit die Wirtschaftlichkeit des Systems. Im Hinblick auf lange Lebensdauern und höhere Laufleistungen der Fahrzeuge ist diese Kostenposition sehr relevant, da schon kleine Kostenvorteile bei großen Energiebedarfen über den langen Zeitraum maßgebliche Auswirkungen haben.

Gleichfalls ist der belastungsabhängige Tausch von Hochtechnologiekomponenten wie Batterien, PowerPacks und Brennstoffzellen ein Kostentreiber. Dabei spielen vor allem die Lebensdauer bzw. die Laufleistung der Komponenten eine maßgebliche Rolle. Zu erwartende Weiterentwicklungen können die Wirtschaftlichkeit positiv beeinflussen.

Entgegen der allgemeinen Erwartungen haben die Fahrzeugbeschaffungskosten nur einen geringen Einfluss auf die Rangfolge der Hybridsysteme und verursachen aufgrund der langen Lebensdauern der Fahrzeuge nur geringe Differenzen beim Kapitalwert. Sie haben zwar einen hohen Anteil an den Gesamtkosten, jedoch sind die Beschaffungskostenunterschiede der einzelnen Technologien gering und so nicht prägend.

8.3 Ökologische Bewertung

In der Studie wurde eine Übersicht über die betrieblichen CO₂-Emissionen aller Antriebstechnologien gegeben. Zusammenfassend kann hierzu festgehalten werden, dass Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeuge spätestens 2038 eine Einsparung von ca. 90 % der Emissionen im Vergleich zur Dieseltraktion erreichen. Auch Wasserstoff-/Batterie-Hybride erreichen je nach Herstellungsverfahren ca. 42 – 74 % Einsparung. Das Ziel, den Betrieb des Netzes Westmecklenburg II und der zukünftig wieder auf voller Länge reaktivierten Darßbahn deutlich ökologischer zu gestalten, kann also durch alle beide Technologien erreicht werden. Sie bieten zudem die Möglichkeit zukünftig nahezu vollständig emissionsfrei zu werden.

8.4 Empfehlung zur Technologieentscheidung

Unter Berücksichtigung aller untersuchten Randbedingungen sehen die Gutachter Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeuge als die wirtschaftlichste alternative Antriebstechnologie im Netz Westmecklenburg II sowie auf der Darßbahn an. Die Wirtschaftlichkeit dieser Technologie kommt am Weitesten an den aktuellen Dieselbetrieb heran. Unter Voraussetzung neuer größerer Dieselfahrzeuge ist der Betrieb in seinen Kosten sogar nahezu gleich.

Diese Empfehlung stützt sich auf Ergebnisse der Kapitalwertberechnung verschiedener alternativer Antriebstechnologien. Diese zeigt, dass die Oberleitungs-/Batterie-Hybride am weitesten an eine Wettbewerbsfähigkeit mit dem aktuellen Dieselzugbetrieb heranreichen. Die Technologie der Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeuge ermöglicht den vollelektrischen Betrieb auf allen Linien auch ohne Elektrifizierung der Gesamtstrecken unter überwiegender Nutzung bereits vorhandener Oberleitungsinfrastruktur zur Ladung der Fahrzeuge.

Herausforderung bleibt die Nachrüstung des Bahnhofs Plau am See mit einer Nachlademöglichkeit für den Ausflugsverkehr, diese wird jedoch durch die im Vergleich höchste Gesamtwirtschaftlichkeit der Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeuge ausgeglichen.

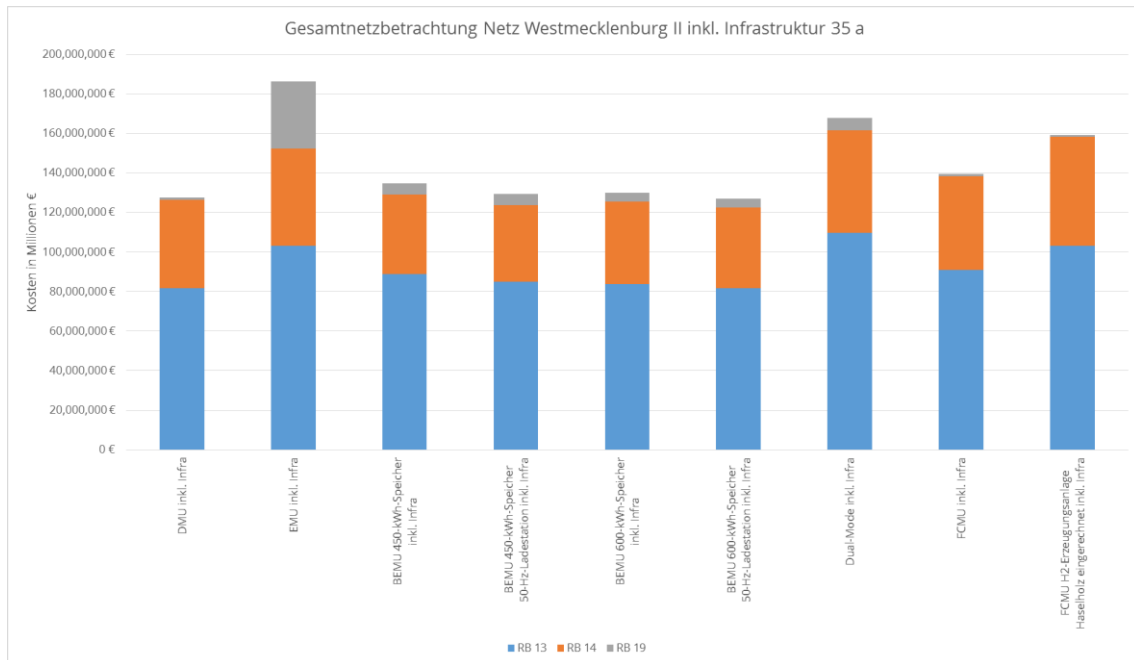
Außerdem berücksichtigt die Empfehlung die CO₂-Emissions-Bewertung, die das ökologische Ziel der Traktionsartänderung im Netz Westmecklenburg II bestätigt und CO₂-Reduktionspotenziale ab 2038 von ca. 90 % erwarten lässt und sich diesem Wert bereits vorher stark annähert.



