

Vorbereitung des Einsatzes innovativer
SPNV-Fahrzeuge im Lausitzer Revier

ENTSCHEIDUNGSPAPIER

zum Einsatz einer alternativen

Antriebsform im VVO-Dieselnetz

HANDLUNGSEMPFEHLUNG

für das Ostsachsennetz



Systementscheidung zum Einsatz einer alternativen Antriebsform im VVO-Dieselnetz und Handlungsempfehlung für das Ostsachsenetz

Entscheidungspapier

Auflage 1, Stand 30.08.2021

Autoren

TU Dresden / Professur Elektrische Bahnen:
Prof. Dr. Arnd Stephan
Nyascha Thomas Wittemann
Tobias Bregulla

TU Berlin / Fachgebiet Bahnbetrieb und Infrastruktur:
Benjamin Ebrecht
Ulrich Zimmermann

KCW GmbH:
Julian Nolte
Harald Schiller
Sebastian Fischer



Auftraggeber

Verkehrsverbund Oberelbe GmbH (VVO)
Leipziger Str. 120
01127 Dresden
info@vvo-online.de
www.vvo-online.de

Mit freundlicher Unterstützung des Zweckverbandes Verkehrsverbund Oberlausitz-Niederschlesien

Gefördert durch das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) und das
Sächsische Staatsministerium für Wirtschaft, Arbeit und Verkehr (SMWA)

Das vorliegende Dokument ist ein Beitrag zum fachlichen Diskurs über alternative Antriebstechnologien im Schienenpersonennahverkehr auf heutigen Dieselstrecken im Ballungsraum Dresden und in Ostachsen und dient als Grundlage für die Gremienentscheidungen des Zweckverbandes Verkehrsverbund Oberelbe (ZVOE) sowie des Zweckverbandes Verkehrsverbund Oberlausitz-Niederschlesien (ZVON).

Anregungen, Hinweise und Fragen werden gern entgegengenommen.

Inhaltsverzeichnis

Management Summary	7
Wegweiser durch das Entscheidungspapier	9
1 Klimaschutz und Kohleausstieg	10
1.1 Globale und regionale Herausforderungen	10
1.2 Bedeutung des Kohleausstiegs für das Lausitzer Revier	10
1.3 Klimafreundlicher Verkehr mit alternativen Antrieben als Brückentechnologie	10
2 Vorstellung des Untersuchungsraums	11
2.1 Heutiges VVO-Dieselnetz	12
2.1.1 Beschreibung des Status quo	12
2.1.2 Geplante Entwicklungen	12
2.2 Ostsachsennetz	13
2.2.1 Beschreibung des Status quo	13
2.2.2 Geplante Entwicklungen	14
2.3 Herausforderungen grenzüberschreitender Einsätze	15
2.4 Ableitung des Handlungsbedarfs für das künftige SPNV-Angebot im Lausitzer Revier	16
3 Fördermöglichkeiten	17
3.1 Fördermöglichkeiten im Rahmen der Strukturstärkung für die Kohleregionen	17
3.1.1 Konkretisierung des 1. Armes: Die Förderrichtlinie Investitionsgesetz Kohleregionen ..	19
3.1.2 Konkretisierung des 2. Armes: Ausbau von Schieneninfrastrukturen	20
3.2 Fördermöglichkeiten des Bundes für alternative Antriebsformen im SPNV	21
3.3 Weitere Fördermöglichkeiten	22
3.4 Ausblick	23
4 Alternative Antriebsformen für den SPNV	24
4.1 Wasserstoffzüge (HEMU)	24
4.2 Batterieelektrische Züge (BEMU)	30
4.3 Weitere mögliche alternative Antriebsformen	35
4.4 Zwischenfazit	37

5	Vergleich und Bewertung der Antriebsformen	38
5.1	Gegenstand der Untersuchungen	38
5.1.1	Herangehensweise und Randbedingungen	38
5.1.2	Bisherige Studien.....	38
5.1.3	Aktuelle Untersuchungen	39
5.2	Eingangsgrößen und Rahmenbedingungen der Vergleichsuntersuchungen.....	40
5.3	Überprüfung der technisch-betrieblichen Machbarkeit des BEMU- und HEMU-Einsatzes....	41
5.3.1	Ziel und Methodik	41
5.3.2	Ergebnisse.....	42
5.3.3	Ableitung erforderlicher Infrastruktur	47
5.4	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	49
5.4.1	Methodik.....	49
5.4.2	Ergebnisse.....	52
5.5	CO ₂ -Emissionsbetrachtung	58
5.6	Ergebnis der Vergleichsuntersuchungen	59
6	Vergabestrategie.....	60
6.1	Denkbare Vergabemodelle	60
6.2	Finanzierungskonditionen	63
6.2.1	Wiedereinsatzgarantie	63
6.2.2	Kapitaldienstgarantie	63
6.2.3	Eigenfinanzierter Aufgabenträgerpool	64
6.3	Einbeziehung von Fördermöglichkeiten.....	64
6.4	Bewertung der Vergabemodelle.....	65
7	Systementscheidung VVO-Dieselnetz	66
8	Handlungsempfehlung Ostsachsenetz	69

Management Summary

Klimaschutz ist eine entscheidende globale Herausforderung dieser Zeit und der in Deutschland beschlossene Ausstieg aus der Kohleförderung und Kohleverstromung bis zum Jahr 2038 entsprechend folgerichtig. Mit dem 2020 verabschiedeten Strukturstärkungsgesetz haben die deutschen Kohleregionen wie das Lausitzer Revier eine Zukunftsperspektive erhalten, die es nun nutzbar zu machen gilt.

Die im Rahmen der Strukturstärkung angekündigten Ausbaumaßnahmen für die Eisenbahn bieten einmalige Chancen, die der Verbesserung des Angebots im Schienenpersonennahverkehr (SPNV) in der Region zugutekommen können und die somit der Verkehrswende und der Strukturstärkung im Lausitzer Revier dienlich sind. Dies betrifft insbesondere die Beschleunigung und den Ausbau von Verkehren und – wo möglich – Nutzung der neuen Oberleitungsinfrastruktur, um einen energieeffizienten elektrischen Eisenbahnbetrieb durchzuführen.

Vor dem Hintergrund der 2020 angekündigten Maßnahmen hat die Verkehrsverbund Oberelbe GmbH (VVO) verschiedene Untersuchungen zur Vorbereitung des Einsatzes innovativer SPNV-Fahrzeuge im Lausitzer Revier durchführen lassen. Im Ergebnis zeigt sich, dass der Einsatz innovativer Fahrzeuge mit alternativen Antrieben grundsätzlich machbar ist. Aus ökonomischer Perspektive sind Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeuge (BEMU) oder konventionelle elektrische Züge (EMU) sowohl im heutigen VVO-Dieselnetz als auch im Ostsachsenetz anderen untersuchten Antriebsformen vorzuziehen. Sowohl die BEMU- als auch die EMU-Technologie können Energie effizient aus Oberleitungen beziehen. Somit profitieren – neben den SPNV-Aufgabenträgern – von den im Rahmen der Strukturstärkung aufgezeigten Elektrifizierungsperspektiven mittelbar auch die Fahrgäste, denn ein effizienter Ressourcen- bzw. Mitteleinsatz kann letztlich eine Verbesserung des SPNV-Angebots im Lausitzer Revier herbeiführen.

Das Ziel eines effizienten Mitteleinsatzes hat auch die in diesem Dokument beschriebene Vergabestrategie für die Verkehre mit alternativen Antrieben. Die Strategie eines eigenfinanzierten Aufgabenträger-Fahrzeugpools lässt den geringsten Zuschussbedarf über die Lebensdauer der Fahrzeuge erwarten und ist zudem geeignet, Förderungen – insbesondere aus der Strukturstärkung – in die Vergabe der SPNV-Leistungen einzubeziehen.

Nicht unerwähnt bleiben darf, dass BEMU- und EMU-Technologie von der rechtzeitigen Errichtung von Oberleitungs- bzw. Nachladeinfrastruktur abhängig sind. In Anbetracht der durch die Sächsische Staatsregierung am 25.06.2021 vorgestellten Maßnahmenliste, die hinter den anfänglichen Erwartungen auf Basis des Investitionsgesetzes Kohleregionen (InvKG) zurückbleibt, bestehen allerdings erhebliche Zweifel, ob die erforderliche Infrastruktur bis zur geplanten Betriebsaufnahme 2031 bereitgestellt werden kann. Die Wasserstofftechnologie (HEMU) stellt für die hier betrachteten Netze gleichwohl keine sinnvolle Alternative dar: Zum einen sind auch Wasserstoffzüge von der rechtzeitigen Bereitstellung der notwendigen Infrastruktur abhängig. Zum anderen gehen mit der Nutzung von grünem klimafreundlichem Wasserstoff hohe und absehbar nicht förderfähige Betriebskosten einher.

Sowohl aus gesamtwirtschaftlicher Sicht als auch aus Aufgabenträgerperspektive bleiben somit BEMU oder EMU die vorzugswürdigen Technologien für den künftigen SPNV im heutigen VVO-Dieselnetz und im Ostsachsenetz. Dieses Entscheidungspapier zeigt auf, welche Maßnahmen hierfür bis 2031 mindestens erforderlich und wie diese passfähig zu den ursprünglich im Investitionsgesetz Kohleregionen vorgesehenen Ausbauprojekten sind.

Wegweiser durch das Entscheidungspapier



CHANCEN

1 Klimaschutz und Kohleausstieg

1.1 Globale und regionale Herausforderungen

Die Nutzung fossiler Energieträger wie Kohle und Erdöl gilt weltweit als wesentlicher Treiber des vom Menschen verursachten Klimawandels. Zum Erhalt der natürlichen Lebensgrundlagen wird von zahlreichen politischen Akteuren die Abkehr von diesen Energieträgern angestrebt (Dekarbonisierung). Zum Schutz des Weltklimas wurde daher in Deutschland der Ausstieg aus der Kohleförderung und Kohleverstromung bis zum Jahr 2038 beschlossen.

Eine solche Strategie bringt erhebliche Herausforderungen mit sich, nicht nur in der eigentlichen Energieversorgung, sondern grundsätzlich auch für die Regionen, welche heute von der Förderung fossiler Energieträger gewissermaßen leben. Dies gilt in besonderem Maße für das „Lausitzer Revier“ im nordöstlichen Sachsen und südlichen Brandenburg, in dem der Abbau von klimaschädlicher Braunkohle bislang ein wichtiges wirtschaftliches Standbein ist.

1.2 Bedeutung des Kohleausstiegs für das Lausitzer Revier

Mitte 2020 haben Bundestag und Bundesrat das „Strukturstärkungsgesetz Kohleregionen“ verabschiedet, mit dem die deutschen Kohleregionen, wie das Lausitzer Revier, eine Zukunftsperspektive erhalten: Zur Bewältigung des Strukturwandels sind im Rahmen des im selben Zuge geschaffenen „Investitionsgesetz Kohleregionen“ bis zum Jahr 2038 Finanzhilfen von bis zu 40 Milliarden Euro vorgesehen. Hierbei sind auch grundlegende und dringend erforderliche Investitionen in die Eisenbahninfrastruktur im Lausitzer Revier geplant, insbesondere die Elektrifizierung von Bahnstrecken. Diese Maßnahmen bilden den Rahmen für die im Sommer 2020 begonnenen Untersuchungen im Auftrag des VVO zur Vorbereitung des Einsatzes innovativer SPNV-Fahrzeuge im Lausitzer Revier.

Gegenwärtig wird der Verkehr auf zahlreichen Bahnstrecken in der Region mit Dieselfahrzeugen erbracht. Die Finanzhilfen des Strukturwandels bieten somit eine Möglichkeit zur Dekarbonisierung des Schienenverkehrs – sowohl infrastrukturell durch die Elektrifizierung von Bahnstrecken als auch fahrzeugseitig durch die Förderung von Fahrzeugen mit alternativen Antriebsformen.

1.3 Klimafreundlicher Verkehr mit alternativen Antrieben als Brückentechnologie

Unklar bleibt zum jetzigen Stand jedoch, zu welchem Zeitpunkt die im Rahmen der Strukturstärkung angekündigten infrastrukturellen Maßnahmen zur Verfügung stehen können. Absehbar ist allerdings, dass nicht alle Maßnahmen der Strukturstärkung bis zum Jahr 2031 abgeschlossen sein werden. Dieses Datum ist für den Schienenpersonennahverkehr (SPNV) in der Region jedoch von entscheidender Bedeutung, da zu diesem Zeitpunkt die relevanten SPNV-Netze von den Aufgabenträgern neu vergeben werden. Um klimafreundlichen Verkehr schon ab diesem Zeitpunkt zu ermöglichen, planen die Aufgabenträger den Einsatz von Fahrzeugen mit sogenannten alternativen Antrieben im SPNV. Diese ermöglichen auch auf Streckenabschnitten ohne Oberleitungsbetrieb einen lokal emissionsfreien SPNV und stellen somit eine Alternative zum bisherigen Dieselpersonenverkehr dar (siehe dazu auch Kapitel 4). Dabei sind sie gewissermaßen als Brückentechnologie bis zur Inbetriebnahme der angekündigten Elektrifizierungen zu sehen. Besonders vorteilhaft wäre es außerdem, wenn die alternative Antriebstechnologie eine schrittweise voranschreitende Elektrifizierung schon nutzen könnte.

2 Vorstellung des Untersuchungsraums

Die im sächsischen Teil des Lausitzer Reviers gelegenen Bahnstrecken können im Wesentlichen zwei SPNV-Netzen zugeordnet werden – dem heutigen VVO-Dieselnetz und dem Ostsachsennetz. Beide Netze sind Gegenstand der folgenden Betrachtungen, sie sind neben weiteren Bahnstrecken der Region in der folgenden Karte dargestellt und dort gelb hervorgehoben:



Abbildung 1: Aktuelle Antriebstechnologien (eigene Darstellung VVO)

Wie aus der Karte ersichtlich, berühren die zum heutigen VVO-Dieselnetz gehörenden Linien RB 71 Pirna – Sebnitz und RB 72 / RE 19 (Dresden –) Heidenau – Kurort Altenberg nicht das Lausitzer Revier, das als Fördergebiet des Strukturwandels ausgewiesen ist. Aufgrund der engen betrieblichen Verzahnung der genannten Linien mit den weiteren Strecken des VVO-Dieselnetzes werden RB 71 und RB 72 / RE 19 im Rahmen dieser gesamthaften Untersuchung mitbetrachtet. Die Abgrenzung vom Lausitzer Revier ist gleichwohl relevant, wenn in die Betrachtung entsprechende Finanzierungs- und Fördermöglichkeiten einfließen (siehe dazu insbesondere Kapitel 3.1.1).

Wie ebenso ersichtlich, verlaufen die untersuchten Strecken innerhalb Sachsens auf dem Gebiet zweier SPNV-Zweckverbände und reichen bei einer Durchbindung der Linie S 8 bis Senftenberg in das Gebiet des Landes Brandenburg hinein.

Der Zweckverband Verkehrsverbund Oberelbe (ZVOE), der Zweckverband Verkehrsverbund Oberlausitz Niederschlesien (ZVON) sowie das Land Brandenburg sind Aufgabenträger für den Schienenpersonennahverkehr. Der ZVOE bedient sich für die Erfüllung seiner satzungsmäßigen Aufgaben der Verkehrsverbund Oberelbe GmbH (VVO), die aufgrund rechtsgeschäftlicher Vollmacht des ZVOE tätig ist. Zum Verbundgebiet des VVO gehören neben der Landeshauptstadt Dresden die Landkreise Meißen, Sächsische Schweiz-Osterzgebirge und der westliche Teil des Landkreises Bautzen. Der östliche Teil des Landkreises Bautzen sowie Landkreis und Stadt Görlitz gehören zum ZVON. Das Land Brandenburg bedient sich der Verkehrsverbund Berlin-Brandenburg GmbH (VBB), die als Beauftragte das Management des öffentlichen Personennahverkehrs, insbesondere auf der Schiene, übernimmt.

2.1 Heutiges VVO-Dieselnetz

2.1.1 Beschreibung des Status quo

Zum heutigen VVO-Dieselnetz gehören die nachfolgend genannten Linien:

- RB 33 Dresden – Königsbrück
- RB 34 Dresden – Radeberg – Kamenz (– Hoyerswerda / Senftenberg)
- RB 71 Pirna – Neustadt (Sachs) – Sebnitz
- RB 72 Heidenau – Altenberg
- RE 19 Dresden – Heidenau – Altenberg

Die Linie RB 34 wird im Rahmen einer Angebotsausweitung ab Dezember 2021 als S 8 bezeichnet werden. Zunächst endet diese Linie wie gehabt weiterhin in Kamenz. Perspektivisch ist eine Verlängerung durch das Lausitzer Revier in Richtung Hoyerswerda bzw. Senftenberg vorgesehen (siehe dazu auch Kapitel 2.1.2).

Das Netz wird bis zum Fahrplanwechsel im Dezember 2021 unter der Marke „Mitteldeutsche Regiobahn“ von der Transdev-Gruppe betrieben. Ab Dezember 2021 wird DB Regio Südost den Verkehr für zehn Jahre übernehmen. Hierüber hat der ZVOE im Sommer 2020 mit der DB Regio einen entsprechenden Verkehrsvertrag geschlossen. Der ZVOE ist dabei alleiniger SPNV-Aufgabenträger für das VVO-Dieselnetz. Auf Basis des neuen Verkehrsvertrags sollen ab Dezember 2021 weiterhin ausschließlich Fahrzeuge des Typs „Desiro Classic“ (Baureihe 642) zum Einsatz gelangen. Diese Fahrzeuge werden mit Ablauf des neuen Verkehrsvertrags Ende 2031 perspektivisch das Ende ihrer technisch erwarteten Lebensdauer nach ca. 30 Jahren Einsatz in Deutschland erreicht haben.

2.1.2 Geplante Entwicklungen

Für die Eisenbahninfrastruktur im Lausitzer Revier sind in den kommenden Jahren Ausbaumaßnahmen zu erwarten, nachdem Bundestag und Bundesrat im Sommer 2020 das Investitionsgesetz Kohleregionen (InvKG) geschaffen haben. Hierunter finden sich auch Projekte¹, die für das heutige VVO-Dieselnetz von besonderer Relevanz sind:

¹ vgl. Bundesgesetzblatt Jahrgang 2020 Teil I Nr. 37, ausgegeben zu Bonn am 13.08.2020, S. 1810

Lfd. Nr.	Bezeichnung	Projektziel gemäß InvKG	Verkehrliche Wirkung für das heutige VVO-Dieselnetz
20	Strecke Dresden – Bautzen – Görlitz – Grenze Deutschland/Polen (– Zittau)	Ausbau auf bis zu 160 Kilometer pro Stunde und Elektrifizierung	Beschleunigung des Verkehrs bis Arnsdorf
22	Strecke Arnsdorf – Kamenz – Hosena (– Hoyerswerda – Spremberg)	Ausbau auf bis zu 160 Kilometer pro Stunde und Elektrifizierung, Verbindungskurve Hosena	Beschleunigung des Verkehrs von/nach Kamenz, SPNV-Reaktivierung der Verbindung Kamenz – Hoyerswerda bzw. Senftenberg

Insgesamt ist mit den genannten Projekten eine Verbesserung und eine Beschleunigung des SPNV im Lausitzer Revier angedacht. Die Elektrifizierung Dresden – Görlitz (Projekt-Nummer 20) ist nicht Bestandteil der im Bund-Länder-Koordinierungsgremium (BLKG) am 01.04.2021 beschlossenen Maßnahmenliste², die durch die Pressekonferenz der Sächsischen Staatsregierung am 25.06.2021 vorgestellt wurde. Gleichwohl wurde dabei durch Vertreter des Freistaats deren hohe Priorität noch einmal betont und die Elektrifizierung der Strecke zum Ziel erklärt. Die Elektrifizierung Dresden – Görlitz ist mit der Projektnummer 2-029-V01 zudem Bestandteil des Bundesverkehrswegeplans 2030, ist allerdings nicht in den vordringlichen Bedarf aufgestiegen.

Der Ausbau der Strecke Kamenz – Hosena (Projekt-Nummer 22) unterstützt die SPNV-Reaktivierungsbestrebungen nördlich von Kamenz in Richtung Hoyerswerda bzw. Senftenberg zur Schaffung eines SPNV-Angebots in diesem Teil des Lausitzer Reviers, insbesondere zur Verbesserung der verkehrlichen Erschließung der Tourismusregion „Lausitzer Seenland“. Diese Maßnahme ist Bestandteil der durch das BLKG beschlossenen Liste. Wenn auch nicht explizit erwähnt, kann im Rahmen der Realisierung dieses Projektes auch von der Elektrifizierung des Abschnitts Dresden-Klotzsche – Arnsdorf ausgegangen werden. Eine kurzfristige angebotsseitige Verbesserung wird im VVO-Dieselnetz bereits im Dezember 2021 mit Aufnahme des neuen 10-jährigen Verkehrsvertrages realisiert. Ab diesem Zeitpunkt wird zwischen Dresden und Kamenz montags bis freitags in den Morgenstunden sowie am Nachmittag im Halbstundentakt gefahren. VVO und ZVOE tragen damit der zunehmenden Pendlerverflechtung zwischen der Landeshauptstadt und diesem Teil des Lausitzer Reviers Rechnung.

Künftig ist beabsichtigt, auf der heutigen Linie RB 33 bis Ottendorf-Okrilla ebenfalls einen Halbstundentakt anzubieten und diese Verbindung, wie auch die Linie nach Kamenz in das Dresdner S-Bahn-Netz einzugliedern.

2.2 Ostsachsennetz

2.2.1 Beschreibung des Status quo

Zum Ostsachsennetz gehören derzeit die nachfolgend genannten Linien:

- RE 1 Dresden – Bischofswerda – Görlitz
- RB 60 Dresden – Bischofswerda – Görlitz
- RE 2 Dresden – Bischofswerda – Zittau (– Liberec)
- RB 61 Dresden – Bischofswerda – Zittau

² Verfügbar unter <https://www.strukturentwicklung.sachsen.de/download/Massnahmenlisten.pdf> (Zugriff am 29.06.2021)

Das Ostsachsennetz wird derzeit von der Die Länderbahn GmbH DLB, einem Unternehmen der Netinera-Gruppe, unter dem Markennamen „Trilex“ betrieben. Der entsprechende Verkehrsvertrag läuft – wie auch jener mit der DB Regio Südost für das VVO-Dieselnetz – bis Dezember 2031. Der dazugehörige SPNV-Vertrag beinhaltet über das eigentliche Ostsachsennetz hinaus auch die Leistungen des sogenannten „Dreiländernetzes“ und somit auch die Weiterführung des RE 2 zwischen Zittau und dem tschechischen Liberec sowie die Linie L 7, welche von Liberec über Zittau ins sächsische Seifhennersdorf (und zurück) verkehrt. Die Linie L 7 quert mehrfach die Grenze zwischen der Tschechischen Republik und der Bundesrepublik Deutschland. RE 2 und L 7 durchfahren zwischen Zittau und Liberec auch einen kurzen Streckenabschnitt auf dem Gebiet der Republik Polen, jedoch ohne Halt im polnischen Abschnitt.

Auf deutscher Seite sind die SPNV-Aufgabenträger ZVOE und ZVON für das Ostsachsennetz zuständig. Aufgrund der vorstehend genannten Verkehre sind zudem die tschechischen Aufgabenträger des Liberecký kraj (RE 2 und L 7) sowie des Ústecký kraj (L 7) in das grenzüberschreitende Angebot involviert. Von den grenzüberschreitenden Linien ist in der Betrachtung dieses Dokuments jedoch nur der RE 2 im Abschnitt Zittau – Liberec für die hier gegenständlichen Untersuchungen von Bedeutung. Die Linie L 7 ist nicht Bestandteil der Untersuchung. Im Ostsachsennetz kommen derzeit Fahrzeuge der Typen „Desiro Classic“ (Baureihe 642) und „RegioShuttle/RS1“ (Baureihe 650) zum Einsatz. Beide Fahrzeugtypen werden mit Ablauf des derzeitigen Verkehrsvertrags Ende 2031 perspektivisch das Ende ihrer technisch erwarteten Lebensdauer nach ca. 30 Jahren Einsatz in Deutschland erreichen.

2.2.2 Geplante Entwicklungen

Ähnlich wie für das VVO-Dieselnetz beinhaltet das im Sommer 2020 geschaffene Investitionsgesetz Kohleregionen (InvKG) Ausbaumaßnahmen³, die für das Ostsachsennetz von erheblicher Bedeutung sind:

Lfd. Nr.	Bezeichnung	Projektziel gemäß InvKG	Verkehrliche Wirkung für das Ostsachsennetz
20	Strecke Dresden – Bautzen – Görlitz – Grenze Deutschland/Polen (– Zittau)	Ausbau auf bis zu 160 Kilometer pro Stunde und Elektrifizierung	Beschleunigung des Verkehrs zwischen Dresden und Görlitz
21	Strecke Dresden – Bischofswerda – Wilthen – Zittau	Ausbau für Flügelverkehre Dresden – Görlitz/Zittau und Elektrifizierung	Beschleunigung des Verkehrs zwischen Dresden und Zittau, Schaffung von mehr umsteigefreien Verbindungen zwischen Dresden und Görlitz bzw. Zittau durch Flügelzugkonzept im Bahnhof Bischofswerda

Mit den gesetzlich verankerten Projekten ist auch hier eine Verbesserung und eine Beschleunigung des SPNV im Lausitzer Revier angedacht. Die Elektrifizierung der Strecke Dresden – Görlitz (Projekt-Nummer 20) ist zudem eine wesentliche Voraussetzung für die Wiederherstellung eines Fernverkehrsangebots auf dieser wichtigen Ost-West-Verbindung. Beide genannten Maßnahmen sind jedoch nicht Bestandteil der am 25.06.2021 durch die Sächsische Staatsregierung vorgestellten Maßnahmenliste (vgl. Kapitel 2.1.2).

³ vgl. Bundesgesetzblatt Jahrgang 2020 Teil I Nr. 37, ausgegeben zu Bonn am 13.08.2020, S. 1810

Für das künftige SPNV-Angebot im Ostsachsennetz ist der Ausbau des Bahnhofs Bischofswerda zur Ermöglichung von Flügelverkehren Dresden – Görlitz / – Zittau und somit zur Schaffung von häufigeren umsteigefreien Verbindungen von erheblicher Bedeutung. Die SPNV-Aufgabenträger ZVOE und ZVON haben dies in ihren Überlegungen für das Fahrplanprogramm ab 2031 bereits berücksichtigt.

2.3 Herausforderungen grenzüberschreitender Einsätze

Insbesondere im heutigen Ostsachsennetz sind Themen relevant, die mit dem grenzüberschreitenden Fahrzeugeinsatz nach Tschechien und ggf. auch nach Polen zusammenhängen. Eisenbahnfahrzeuge müssen abweichend von den Fahrzeugen im Straßenverkehr durch viele technische Maßnahmen, vor allem im Bereich der Energieversorgung (Tauglichkeit für verschiedene Fahrleitungsspannungen sowie -frequenzen) sowie bei der Zugsicherungstechnik für den Einsatz auf ausländischen Bahnnetzen ausgerüstet sein. Außerdem müssen die Fahrzeuge für die jeweils zu befahrenden Länder eigene umfangreiche Zulassungsverfahren durchlaufen um nachzuweisen, dass sie in diesen Ländern alle länderspezifischen technischen und sicherheitsrelevanten Anforderungen erfüllen und keine Störungen im jeweiligen Bahnnetz verursachen. Die Europäische Union bemüht sich zwar mit der Schaffung eines einheitlichen europäischen Eisenbahnraums um Vereinfachungen und Harmonisierungen, doch die grundsätzlichen Herausforderungen werden aufgrund der bestehenden Infrastrukturen absehbar weiterhin bestehen bleiben.

Während in Deutschland die Oberleitung üblicherweise mit 15 kV, 16,7 Hz Wechselspannung versorgt wird, fahren Polen und Tschechien als direkte Nachbarn zum Ostsachsennetz aktuell mit abweichenden Bahnstromsystemen. In beiden Ländern wird mit 3 kV Gleichspannung gefahren. In Tschechien, insbesondere im südlichen Landesteil, existiert zudem ein Netz mit 25 kV, 50 Hz Wechselspannung. Absehbar will Tschechien sein elektrifiziertes Netz konsequent auf 25 kV, 50 Hz Wechselspannung umstellen. Eine Mehrsystemfähigkeit von Regionalverkehrsfahrzeugen für das zu Deutschland abweichende tschechische Wechselspannungssystem ist technisch einfach und kostengünstig zu realisieren, für die verbleibenden 3 kV Gleichspannung in Polen sind jedoch erhebliche Mehrkosten zu erwarten. Planmäßig wird für den Einsatz im Ostsachsennetz aktuell nur eine Einsetzbarkeit der Fahrzeuge in Tschechien notwendig sowie auf der für die Fahrzeugzulassung nicht signifikanten Grenzbetriebsstrecken Görlitz – Zgorzelec und Zittau-Grenze D/PL – Staatsgrenze PL/CZ bei Hradek.

Gleichzeitig ist davon auszugehen, dass nach Fertigstellung der im Strukturstärkungsgesetz vorgesehenen Elektrifizierungen (Dresden – Görlitz/Zittau, Arnsdorf – Kamenz – Hosena) viele Fahrzeuge in einem weiteren Vertrag nach 2046 auf den grenzüberschreitenden Strecken verstärkt nach Tschechien zum Einsatz kommen könnten. Es wird deshalb in dieser Studie zugrunde gelegt, dass die Fahrzeuge für einen späteren Wechsel der Linien oder andere Verwendungen im sächsisch-tschechischen Nahverkehr für 25 kV, 50 Hz mit ausgestattet werden. So könnten diese im zweiten Vertrag beispielsweise auch auf der Nationalparklinie U 28 (nach der geplanten Umstellung der Fahrleitungsspannung im tschechischen Elbtal), der L 7 bzw. bei Elektrifizierungen in und um Liberec die dortige Oberleitung nutzen. Eine Ausstattung für die polnische Fahrleitungsspannung wird aufgrund der hohen Mehrkosten und noch nicht absehbaren Einsatzperspektiven nicht unterstellt. Für einen ebenso möglichen Einsatz auf der Strecke zwischen Zittau und Görlitz (RB 65) über polnisches Staatsgebiet ist dies nicht notwendig, da dort heute keine Oberleitung vorhanden ist. Gleiches gilt für den sehr kurzen Transitabschnitt zwischen Zittau und Liberec. Für die Strecke Zittau – Liberec besteht zudem derzeit keine konkrete Elektrifizierungsperspektive, auch nicht mit tschechischer Wechselspannung.

Für eine spätere Regional- bzw. Fernverkehrsverbindung nach Polen bzw. auf der Linie Dresden – Breslau, wie diese im Deutschlandtakt vorgesehen sind, kann davon ausgegangen werden, dass die dann gebildeten Linien durchgehend unter Oberleitung fahren und somit für die hier betrachteten Fahrzeuge mit alternativen Antrieben keinen Einsatzfall darstellen.

Beide östlichen Nachbarnetze haben außerdem ein anderes Zugsicherungssystem als Deutschland, das andere technische Systeme und signifikante Mehrkosten zur Folge hat. Diese werden während der Vertragslaufzeit durch das neue einheitliche europäische System ETCS abgelöst, das perspektivisch auch auf den deutschen Streckenabschnitten eingeführt werden wird. Für den Knotenbahnhof Liberec ist nach Angaben des tschechischen Netzbetreibers SŽ eine Umstellung ab ca. 2033 vorgesehen. Deshalb muss sichergestellt werden, dass die zu bestellenden Fahrzeuge die entsprechende konventionelle länderspezifische Technik mindestens für Tschechien (aktuell geplantes Einsatzland) an Bord haben und dafür zugelassen werden sowie zusätzlich ETCS-Bordgeräte besitzen. Für Polen wird sich das Problem perspektivisch mit der dortigen ETCS-Ausstattung aufheben, sodass von einer Ausstattung für das konventionelle polnische Zugsicherungssystem abgesehen werden kann.

2.4 Ableitung des Handlungsbedarfs für das künftige SPNV-Angebot im Lausitzer Revier (heutiges VVO-Dieselnetz und Ostsachsennetz)

Vor dem Hintergrund der beschriebenen Ausgangssituation und insbesondere in Anbetracht der im Rahmen der Strukturstärkung angekündigten Ausbaumaßnahmen lässt sich konkreter Handlungsbedarf für das künftige SPNV-Angebot im Lausitzer Revier ableiten:

Abkehr vom heutigen Dieselbetrieb	Das derzeit im heutigen VVO-Dieselnetz und im Ostsachsennetz eingesetzte Fahrzeugmaterial ist mit Ablauf der Verkehrsverträge 2031 an seinem perspektivischen Einsatzende. (Re-)Investitionen in neue Dieselfahrzeuge sind unter Berücksichtigung der Klimaschutzziele zu diesem Zeitpunkt nicht vertretbar. Vor diesem Hintergrund setzt auch die Fahrzeugindustrie immer weniger auf die Entwicklung und Herstellung von Dieselmotoren.
Umsetzung der Verkehrswende	Ein weiterer Baustein zum Klimaschutz ist die sogenannte Verkehrswende, in deren Rahmen umweltfreundliche Verkehrsträger wie die Schiene weiter ausgebaut werden sollen. Der Ausbau des SPNV-Angebots im Lausitzer Revier, sowohl infrastrukturell als auch angebotsseitig, ist hierfür essentiell. Entsprechende Maßnahmen können an die im Rahmen der Strukturstärkung in Aussicht gestellten Projekte anknüpfen.
Chancen im Rahmen der Strukturstärkung	Die im Rahmen der Strukturstärkung angekündigten Ausbaumaßnahmen für die Eisenbahn bieten einmalige Chancen, die es zur Verbesserung des SPNV-Angebots zu nutzen gilt. Dies betrifft insbesondere die Beschleunigung und den Ausbau von Verkehren und – wo möglich – Nutzung der neuen Oberleitungsinfrastruktur, um einen energieeffizienten elektrischen Eisenbahnbetrieb durchzuführen. Darüber hinaus bieten auch die sich im Rahmen der Strukturstärkung abzeichnenden Fördermöglichkeiten weitere Chancen zur Verbesserung des SPNV im Lausitzer Revier (siehe dazu auch Kapitel 3.1). Bei gezielter Nutzung der Fördermöglichkeiten können weitere Finanzierungsmittel (insb. Regionalisierungsmittel) umgeschichtet werden und diese somit wiederum einen weiteren Beitrag zum Ausbau des regionalen SPNV-Angebots leisten.

Die Abkehr vom Dieselbetrieb und somit die Hinwendung zu alternativen Antrieben kann mit den sich aus der Strukturstärkung ergebenden Chancen folgendermaßen veranschaulicht werden:

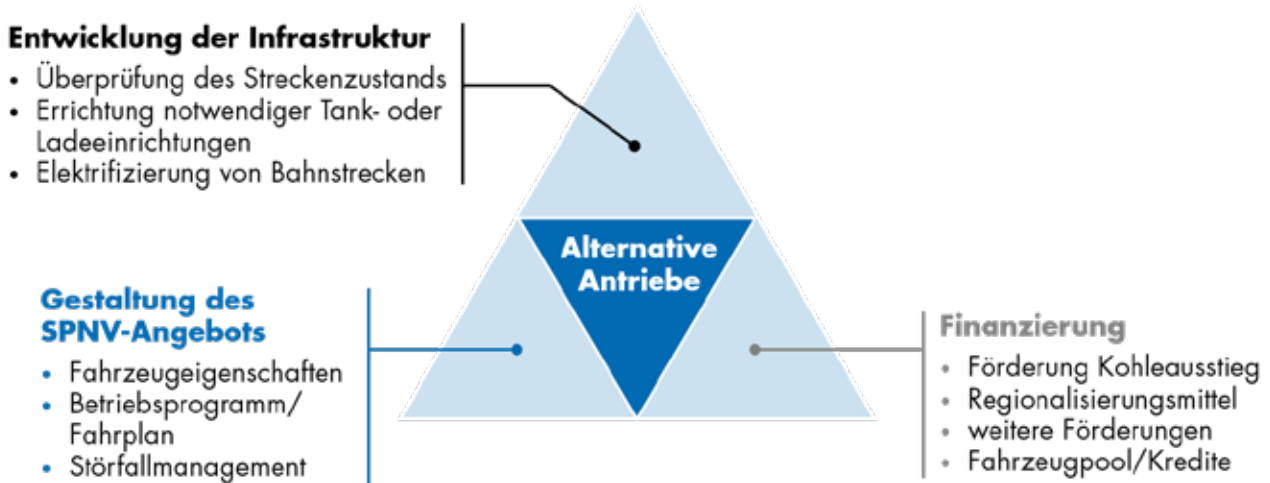


Abbildung 2: Ableitung des Handlungsbedarfs für das künftige SPNV-Angebot im Lausitzer Revier (eigene Darstellung VVO)

3 Fördermöglichkeiten

3.1 Fördermöglichkeiten im Rahmen der Strukturstärkung für die Kohleregionen

Um den Strukturwandel im Rahmen des bis 2038 zu vollziehenden Ausstiegs aus der Kohleförderung in Deutschland zu bewerkstelligen, haben Bundestag und Bundesrat das bereits vorstehend erwähnte „Strukturstärkungsgesetz Kohleregionen“ (StStG) verabschiedet. Es wurde am 13.08.2020 im Bundesgesetzblatt verkündet und ist am 14.08.2020 in Kraft getreten⁴. Das StStG ist ein so genanntes Artikelgesetz, das zum einen mit dem „Investitionsgesetz Kohleregionen“ (InvKG) ein neues Stammgesetz geschaffen hat, und zum anderen verschiedene Gesetze des Verkehrswegebbaus, z. B. das Maßnahmenvorbereitungsgesetz, ergänzt hat.

Im Rahmen der sogenannten Strukturstärkung stehen bis 2038 für die deutschen Kohleländer rund 40 Mrd. EUR zur Verfügung. Neben dem Freistaat Sachsen zählen hierzu Brandenburg, Nordrhein-Westfalen und Sachsen-Anhalt. StStG bzw. InvKG definieren gemeinsam Investitionsmaßnahmen. Das InvKG bildet dabei die finanziellen Rahmenbedingungen ab, die den Kohleländern bereitgestellt werden. Im Kontext der Strukturstärkung ist zu berücksichtigen, dass die genannten Länder nicht vollständig als entsprechendes Fördergebiet anzusehen sind. Relevant für die hiesige Betrachtung ist das Fördergebiet Lausitzer Revier, das nach § 2 Ziff. 1 lit. b) InvKG im Freistaat Sachsen die Landkreise Bautzen und Görlitz umfasst. Die Landeshauptstadt Dresden und der Landkreis Sächsische Schweiz-Osterzgebirge zählen somit nicht zum Fördergebiet der Strukturstärkung für die Kohleregionen.⁵

⁴ vgl. Bundesgesetzblatt Jahrgang 2020 Teil I Nr. 37, ausgegeben zu Bonn am 13.08.2020, S. 1795 ff.

⁵ Diese Einordnung ist für das heutige VVO-Dieselnetz relevant, da der südliche Teil (Linien nach Altenberg und Sebnitz) somit nicht zum Fördergebiet der Strukturstärkung gehört. Es werden daher in der weiteren Betrachtung Maßnahmen im Bereich des Dieselnetzes in „VVO-Dieselnetz Nord“ (im Lausitzer Revier) und in „VVO-Dieselnetz Süd“ (außerhalb Lausitzer Revier) grundsätzlich voneinander abgegrenzt.

Die im Rahmen der Strukturstärkung zur Verfügung stehenden ca. 40 Mrd. EUR verteilen sich auf zwei sogenannte Arme:

- Im 1. Arm sind insgesamt ca. 14 Mrd. EUR für investive Maßnahmen der Länder und Kommunen als Finanzhilfen gem. Art 104 b GG eingeplant (Kapitel 1 InvKG mit den Förderbereichen gem. § 4 InvKG). Für die sächsische Lausitz (Landkreise Bautzen und Görlitz) sind hierbei bis zu 2,408 Mrd. EUR vorgesehen.
- Im 2. Arm sind insgesamt ca. 26 Mrd. EUR für weitere Maßnahmen des Bundes (Kapitel 3 InvKG) und für zusätzliche Investitionen in Bundesfernstraßen und Bundesschienenwege eingeplant (Kapitel 4 InvKG).