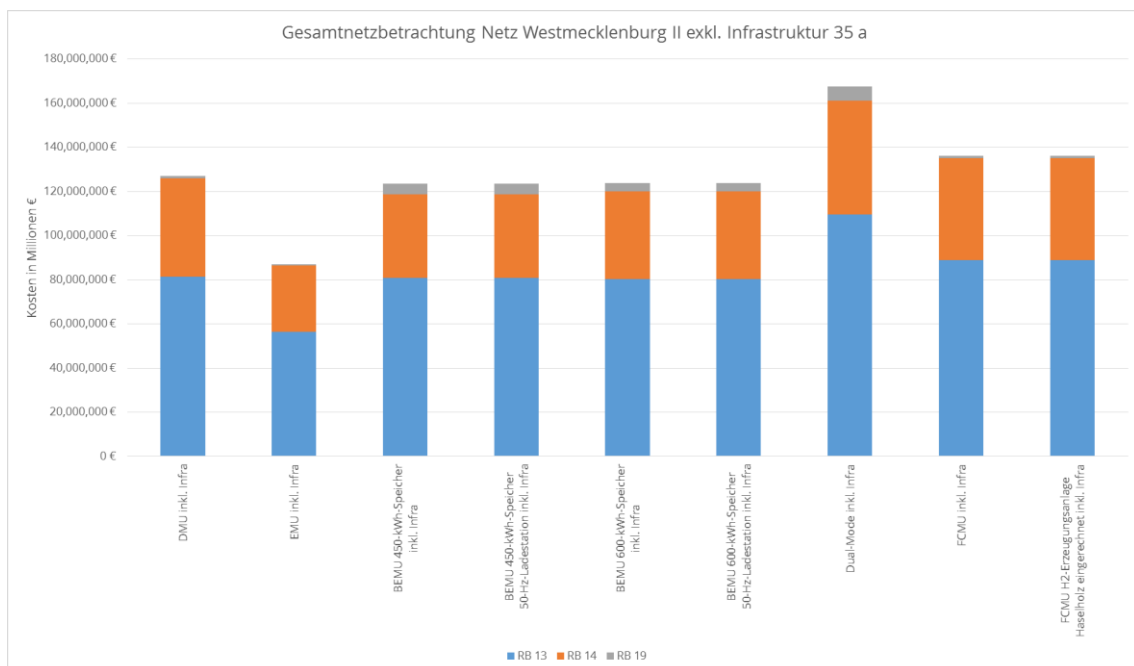
9 Anhang A-F

A Gesamtkapitalwerte im Netz Westmecklenburg II

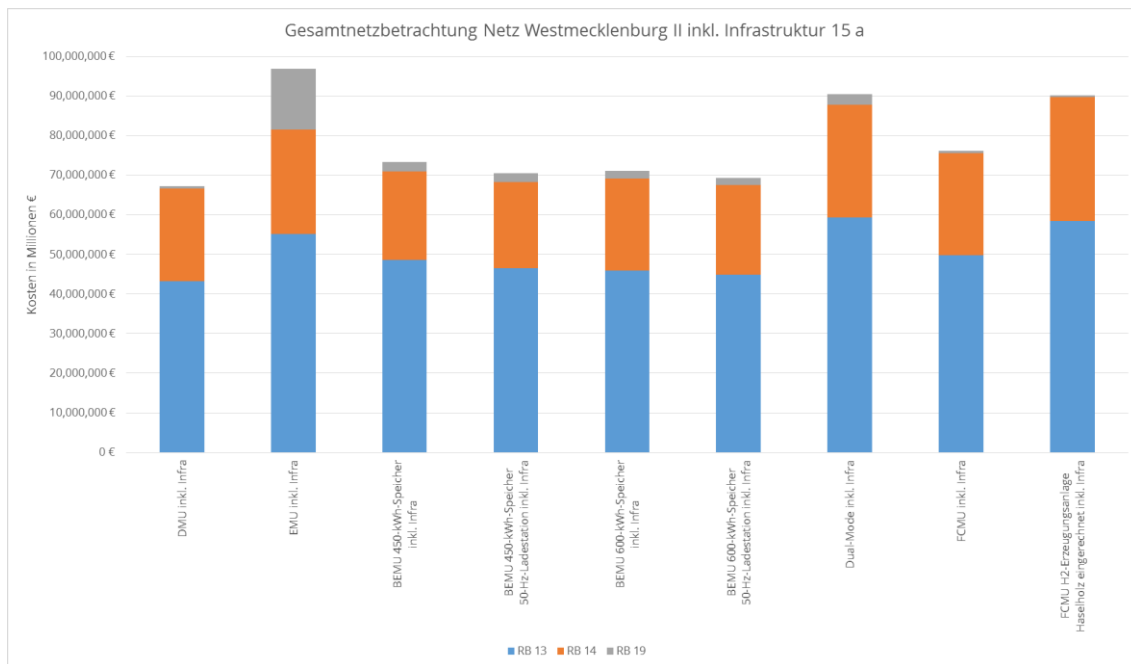
A.1 35 Jahre Betrachtungszeit inklusive Infrastruktur



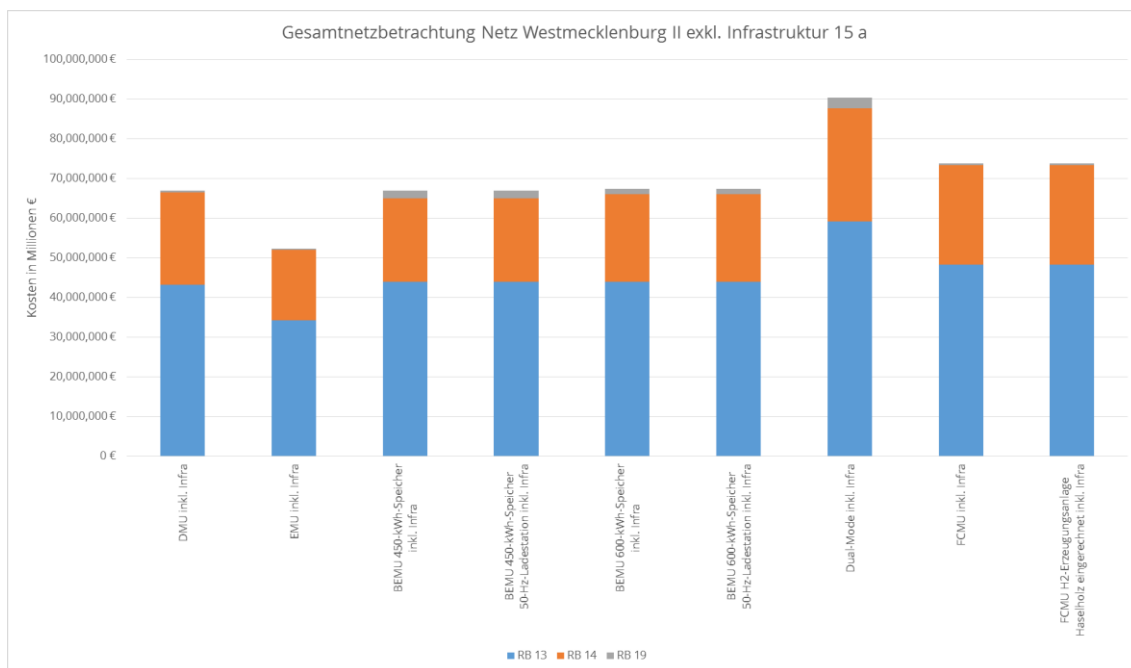
A.2 35 Jahre Betrachtungszeit exklusive Infrastruktur