Die folgende Abbildung veranschaulicht die zuvor beschriebenen Abgrenzungen aus der Perspektive des Freistaats Sachsen:

Strukturstärkungsgesetz Kohleregionen (Bund)

STAATSMINISTERIUM FÜR
REGIONALENTWICKLUNG



40 Mrd. € über 18 Jahre bis 2038 für 4 Braunkohleländer

(aktuell bereits weit mehr Projektideen als Gesamtbudget)

14 Mrd. € für Maßnahmen der Länder und Kommunen gem. Art. 104 b GG (Finanzhilfen) im sog. **1. Arm – Kapitel 1 InvKG** mit den Förderbereichen gemäß § 4 InvKG

26 Mrd. € im Rahmen des sog. **2. Armes – Kapitel 3** (Weitere Maßnahmen des Bundes) und **Kapitel 4** (Zusätzliche Investitionen in die Bundesfernstraßen und Bundesschienenwege)

2,08 Mrd. € sächs. Teil
Mitteldeutsches Revier

4,472 Mrd. € sächs. Teil
Lausitzer Revier

1,084 Mrd. €
sächs. Teil
Mitteldeutsches
Revier
(54,2 Mio. €/a)

2,408 Mrd. €
sächs. Teil
Lausitzer
Revier
(120,4 Mio. €/a)

(Verkehrs-)Infrastrukturprojekte,
Kapitel 4,
§ 20 ff. InvKG

Bundesprogramm STARK,
Kapitel 3,
§ 15 InvKG

Weitere Bundesprogramme und
Initiativen,
Kapitel 3,
§ 17 InvKG

Abbildung 3: Übersicht Strukturstärkungsgesetz Kohleregionen (Quelle: Darstellung SMR⁶)

⁶ vgl. <https://www.strukturentwicklung.sachsen.de/strukturstaerkungsgesetz-4773.html> (Zugriff am 01.06.2021)

3.1.1 Konkretisierung des 1. Arms: Die Förderrichtlinie Investitionsgesetz Kohleregionen (RL InvKG)

Das sächsische Kabinett hat am 27.04.2021 die „Förderrichtlinie für Zuwendungen nach dem Investitionsgesetz Kohleregionen“ (RL InvKG)⁷ beschlossen und konkretisiert somit die Auswahl und das Verfahren, mit denen Maßnahmen des 1. Arms der Strukturstärkung in den sächsischen Fördergebieten umgesetzt werden sollen. Für den SPNV im Lausitzer Revier ist besonders II. Ziff. 2) RL InvKG von Bedeutung. Demnach kann eine Förderung für Investitionen (Projekte) zur Verbesserung der wirtschaftlichen Infrastruktur im Bereich Verkehr für Schienenbahnen, die nicht Eisenbahnen des Bundes sind, im Rahmen des öffentlichen Personennahverkehrs gewährt werden.

Vor diesem Hintergrund besteht die Absicht des VVO, die Fördermöglichkeiten des 1. Arms für Investitionen in Fahrzeuge und Werkstattanlagen nutzbar zu machen, zumal derartige Investitionen für das künftige SPNV-Angebot im Lausitzer Revier ohnehin notwendig sind. Gleiches gilt für die Errichtung von Tank- bzw. Ladeeinrichtungen, die für den Einsatz von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben im Lausitzer Revier absehbar erforderlich sein werden. Entsprechende Vorhaben sind für die Projektliste im Rahmen der Strukturstärkung vom VVO beim Freistaat Sachsen angemeldet und mit vorläufigen Kostenprognosen versehen worden. Die Prognosen basieren auf Daten aktuell am Markt verfügbarer Fahrzeugtypen, vergleichbarer Infrastrukturprojekte und im Rahmen dieser Studie ermittelter Mengengerüste.

- Für die im Lausitzer Revier notwendigen **Tank- bzw. Ladeeinrichtungen** geht der VVO aktuell von einer Kostenprognose von **40,2 Mio. EUR** aus.
- Die derzeitige Kostenprognose des VVO für die künftigen **Fahrzeuge** des VVO-Dieselnetzes (inkl. Verlängerungen nach Hoyerswerda und Senftenberg) sowie des Ostsachsennetzes setzt sich wie folgt zusammen:

	Paket	Fahrzeugbedarf	Reserve	Kostenprognose
I	VVO-Dieselnetz Nord (RB 33, RB 34 inkl. Erweiterung)	15 davon RB 33: 5	2	103,7 Mio. EUR
II	Ostsachsennetz (RE 1, RE 2, RB 60, RB 61)	27 davon RE 2/RB 61: 7*	4	189,1 Mio. EUR
I+II	Teilsumme	48		292,8 Mio. EUR
III	VVO-Dieselnetz Süd (RB 71, RB 72, RE 19)	6	1	42,7 Mio. EUR (nicht im Lausitzer Revier)
Σ	Gesamt	55 (inkl. VVO-Dieselnetz Süd)		335,5 Mio. EUR (Mehrkosten zu EMU ca. 10%)

*durch Verknüpfung der Umläufe und Flügel/Schwächen in Bischofswerda ist eine saubere Aufteilung nach Linienast Görlitz bzw. Zittau nicht möglich.

Abbildung 4: Kostenprognose SPNV-Fahrzeuge für VVO-Diesel- und Ostsachsennetz (eigene Darstellung VVO)

⁷ Förderrichtlinie des Sächsischen Staatsministeriums für Regionalentwicklung zur Gewährung von Zuwendungen nach dem Investitionsgesetz Kohleregionen (RL InvKG) vom 04.05.2021

Die Darstellung berücksichtigt, dass im südlichen Bereich des heutigen VVO-Dieselnetzes (RB 71, RB 72, RE 19) eingesetzte Fahrzeuge nicht dem Fördergebiet Lausitzer Revier und somit nicht einer Förderung im Rahmen der Strukturstärkung zugeordnet werden können.

- Als Kostenprognose für eine dem SPNV im Lausitzer Revier dienende **Werkstatt** geht der VVO derzeit von **21,6 Mio. EUR** aus. Mit einer Instandhaltung vor Ort können hochwertige Arbeits- und Ausbildungsplätze geschaffen werden. Die Umschulung und Qualifizierung der derzeit noch für die Braunkohleindustrie angestellten Fachkräfte wurde als Vorhaben für die Förderrichtlinie STARK vorgeschlagen.

Für alle angemeldeten Vorhaben ist zu berücksichtigen, dass ein Eigenanteil des Antragstellers von vsl. 10 % erforderlich sein wird. Gleichwohl sind die im Raum stehenden Fördermöglichkeiten des 1. Arms der Strukturstärkung in jedem Fall dazu geeignet, die finanziellen Belastungen des Antragstellers und somit eines SPNV-Aufgabenträgers erheblich zu entlasten. Mit den so eingesparten Mitteln könnte der Bestand des SPNV im Lausitzer Revier finanziell abgesichert und die notwendigen konsumtiven und nicht über die genannten Förderprogramme abgedeckten Mittel für Angebotsverbesserungen (z. B. Verlängerung des SPNV-Angebots über Kamenz hinaus Richtung Hoyerswerda und Senftenberg oder Taktverdichtung Dresden – Görlitz) eingesetzt werden.

3.1.2 Konkretisierung des 2. Armes: Ausbau von Schieneninfrastrukturen nach § 21 InvKG

Für die weitere Entwicklung der Eisenbahnen im Allgemeinen und für den SPNV des Lausitzer Reviers im Besonderen sind innerhalb des 2. Armes jene Maßnahmen von herausragender Bedeutung, die das im Sommer 2020 verabschiedete Investitionsgesetz Kohleregionen umfasst (vgl. § 21 InvKG i. V. m. Anlage 4 Abschnitt 2 InvKG). Dabei sind folgende Ausbaumaßnahmen für Strecken des heutigen VVO-Dieselnetz und das Ostsachsennetz im Lausitzer Revier relevant:

- Nr. 20: Strecke Dresden – Bautzen – Görlitz – Grenze Deutschland/Polen (– Zittau): Ausbau auf bis zu 160 Kilometer pro Stunde und Elektrifizierung [nicht Bestandteil der im BLKG beschlossenen Maßnahmenliste vom 01.04.2021 (vgl. Kapitel 2.1.2)]
- Nr. 21: Strecke Dresden – Bischofswerda – Wilthen – Zittau: Ausbau für Flügelverkehre Dresden – Görlitz/Zittau und Elektrifizierung [nicht Bestandteil der im BLKG beschlossenen Maßnahmenliste vom 01.04.2021 (vgl. Kapitel 2.2.2)]
- Nr. 22: Strecke Arnsdorf – Kamenz – Hosena (– Hoyerswerda – Spremberg): Ausbau auf bis zu 160 Kilometer pro Stunde und Elektrifizierung, Verbindungskurve Hosena [die Elektrifizierung im Abschnitt Dresden-Klotzsche – Arnsdorf wird bei ausbleibender Elektrifizierung Dresden – Görlitz im Rahmen dieses Projektes vorausgesetzt]

Nicht unerwähnt bleiben soll das Ausbauprojekt Nr. 19 (Strecke Berlin – Cottbus – Weißwasser – Görlitz (– Breslau)), welches für die sächsische Lausitz ebenfalls bedeutsam ist, allerdings für das heutige VVO-Dieselnetz und das Ostsachsennetz im aktuellen Zuschnitt nur eine bedingte Wirkung (im Bahnhof Görlitz) entfaltet.

Mit dem Ausbauprojekt Nr. 11 (Strecke Graustein – Spreewitz) bietet sich zudem die Möglichkeit einer durchgängigen Verbindung Dresden – Kamenz – Hoyerswerda – Spremberg – Cottbus mit elektrischen Fahrzeugen.

Der VVO unterstreicht in jedem Fall die herausragende Bedeutung der Ausbautvorhaben Nr. 20, 21 und 22 als Voraussetzung zur Gestaltung eines zukunftsfähigen, nachhaltigen SPNV-Angebotes für das heutige VVO-Dieselnetz und für das Ostsachsenetz. Die verkehrliche Wirkung und der entsprechende Nutzen für das Lausitzer Revier wurden in Kapitel 2.1.2 bzw. 2.2.2 dieses Dokuments für das jeweilige Netz dargestellt.

3.2 Fördermöglichkeiten des Bundes für alternative Antriebsformen im SPNV

Am 14.12.2020 ist die neue Richtlinie Elektromobilität des BMVI in Kraft getreten. Die Richtlinie ist bis zum 30.06.2024 befristet. Die Richtlinie hat das Ziel die Energiewende im Verkehrssektor voranzutreiben und alternative Antriebe zu etablieren. Insbesondere die Förderung der Beschaffung von Elektrofahrzeugen und deren Ladeinfrastruktur bei der Umstellung auf batterieelektrische Fahrzeugflotten des Fördergegenstands ist für alternative Antriebe im SPNV relevant.

Dabei hat der Betrieb der Fahrzeuge größtenteils mit erneuerbaren Energien zu erfolgen. Die Maßnahmen werden mit bis zu 40 % gefördert. Sofern die Förderung keine Beihilfe darstellt, ist eine Förderung von bis 90 % möglich.

Am 17.02.2021 ist die neue Richtlinie zur Förderung alternativer Antriebe im Schienenverkehr des BMVI in Kraft getreten⁸. Die Richtlinie ist bis zum 30.06.2024 befristet. Die Richtlinie soll den Anteil emissionsarmer Antriebe im Schienenverkehr erhöhen, um so die gesetzten Dekarbonisierungsziele im Verkehrssektor zu erreichen. Die Förderrichtlinie unterstützt die Unternehmen und Aufgabenträger in Form

- 1) der Beschaffung von Schienenfahrzeugen mit alternativen Antriebsformen
- 2) der Errichtung von Betankungs- bzw. Ladeinfrastruktur
- 3) der Erstellung von Studien zu Einsatzmöglichkeiten von alternativen Antrieben

Explizit ausgeschlossen sind Förderungen von etwaigen Betriebskosten. Die zu fördernden Projekte dürfen noch nicht begonnen worden sein (Vertragsabschluss). Der Strom für Elektrolyseanlagen muss zu 100 % aus erneuerbaren Energien stammen. Sofern der Aufgabenträger Fahrzeugüberlassungsverträge vorsieht, muss dieser sicherstellen, dass die Verpflichtungen aus dem Förderbescheid eingehalten werden.

Die Investitionsmehrausgaben werden wie folgt gefördert:

- 1) Bei Maßnahmen nach Nr. 1) werden 40 % der Investitionsmehrkosten gegenüber konventionellen Fahrzeugen gefördert. Bei kleinen und mittleren Unternehmen kann dieser Wert auf 60 % bzw. 50 % erhöht werden. Dabei gilt eine Anmeldeschwelle in Höhe von 15 Mio. EUR

- 3) Maßnahmen nach Nr. 3) werden zu 50 % gefördert. Bei kleinen und mittleren Unternehmen kann dieser Wert auf 70 % bzw. 60 % erhöht werden. Sofern es keine Beihilfe nach Artikel 107 Absatz 1 AEUV ist, ist eine Förderung von 80 % möglich.

Im Juni 2021 haben BMVI, PtJ und NOW einen ersten Förderaufruf (Frist 31.08.2021) unter der vorstehend genannten Richtlinie veröffentlicht. Im Rahmen dieses Aufrufes stehen maximal 227 Mio. EUR für die Beschaffung von Schienenfahrzeugen und Erstellung von Studien zur Verfügung. Pro Investitionsvorhaben und Unternehmen ist die jeweilige Fördersumme allerdings auf 15 Mio. EUR begrenzt. Eine Förderung im Rahmen des vorstehend genannten Förderaufrufs war aktuell noch nicht möglich, da eine geteilte Förderbeantragung für Planungs- und Ausführungsleistungen ausgeschlossen ist und die Bauausführung bis 2026 abgeschlossen sein sollte. Eventuell kann ein Antrag im Rahmen späterer Förderaufrufe (mit Blick auf die angestrebte Betriebsaufnahme 2031) gestellt werden.

Unter der Annahme, dass die Richtlinien durch nachfolgende Richtlinien mit gleichem Ziel und ähnlichen Förderbedingungen ersetzt werden, zeigen sie jedenfalls auf, wie die Umsetzung von alternativen Antrieben im heutigen VVO-Dieselnetz und im Ostsachsennetz durch entsprechende Förderungen des Bundes unterstützt werden kann. Darüber hinaus zeigt sich, dass eine derartige Förderung vsl. die Versorgung mit (größtenteils) erneuerbaren Energien als Bedingung voraussetzt. Ebenso dürfte der Grundsatz, dass laufende Betriebskosten nicht förderfähig sind, auch künftig Bestand haben.

3.3 Weitere Fördermöglichkeiten

Die vorstehenden Kapitel haben Fördermöglichkeiten aufgezeigt, die vor dem Hintergrund der aktuellen politischen Herausforderungen des Klimaschutzes (Kohleausstieg/Strukturstärkung bzw. Umstellung des Verkehrs auf alternative Antriebe) im Raum stehen. Darüber hinaus existieren weitere Fördermöglichkeiten, die für das heutige VVO-Dieselnetz und das Ostsachsennetz nutzbar gemacht werden könnten. Insbesondere für den südlichen Teil des heutigen VVO-Dieselnetzes, welcher sich außerhalb des Fördergebiets des Lausitzer Reviers befindet, ergeben sich aus den in Kapitel 3.2 und den hier nachfolgend beschriebenen Möglichkeiten eventuell Chancen zur Förderung. Diese haben VVO bzw. ZVOE gleichfalls im Blick und werden sie im Lichte einer möglichen Eignung für die angedachten Vorhaben berücksichtigen. Hierzu zählen insbesondere:

- Europäische Förderinstrumente wie das LEADER-Programm, der Europäische Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) oder der „Just Transition Fund“ (JTF, Fonds für einen gerechten Übergang)
- Weitere Bundesförderungen über die in Kapitel 3.2 beschriebenen Förderinstrumente hinaus, z. B. im Rahmen des Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetzes (GVFG), weitere Förderungen im Rahmen des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie Phase II (NIP) oder weiterer Aktivitäten des Projektträgers Jülich (PtJ) bzw. der Nationalen Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW GmbH)
- Förderungen des Freistaats Sachsen, z. B. im Rahmen der RL-ÖPNV⁹

⁹ Richtlinie des Sächsischen Staatsministeriums für Wirtschaft, Arbeit und Verkehr über die Gewährung von Fördermitteln im öffentlichen Personennahverkehr vom 24.08.2010

3.4 Ausblick

Insbesondere die im Rahmen der Strukturstärkung im Raum stehenden und vom Bund zu finanzierenden Ausbauprojekte der Schieneninfrastruktur, aber auch die im Kapitel 3.1.1 beschriebenen Fördermöglichkeiten des sog. 1. Arms der Strukturstärkung, bilden eine herausragende Chance für eine zukunftsfähige Entwicklung des SPNV im Lausitzer Revier. Gleichwohl ist dabei zu berücksichtigen, dass sich schon jetzt abzeichnet, dass vsl. nicht alle eingereichten Projekte finanziert werden können. Dennoch liegen die Bemühungen des VVO zur Nutzbarmachung von Fördermitteln aktuell schwerpunktmäßig darauf, im Rahmen der Strukturstärkung die für den SPNV im Lausitzer Revier notwendigen Maßnahmen zu platzieren, um somit letztlich ein zukunftsfähiges SPNV-Angebot in der Region zu ermöglichen. Möglichkeiten, die darüber hinausgehen, werden vom VVO selbstredend mitberücksichtigt.

Für alle angedachten Förderungen gilt, dass diese passfähig zu den für das VVO-Dieselnetz und das Ostsachsenetz angedachten Vorhaben sein müssen. Dies betrifft sowohl den Gegenstand der Förderung, aber auch die Eignung des Förderempfängers und die zeitliche Verfügbarkeit der jeweiligen Förderung. Vor diesem Hintergrund hat die Einbeziehung von Fördermöglichkeiten auch einen Einfluss auf die Vergabestrategie des VVO (siehe dazu Kapitel 6.3).

4 Alternative Antriebsformen für den SPNV

Wenngleich für einige Strecken des heutigen VVO-Dieselnetzes sowie des Ostsachsenetzes bereits konkrete Elektrifizierungsperspektiven bestehen, stellt sich dennoch die Frage, wie ein lokal emissionsfreier Betrieb auch dort ermöglicht werden kann, wo absehbar nicht mit der Errichtung von Oberleitungsanlagen zu rechnen ist. Hierfür sind als Alternativen zum gegenwärtigen Dieselbetrieb in den vergangenen Jahren neue Antriebsformen für den SPNV entstanden, die als „alternative Antriebe“ bezeichnet werden. Die höchste Kompatibilität mit der vorhandenen Infrastruktur stellen batterieelektrische Züge dar, die – ergänzt um kurze Nachladeinseln – vor allem die bereits bestehenden Oberleitungen nutzen und so profitieren können. In einer aktuellen Studie des HZwo e.V. (sächsische Kompetenzstelle für Brennstoffzellen und grünen Wasserstoff) wurden außerdem brennstoffzellenbetriebene Wasserstoffzüge als mögliche Alternative zum Diesel für den sächsischen SPNV identifiziert, für welche keine zusätzlichen Strecken elektrifiziert werden müssen¹⁰, jedoch eine neu zu errichtende Wasserstoffherzeugung und -logistik. Im Folgenden werden die möglichen Antriebsformen vorgestellt und deren Funktionsweise erläutert.

4.1 Wasserstoffzüge (HEMU)

Als Wasserstoffzüge (HEMU) werden in dieser Untersuchung Brennstoffzellen-/Batterie-Hybridfahrzeuge verstanden. Derartige Fahrzeuge wandeln in einer Brennstoffzelle die im Wasserstoff gespeicherte Energie in Kombination mit Luftsauerstoff im Prozess der sogenannten kalten Verbrennung in elektrische Energie um. Mit der PEMFC-Technologie kann aktuell ein technologieabhängiger Wirkungsgrad von 50 bis 68 % erreicht werden¹¹. Dies führt allerdings im Vergleich zu Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeugen (BEMU) zu einer geringeren Gesamteffizienz, da pro gefahrenem Kilometer bei gesamter Betrachtung mehr Energie benötigt wird. Die Verlustleistung fällt in Form von abzuführender Wärme an. Vorteilhaft ist hingegen die (im Vergleich zum BEMU) aus der Energiedichte resultierende höhere Reichweite, die aus verdichtetem Wasserstoff im Speicher stammt.