A.3 15 Jahre Betrachtungszeit inklusive Infrastruktur

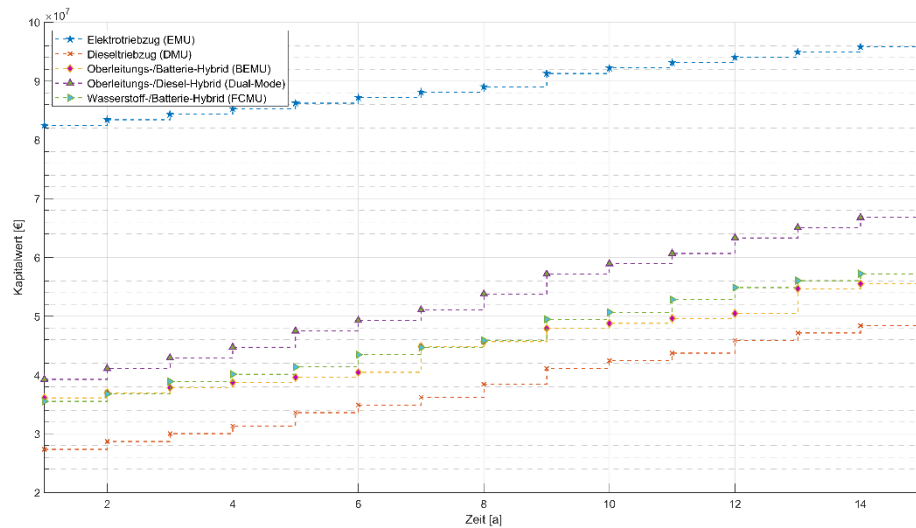


A.4 15 Jahre Betrachtungszeit exklusive Infrastruktur

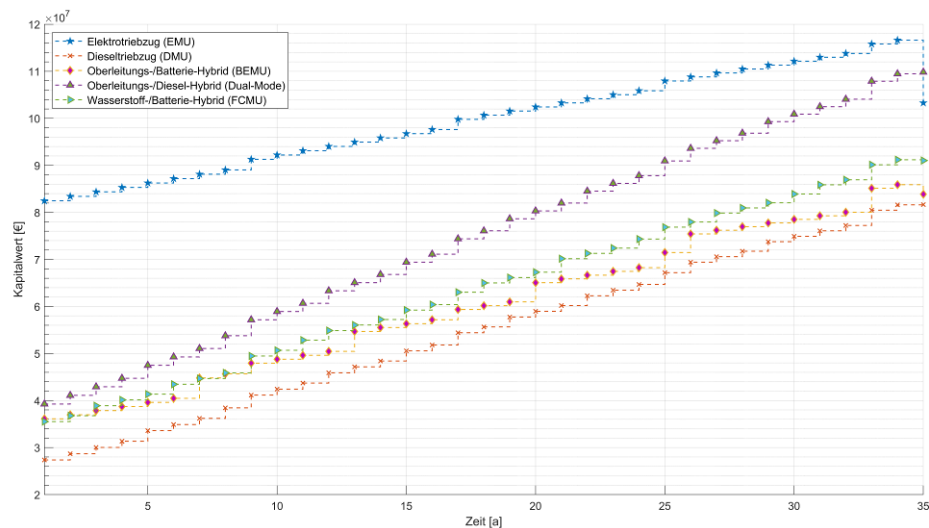


B Linienspezifische Auswertung RB 13 Rehna –Schwerin - Parchim

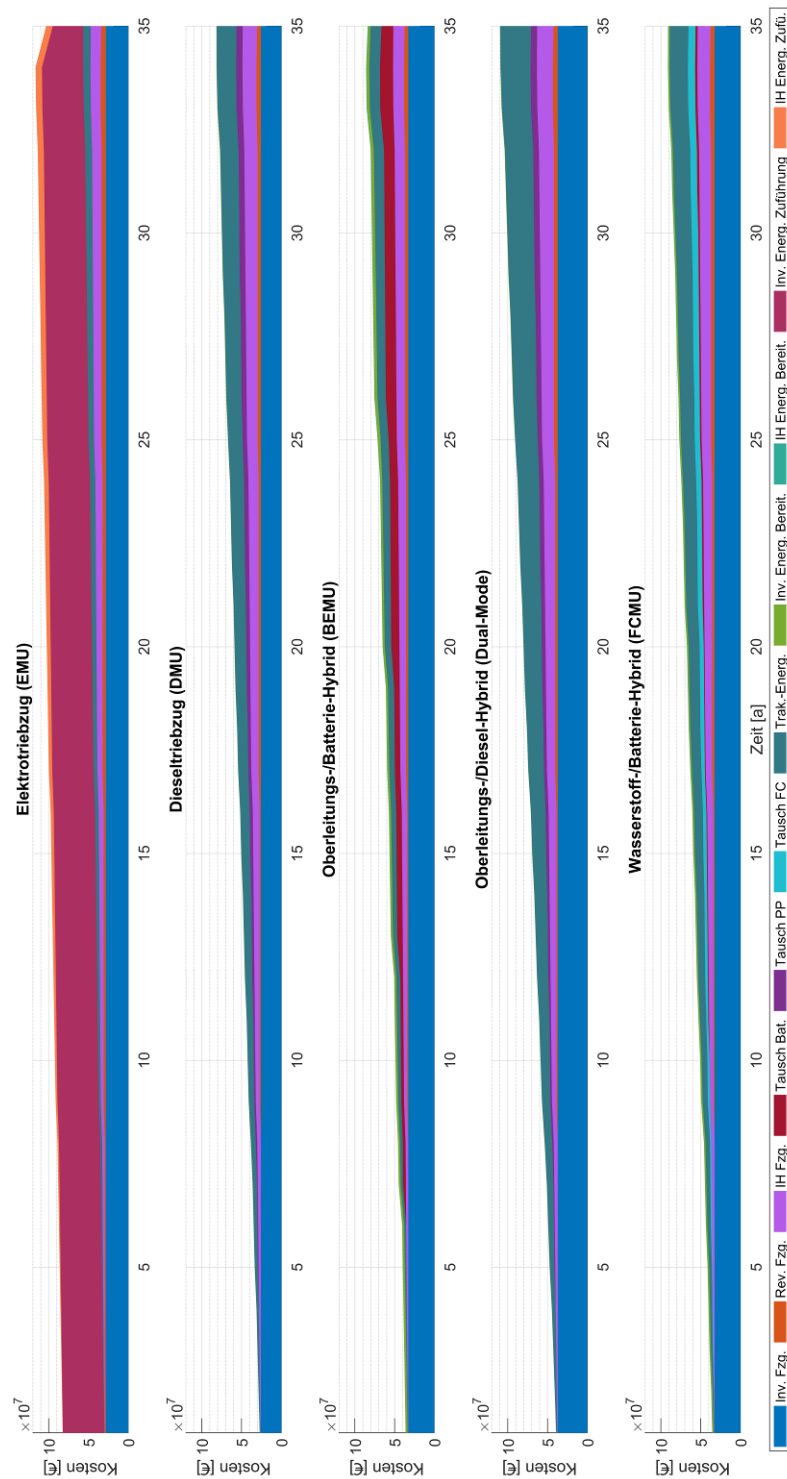
B.1 Kapitalwertverlauf RB 13 WRA-WS-WPM – Zeitraum 15 a



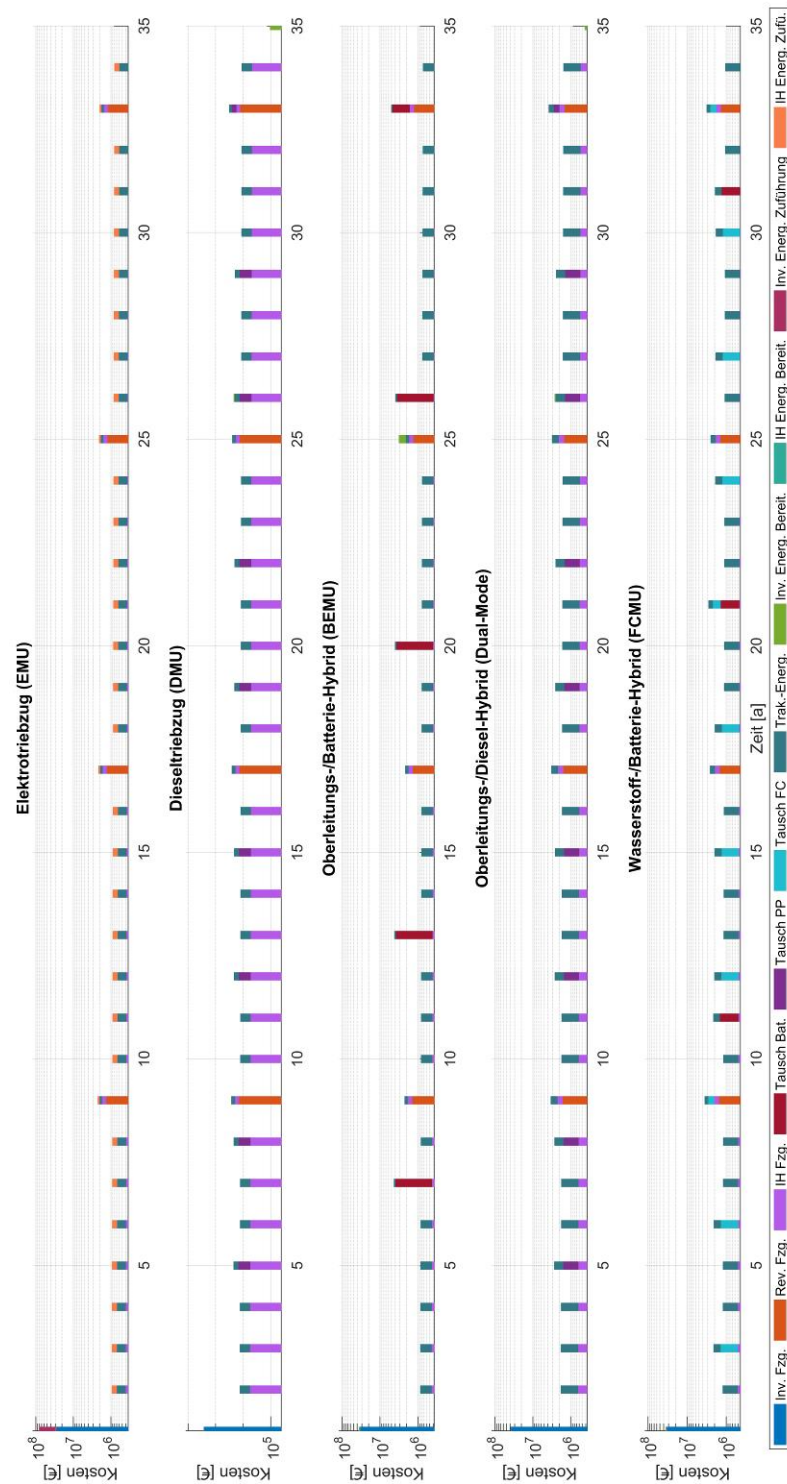
B.2 Kapitalwertverlauf RB 13 WRA-WS-WPM – Zeitraum 35 a



B.3 Kapitalwertverlauf RB 13 – 35 a (differenziert)

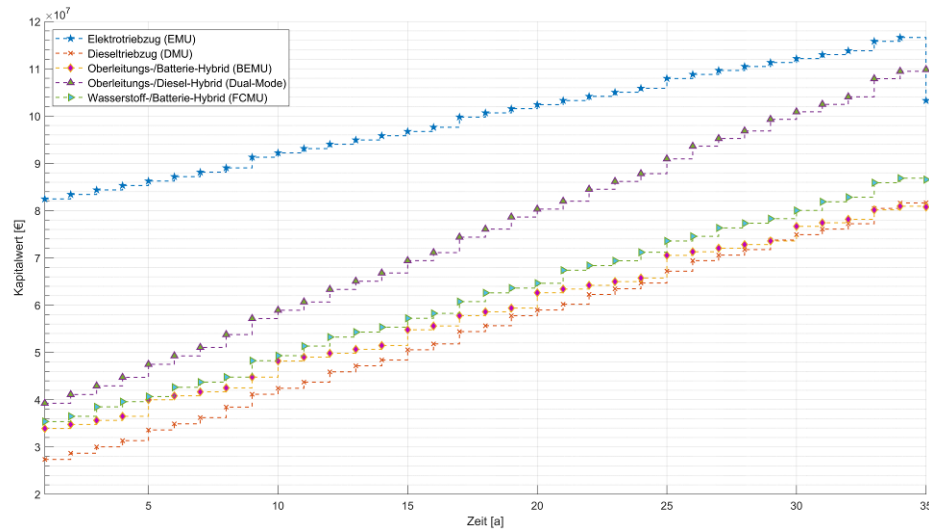


B.4 Kostenpositionen jährlich RB 13 – 35 a



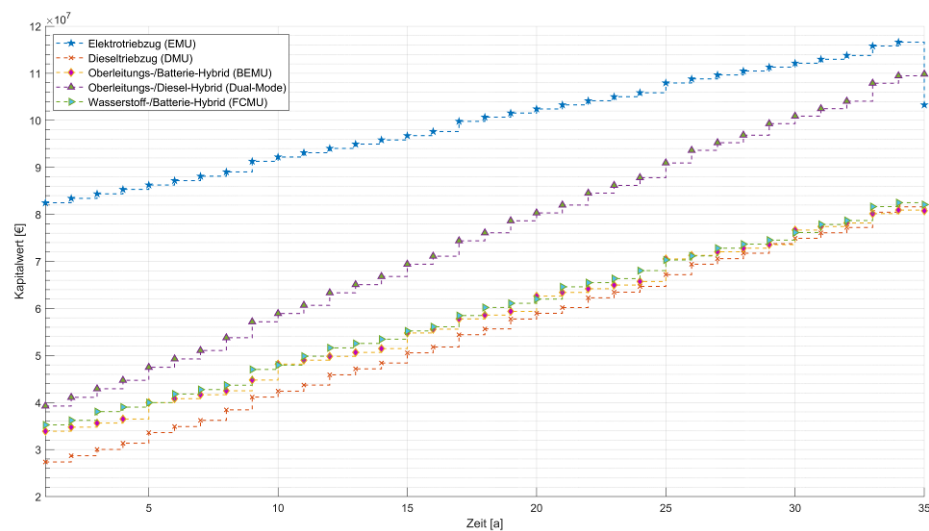
B.5 Kapitalwertverlauf RB 13 – Zeitraum 35 a

Wasserstoffpreis von 4 €/kg



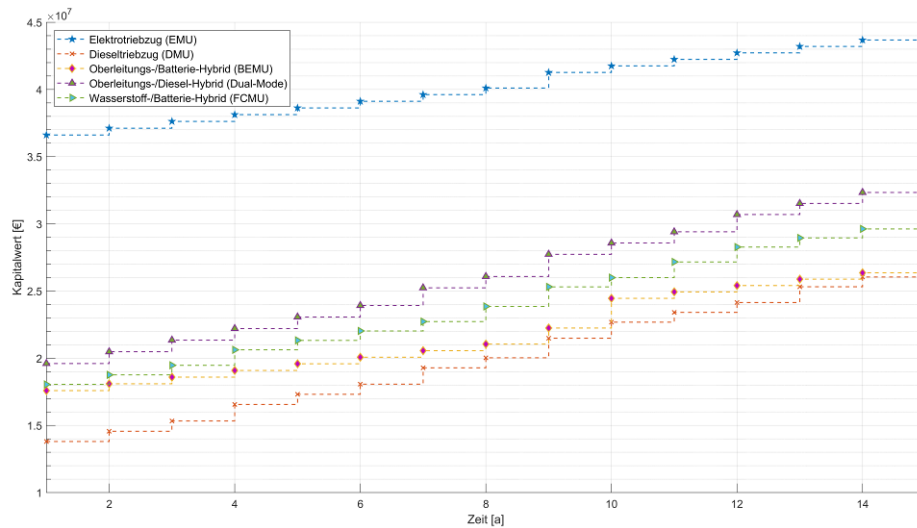
B.6 Kapitalwertverlauf RB 13 – Zeitraum 35 a

Wasserstoffpreis von 3 €/kg

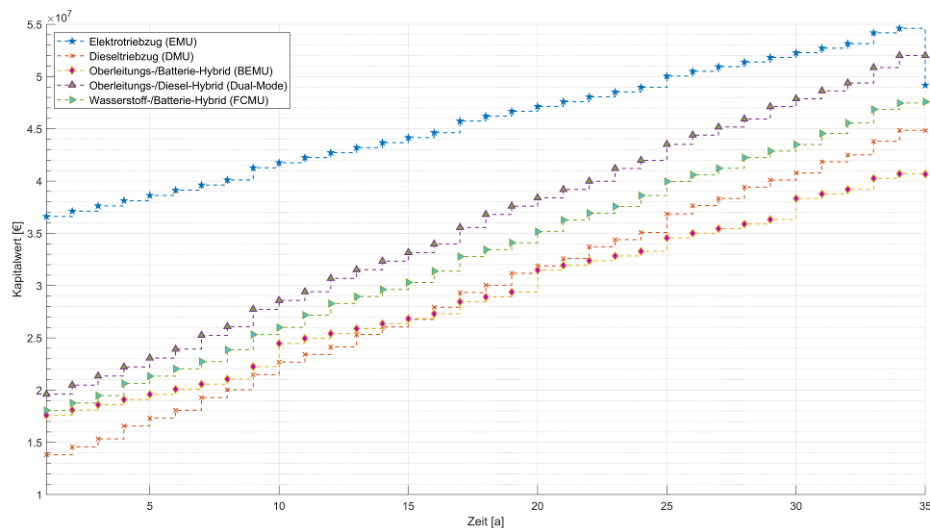


C Linienspezifische Auswertung RB 14 Hagenow Stadt – Parchim **ohne** Durchbindung als RB 19

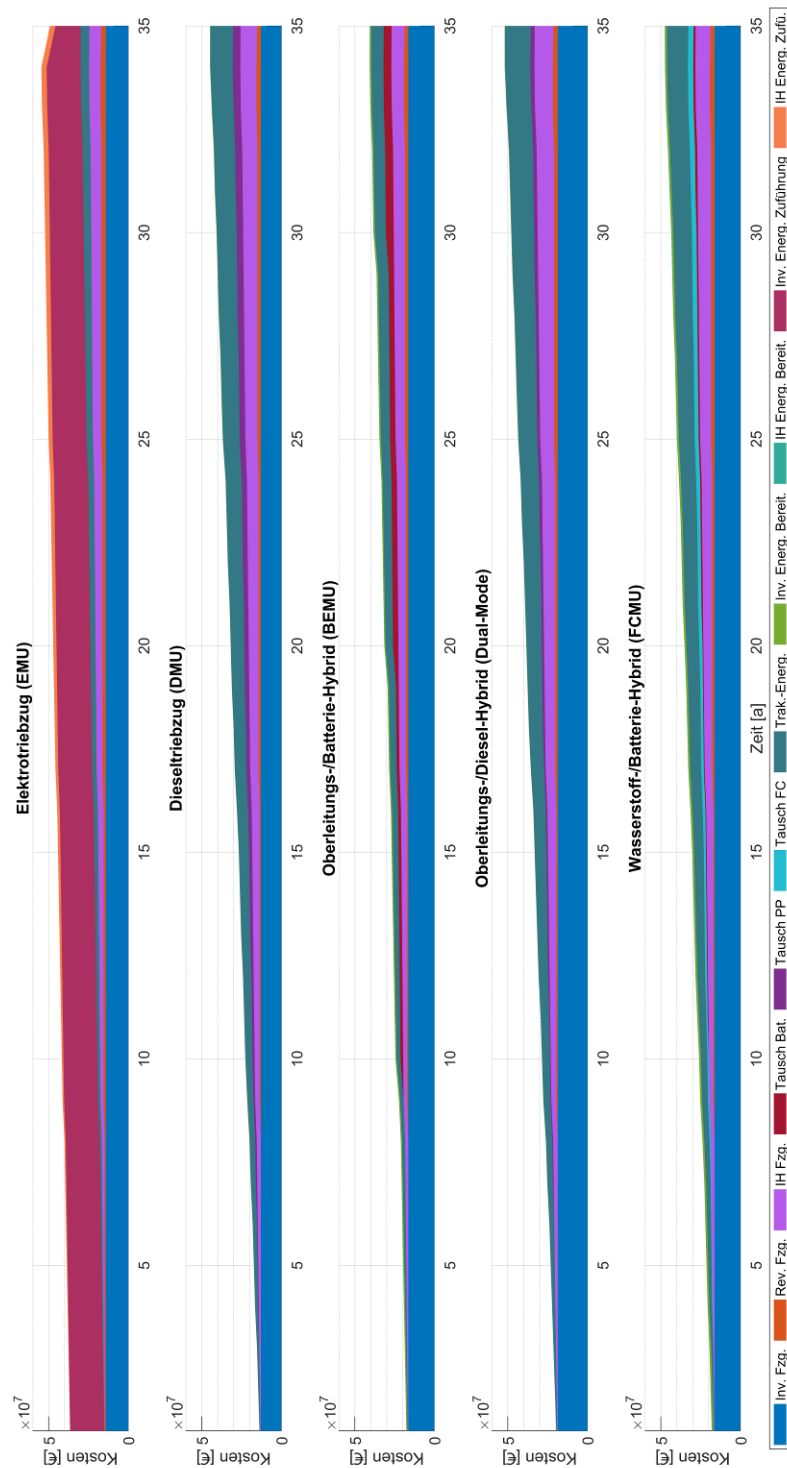
C.1 Kapitalwertverlauf RB 14 WH-WL-WPM – Zeitraum 15 a