Wasserstoff besitzt im gasförmigen Zustand unter Normaldruck nur eine sehr geringe Dichte. Dies führt dazu, dass der eigentliche Vorteil des hohen Energieinhalts pro Kilogramm mit einem hohen Volumenbedarf einhergeht. Hierbei kann mittels Verdichtung oder Verflüssigung Abhilfe geschaffen werden und die Dichte erhöht werden. Beides erfordert, wie im Abschnitt Wasserstoffherzeugung erläutert, infrastrukturelle Maßnahmen. Darüber hinaus ist auch ein entsprechender energetischer Aufwand zu berücksichtigen, der die gesamte Energieeffizienz negativ beeinflusst. Hinzu kommen die notwendigen, meist aus Sicherheitsgründen auf dem Fahrzeugdach angebrachten, speziellen Tanks zur Speicherung des Wasserstoffs unter hohem Druck (ca. 350 bar). Die gespeicherte Wasserstoffmenge ermöglicht eine Reichweite von 600 bis 800 km. Dies entspricht meist einem ganztägigen Betrieb, bevor erneut getankt werden muss und liegt knapp unterhalb der Reichweiten aktueller Dieseltriebzüge.

Die in der Brennstoffzelle erzeugte Elektroenergie wird in einem Elektromotor in mechanische Energie umgewandelt. Abgas ist Wasserdampf bzw. kondensiertes Wasser. Auch wenn elektrische Energie im Fahrzeug verwendet wird, so ist bei aktuellen Wasserstoff-Fahrzeugkonzepten dennoch nicht die Nutzung eines konventionellen Oberleitungsstromabnehmers vorgesehen. Derzeitige Wasserstoffzüge

¹⁰ vgl. HZwo e.V. (Hrsg.): Wertschöpfungspotenziale von Wasserstoff für Sachsen - Potenzialstudie mit Akteurs- und Marktanalyse zu Wasserstofftechnologien und Brennstoffzellen für Sachsen, S. 57, verfügbar unter http://hzwo.eu/media/HZwo_Wasserstoffstudie-Sachsen_04-2021.pdf (abgerufen am 01.06.2021)

¹¹ vgl. vorherige Quelle (HZwo e.V.) S. 23

sind daher nicht auf die klassische Elektrifizierung von Schienenstrecken angewiesen, können deren wirtschaftliche Vorteile jedoch auch nicht nutzen, wenn diese bereits existiert bzw. Elektrifizierungsperspektiven für die befahrenen Strecken vorhanden sind.

Während der Fahrt schwankt die benötigte Leistung in einem Schienenfahrzeug, je nach Streckenbedingungen, ständig. Da in einem elektrischen System immer eine ausgeglichene Bilanz zwischen Leistungsangebot und -aufnahme herrschen muss, Brennstoffzellen jedoch zur Reduzierung der Alterungserscheinungen immer möglichst in einem konstanten Leistungsbereich belastet und möglichst selten an- bzw. abgeschaltet werden sollen, muss für den ständig schwankenden Leistungsbedarf ein Zwischenspeicher (Dynamikbatterie bzw. technisch präziser: Dynamikkumulator) integriert werden. Insbesondere bei Traktionsspitzen übernimmt dieser die wechselnden Lasten. Wasserstoffzüge sind somit Hybridfahrzeuge mit Brennstoffzellen und Akkumulatoren. Die dynamische Belastung der Batterien führt zu einem notwendigen Tausch derselben ein- bis dreimal in der Fahrzeuglebensdauer, je nach gewählter Zelltechnologien und Belastungsprofil.

Leistungsfähige Brennstoffzellensysteme sind für den nutzbaren Betrieb als Stapel aus mehreren einzelnen Brennstoffzellen aufgebaut. Diese werden Stack genannt. Eine Alterung tritt bei Brennstoffzellen maßgeblich an der protonenleitenden Membran im Innern der Zelle auf. Bei einer substanziellen Instandhaltung bzw. Erneuerung werden deshalb vor allem die Zellmembranen überarbeitet bzw. getauscht, die Zellumgebung kann bestehen bleiben. Die Standdauer der Zellmembran wird im Rahmen dieser Studie als Lebensdauer bezeichnet. Diese Lebensdauer liegt aktuell bei vier bis acht Jahren, je nach Hersteller der Brennstoffzellen und gefahrenen Fahrzeugkilometern (bzw. Betriebsstunden) pro Jahr. Die zusätzliche Ausrüstung der Fahrzeuge mit Brennstoffzellen, Batterien und Tanks führt zu einer ca. 6 bis 8 % höheren Fahrzeugmasse im Vergleich zum Basisdieselfahrzeug.¹²

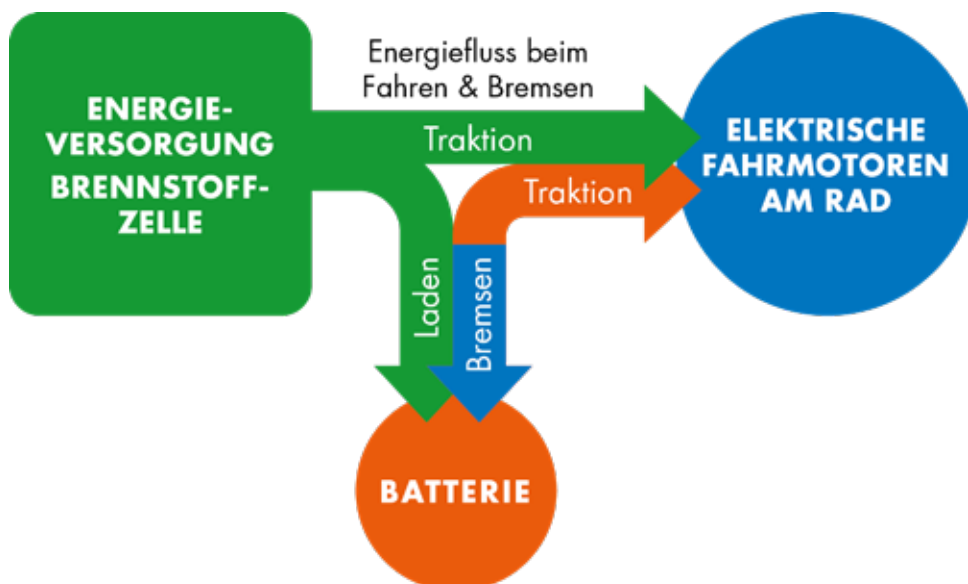


Abbildung 5: Energieflüsse im Antriebsstrang eines HEMU (eigene Darstellung TU Dresden)

¹² abgeleitet aus den Fahrzeugmassenunterschieden vorhandener Erprobungsträger von Alstom

Traktion

Der Leistungsbedarf wird durch ein Zusammenspiel aus Batterien und der Brennstoffzellen gedeckt. Vor allem bei Leistungsspitzen für Beschleunigungsphasen werden dabei große Anteile der Energie aus der Dynamikbatterie entnommen, da die Leistung der Brennstoffzellen kleiner ist als die Antriebsleistung. In traktionsschwachen Phasen wird die Dynamikbatterie wieder aus der Brennstoffzelle aufgeladen. Der benötigte Wasserstoff wird in Tanks mitgeführt, die unter mehreren 100 bar Druck stehen und den Wasserstoff so in größeren Mengen speichern können.

Bremsen

Das Fahrzeug kann die elektrische Bremsenergie rekuperieren, d. h. wiederaufnehmen. 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 befindlicher Brennstoffzelle lädt diese während des Bremsvorgangs die Batterien zusätzlich weiter auf. Eine Umkehr der technischen Prozesse in der Brennstoffzelle zur Erzeugung von Wasserstoff während der Fahrt ist allerdings nicht möglich.

Fahrzeugbeispiele Wasserstoffzüge

Alstom iLint



Abbildung 6: HEMU Alstom iLint (Foto: Alstom)

Der Fahrzeugtyp war von 2018 bis 2020 mit zwei Vorserienfahrzeugen in Norddeutschland (ca. 180.000 zurückgelegte Fahrzeug-km in 530 Tagen¹³) und Österreich im planmäßigen Fahrgasteinsatz. Er basiert auf der Dieseltriebwagen-Plattform Coradia Lint der Firma Alstom. Die Diesel-Power-Packs des Fahrzeugs wurden durch Elektromotoren, Brennstoffzellen und Batterien ersetzt. Die Beschleunigungswerte entsprechen annähernd jenen von Dieseltriebzügen. Der Fahrzeugtyp wurde im Jahr 2018 außerdem in einer Stückzahl von 27 durch den Rhein-Main-Verkehrsverbund (RMV) für das Taunusnetz bestellt (vgl. Einsatzbeginn 2022). Niedersachsen hat weitere 14 Fahrzeuge geordert, ebenfalls mit geplantem Einsatzbeginn 2022.

¹³ vgl. Kreiszeitung Wochenblatt vom 22.05.2020, verfügbar unter https://www.kreiszeitung-wochenblatt.de/buxtehude/c-panorama/positive-ergebnisse-mit-dem-weltweit-ersten-wasserstoffzug_a167651 (abgerufen am 01.06.2021)

Siemens Mireo Plus H



Abbildung 7: HEMU Siemens Mireo Plus H (Rendering: Siemens)

Das Fahrzeugkonzept basiert auf der Mireo-Plattform der Firma Siemens. Ein Prototyp existiert bisher nicht, die Entwicklung der nötigen Brennstoffzellen ist jedoch mit dem vorgesehenen Hersteller Ballard bereits angestoßen. Als Wasserstofffahrzeug wird der Mireo in der Variante „Plus H“ angeboten. Oberleitungs-Fahrzeuge der Mireo-Plattform befinden sich bereits im Planbetrieb im Rheintal und bei der S-Bahn Rhein-Neckar. Siemens und die Deutsche Bahn AG haben im November 2020 verkündet, gemeinsam ab 2024 in Baden-Württemberg einen Probebetrieb mit dem ersten Mireo Plus H im Forschungsprojekt H2goesrail aufzunehmen. Auch im Netz der Bayerischen Regiobahn (BRB) ist ein längerer Testeinsatz dieses Fahrzeugtyps ab Mitte 2023 geplant.

Wasserstoffbereitstellung

Die Energieversorgung von HEMU-Fahrzeugen erfolgt, ähnlich wie bei dieselektrischen Fahrzeugen, 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.¹⁴

CO₂-neutral ist dies aktuell nur durch Elektrolyse von reinem Wasser unter Verwendung erneuerbarer elektrischer Energie möglich. Diese kann z. B. durch Sektorenkopplung umgesetzt werden. Eine Erzeugung mittels Elektrolyse mit dem aktuellen deutschen Strommix würde jedoch zu höheren CO₂-Emissionen im Vergleich zum klassischen Dieselbetrieb führen. Dies ist nicht zuletzt den Wirkungsgradverlusten bei der Wasserstoffherstellung geschuldet. Im Vergleich mit der Energiespeicherung in Traktionsbatterien muss erwähnt werden, dass der Wirkungsgrad der Elektrolyse geringer ist, als der der elektrochemischen Speicherung. Für Elektrolyseanlagen mit mittelgroßer Dimensionierung, beispielsweise dem Energiepark Mainz (6 MW Maximallast), können auf die Elektroenergie bezogene Wirkungsgrade von 60 bis 75 % für die Elektrolyse angenommen werden.¹⁵ Hinzuzurechnen sind Energiebedarfswerte für die Speicherung, Verteilung und Abgabe an das Fahrzeug. Prozessenergie muss entsprechend aufgewendet werden und erhöht u. a. auch den gesamten Strombedarf.

¹⁴ vgl. dazu z. B. auch HZwo e. V. (Hrsg.): Wertschöpfungspotenziale von Wasserstoff für Sachsen - Potenzialstudie mit Akteurs- und Marktanalyse zu Wasserstofftechnologien und Brennstoffzellen für Sachsen, verfügbar unter http://hzwo.eu/media/HZwo_Wasserstoffstudie-Sachsen_04-2021.pdf (abgerufen am 01.06.2021)

¹⁵ vgl. Präsentation J. Aichinger, C. Stiller: <https://docplayer.org/79324858-Power-to-gas-im-energiepark-mainz-mehr-als-2-jahre-betriebserfahrung-mit-der-weltgroessten-pem-power-to-gas-anlage-6-mw-im-energiepark-mainz.html> (abgerufen am 07.06.2021) – Werte abgeleitet aus Grafik von M. Kopp, Hochschule Rhein Main

Mit fortschreitender Dekarbonisierung der Stromerzeugung wird die CO₂-Bilanz der Wasserstoffherstellung kontinuierlich besser (vgl. auch Kapitel 5.5). Die vorstehend beschriebenen Wirkungsgradverluste bleiben jedoch grundsätzlich bestehen. Aufgrund der geringen Dichte von Wasserstoff muss dieser zudem energieintensiv verdichtet und unter Druck gelagert bzw. ggf. transportiert werden. Auch die Betankung der Züge findet unter Hochdruck statt.

Infrastrukturbedarf der HEMU-Fahrzeuge¹⁶

Der Einsatz von Wasserstofffahrzeugen ist an infrastrukturelle Anforderungen geknüpft und lässt sich vielseitig ausprägen. Maßgebend hierbei ist die Erzeugungsart des Wasserstoffs:

- **Zentralisiert:** Großindustrielle Herstellung an wenigen Orten. Verteilung durch Rohrleitungen oder LKW-Tank-Trailer.
- **Dezentralisiert:** Erzeugung am Ort der Übergabe an Endverbraucher. In der Regel mittels Elektrolyse, weshalb eine leistungsfähige Stromnetzanbindung nötig ist.

Die entsprechende Wahl ist maßgebend ökonomisch motiviert. Grundsätzlich ist die zentralisierte Erzeugung aufgrund von Skaleneffekten günstiger. Ob dieser Vorteil sich schließlich auch am Ort der Abnahme zeigt, hängt anschließend von den Transportkosten ab. Aus der Erzeugungsart lässt sich nahezu direkt die Verteilstrategie ableiten, die von der räumlichen Verteilung der Übergabestellen bzw. der Mobilität der Verbraucher abhängig ist. Am Übergabeort zum Fahrzeug sind entsprechende Tankstellen vorzusehen, die Druck, abzugebende Wasserstoffmenge, Temperatur der Tanks etc. überwachen und steuern sowie allgemein die sichere Betankung der Fahrzeuge sicherstellen. Ggf. beinhalten diese zudem Behandlungsanlagen für den Wasserstoff (z. B. zur Lagerung, Verdichtung etc.).

- **Rohrleitung:** Verteilung über ein eigenes Rohrleitungsnetz, Ertüchtigung eines Bestandsnetzes zur Verteilung von Erdgas auf Wasserstoff, Beimischung in das bestehende Erdgasnetz. Letzteres ist nicht unmittelbar für einen Einsatz in einer Brennstoffzelle geeignet.
- **Trailer-Transport:** Verteilung des Wasserstoffs (gasförmig ca. 3.000 bis 12.000 Nm³ pro Trailer/flüssig ca. 35.000 bis 40.000 Nm³ pro Trailer, aber mit Energieaufwand zur Verflüssigung ca. 1 kWh/Nm³) über LKW-Trailer. Möglichkeit zur Abgabe durch Überströmen (höherer Druck im Trailer zu niedrigerem Druck im Fahrzeugtank) oder zusätzliches Verdichten.

Diese Verteilstrategien zur Versorgung von Schienenverkehrsangeboten mit Wasserstoff sind aktuell noch nicht im täglichen Betrieb eingesetzt. Die beiden bald zur Betriebsaufnahme anstehenden Netze in Hessen und Niedersachsen setzen auf dezentrale Erzeugung und Betankung an einem Ort.

Ein grundsätzlicher und maßgebender Faktor für die Verteilung ist der Zustand des Wasserstoffs. Durch diesen wird bestimmt, welche Möglichkeiten sich eröffnen und welche Einrichtungen nötig sind.¹⁷

- **Gasförmig (GH₂):** Aufgrund der geringen Dichte von gasförmigem Wasserstoff ist nur eine verdichtete Verteilung sinnvoll. In Fahrzeugen haben sich die Druckstufen 350 bar sowie 700 bar etabliert. Die Verdichtung ist allerdings energieintensiv und benötigt je nach Druckebene ein Äquivalent von ca. 7 bis 12 % der im verdichteten Wasserstoff gespeicherten Energie.

¹⁶ vgl. Töpler et al., Wasserstoff und Brennstoffzelle 2. Aufl., Springer 2017

¹⁷ vgl. Bossel, Wasserstoff löst keine Energieprobleme, Leibnitz-Institut 2010

- **Flüssig (LH₂):** Durch eine Verflüssigung kann die Dichte um ein Vielfaches erhöht werden. Ebenso ist, solange eine entsprechende Kühlung gewährleistet ist, nur ein geringer Druck erforderlich. Dies ist allerdings energieaufwändig (ca. 1/3 der gespeicherten Energie) ermöglicht aber die Bereitstellung hochreinen Wasserstoffs in großen Mengen.
- **Gebunden:** Einbindung von Wasserstoff in Metallstrukturen (Metallhydrid) oder Flüssigkeiten (z. B. Ammoniak), Anwendung bisher aber nicht im Transportbereich.

Wasserstoffherstellung

Die Herstellung von Wasserstoff basiert heutzutage zu über 90 % auf fossilen Energieträgern. Dies ist für eine angestrebte CO₂-Neutralität nicht förderlich. Da die tatsächliche CO₂-Bilanz des Wasserstoffs ausschließlich von seiner Erzeugung abhängig ist, muss dieser besondere Betrachtung geschenkt werden. Im allgemeinen Sprachgebrauch haben sich unterschiedliche Farben als herkunftsdifferenzierender Bezeichner für Wasserstoff etabliert¹⁸. Grundsätzlich ist jedoch anzumerken, dass chemischer Wasserstoff ein farbloses Gas darstellt:

- **Grün:** Elektrolytisch aus erneuerbarer Energie erzeugt und somit CO₂-neutral.
- **Grau:** Durch Umwandlung aus fossilen Brennstoffen erzeugt (bspw. Dampfreformierung). Ungefähre Emission: 10 kg CO₂ /1 kg H₂
- **Türkis:** Durch thermische Spaltung von Methan erzeugt. Es entsteht Kohlenstoff in Feststoffform. CO₂-Neutralität abhängig von der Wärmeversorgung des Hochtemperaturreaktors.
- **Blau:** Vergleichbar mit „Türkis“, aber mit gasförmigem kohlenstoffhaltigen Reaktionsprodukt.

Als Herstellungsmöglichkeit für Wasserstoff nach den unterschiedlichen genannten Klassifizierungen sind folgende zu nennen. Verallgemeinernd ist zu sagen, dass für die Herstellung von Wasserstoff grundsätzlich Kohlenwasserstoffe oder Wasser zusammen mit Energie (Wärme, Licht, Strom) benötigt werden¹⁹:

- **Herstellung aus fossilen Energieträgern und Biomasse:** Umwandlung von Methan und Wasser unter Druck und Wärmeeinwirkung zu Wasserstoff und Kohlendioxid (CO₂). Wirkungsgrad ca. 70 %.
- **Herstellung durch Wärmeenergie:** Spaltung von Wasser durch Zuführung von Wärmeenergie unter hoher Prozesstemperatur (2000 °C) unter Zuhilfenahme von Katalysatoren. Wirkungsgrad ca. 50 %.
- **Spaltung von Wasser durch elektrische Energie (Elektrolyse):** Bei diesem Prozess kann reines Wasser zur Spaltung verwendet werden. Es existieren unterschiedliche Elektrolyseurtechnologien (Alkalische Brennstoffzelle, Membranbrennstoffzelle, Oxidkeramische Brennstoffzelle). Der grundsätzliche Vorteil der strombasierten Wasserstofferzeugung ist die Möglichkeit zur Verwendung CO₂-neutraler sowie erneuerbar erzeugter elektrischer Energie. Der Wirkungsgrad ist abhängig von der Elektrolyseurtechnologie. Bei der alkalischen Elektrolyse liegt der Wirkungsgrad bei ca. 65 bis 70 %.
- **Aktuelle Forschung – Fotokatalyse:** In aktueller Forschung wird die Herstellung von Wasserstoff durch Einwirkung von Sonnenlicht erforscht. Dies ist allerdings weit von industrieller Nutzbarkeit entfernt.