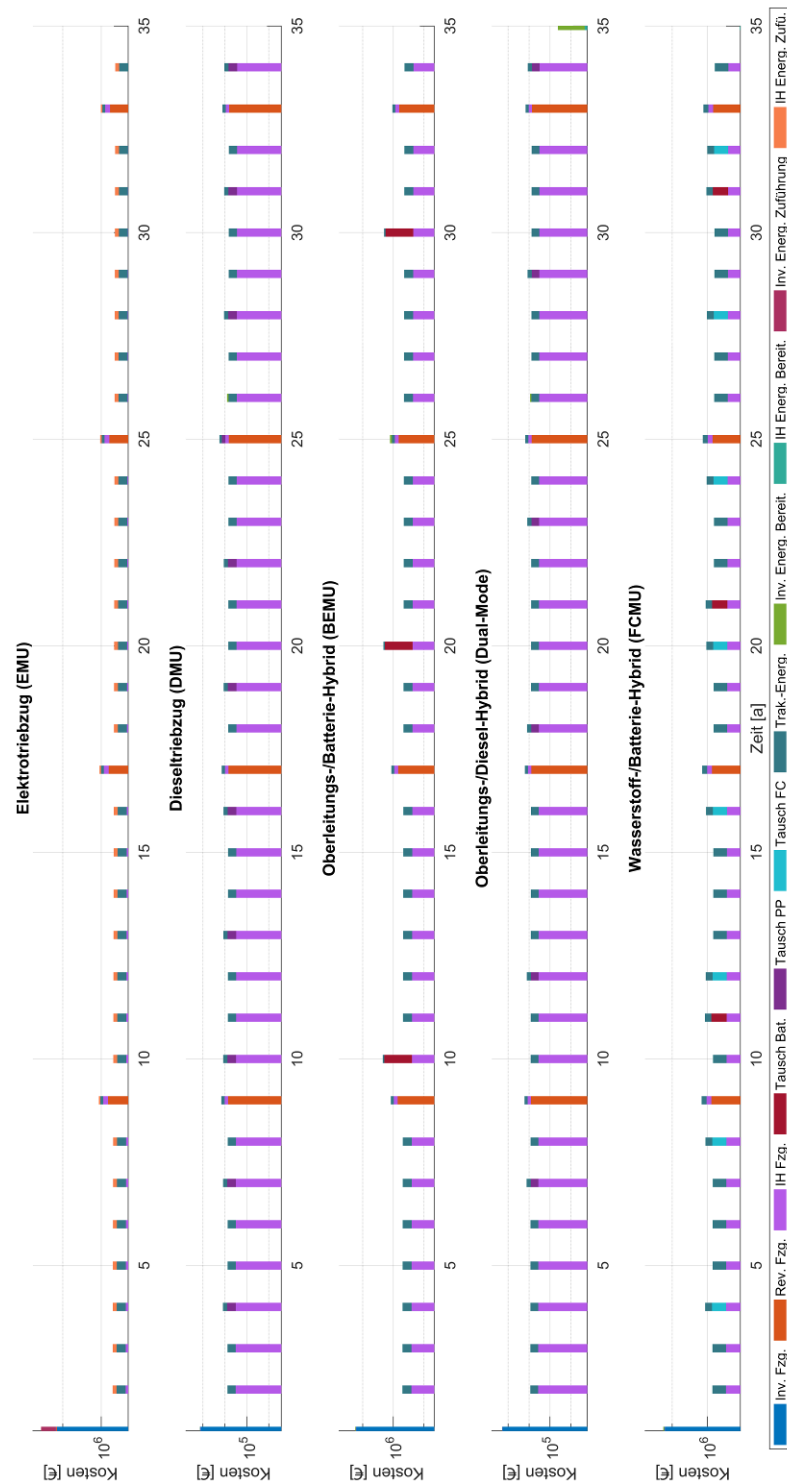
C.2 Kapitalwertverlauf RB 14 WH-WL-WPM - – Zeitraum 35 a



C.3 Kapitalwertverlauf RB 14 – 35 a (differenziert)



C.4 Kostenpositionen jährlich RB 14 – 35 a

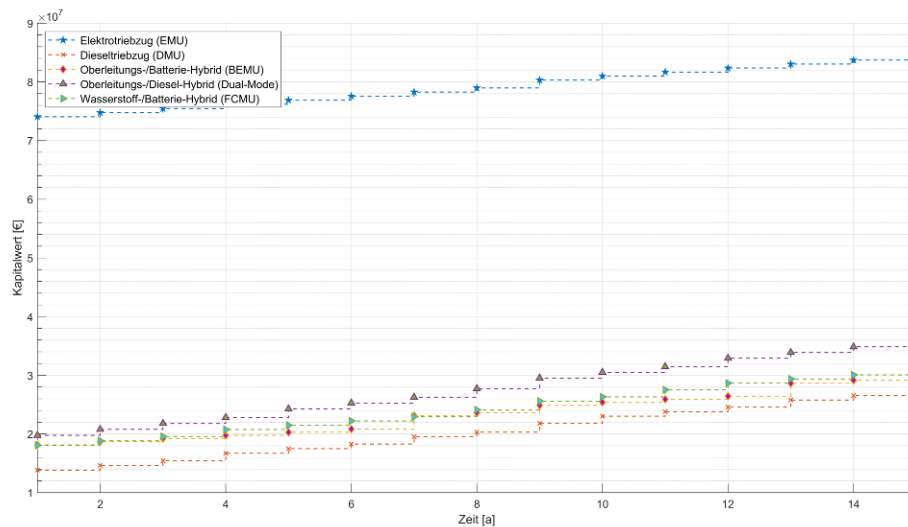


D Linien spezifische Auswertung RB 14 & RB 19 Hagenow

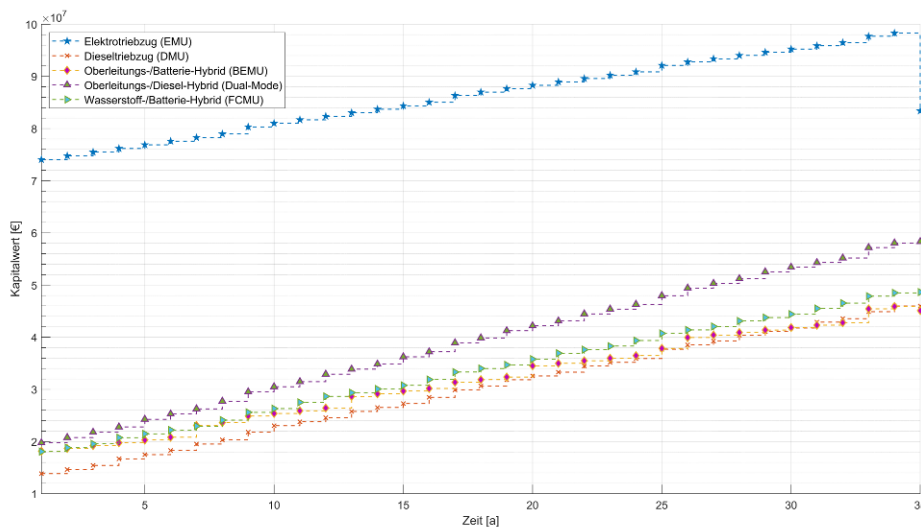
Stadt – Parchim **mit** Durchbindung Plau am

See

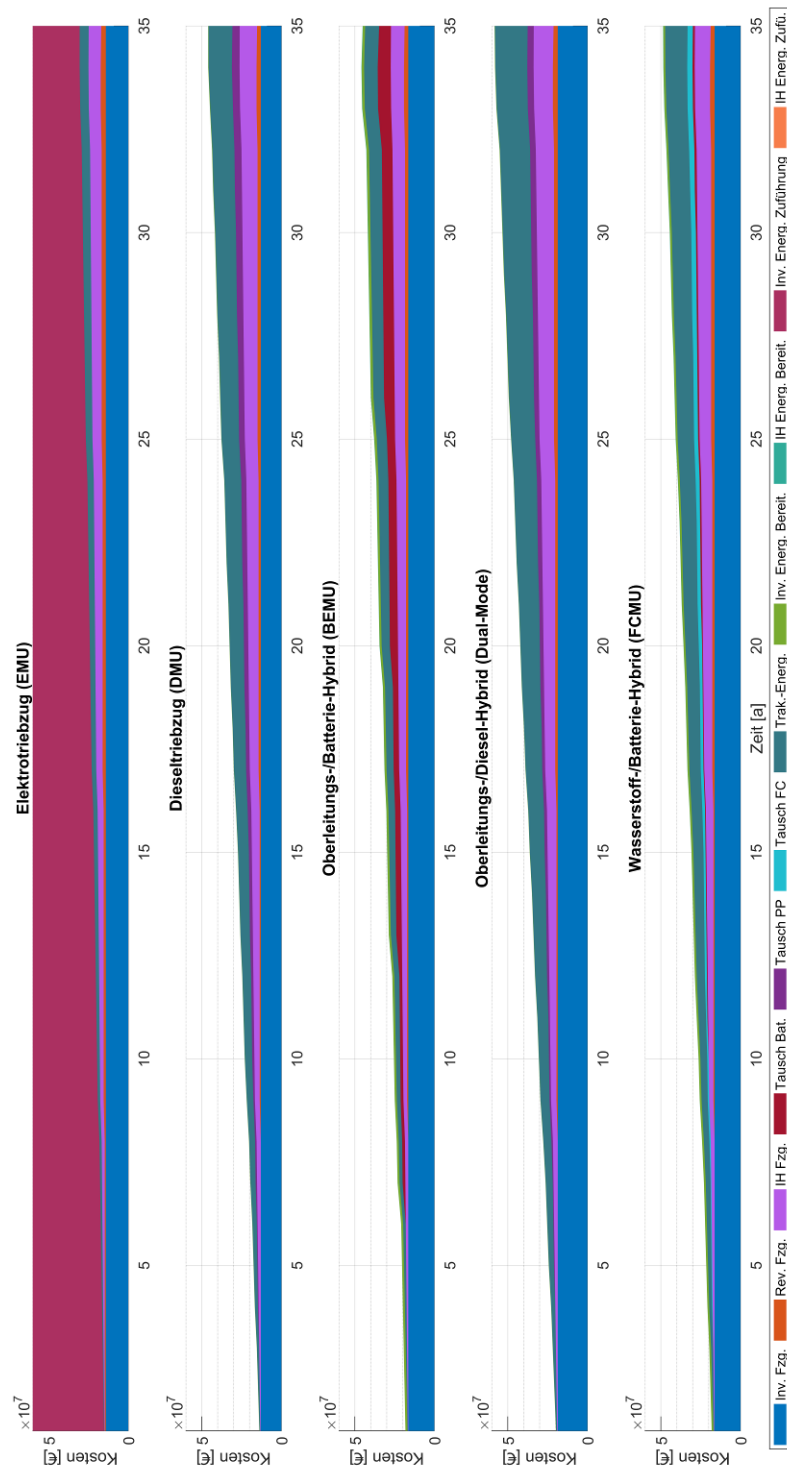
D.1 Kapitalwertverlauf RB 14 & RB 19 WH-WL-WPM-WPU- Zeitraum 15 a



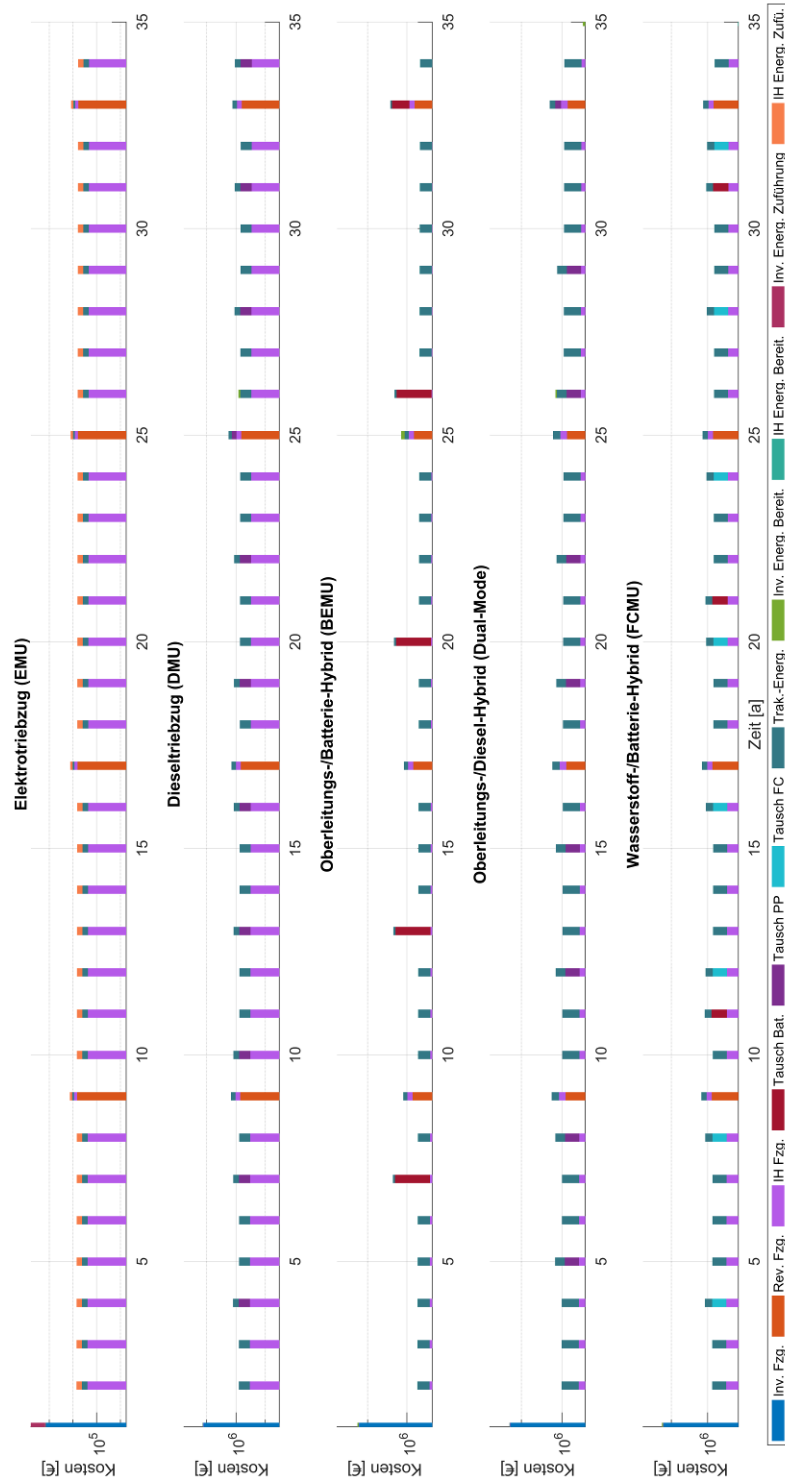
D.2 Kapitalwertverlauf RB 14 & RB 19 WH-WL-WPM-WPU- Zeitraum 35 a



D.3 Kapitalwertverlauf RB 14 & RB 19 – 35 a (differenziert)

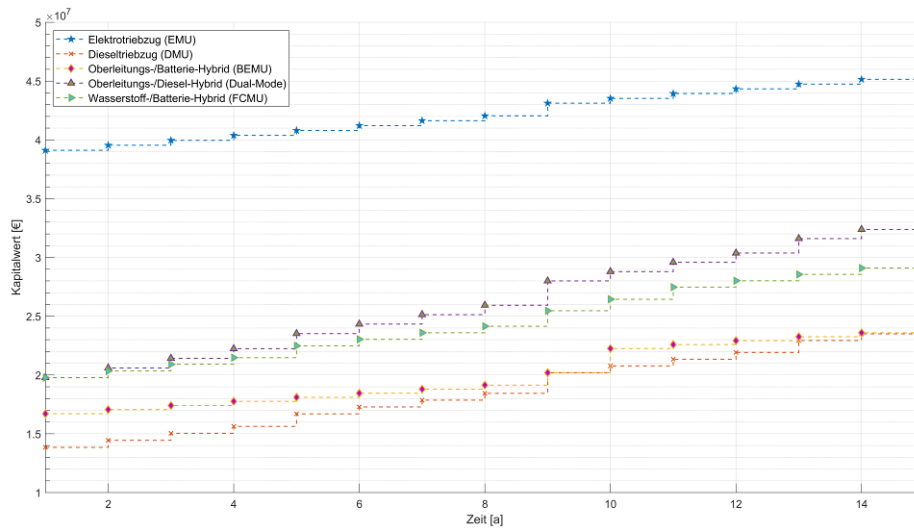


D.4 Kostenpositionen jährlich RB 14 & RB 19 – 35 a

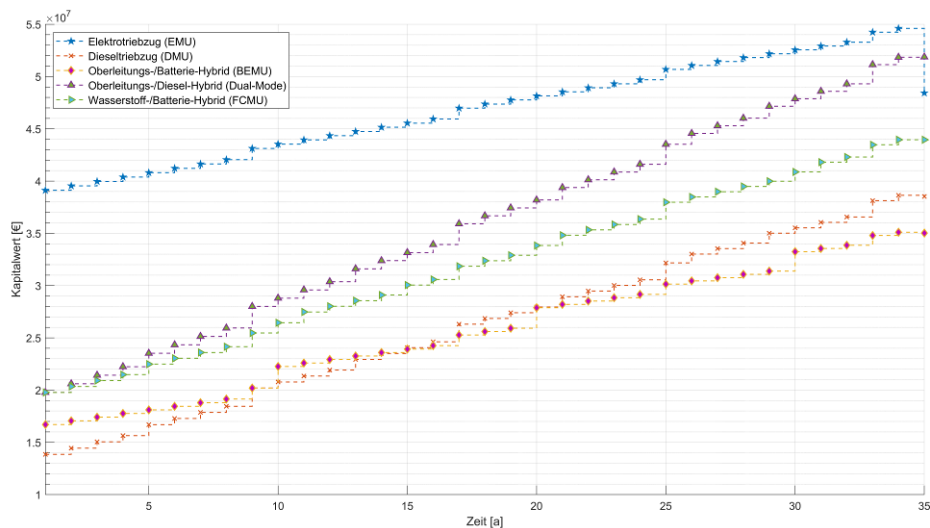


E Linienspezifische Auswertung RB 25 Velgast – Prerow **ohne** Durchbindung nach Stralsund