¹⁸ vgl. z. B. Bundesministerium für Bildung und Forschung – Eine kleine Wasserstoff-Farbenlehre, verfügbar unter <https://www.bmbf.de/de/eine-kleine-wasserstoff-farbenlehre-10879.html> (abgerufen am 01.06.2021)

¹⁹ vgl. Töpler et al., Wasserstoff und Brennstoffzelle 2. Aufl., Springer 2017

4.2 Batterieelektrische Züge (BEMU)

Als batterieelektrische Züge (BEMU) werden in dieser Untersuchung Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeuge verstanden. Dies sind klassische Elektrotriebwagen, die um eine Batterie (bzw. technisch präziser: Akkumulator) als elektrochemischen Energiespeicher erweitert wurden. Die Batterien können während der Fahrt sowie im Stand an der Oberleitung geladen werden und stellen 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. Ein Vorteil ist, dass bei Fahrt unter Oberleitung meist höhere Beschleunigungen im Vergleich zu Dieseltriebwagen erreichbar sind. Zudem schreitet die Alterung der Batterien weniger schnell voran (bei geringerem Umfang der Entladetiefe). Im Fall einer Vollelektrifizierung ist auch die Stilllegung und ein Abbau der Batterieanlage möglich, ggf. mit Ausgleich der fahrdynamisch und zulassungsrelevanten Batteriemasse.

Herausforderung ist, ausreichend Energie speichern zu können, um auch größere oberleitungsfreie Distanzen (40 – 120 km) zu überbrücken.²⁰ 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, ausgedrückt in der C-Rate), Alterungsverhalten (Lebensdauer) sowie Beschaffungskosten je Kilowattstunde Energieinhalt unterscheiden. Die dynamische Belastung der Batterien führt zu einem notwendigen Tausch derselben ein- bis dreimal in der Fahrzeuglebensdauer, je nach gewählter Zelltechnologien und Belastungsprofil.

Die Ladeleistung der Fahrzeuge liegt im Stillstand bei ca. 1,0 bis 1,2 MW pro Stromabnehmer. Sie wird dabei durch den maximal möglichen Stillstandsstrom laut DIN EN 50367 von 80 A über die Kontaktstelle Oberleitung-Stromabnehmerschleifleiste begrenzt, da diese sonst zu heiß wird und der Fahrdrabt mittelfristig entfestigt wird. Je nach Batterietechnologie und deren maximal möglicher Ladeleistung kann die Ladeleistung in Fahrt jedoch deutlich höher liegen. Somit sind im Stillstand Ladezeiten für das volle Aufladen der Batterie von 10 bis 20 min realistisch, in Fahrt können diese geringer ausfallen. Dies liegt in der höheren möglichen Stromübertragung während der Fahrt begründet (je nach Oberleitungsbauart mehrere hundert Ampere). Neue Anforderungen ergeben sich bei der Betriebsumstellung auf Fahrzeuge solchen Typs durch höhere zu erwartende Radsatzlasten. Die ca. 7 bis 10 % höhere Masse²¹ 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.

²⁰ vgl. NOW GmbH, 2020: Marktanalyse alternative Antriebe im deutschen Schienenpersonennahverkehr.

²¹ abgeleitet aus den Fahrzeugmassenunterschieden vorhandener Erprobungsträger von Alstom und Siemens

Oberleitungsbetrieb

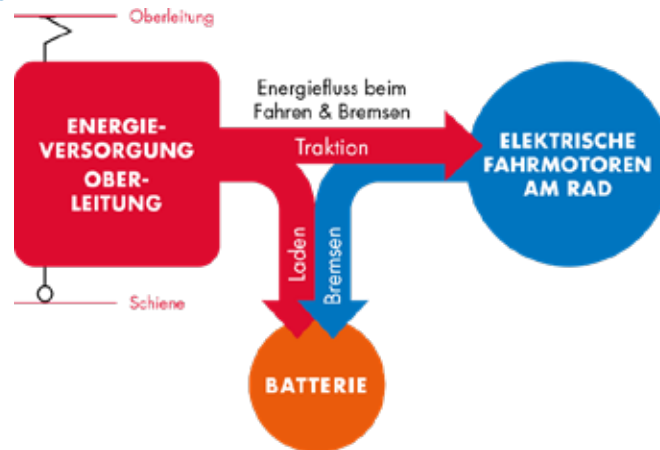


Abbildung 8: Energieflüsse im Antriebsstrang BEMU (Oberleitungs-/Batterie-Hybrid) im Oberleitungsbetrieb (schematisch, eigene Darstellung TU Dresden)

Traktion

Im Oberleitungsbetrieb unterscheidet sich der Oberleitungs-/Batterie-Hybrid nicht wesentlich vom klassischen Elektrotriebzug. 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 elektrische Bremsenergie wie normale Elektrotriebzüge 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

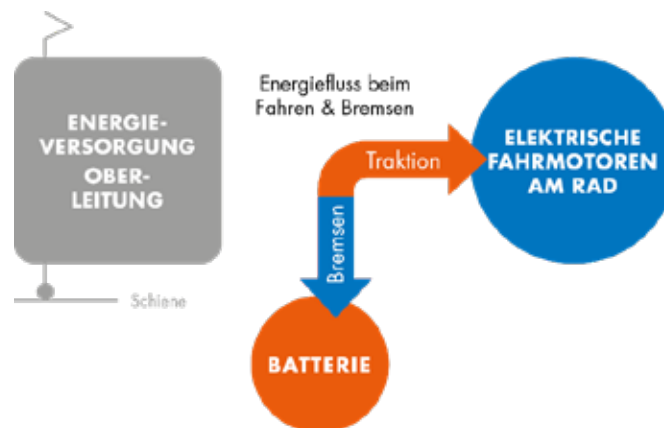


Abbildung 9: Energieflüsse im Antriebsstrang BEMU (Oberleitungs-/Batterie-Hybrid) im Batteriebetrieb (schematisch, eigene Darstellung TU Dresden)

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 elektrische Bremsenergie 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.

Fahrzeugbeispiele Oberleitungs-/Batterie-Hybrid

Bombardier Talent 3



Abbildung 10: BEMU Bombardier Talent 3 (Foto: Bombardier)

Das Fahrzeug existiert 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 erfolgen. Bereits im Juli 2018 hatte der VVO die Technische Universität Berlin gemeinsam mit Bombardier Transportation mit einer Machbarkeitsstudie zum Einsatz dieses Fahrzeuges im VVO-Dieselnetz beauftragt (vgl. Kapitel 5.1.2). Inzwischen wurde Bombardier Transportation durch Alstom übernommen. Eine mögliche Fortführung der Produktplattform Talent 3 durch andere Hersteller bleibt aktuell unklar.

Siemens Desiro Mainline „Cityjet Eco“



Abbildung 11: BEMU Siemens Cityjet Eco (Foto: Siemens)

Das Fahrzeug existiert bereits als Prototyp und wird in Zusammenarbeit mit den Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB AG) zurzeit erfolgreich erprobt. Es wurde aus einer laufenden Produktionslinie klassischer Elektrotriebwagen der Desiro Mainline Fahrzeugplattform für die ÖBB AG entnommen. Diese Plattform ist für Deutschland nicht mehr bei Ausschreibungen verfügbar. Mit einem Fahrzeug dieses Typs wurde im September 2020 erfolgreich eine Präsentationsfahrt des VVO nach Königsbrück durchgeführt.

Siemens Mireo Plus B



Abbildung 12: BEMU Siemens Mireo Plus B (Fotomontage: Siemens)

Als Ersatz für den Fahrzeugtyp Desiro Mainline „Cityjet Eco“ bietet Siemens die neue Fahrzeugplattform Mireo in einer Variante „Plus B“ an. Reine Oberleitungs-Fahrzeuge der Mireo Plattform befinden sich bereits im Einsatz für die S-Bahn Rhein-Neckar und auf der Rheintalbahn. Für das Ortenau-Netz und weitere Strecken in Baden-Württemberg wurden mehr als 20 BEMU-Fahrzeuge fest bestellt und sollen 2023 in Betrieb gehen. Auch im Netz Ostbrandenburg II sollen für die Niederbarnimer Eisenbahn künftig derartige Fahrzeuge zum Einsatz kommen.

Stadler Flirt Akku



Abbildung 13: BEMU Stadler Flirt Akku (Foto: Stadler)

Das Fahrzeug existiert bereits als Prototyp und ist eine Eigenentwicklung der Firma Stadler. Es basiert auf der EMU-Plattform des Herstellers vom Typ Flirt 3. Laut Hersteller-Medienmitteilung verfügt das Fahrzeug bereits über eine Zulassung für den Personenverkehr. Die Entwicklung wurde mit Fördermitteln des Bundes unterstützt. 55 Fahrzeuge wurden vom Aufgabenträger nah.sh für den Verkehr in Schleswig-Holstein fest bestellt und sollen Ende 2022 die ersten Verkehre übernehmen.

Alstom Coradia Continental BEMU



Abbildung 14: BEMU Alstom Coradia Continental (Fotomontage: Alstom)

Der Fahrzeugtyp basiert auf der EMU-Plattform Coradia Continental des Herstellers Alstom. Fahrzeuge in der EMU-Variante verkehren aktuell beispielsweise auf den Strecken des Elektonetzes Mittelsachsen sowie auf zahlreichen bayerischen Strecken. Bei der Beschaffung von alternativ angetriebenen Fahrzeugen auf der Strecke Leipzig – Chemnitz entschied sich mit dem VMS erstmalig ein Aufgabenträger für die BEMU-Variante dieser Plattform. Der Betriebsbeginn ist für 2023 geplant.

CAF Civity BEMU



Abbildung 15: Designentwurf BEMU-Fahrzeug der Plattform CAF Civity für Leistungen im VRR-Netz (Foto: CAF/VRR)

Der BEMU von CAF basiert auf der modularen EMU-Fahrzeugplattform Civity für den Regional- und Nahverkehr, die in mehreren europäischen Ländern im Einsatz ist, jedoch noch nicht in Deutschland. Die Aufgabenträger VRR und NWL haben im Juni 2021 von diesem Fahrzeugtyp 30 Einheiten für den Einsatz auf sieben Regionalbahn- und Regionalexpresslinien bestellt. Diese sollen am Niederrhein und im Münsterland ab 2025 bzw. 2026 zum Einsatz kommen.

Infrastrukturbedarf der BEMU-Fahrzeuge

Die Aufladung der Fahrzeugbatterien kann grundsätzlich über die folgenden technischen Einrichtungen erfolgen. Dabei ist allerdings zu erwähnen, dass die Verwendung ausgewählter Ladetechnologien ggf. bei der Beschaffung des Fahrzeugs explizit anzufordern ist (z. B. Steckerladung):

- **Nutzung einer Bestandsoberleitung** mit ggf. erfolgter Ertüchtigung zur Erhöhung des Ladestroms und damit der Ladeleistung.
- **Verlängerung einer Bestandsoberleitung** mit Anlegen des Stromabnehmers in Fahrt auf freier Strecke oder bei einem Halt am Bahnsteig. Meist ist hierfür kein Ausbau der Energieversorgung nötig, da die Bestandsfahrleitung (nach Prüfung der Spannungshaltung) zur Versorgung genutzt werden kann.

- **Ladestation Oberleitung** Stillstandsladung über eine Oberleitung. Es bestehen mehrere Ausführungsmöglichkeiten, die die Stromtragfähigkeit und somit die Ladeleistung erhöhen. Verwendung genormter Spannungssysteme für elektrische Bahnen mit 16,7 Hz oder 50 Hz.
- **Ladeinsel.** Vergleichbar mit „Ladestation Oberleitung“ mit dem Unterschied einer längeren räumlichen Ausdehnung. Fahrzeuge verbinden und trennen sich ggf. während der Fahrt. Es ergeben sich Anforderungen an die Signalisierung, die Fahrzeugsteuerung und ggf. die bestehende Leit- und Sicherungstechnik.
- **Steckerladung.** Stillstandsladung mit 1.000 V über UIC genormten Zugsammelschienenstecker, zudem 400-V-Elekrantensysteme zur Erhaltungsladung bei Abstellung.

Der maßgebende Vorteil von BEMUs ist die effiziente Verwendung von günstig über die Oberleitung beziehbarer elektrischer Energie. Dabei entfällt die energieintensive Speicherung in einem speicherfähigen Energieträger wie bspw. in Form von Wasserstoff oder synthetischem Kraftstoff, dennoch ist die Verwendung elektrochemischer Energiespeicher (Akkumulatoren) nicht ohne Nachteile. Maßgebliche Herausforderung ist aktuell die geringe Reichweite, die in vielen möglichen Anwendungsfällen die Errichtung von Ladeinfrastruktur notwendig macht. Grundsätzlich bieten BEMUs dafür jedoch eine hohe Migrationsfähigkeit bei Elektrifizierungsvorhaben und vorhandenen Elektrifizierungsperspektiven.

4.3 Weitere mögliche alternative Antriebsformen

Prinzipiell besteht auch die Möglichkeit, die CO₂-Reduktion und begrenzt sogar eine CO₂-Neutralität ohne Technologiewechsel zu erreichen. Dies kann durch den Einsatz konventioneller Verbrennungsmotoren mit alternativen Kraftstoffen erfolgen. Hierbei wird zwischen biogen (von Pflanzen stammend) und synthetisch (chemisch erzeugt) differenziert. Solange die Kraftstoffe die erforderlichen stofflichen Eigenschaften besitzen, kann eine Verbrennung entweder direkt oder nach Anpassung bzw. Umrüstung der Motoren erfolgen. Dies ermöglicht zwar eine schnelle Einsatzreife, verhindert aber nicht die technologiespezifischen Emissionen. Hierzu zählen Lärm und zahlreiche Luftschadstoffe, die beim Verbrennungsprozess entstehen. Hierfür sind dann entsprechende Reinigungssysteme nachzurüsten. Ebenso kann alleine durch den alternativen Kraftstoff keine höhere Effizienz des Fahrzeugs erreicht werden. Auch eine Nutzung von Bremsenergie ergibt sich hierdurch nicht per se. Die Verwendung von Wasserstoff, der über andere Systeme als Brennstoffzellen (bspw. Verbrennungsmotoren) in Traktionsenergie gewandelt wird, kann ebenfalls im Bereich der synthetischen Kraftstoffe eingeordnet werden. Nachteilig ist hierbei, neben den bereits erwähnten Schadstoffemissionen, auch die geringere Effizienz. Aus diesem Grund empfiehlt das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) den Einsatz dieser Kraftstoffe nur dort, wo keine anderen Alternativen möglich sind, bspw. im Luftverkehr. Allenfalls wird der Einsatz als Übergangslösung empfohlen. Davon kann allerdings in dieser Untersuchung, auch im Hinblick auf die geplante Neubeschaffung von Fahrzeugen, nicht ausgegangen werden. Aus diesen Gründen schließt sich diese Untersuchung der Empfehlung des BMU an und das Konzept wird im Rahmen dieses Entscheidungspapiers nicht weiterverfolgt.

Das Konzept der Dual-Mode-Fahrzeuge sieht vor, durch die Kombination von Elektroantrieb und Dieselmotor stets diejenige konventionelle Antriebstechnologie zu verwenden, die für einen bestimmten Streckenabschnitt erforderlich ist. Auf elektrifizierten Abschnitten verkehrt das Fahrzeug rein elektrisch und verhält sich, abgesehen von einer höheren Masse, wie ein elektrischer Triebwagen. Auf nicht elektrifizierten Abschnitten wird der Dieselmotor verwendet, wodurch, vergleichbar mit einem konventionellen DMU, entsprechende Emissionen entstehen. Aufgrund der Motivation, Dieselantriebe zu ersetzen, stellt auch dieses Konzept keine zu betrachtende Variante dar.

Fahrzeugbeispiele weiterer alternativer Antriebsformen

Stadler WINK



Abbildung 16: Stadler WINK (Foto: Jan Oosterhuis)

Das Fahrzeug Stadler WINK bietet durch die als eigenständiges Mittelteil ausgeführte Antriebseinheit eine besondere Flexibilität hinsichtlich der verwendeten Technologie. Laut Hersteller sind hierbei neben unterschiedlichen Kraftstoffen (DMU) auch die Kombinationen aus Dieselmotor bzw. Brennstoffzelle und Batterie möglich. Ebenso lassen sich rein batterieelektrische Lösungen implementieren. Im Jahr 2017 erhielt der Hersteller einen Auftrag von Arriva Nederland für 18 Fahrzeuge für einen im Jahr 2021 gestarteten Betrieb. Die Fahrzeuge sind als bimodale Fahrzeuge (1,5 kV DC + Dieselmotor) ausgeführt und werden übergangsweise mit Pflanzenöl betrieben. Angestrebt wird jedoch zukünftig ein Ersatz des Dieselmotors durch Akkumulatoren.

Alstom Coradia Polyvalent



Abbildung 17: Alstom Coradia Polyvalent (Foto: Alstom/Frédérique Clément)

Das Fahrzeug verfügt über Ausstattungen für sowohl den Oberleitungs- als auch den Dieselbetrieb. Der Fahrzeugtyp wird in Frankreich in verschiedenen Ausführungen bereits seit mehreren Jahren im Regional- und Fernverkehr eingesetzt. Unterschiedliche Fahrzeugkonfigurationen in Länge, Ausstattung und Leistung sind möglich. Auch der Einsatz in Deutschland ist durch die Länder Rheinland-Pfalz und Baden-Württemberg fest bestellt und soll 2023 grenzüberschreitend beginnen. Seit Mai 2021 läuft nach Herstellerangaben für den Fahrzeugtyp die Zulassung in Deutschland.²²

²² vgl. Alstom: Start der Zulassungs- und Zertifizierungsprüfungen des ersten Coradia-Polyvalent-Regionalzugs für den grenzüberschreitenden Verkehr zwischen Frankreich und Deutschland, verfügbar unter <https://www.alstom.com/de/press-releases-news/2021/5/start-der-zulassungs-und-zertifizierungspruefungen-des-ersten-coradia> (abgerufen am 01.06.2021)

EcoTrain



Abbildung 18: DB Erzgebirgsbahn EcoTrain mit Oberleitungs-Nachladung (Fotomontage F. Angermann)

Um Bestandsfahrzeuge nicht vor dem Ablauf ihrer üblichen Lebensdauer von ca. 30 bis 35 Jahren verschrotten zu müssen, hat die DB RegioNetz Verkehrs GmbH die Umrüstung bestehender Fahrzeuge auf alternative Antriebe erprobt. Es entstand 2016/17 das Projekt „EcoTrain“, das verschiedene Umbaukonzepte umfasste. Die EcoTrain-Varianten wurden gemeinsam mit der TU Dresden, der TU Chemnitz und dem Fraunhofer-Institut IVI entwickelt. Ein erster Prototyp des EcoTrain in der Variante HybridMode wurde für die DB-Tochter Erzgebirgsbahn in Chemnitz gebaut. Es sieht den Betrieb als Plug-In-Hybrid mit einem Dieselmotor und einem großen Batteriespeicher inkl. externer Nachladung vor. Aufgrund veränderter Zulassungsbedingungen wurde das Projekt im Sommer 2020 durch die DB gestoppt und auf die in diesem Zusammenhang höheren Kosten bei einer Umrüstung verwiesen.²³

4.4 Zwischenfazit

Beide alternativen Antriebsformen, also sowohl BEMU als auch HEMU, erscheinen grundsätzlich geeignet, um künftig lokal emissionsfreien SPNV im heutigen VVO-Dieselnetz sowie im Ostsachsenetz durchführen zu können. Eine entsprechende Systementscheidung bzw. Handlungsempfehlung bedarf jedoch einer weitergehenden Untersuchung, die sich insbesondere technisch-betrieblichen, ökonomischen und ökologischen Fragestellungen widmet. Diese Untersuchung wird im folgenden Kapitel beschrieben.

²³ vgl. MDR: Erzgebirgsbahn zieht beim Projekt „Hybridzug“ den Stecker, verfügbar unter <https://www.mdr.de/nachrichten/sachsen/chemnitz/annaberg-aue-schwarzenberg/erzgebirgsbahn-keine-hybridzuege-100.html> (abgerufen am 01.06.2021)

5 Vergleich und Bewertung der Antriebsformen

5.1 Gegenstand der Untersuchungen

5.1.1 Herangehensweise und Randbedingungen

Der VVO beschäftigt sich bereits seit 2018 intensiv mit alternativen Antrieben und einer Zukunftsperspektive für die aktuell im Dieselbetrieb erbrachten SPNV-Leistungen. Im Fokus stand zunächst das VVO-Dieselnetz, das nach Ablauf des damaligen, ursprünglich bis zum Jahr 2024 terminierten Verkehrsvertrags, auf alternative Antriebe hätte umgestellt werden können. Nach der Insolvenz der Stadtebahn Sachsen GmbH, der damaligen Betreiberin des VVO-Dieselnetz, der entsprechenden kurzfristigen vertraglichen Neuorganisation des Netzes, die im Ergebnis zu einem Weiterbetrieb mit Dieselfahrzeugen bis ins Jahr 2031 führte, hat sich die Betrachtung inzwischen sowohl zeitlich als auch räumlich verschoben. Da 2031 auch das geplante Ende des heutigen Verkehrsvertrags im Ostsachsenetz darstellt, können nun in Abstimmung mit dem ZVON die Strecken Richtung Görlitz und Zittau ebenfalls mit in die vorliegende Untersuchung über alternative Antriebe für den SPNV einbezogen werden. Darüber hinaus lässt der ZVON auch weitere Strecken auf seinem Gebiet in einer gesamthafte Untersuchung betrachten.

5.1.2 Bisherige Studien

Im Rahmen einer Untersuchung zum Einsatz von alternativen Antrieben hat die TU Berlin maßgeblich im Jahr 2018 in Kooperation mit Bombardier Transportation eine Machbarkeitsstudie zum Einsatz von BEMU im VVO-Dieselnetz erstellt. Schwerpunkt waren die betrieblichen Parameter mit einer groben Umlaufplanung, der Energieverbrauch und die Abschätzung der Anzahl und Position möglicher Ladepunkte im Betrieb mit BEMU anhand des damaligen Stands der Batterietechnik im SPNV. Ebenfalls wurden die Strecken selbst hinsichtlich der infrastrukturellen Rahmenbedingungen wie dem Anteil an Streckenelektrifizierung, dem Höhenprofil, der zulässigen Achslasten, der Bahnsteighöhen und -längen sowie der Gleisanzahl und der Tunnel untersucht. Auf dieser Basis wurden dann Betriebssimulationen durchgeführt.

Ergänzend dazu wurde durch die DB Energie GmbH eine Machbarkeitsstudie zum Aufbau einer Ladeinfrastruktur für BEMU im Jahr 2019 durchgeführt. Schwerpunkte waren die technische Realisierbarkeit, die kaufmännische und rechtliche Bewertung sowie die Ableitung von Handlungsempfehlungen. Dazu wurde die standortspezifische Realisierbarkeit von Oberleitungsinselanlagen im Bahnhofsbereich, die stationäre Lademöglichkeit und die Teil-Neuelektrifizierung inklusive der Energieanlagen, der Flächenverfügbarkeit und einer Kostenschätzung untersucht. Das Ergebnis der Machbarkeitsstudie war, dass der Aufbau einer elektrischen Ladeinfrastruktur für das Betreiben von BEMU aus technischer, baulicher und zeitlicher Sicht möglich und realistisch ist.

Die TU Dresden hat darüber hinaus maßgeblich im Jahr 2019 eine Machbarkeits- und Kostenanalyse basierend auf den Ergebnissen der Studie der TU Berlin für alternative Antriebskonzepte im VVO-Dieselnetz durchgeführt. Im Gegensatz zur Studie der TU Berlin wurden ergänzend zu batteriebetriebenen Fahrzeugen auch wasserstoffbetriebene, dieselbetriebene hybride und rein elektrische Fahrzeuge betrachtet. Zunächst wurde eine Analyse des Netzes hinsichtlich Streckenlänge, Verkehrsaufkommen, etc. durchgeführt. Anschließend erfolgte eine linienspezifische Analyse der Lebenszykluskosten (Infrastruktur und Fahrzeuge). Daraus folgte die Analyse des Gesamtnetzes mit der Ermittlung der optimalen Technologie. Dabei werden unterschiedliche Varianten zur (Teil-)Elektrifizierung unterschieden. Im Ergebnis der Analyse der Lebenszykluskosten zeigt sich, dass insbesondere EMU und BEMU

Kostenvorteile aufweisen und zu bevorzugen sind. Dies zeigt sich auch bei den zu erwartenden Einsparungen an CO₂-Emissionen.

5.1.3 Aktuelle Untersuchungen

Die vorstehend genannten Untersuchungen sind abgeschlossen, werden seit dem Jahr 2020 jedoch grundsätzlich aktualisiert und erweitert. Dies erfolgt sowohl aufgrund der eingangs von Kapitel 5.1 genannten veränderten Rahmenbedingungen als auch aufgrund der Tatsache, dass eine aktualisierte Betrachtung die jüngsten technischen Entwicklungen im Bereich alternativer Antriebe berücksichtigen kann. Dank der im Rahmen des Sofortprogramms Kohleausstieg bewilligten finanziellen Unterstützung durch das BMVI und das SMWA wurden noch tiefergehende Untersuchungen möglich. Dabei werden nun neben BEMU- auch HEMU-Konzepte vollständig betrachtet, um eine Abwägung zwischen möglichen alternativen Antriebsformen zu vervollständigen. Auch die Verlängerung der bisherigen RB 34 über Kamenz hinaus Richtung Hoyerswerda und Senftenberg (sog. „RB 34+“) wird nun vertieft untersucht.

Vor diesem Hintergrund hat der VVO im Frühjahr 2020 die KCW GmbH in Zusammenarbeit mit dem Institut für Bahnfahrzeuge und Bahntechnik der TU Dresden beauftragt, den VVO in folgenden Bereichen beratend zu unterstützen:

- Unterstützung im Entscheidungsprozess und der Vorbereitung des Einsatzes einer alternativen Antriebstechnologie
- Entwicklung einer Vergabestrategie für die Ausschreibung zu 12/2031
- Umlaufplanung BEMU/HEMU

Das Fachgebiet Bahnbetrieb und Infrastruktur des Instituts für Land- und Seeverkehr an der TU Berlin ist ferner vom VVO damit beauftragt worden, die technisch-betriebliche Machbarkeit des Einsatzes von BEMU- und HEMU-Fahrzeugen im VVO-Dieselnetz und im Ostsachsenetz zu untersuchen. Weiterhin erstellt DB Energie im Auftrag des VVO eine Machbarkeitsstudie über die Errichtung der entsprechend notwendigen Versorgungsinfrastruktur für beide SPNV-Netzen. Die folgende Grafik stellt diese Untersuchungen schematisch dar:

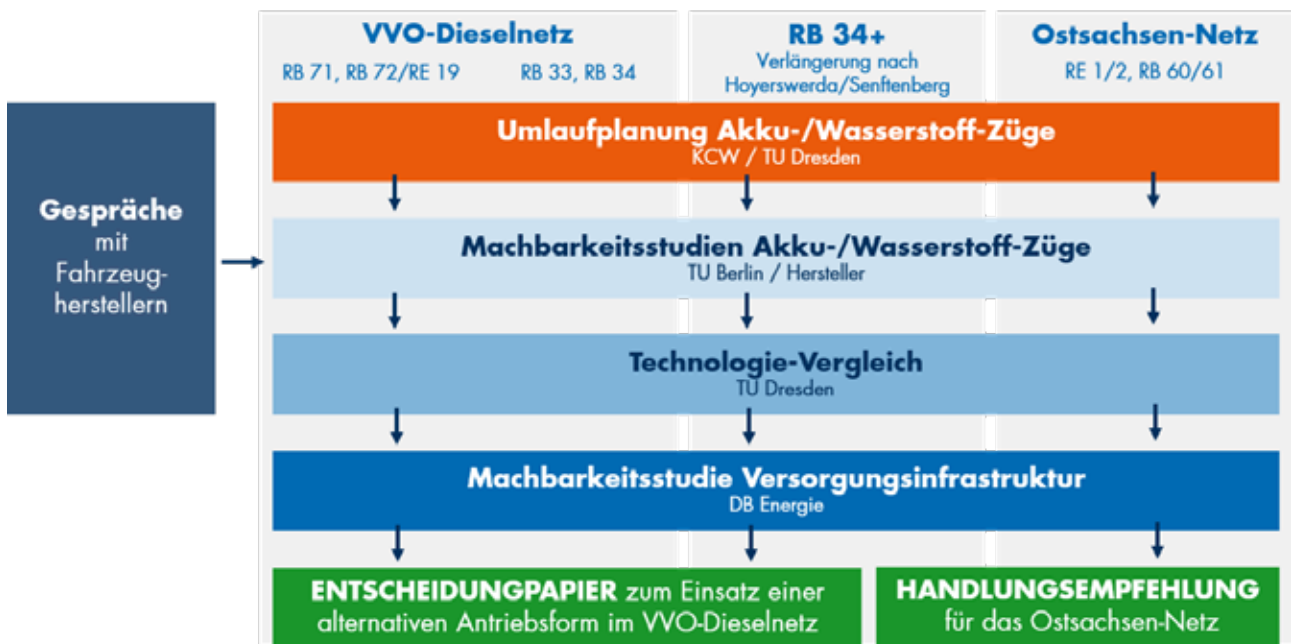


Abbildung 19: Untersuchungen als Grundlage für die Systementscheidung bzw. Handlungsempfehlung (eigene Darstellung VVO)

Insbesondere die nachfolgenden Abschnitte des Kapitels 5 als auch das Kapitel 6 sind Ergebnisse der Bearbeitungen von TU Berlin, TU Dresden und KCW im Auftrag des VVO. Sie stellen die wesentlichen Grundlagen für die in Kapitel 7 beschriebene Systementscheidung für das VVO-Dieselnetz bzw. für die in Kapitel 8 ausgesprochene Handlungsempfehlung für das Ostsachsennetz dar.

5.2 Eingangsgrößen und Rahmenbedingungen der Vergleichsuntersuchungen

Den in den nachfolgenden Abschnitten beschriebenen Vergleichsuntersuchungen liegen Eingangsgrößen und Rahmenbedingungen zu Grunde, auf die dieses Kapitel eingeht.

Eine wesentliche Rahmenbedingung und somit eine relevante Eingangsgröße der Untersuchungen ist der Fahrplan. Hierfür wurde in Abstimmung mit den beteiligten Aufgabenträgern ein Betriebskonzept 2030+ entwickelt, das die künftigen verkehrlichen Anforderungen im heutigen VVO-Dieselnetz bzw. im Ostsachsennetz abbildet. Dabei berücksichtigt sind Eckpunkte aus dem Zielfahrplan Deutschlandtakt sowie weitere, angestrebte Angebotsverbesserungen (z. B. Verlängerung SPNV über Kamenz hinaus Richtung Hoyerswerda und Senftenberg, Taktverdichtung Dresden – Ottendorf-Okrilla). Neben dem Fahrplan umfasst das Betriebskonzept für das jeweilige Netz insbesondere auch Kapazitätsanforderungen, um letztlich vor diesem Hintergrund alle kostenwirksamen betrieblichen Elemente (Fahrzeugbedarf, Laufleistung, Betriebsdauern) ableiten zu können.

Die Überprüfung der technisch-betrieblichen Machbarkeit untersucht zunächst die Realisierbarkeit des Einsatzes von HEMU- und BEMU-Fahrzeugen auf Basis des genannten Betriebskonzepts. Hiervon wird der jeweilige, technologiespezifisch erforderliche und somit kostenwirksame Infrastrukturbedarf abgeleitet. Ebenso wird der technologieunabhängige Infrastrukturbedarf ermittelt, der zur Umsetzung des geplanten Betriebskonzeptes in jedem Fall erforderlich ist.

In der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung werden über HEMU und BEMU hinaus Varianten mit klassischen Dieselfahrzeugen (als Referenzfall – ohne zusätzlichen, technologiespezifischen Infrastrukturbedarf)

und klassischen Elektrofahrzeugen (als Szenario einer etwaigen Vollelektrifizierung) gerechnet. Diese dienen der weiteren Vergleichbarkeit, u. a. aber auch zur Bewertung von Umwelteffekten (CO₂-Einsparungen).

Nicht Gegenstand der aktuellen Untersuchungen sind detaillierte Prüfungen der Infrastruktur, insbesondere zu den Themen Streckenklasse (wird in einer weiteren durch den VVO beauftragten Untersuchung der DB Netz vertieft behandelt) oder Bahnsteiglängen (etwaiger Anpassungsbedarf aufgrund der Fahrzeuglängen ist nach dem Technologieentscheid unter Berücksichtigung der entsprechend zur Verfügung stehenden Fahrzeuggrößen zu bewerten).

Die im Ergebnis dargestellten Kostenwerte verstehen sich als „brutto“-Angaben, d. h. ohne Berücksichtigung von Förderungen, die sich aus dem 1. Arm der Strukturstärkung oder weiteren Möglichkeiten ergeben können (vgl. Kapitel 3). Selbstredend können Förderungen dazu beitragen, das wirtschaftliche Gesamtbild zu verändern. Sie sind aufgrund der grundsätzlichen Technologieoffenheit der vorgestellten Förderungen jedoch nicht dazu geeignet, die Untersuchung zugunsten einer bestimmten Technologie zu beeinflussen.

5.3 Überprüfung der technisch-betrieblichen Machbarkeit des BEMU- und HEMU-Einsatzes

5.3.1 Ziel und Methodik

Hauptziel der Studie der TU Berlin ist die Identifikation der für die jeweilige Technologie notwendigen Infrastruktur sowie die Prüfung der Einhaltung des zukünftig angedachten Betriebsprogramms. Dies geschieht vor dem Hintergrund, die Auslegung der Infrastruktur derart zu gestalten, dass ein Großteil der aktuell am Markt verfügbaren Fahrzeuge unter den gegebenen Randbedingungen eingesetzt werden kann. Ziel ist, für die Fahrzeugbeschaffung einen aktiven Wettbewerb zu ermöglichen.

Neun Fahrzeuge (drei HEMU, sechs BEMU) verschiedener Hersteller wurden untersucht und konnten mittels von den Herstellern gelieferter Fahrzeug- und Fahrdynamikdaten im Detail ausgewertet werden. Die präzisen Fahrzeugdaten erlauben dabei eine belastbare Aussage über die technisch-betriebliche Machbarkeit. Als erster Schritt wurde eine Fahrdynamiksimulation durchgeführt, die der Überprüfung dient, ob die Fahrzeuge das vom VVO vorgegebene Fahrplankonzept für 2030+ einhalten können. Im zweiten Schritt wurde der Energieverbrauch der Fahrzeuge berechnet, um daraus die notwendige Infrastruktur abzuleiten und eine Plausibilisierung der Verbrauchswerte für die Wirtschaftlichkeitsberechnung durchzuführen. Hierbei wurden auch Verspätungsszenarien sowie der erhöhte Verbrauch der Nebenaggregate in Sommer- bzw. Wintermonaten beispielsweise für Klimatisierung oder Heizung berücksichtigt. Dieses Vorgehen erlaubt eine plausible Einschätzung des Energieverbrauchs und ermöglicht eine stabile Betriebsführung auch unter anspruchsvollen Randbedingungen oder Störungseinflüssen durch ausreichende Energiepuffer.

Zusätzlich wurden die von KCW entworfenen Varianten der Umlaufpläne einer Überprüfung unterzogen, inwieweit unter Berücksichtigung der berechneten Verbrauchswerte der Fahrzeuge eine Anpassung dieser Pläne notwendig werden könnte. Der aus den Umlaufplänen resultierende Fahrzeugbedarf sowie die weiteren Ergebnisse des Studienteils der TU Berlin gehen in die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der TU Dresden ein (siehe Kapitel 5.4). Dies umfasst insbesondere die jeweilige Auswahl einer Vorzugsvariante für den Infrastrukturausbau.

5.3.2 Ergebnisse

Die Fahrzeituntersuchung zeigte erwartungsgemäß, dass sämtliche Fahrzeuge durch ihren komplett elektrischen Antriebsstrang ausreichend leistungsfähig sind. Je nach Topografie der Strecken fällt der Vorsprung zum vorgegebenen Fahrplan unterschiedlich hoch aus. Die Fahrzeiten des unterstellten Fahrplankonzeptes können für die untersuchten Fahrzeuge eingehalten werden. Es gibt einige wenige Ausnahmen, die allerdings technologieunabhängig bestehen. Diese werden in den folgenden Ergebnisblöcken des jeweiligen Netzes aufgeführt.

VVO-Dieselnetz Nord

Die Linie **RB 33** wird auf dem Linienverlauf Dresden Hbf – Königsbrück betrieben. Der Teilabschnitt von Dresden Hbf bis Dresden-Klotzsche ist bereits heute elektrifiziert und kann für die Batterieladung der BEMU genutzt werden. Die energetische Simulation zeigt, dass alle untersuchten BEMU und HEMU in der Lage sind, das vorgesehene Betriebsprogramm zu fahren. Die BEMU profitieren dabei von der vorhandenen Elektrifizierung und benötigen daher keine zusätzliche Ladeinfrastruktur.

Die Betankung der HEMU zwischen zwei Betriebstagen kann über die Errichtung einer Wasserstoff-tankstelle in Dresden erfolgen.

Die Linie **RB 34** führt im Abschnitt Dresden – Arnsdorf entlang der zweigleisigen Hauptstrecke Dresden – Görlitz und wird ab den jeweiligen Abzweigen Arnsdorf Richtung Kamenz eingleisig fortgeführt. Dabei ist der Abschnitt Dresden Hbf – Dresden-Klotzsche im Bestand elektrifiziert. Die Elektrifizierung der Strecke Arnsdorf – Kamenz – Hosena ist unter der laufenden Projektnummer 22 im Investitionsgesetz Kohleregionen geplant (vgl. Kapitel 2.1.2 und 3.1.2). Wenn auch nicht explizit erwähnt, kann im Rahmen der Realisierung dieses Projektes auch von der Elektrifizierung des Abschnitts Dresden-Klotzsche – Arnsdorf ausgegangen werden.

Der Einsatz von BEMU ist bei heutiger Infrastrukturausstattung nur unter der Annahme zusätzlicher Ladeinfrastruktur möglich. Von der geplanten Elektrifizierung der Görlitzer Strecke würden die Batteriefahrzeuge auf der Linie RB 34 maßgeblich profitieren. Nach Umsetzung dieser Maßnahme wird keine separate Ladeinfrastruktur mehr benötigt. Somit wird die Umsetzung des Ausbaus Dresden – Görlitz bis Arnsdorf zur infrastrukturellen Voraussetzung eines Batteriezeugsatzes auf der Linie Dresden – Kamenz. Der Einsatz von Brennstoffzellenfahrzeugen ist auf dieser Linie möglich. Die Betankung wird an den Standorten der Nachtabstellung in Dresden und Kamenz durch Errichtung von Wasserstofftankstellen gewährleistet. Teilweise notwendige Zwischenbetankungen im Tagesverlauf können durch Anpassung des Umlaufplans bei entsprechendem Personalmehreinsatz ohne den Einsatz zusätzlicher Fahrzeuge umgesetzt werden.

Die Bezeichnung Linie **RB 34+** beschreibt die geplante Verlängerung der Linie 34 nördlich über Kamenz hinaus und beinhaltet die stündlich alternierende Durchbindung nach Senftenberg und Hoyerswerda. Die Simulation hat gezeigt, dass die Kreuzungszeiten in Kamenz nicht ausreichen. Dies kann durch die Schaffung eines zweigleisigen Abschnittes von Kamenz bis Hausdorf behoben werden, anderenfalls ist das Fahrplankonzept nördlich Kamenz nicht stabil fahrbar. Weiterhin ist der Bau einer Verbindungskurve bei Hosena nötig, um die Durchbindung der Züge Kamenz – Hoyerswerda ohne Richtungswechsel in Hosena zu ermöglichen. Ab Johannisthal (bei Hosena) erfolgt die Bedienung beider Linienäste unter bereits bestehender Fahrleitung, welche für die Ladung der Batteriefahrzeuge genutzt werden kann. Somit wird gegenüber der Linie RB 34 für BEMU keine zusätzliche Ladeinfrastruktur benötigt. Die Bedienung der RB 34+ mit HEMU ist mit gleichem Infrastrukturaufwand wie bei einem HEMU-Einsatz auf der Linie RB 34 möglich.