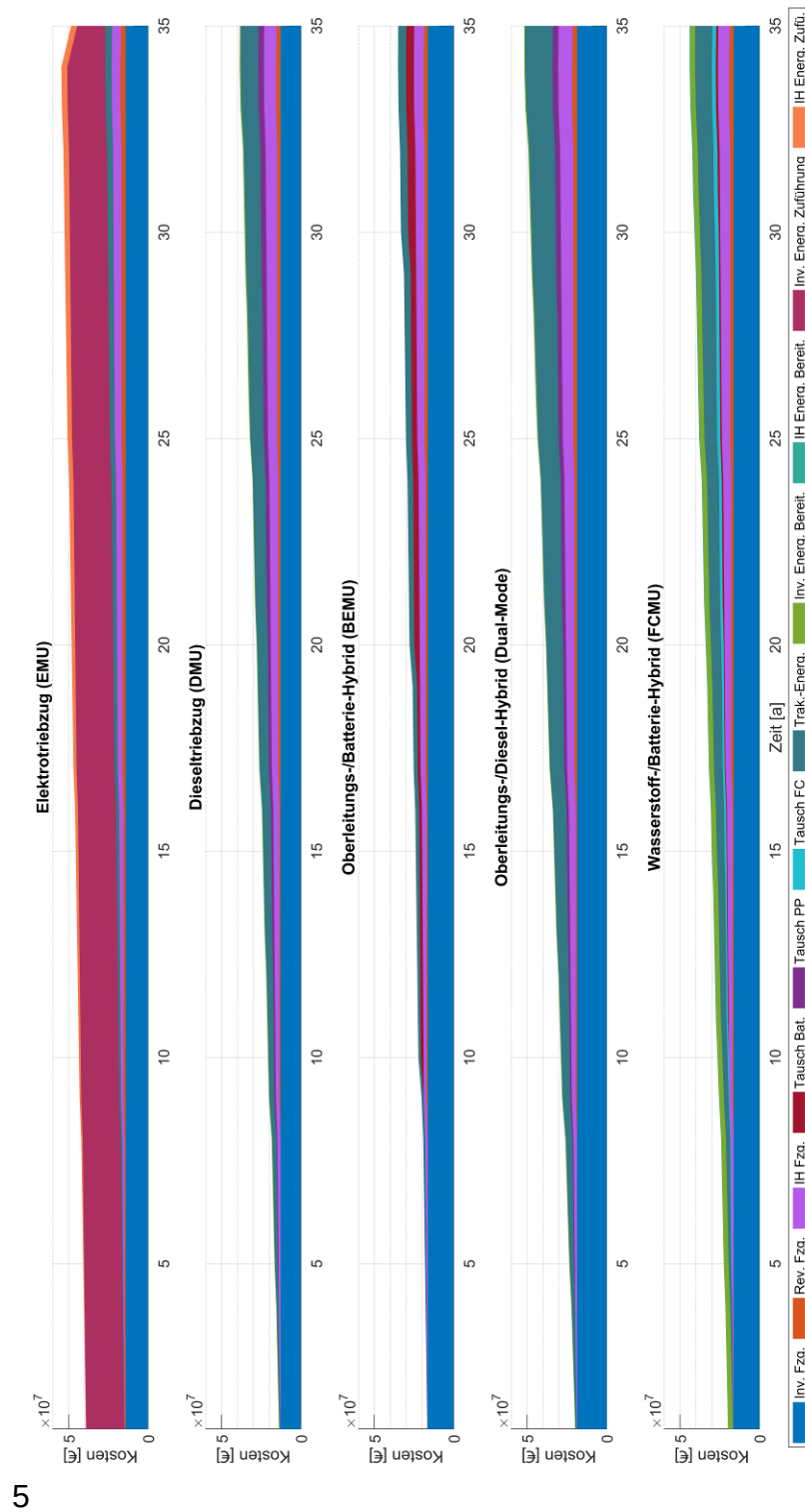
E.1 Kapitalwertverlauf RB 25 WV-WPOS – Zeitraum 15 a



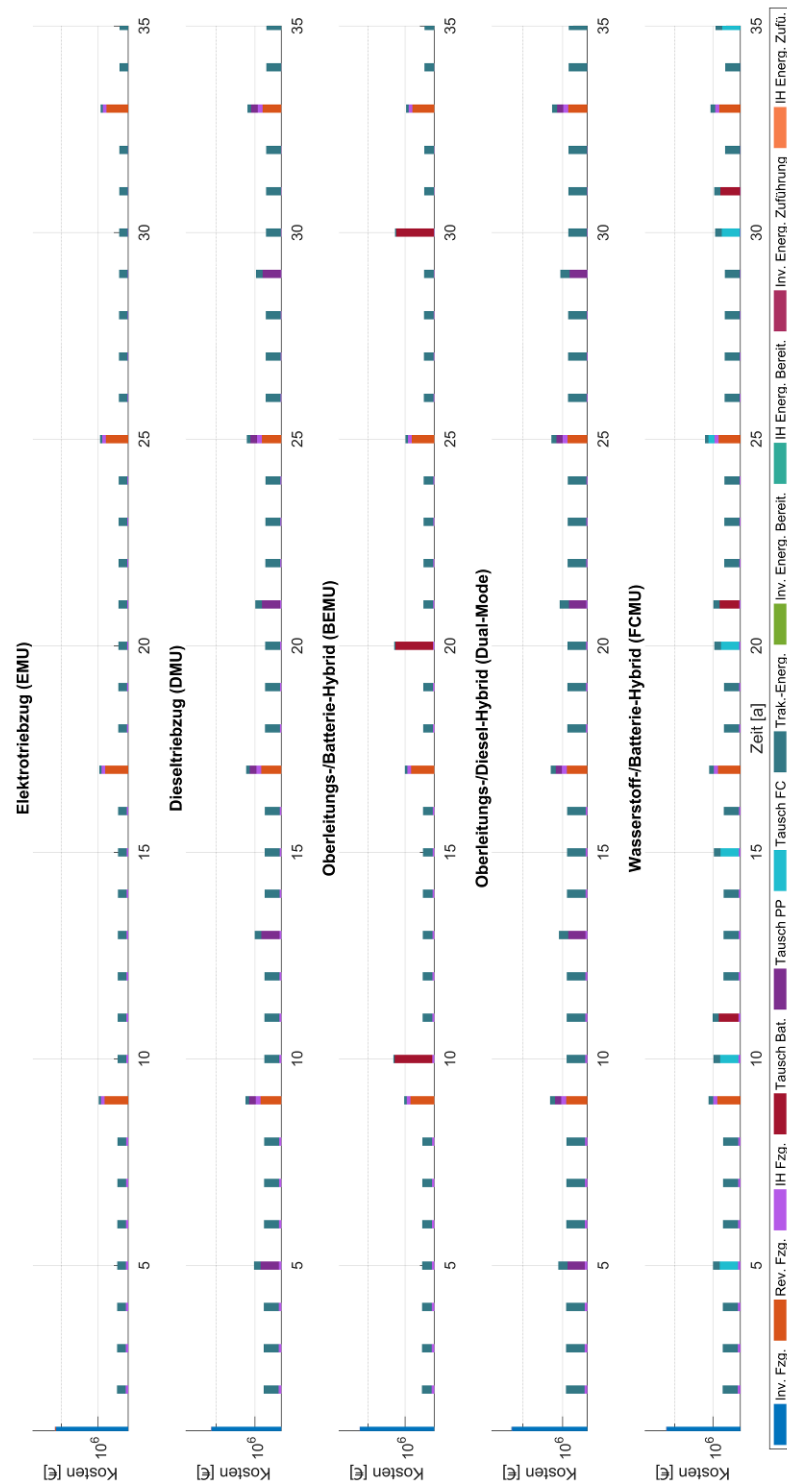
E.2 Kapitalwertverlauf RB 25 WV-WPOS – Zeitraum 35 a



E.3 Kapitalwertverlauf RB 25 – 35 a (differenziert)

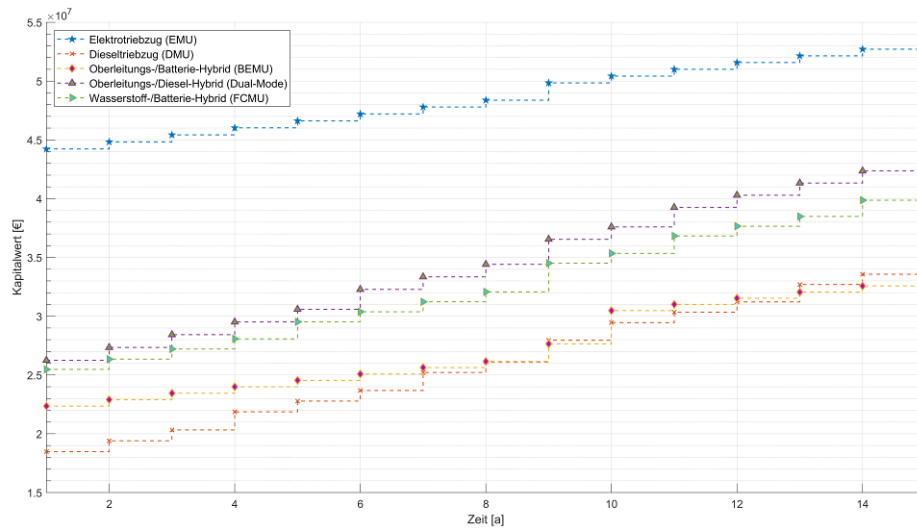


E.4 Kostenpositionen jährlich RB 25 - 35 a (differenziert)

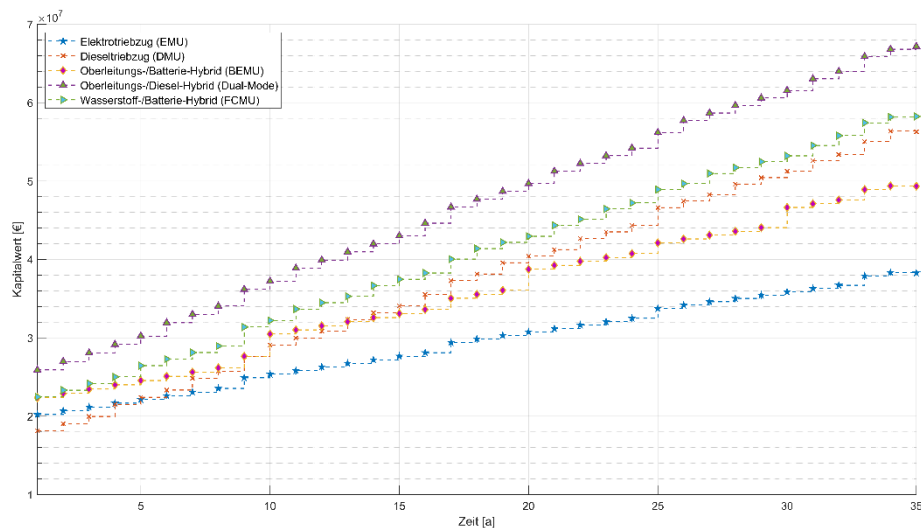


F Linienspezifische Auswertung RB 25 Velgast – Prerow mit Durchbindung nach Stralsund

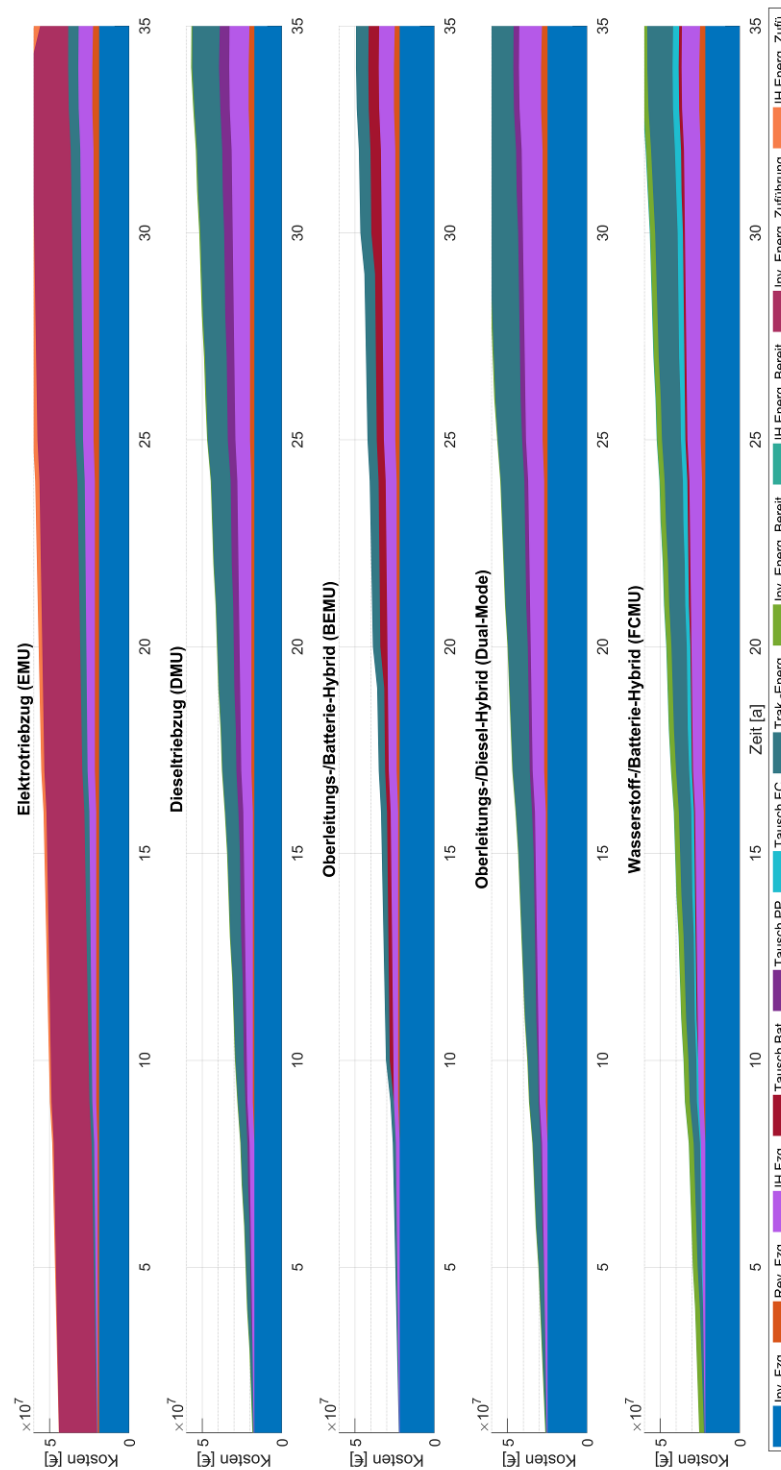
F.1 Kapitalwertverlauf RB 25 WSR-WV-WPOS – Zeitraum 15 a



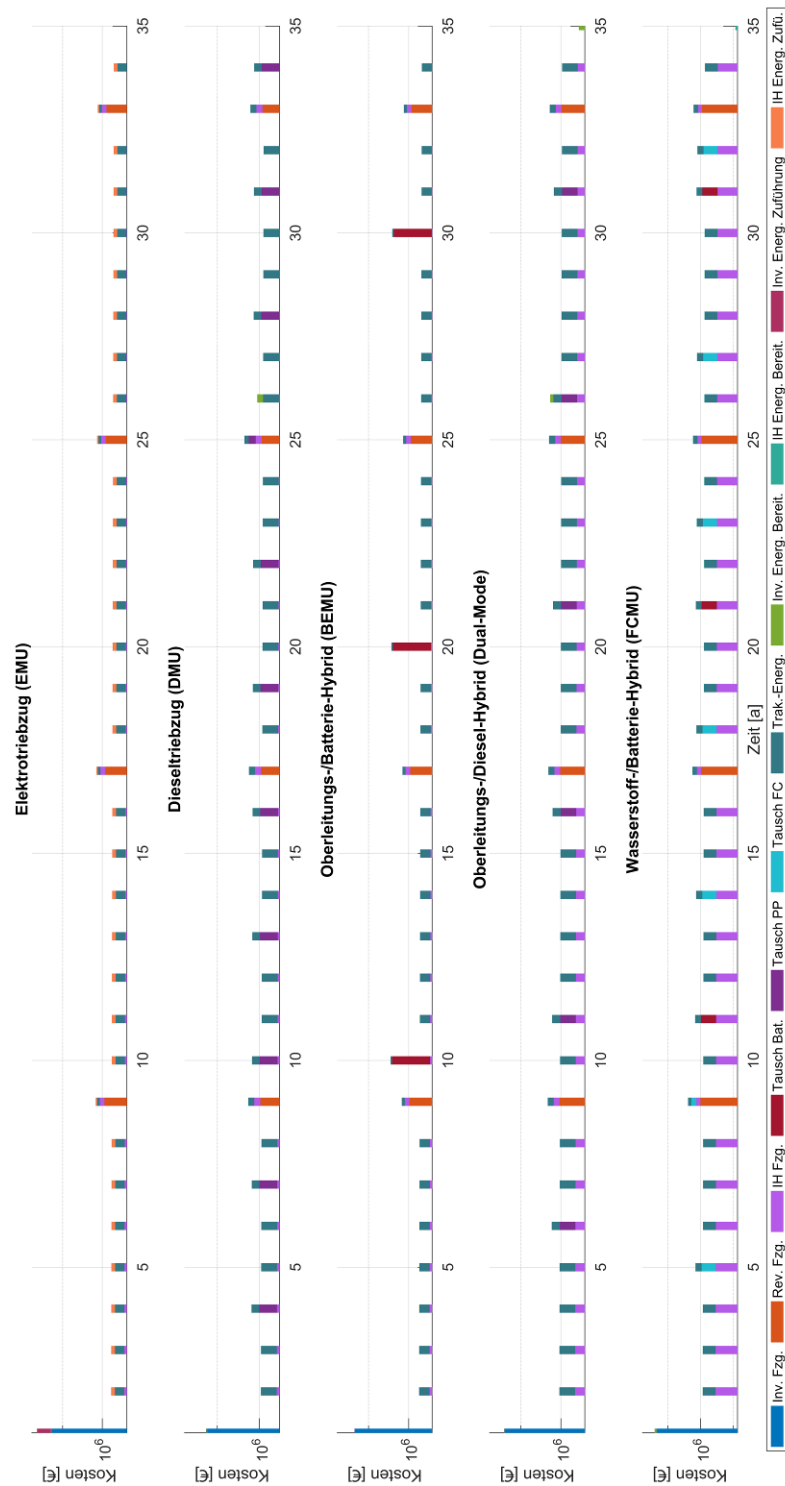
F.2 Kapitalwertverlauf RB 25 WSR-WV-WPOS – Zeitraum 35 a



F.3 Kapitalwertverlauf RB 25 – 35 a (differenziert)



F.4 Kostenpositionen jährlich RB 25 – 35 a (differenziert)





**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