VVO-Dieselnetz Süd

Auf der Linie **RB 71** verkehren die Züge grundsätzlich zwischen Pirna und Neustadt (Sachs). Fahrten, die weiter nach Sebnitz durchgebunden sind, wechseln in Neustadt (Sachs) während eines je etwa zehnmütigen Aufenthalts die Fahrtrichtung.

Um die Linie 71 mit Batteriefahrzeugen betreiben zu können, sind zwei infrastrukturelle Maßnahmen notwendig:

1. In Pirna ist sicherzustellen, dass der Aufenthalt am derzeit nur teilelektrifizierten Bahnsteiggleis zur Standladung des Zuges via Fahrleitung genutzt werden kann. Die Identifikation der effizientesten Umsetzung ist Teil einer laufenden Untersuchung von DB Energie, welche vom VVO beauftragt wurde.
2. Weiterhin wird von der Mehrheit der untersuchten BEMU-Fahrzeuge eine Ladestation in Neustadt (Sachs) benötigt. Während der Aufenthaltszeit der Züge zum Wechsel der Fahrtrichtung bzw. vor der Weiterfahrt Richtung Sebnitz wird eine Zwischenladung im Stand vorgesehen. Die Ladestation sorgt weiterhin für größere betriebliche Flexibilität bei Störungen oder Bauzuständen und für geringere Belastungen der Traktionsbatterien.

Ein Betrieb mit HEMU-Fahrzeugen ist problemlos möglich. Die dafür notwendige Tankstelle zur Einhaltung des Umlaufplanes sollte in Sebnitz positioniert werden. Eine Versorgung bei der Nachtabstellung in Neustadt bzw. Sebnitz muss ebenfalls vorgesehen werden.

Die Linie **RB 72** verbindet Heidenau mit Altenberg und ist nicht elektrifiziert. Die Bahnsteiggleise in Heidenau an der Hauptstrecke Dresden – Prag sind mit Fahrleitung überspannt und können bereits im Status Quo zur Standladung genutzt werden. Diese Linie stellt insoweit eine Besonderheit dar, als dass sie zwischen Elbtal und Erzgebirge einen Höhenunterschied von ca. 640 m überwindet, was besondere Anforderungen an die Fahrzeuge stellt. Neben der Linie RB 72 ergänzt die Linie **RE 19** „Ski- und Wanderexpress“ mit Durchbindungen von/nach Dresden Hbf an Wochenenden das Angebot mit weniger Halten zwischen Heidenau und Altenberg. Zwischen Dresden und Heidenau verkehren die Züge dabei vollständig unter Fahrleitung.

Unabhängig von der Technologieentscheidung ist die Strecke (Heidenau –) Köttewitz – Altenberg für eine Anhebung der Streckenklasse zu ertüchtigen, damit schwerere Fahrzeuge (bedingt durch zusätzliche Antriebskomponenten und insbesondere aktuelle Crash-Normen) als heute eingesetzt werden können. Der Aufwand hierfür wird aktuell durch DB Netz ermittelt.

Die Bedienung durch Batteriezüge erfordert weitere infrastrukturelle Maßnahmen: als Vorzugsvariante wurde die Verlängerung der bestehenden Fahrleitung ab Heidenau identifiziert. Abhängig vom jeweils untersuchten Fahrzeug der eingesetzten BEMU sollte diese ab Heidenau ca. fünf bis zehn km weit reichen. Diese Lösung beinhaltet u. U. die Elektrifizierung von zwei Tunneln, ermöglicht jedoch die Speisung des Ladeabschnitts durch die Bestandselektrifizierung der Hauptstrecke. Gegenüber den ebenfalls untersuchten Lösungen einer Ladeinsel beim Kreuzungshalt Glashütte oder der Elektrifizierung des Abschnitts Geising – Altenberg wird so eine separate (Landes-)Netzanbindung samt zugehöriger Umrichterwerke mit Leistungselektronik eingespart.

Es ist bis 2031 absehbar möglich, die untersuchten HEMU auf der Linie RB 72 einzusetzen. Der Einsatz von Brennstoffzellenfahrzeugen bedingt neben der Ladestandserhaltung der Dynamikbatterie in Altenberg auch eine nahegelegene Tankmöglichkeit, welche mit der Errichtung einer Wasserstofftankstelle

in Pirna geschaffen wird. Da der Einsatz von HEMU für die untersuchten Fahrzeuge neben Nachtbetankungen auch Zwischentankfahrten am Tage bedingt, werden so die Überführungswege kurzgehalten und die notwendige Anpassung des Fahrzeugumlaufplans ohne den Einsatz eines zusätzlichen Fahrzeugs ermöglicht.

Ostsachsennetz

Für die zweigleisige Hauptstrecke Dresden – Görlitz, welche durch die Linien **RE 1** sowie **RB 60** bedient wird, ist im Investitionsgesetz Kohleregionen unter der laufenden Projektnummer 20 ein Streckenausbau inkl. Vollelektrifizierung vorgesehen (vgl. Kapitel 2.2.2 und 3.1.2). Vor diesem Hintergrund ist der mögliche Einsatz alternativer Antriebssysteme als Migrationslösung bis zur Vollelektrifizierung zu verstehen. Im heutigen Zustand ist die Strecke überwiegend mit 120 km/h befahrbar und von Dresden Hbf bis Dresden-Klotzsche elektrifiziert. Im Zuge der Elektrifizierung in Richtung Bischofswerda/Görlitz ist ein weitgehender Ausbau auf 160 km/h geplant.

Die BEMU können die Fahrzeiteinhaltung gewährleisten. Voraussetzung für einen zwischenzeitlichen Betrieb mit Batteriefahrzeugen ist die Umsetzung der Elektrifizierung ab Dresden bis Demitz-Thumitz bei Bischofswerda sowie die Schaffung einer Ladestation in Görlitz. Die Ladestation kann in der Bahnhofshalle oder alternativ in der Abstellanlage an der Sattigstraße errichtet werden. Die Weiterverwendbarkeit der Ladestation Görlitz für die später vorgesehene Vollelektrifizierung sollte bereits bei deren Planung und Errichtung angestrebt werden.

Schnelle und langlaufende Linien stellen auch für die HEMU eine Herausforderung dar. Diese werden absehbar bis 2031 in der Lage sein, das betriebliche Anforderungsprofil zu erfüllen und die Nachladung der Dynamikbatterie in den Wendezeiten sicherzustellen. Für einen Wasserstoffbetrieb nach Görlitz werden Tankstellen in Dresden und Görlitz vorgesehen.

Die **Linien RE 2 und RB 61** teilen sich den Laufweg mit den nach Görlitz verkehrenden Linien bis Bischofswerda. Im Abschnitt Bischofswerda – Zittau wird eine nicht elektrifizierte, eingleisige Strecke mit geringerer Höchstgeschwindigkeit befahren. Der Abschnitt Zittau – Liberec ist ebenfalls eingleisig und führt durch insgesamt drei Staaten. Die Mehrheit der Fahrzeughersteller hat zugesichert, einen grenzüberschreitenden Betrieb der Fahrzeuge mit alternativen Antrieben nach Tschechien unter Berücksichtigung der dort im Einsatz befindlichen Zugsicherung ermöglichen zu können (vgl. Kapitel 2.3).

Die Fahrplaneinhaltung ist für BEMU und HEMU grundsätzlich möglich: es besteht ausreichend Puffer, um auch im Verspätungsfall über ausreichend Reserven zu verfügen. Jedoch stellt sich die abschnittsweise Einhaltung des Fahrplankonzepts im Status Quo problematisch dar – um eine stabile Fahrbarkeit des Zielfahrplankonzepts zu gewährleisten, sind unabhängig von der Entscheidung für eine Antriebstechnologie Infrastrukturausbauten zu forcieren:

Dies betrifft zum einen den Abschnitt Zittau – Mittelherwigsdorf, der auf eine Höchstgeschwindigkeit von 120 km/h auszubauen ist. Dieser wird im Zuge der Ertüchtigung der Linie L 7 ebenfalls angestrebt, womit sich ein hoher Nutzen der Maßnahme ergibt. Derartige Planungen sind passfähig zu den Vorhaben des Investitionsgesetz Kohleregionen, in dem unter der laufenden Projektnummer 21 der Ausbau inkl. Elektrifizierung der Strecke (Dresden –) Bischofswerda – Zittau genannt ist.

Zum anderen ist im grenzüberschreitenden Betrieb die Höchstgeschwindigkeit im Abschnitt Zittau – Hrádek (CZ) heute auf teils 30 km/h begrenzt. Um im Fahrplankonzept vorgesehene Zugkreuzungen zu ermöglichen, muss dieser ausgebaut werden. Der Abschnitt führt z. T. über polnisches Staatsgebiet, dem Einfluss des für den Betrieb zu Grunde liegenden Staatsvertrags ist entsprechend Rechnung zu tragen. Eine Möglichkeit besteht in der Ertüchtigung des Neißeviadukts, das die Grenze Deutschland – Polen markiert. Dieser Ausbau allein würde jedoch nicht genügen, es sind weitere Geschwindigkeitserhöhungen auf ausländischem Staatsgebiet notwendig. Aufgrund des meist eingleisigen Streckenverlaufs und der daraus entstehenden Zwangspunkte besteht kaum Potenzial für eine Fahrplananpassung. Im Investitionsgesetz Kohleregionen ist der Ausbau der Strecke Bischofswerda – Zittau genannt. Die Ertüchtigung der vorstehend genannten Streckenabschnitte für höhere Geschwindigkeiten bis zur Betriebsaufnahme 2031 ist Voraussetzung, um das künftig angedachte Betriebsprogramm umsetzen zu können.

Auch für den Batteriebetrieb auf dem Zittauer Ast des Ostsachsennetzes ist die Elektrifizierung der Hauptstrecke Dresden – Bischofswerda (– Görlitz) eine Voraussetzung. Weiterhin ist es notwendig, eine Ladeinsel im Abschnitt Zittau – Mittelherwigsdorf zu errichten. Beide Maßnahmen sind passfähig zu den Projekten 20 und 21 des Investitionsgesetz Kohleregionen, welche die Elektrifizierung der Strecken Dresden – Bischofswerda – Görlitz bzw. Zittau nennen. Die Ladeinsel Zittau – Mittelherwigsdorf ermöglicht neben einer Standladung im Bahnhof Zittau auch die Batterieladung während der Fahrt im genannten Streckenabschnitt, um den langen nichtelektrifizierten Abschnitt Bischofswerda – Liberec zu teilen: Die Ladeanlage wird damit für Züge, die in Zittau enden, aber auch für durchgebundene Fahrten nach Liberec nutzbar. Sie kann perspektivisch weitere Lademöglichkeiten für Linien bieten, die in Zittau halten oder enden (z. B. heutige RB 65 & L 7), sofern diese auf BEMU-Betrieb umgestellt werden. Die Weiterverwendbarkeit der Ladeinsel im Bereich Zittau für die im Investitionsgesetz Kohleregionen vorgesehene Vollelektrifizierung sollte bereits bei deren Planung und Errichtung angestrebt werden.

In Liberec wird eine ladestanderhaltende Fahrzeugversorgung als Steckerlösung avisiert, um die Wendezeit der dort endenden RE 2-Fahrten zu überbrücken. Eine Prüfung der dort vorhandenen Anlagen auf Verwendbarkeit für BEMU ist noch vorzunehmen. Sofern in Tschechien eine Vollelektrifizierung des Bahnhofs Liberec realisiert wird, kann eine Mitbenutzbarkeit der dortigen Fahrleitungsanlage geprüft werden. Diese wird abhängig von der Wahl des Bahnstromsystems zusätzliche Anforderungen an den Fahrzeugpark stellen, welche jedoch von der Mehrheit der Anbieter bereits heute befriedigt werden kann (siehe auch Kapitel 2.3).

Der Betrieb mit HEMU ist auf den Linien RE 2 und RB 61 möglich. Bei einer Entscheidung für Wasserstofffahrzeuge sind in Zittau und Liberec steckerbasierte Fahrzeugversorgungen auf Elektranten-Basis vorzusehen, soweit diese nicht in ausreichender Anzahl bereits vorhanden sind. Die Betankung der Fahrzeuge ist über Tankstellen in Dresden und Zittau vorgesehen, welche ebenfalls zu errichten wären.

Aufgrund der weiteren technischen Entwicklung bzw. der spezifischen Anpassung der Fahrzeuge an die untersuchten Strecken kann von einer problemlosen Nutzung von BEMU- bzw. HEMU-Fahrzeugen für das untersuchte Netz im Jahre 2031 ausgegangen werden, sofern die jeweils erforderliche Infrastruktur fertiggestellt sein wird. Die weiteren Schritte der Infrastrukturplanung sollten auch unter Berücksichtigung der Entwicklungen im Fahrzeugbereich erfolgen. Zu den technischen Entwicklungspotenzialen gehört beispielsweise die Erhöhung der Ladeleistung für BEMU-Fahrzeuge im Stand (siehe auch Kapitel 4.2). Aufgrund der hohen Bedeutung des Nachladens während der Wendezeiten sollte dieser Aspekt durch die beteiligten Akteure auf jeden Fall weiterverfolgt und in die Infrastrukturplanung einbezogen werden. Da es sich um eine Schnittstelle zwischen Fahrzeug und Infrastruktur handelt, wird

diese im Zusammenspiel mehrerer Akteure (insbesondere Fahrzeughersteller, Fahrzeugbetreiber, Infrastrukturbetreiber, Aufgabenträger) ausgestaltet.

Da die Aufgabenträger weiterhin am Ziel einer Elektrifizierung der Strecke Dresden – Görlitz festhalten, ergeben sich im Hinblick auf den Einsatz alternativer Antriebssysteme spezielle Randbedingungen, die analog auch für die Elektrifizierungspläne der Strecke Arnsdorf – Hosena bzw. Bischofswerda – Zittau gelten:

Die untersuchten HEMU können von einer späteren Elektrifizierung nicht profitieren, ihr Weiterbetrieb unter vollständig elektrifizierten Strecken ist technisch (und ökonomisch, dazu auch in Kapitel 5.4.2) nicht sinnvoll. Bei Entscheidung für HEMU als Migrationslösung sollte demnach eine Weiterverwendung der Fahrzeuge auf anderen Linien bereits zum Beschaffungszeitpunkt sichergestellt werden.

Die Batteriefahrzeuge bieten Optionen zur Weiterverwendbarkeit auf (teil-)elektrifizierten Strecken. Sie können unter Fahrleitung wie reine Elektrozüge betrieben werden. Im Sinne einer einheitlichen Fahrzeugflotte und Wahrung der betrieblichen Flexibilität im gesamten Ostsachsendnetz könnten die BEMU unverändert auf der elektrifizierten Strecke weiterbetrieben werden. Alternativ kann der Rückbau einer Teilflotte der BEMU, mit welcher der Görlitzer Streckenast bedient würde, zu reinen Elektrotriebzügen angestrebt werden. Um den Umbau- und ggf. Neuzulassungsaufwand zu minimieren, wäre dieser Ansatz bereits als Anforderung im Fahrzeugbeschaffungsprozess zu verankern.

Die notwendige Elektrifizierung des Streckenabschnittes Dresden-Klotzsche – Demitz-Thumitz hat sich gegenüber anderen Varianten als technisch am sinnvollsten durchgesetzt, da von ihr die meisten Linien im Lausitzer Revier in ausreichendem Maße profitieren. Darüber hinaus ist dieser Abschnitt ohnehin bereits Teil gesetzlicher Ausbauplanungen (siehe Kapitel 2.2.2 bzw. 3.1.2).

5.3.3 Ableitung erforderlicher Infrastruktur

Für die Umsetzung des in beiden Netzen angedachten Betriebskonzepts ist ein entsprechender Ausbau der Infrastruktur bis 2031 je nach gewählter Technologie erforderlich. Zudem gibt es Ausbaumaßnahmen, die unabhängig von der Antriebstechnologie bis 2031 umzusetzen sind:

Antriebsunabhängige Infrastruktur:

- Verbindungskurve „Johannisthal“ bei Hosena, um Direktverbindung Dresden – Kamenz – Hoyerswerda ohne Richtungswechsel in Hosena zu ermöglichen
Bestandteil der Ausbaumaßnahme Nr. 22 im Investitionsgesetz Kohleregionen
- Ausbau zu einem zweigleisigen Begegnungsabschnitt Kamenz – Cunnersdorf – Hausdorf. Ein Ausbau bis Cunnersdorf genügt nicht, da Fahrplangefüge in Nordverlängerung RB34+ so, dass bei kürzerer Ausführung Betriebsstabilität gefährdet wäre
Bestandteil der Ausbaumaßnahme Nr. 22 im Investitionsgesetz Kohleregionen
- Ertüchtigung Bahnhof Bischofswerda für Flügel-Konzept
- V_{\max} -Erhöhung Zittau – Hrádek nad Nisou auf 80 km/h
- V_{\max} -Erhöhung Zittau – Mittelherwigsdorf auf 120 km/h
Bestandteil der Ausbaumaßnahme Nr. 21 im Investitionsgesetz Kohleregionen
- Anhebung der Streckenklasse Köttewitz – Altenberg und ggf. Zittau – Liberec

Infrastruktur für HEMU-Fahrzeuge:

- Tankstandorte: DD-Altstadt, Pirna, Sebnitz, Kamenz, Görlitz, Zittau
- Zugehörige H₂-Herstellung und Versorgungslogistik der Tankstandorte
- Errichtung einer steckergebundenen Fahrzeugversorgung, wenn längere Abstellungen beispielsweise über Nacht geplant sind (400-V-Elektanten ähnlich Dieselbetrieb)
- Elektanten für Nachtabstellung der HEMU sind u. a. aus Lärmgründen zu bevorzugen und um Vorheizen/Kühlen nicht über H₂-Tankvolumen und zu Lasten der Brennstoffzellenlebensdauer bzw. -betriebsstunden bestreiten zu müssen

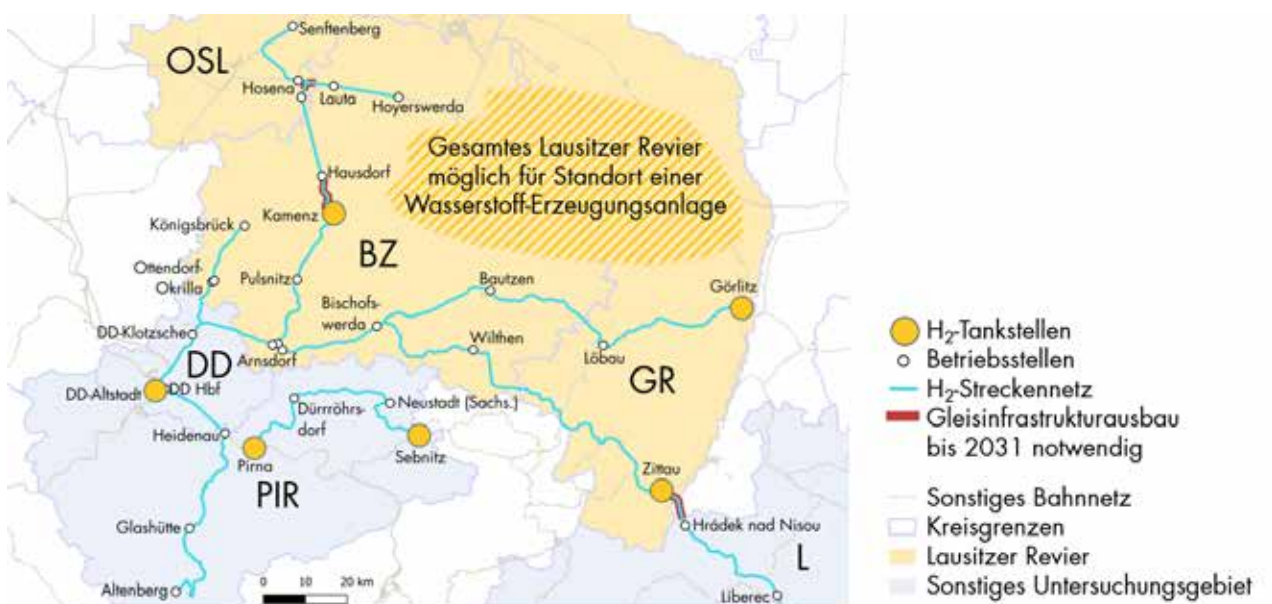


Abbildung 20: Infrastrukturbedarf für HEMU-Fahrzeuge (eigene Darstellung TU Dresden/VVO)

Infrastruktur für BEMU-Fahrzeuge:

- Elektrifizierung Dresden-Klotzsche – Demitz-Thumitz
Bestandteil der Ausbaumaßnahme Nr. 20 bzw. Nr. 22 (hier nur Abschnitt bis Arnsdorf) im Investitionsgesetz Kohleregionen
- Elektrifizierung Zittau – Mittelherwigsdorf
Bestandteil der Ausbaumaßnahme Nr. 21 im Investitionsgesetz Kohleregionen
- Elektrifizierung Heidenau – Köttewitz (– Mühlbach)
- Ladestationen in Görlitz (Migrationsvariante bis Vollelektrifizierung) und Neustadt (Sachs), die auch für Fahrzeugabstellungen über Nacht vorgesehen werden soll.
- Ladeerhaltung in Altenberg und Liberec (Steckerlösung mit geringer Leistung)
- Errichtung einer steckergebundenen Fahrzeugversorgung, sofern keine Oberleitungsinfrastruktur geplant ist und längere Abstellungen beispielsweise über Nacht geplant sind (400-V-Elektranten ähnlich Dieselbetrieb)



Abbildung 21: Infrastrukturbedarf für BEMU-Fahrzeuge (eigene Darstellung TU Dresden/VVO)

5.4 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

5.4.1 Methodik

Zur Bestimmung der wirtschaftlich optimalen Technologie in den beiden Netzen wird von der TU Dresden ein dreistufiges Verfahren angewendet, das in Abbildung 22 dargestellt ist.

Zuerst wird eine Analyse des jeweiligen Netzes durchgeführt, die Aussagen über den aktuell dort stattfindenden Betrieb, vorhandene Infrastruktur, benötigte Fahrzeuganzahlen etc. bereitstellt. Diese Analyse wird für jede einzelne Linie der Netze durchgeführt und basiert vor allem auf den Voruntersuchungen zu den Umlaufplänen der Projektpartner, den technischen Machbarkeitsuntersuchungen der TU Berlin (vgl. Kapitel 5.3) mit dem abgeleiteten Infrastrukturbedarf sowie umfangreichen weiteren Quellen. Anhand von Vor-Ort-Begehungen, Bild- und Onlinequellen, Infrastrukturplänen, Energieversorgungs-Netzplänen, Angaben des VVO bzw. des ZVON sowie weiteren Quellen der Professur für Elektrische Bahnen und verschiedener Fahrzeugbetreiber bzw. -hersteller werden die Mengengerüste und Kostensätze je Infrastrukturmaßnahme sowie Fahrzeugtechnologie linienspezifisch abgeleitet.

Darauf aufbauend wird in der zweiten Stufe des Verfahrens linienspezifisch die jeweils wirtschaftlich optimal einzusetzende Technologie auf Basis der Lebenszykluskosten (LCC) ermittelt. Für die verschiedenen Linien werden dabei je nach Betrachtungszeitraum unterschiedliche Optima der Technologiewahl erwartet.

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

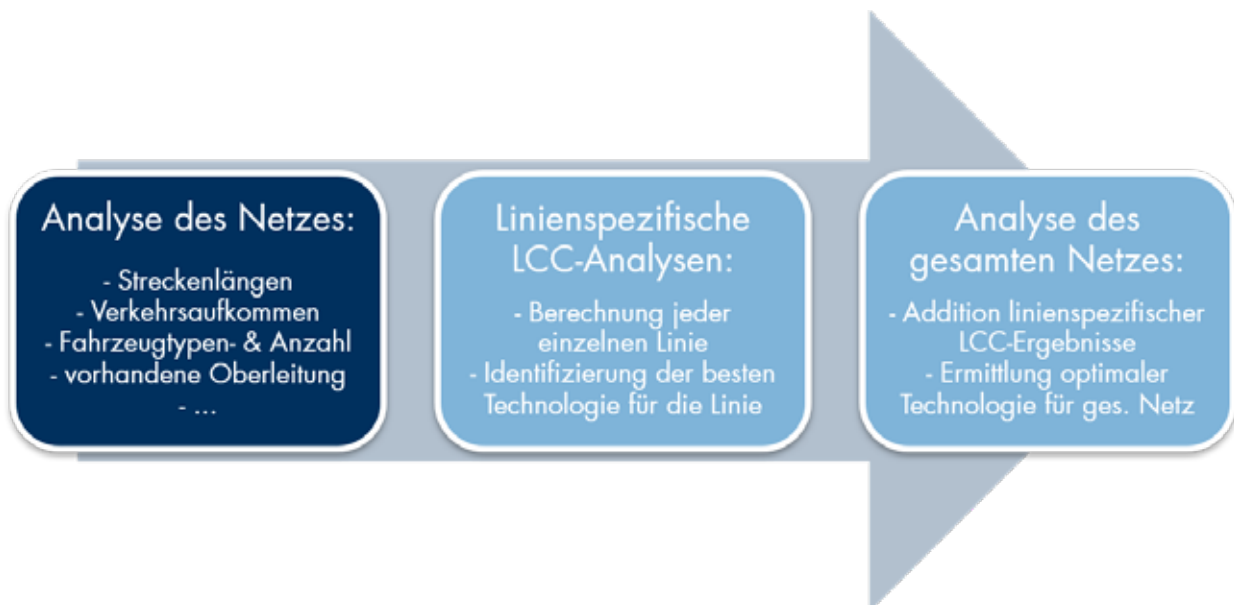


Abbildung 22: Vorgehensweise zur Bestimmung technologiespezifischer Kapitalwerte (eigene Darstellung TU Dresden)

Linienspezifische Lebenszykluskostenuntersuchungen

Die linienspezifische Untersuchung hat das Ziel der Feststellung einer sogenannten relativen Vorteilhaftigkeit sich einander ausschließender Investitionsvorhaben (z. B. BEMU vs. HEMU) unter bestimmten gleichen Voraussetzungen je Linie (bspw. befahrene Linien, gleiche betriebliche Randbedingungen, gleicher Betrachtungszeitraum etc.). Mit der durchgeführten Studie wird also eine wirtschaftliche Entscheidungsbasis geschaffen, welche Technologie die jeweils wirtschaftlich vorteilhafteste im heutigen VVO-Dieselnetz sowie im Ostsachsenetz ist. Dies wird durch die Bestimmung der Differenz der relevanten Gesamtkosten, die unterschiedliche Technologien hervorrufen, möglich. Diese Gesamtkosten werden mittels Lebenszykluskostenanalyse im gesamten Betrachtungszeitraum ermittelt.

Zur Bewertung der relativen Vorteilhaftigkeit kommt das Modell der dynamischen Investitionsrechnung, auch Kapitalwertmethode genannt, zum Einsatz. In der Kapitalwertmethode werden Effekte des Zinsseszinses und der Teuerungsrate bei zeitlich unterschiedlichem Anfall von Ein- bzw. Auszahlungen in einer langen Betrachtungsdauer berücksichtigt, wie dies in Abbildung 23 schematisch dargestellt ist. Die sich ausschließenden Investitionsvorhaben im Sinne dieser Untersuchung bestehen aus den folgenden verschiedenen Technologieoptionen:

- DMU (Dieselbetrieb als Referenzfall)
- EMU (Vollelektrifizierung, Einsatz klassischer elektrischer Züge)
- BEMU (Einsatz batterieelektrischer Züge)
- HEMU (Einsatz Wasserstoffzüge)

Für diese vier Technologieoptionen 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.

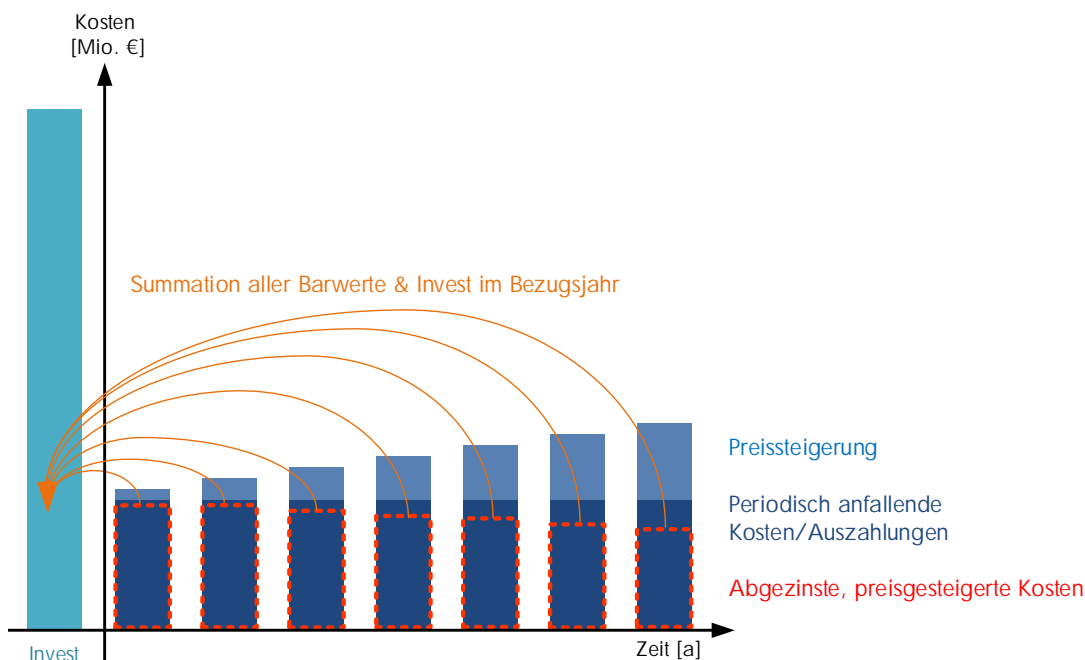


Abbildung 23: Vorgehensweise der Kapitalwertmethode (eigene Darstellung TU Dresden)

Das prinzipielle Vorgehen ist in Abbildung 23 schematisch dargestellt. Zunächst erfolgt die Berechnung der periodischen Auszahlungen, d. h. aller Kosten die je Betrachtungsjahr anfallen. Diese sind:

- Investitionen in Fahrzeuge und die zusätzliche Infrastruktur
- Finanzierungskosten der Fahrzeuge und Infrastruktur am Kapitalmarkt
- Traktionsenergiekosten abhängig von Bezugsquelle (Diesel / H₂ / Oberleitung / Ladestation)
- Instandhaltungskosten der Fahrzeuge und der zusätzlichen Infrastruktur
- laufende Instandhaltung sowie Hauptuntersuchungen der Fahrzeuge
- Reinvestitionen in Hochtechnologiekomponenten (Batterien, Brennstoffzellen, PowerPacks der Dieselmotoreinheit) jeweils in Abhängigkeit von belastungsabhängiger Lebensdauer
- ggf. erforderliche Reinvestitionen in Fahrzeuge und die zusätzliche Infrastruktur
- Restwerte bei kleineren Betrachtungsdauern als Abschreibungszeiträume der Komponenten

Einnahmen werden abgesehen von möglichen Restwerten nicht betrachtet, da Fahrgeldeinnahmen für alle Technologien gleich angenommen werden können. Gleiches gilt für Trassenkosten, Personalkosten (außer Tankfahrten), Abstellkosten, Reinigungskosten sowie Versicherungszahlungen. Diese sind für alle Technologien ebenfalls gleich und werden deshalb nicht mit berechnet. Die jährlichen Auszahlungen werden anschließend mit der Teuerungsrate beaufschlagt, die als Preissteigerung in Abbildung 23 zu erkennen sind. Durch Abzinsung mit dem Nominalzins, der für die Einlage der jährlichen Auszahlungssumme bei einem Kreditinstitut zu erwarten wäre, können dann die Werte auf das Jahr Null (Startjahr des Vertrages) bezogen und aufsummiert werden. Für jede Technologie wird so ein Kapitalwert gebildet, der einen Vergleich der Technologiekosten im Lebenszyklus ermöglicht.

Die Gesamtbetrachtung erfolgt differenziert nach zwei Betrachtungszeiträumen – 35 Jahre als anzustrebende Fahrzeuglebensdauer und 15 Jahre als mögliche Vertragslaufzeit eines Verkehrsvertrags – sowie nach den Infrastrukturrandbedingungen. Die nachfolgenden Betrachtungen schauen ausschließlich auf den Zeitraum über 35 Jahre, was mit der Langlebigkeit der erforderlichen Investitionen (Fahrzeuge, Infrastruktur) begründet werden kann. Dies geschieht auch vor dem Hintergrund der angestrebten Vergabestrategie, die mit einem sog. Aufgabenträgerpool auf einen langlebigen Werterhalt über die Lebensdauer der einzusetzenden Fahrzeuge abzielt (vgl. hierzu insbesondere Kapitel 6.1). Die Kostenrechnung erfolgt dabei einmal für die minimal notwendige Ausstattung an Infrastruktur zum Zeitpunkt der Betriebsaufnahme 2031 (vgl. Kapitel 5.3.3) sowie mit abgeschlossenen Ausbaumaßnahmen entsprechend dem Strukturstärkungsgesetz bzw. Investitionsgesetz Kohleregionen. Die am Ende des Betrachtungszeitraums vorhandenen Restwerte, vor Allem in der Infrastruktur, werden dabei berücksichtigt.

Wichtig zu betonen ist, dass die Kosten zur Elektrifizierung, die Basis für einen EMU-Betrieb sind, in dieser Untersuchung vollständig den Regionalverkehren auf der Strecke zugewiesen werden. Dies führt im Ansatz dazu, dass Kostenanteile für Fern- und Güterverkehr, die von einer Fahrleitungsinfrastruktur ebenfalls profitieren, dem Regionalverkehr angelastet werden. Die vorliegende Untersuchung kann also nicht dazu dienen, die gegebene Wirtschaftlichkeit einer Elektrifizierung einzelner Strecken (vor allem auf den Strecken Dresden-Klotzsche – Arnsdorf – Kamenz – Hosena sowie Dresden-Klotzsche – Görlitz) zu bewerten.

5.4.2 Ergebnisse

Beispiel zur linienspezifischen Untersuchung

Die linienspezifischen Untersuchungen ergeben für jede Linie ein klares Bild, welche Technologie besonders wirtschaftlich vorteilhaft ist. Als Beispiel sind in Abbildung 24 die Ergebnisse der Linie RB 34 dargestellt, wobei deutlich zu erkennen ist, dass BEMU-Fahrzeuge dort bereits mit heute absehbarem Technologiestand gleich wirtschaftlich sind wie der Betrieb mit Dieselfahrzeugen. Weitere erwartbare, jedoch noch nicht politisch endgültig definierte Anhebungen des CO₂-Preises nach 2025 beeinflussen vor allem den Dieselverkehr nachteilig, sodass eine Steigerung der Wirtschaftlichkeit der alternativen Antriebsformen – und hier insbesondere des BEMU – absehbar ist. Aufgrund der hohen vorhandenen Elektrifizierungsanteile, die bis 2031 zusätzlich zu Dresden Hbf – Dresden-Klotzsche durch die Elektrifizierung des Abschnittes Dresden-Klotzsche – Arnsdorf entstehen, kann das BEMU-Fahrzeug den besonders günstigen Energiebezugspreis an der Oberleitung (ca. 13 ct/kWh) auf der gesamten Linienlänge nutzen und so einen hohen wirtschaftlichen Vorteil erreichen.

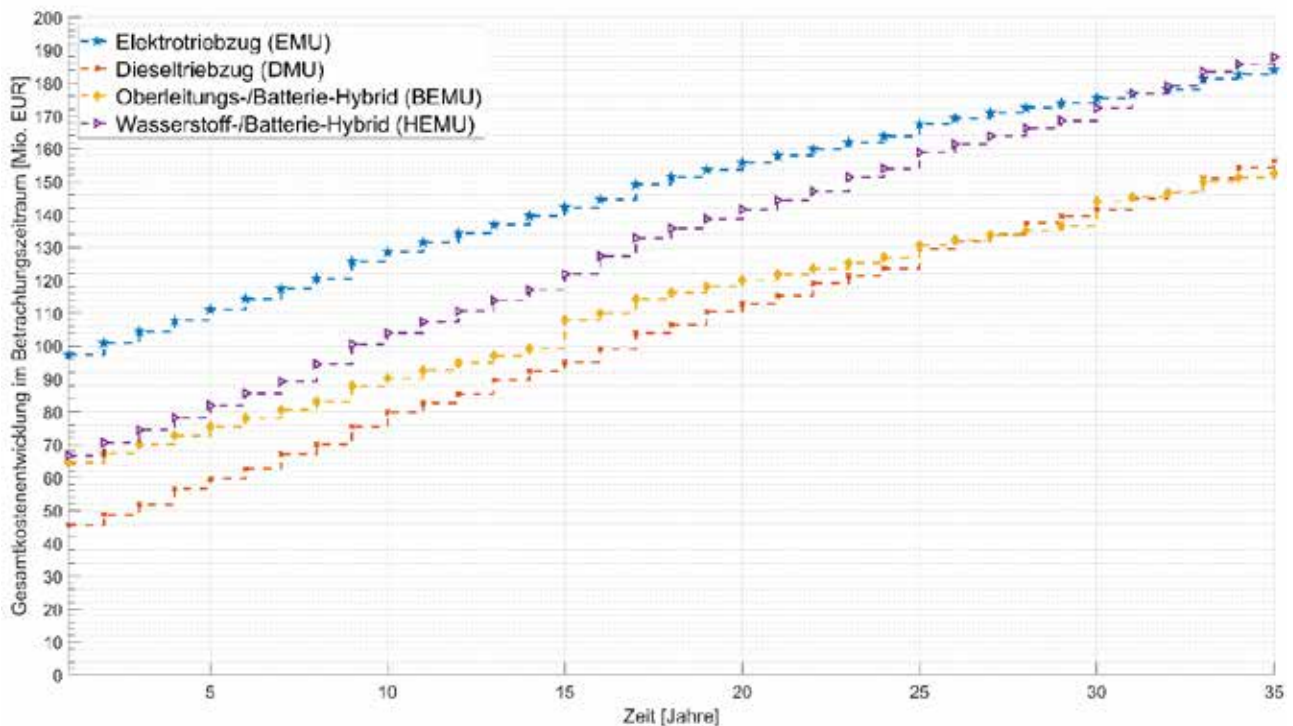


Abbildung 24: Ergebnis der Lebenszykluskostenuntersuchung am Beispiel der Linie RB 34 unter Berücksichtigung der Elektrifizierungsinvestitionen Dresden-Klotzsche – Kamenz (eigene Darstellung TU Dresden)

Einen signifikanten Einfluss auf die Technologiereihenfolge hat der hohe Anteil der Energiebezugskosten (insbesondere bei Wasserstofffahrzeugen) und die hohen Investitionen in die Fahrleitungsanlagen für vollelektrischen Betrieb mit EMU. Die relativ geringen Unterschiede im Fahrzeugbeschaffungspreis der einzelnen Technologien spielen nur eine untergeordnete Rolle. Das Referenz-Dieselfahrzeug weist zum einen durch seine hohen Instandhaltungskosten für die laufende Instandhaltung der hochbelasteten Antriebsanlagen einen starken Anstieg auf. Zum anderen ist zu berücksichtigen, dass die durch den niedrigen Wirkungsgrad ohnehin hohen Energiekosten des Dieselbetriebs sich in Anbetracht der aktuellen politischen Debatte um eine gesteigerte CO₂-Bepreisung absehbar weiter erhöhen werden, was derzeit jedoch nicht abschließbar beschreibbar und daher hier noch nicht berücksichtigt ist. Beide

Kostenblöcke (Instandhaltung und Energiekosten) werden unabhängig von der verwendeten Technologie letztlich vom Aufgabenträger aus den Regionalisierungsmitteln bezahlt. Durch den Einsatz der wirtschaftlicheren BEMU-Technologie können diese Kosten allerdings erheblich gesenkt und Regionalisierungsmitteln entsprechend effizient eingesetzt werden.

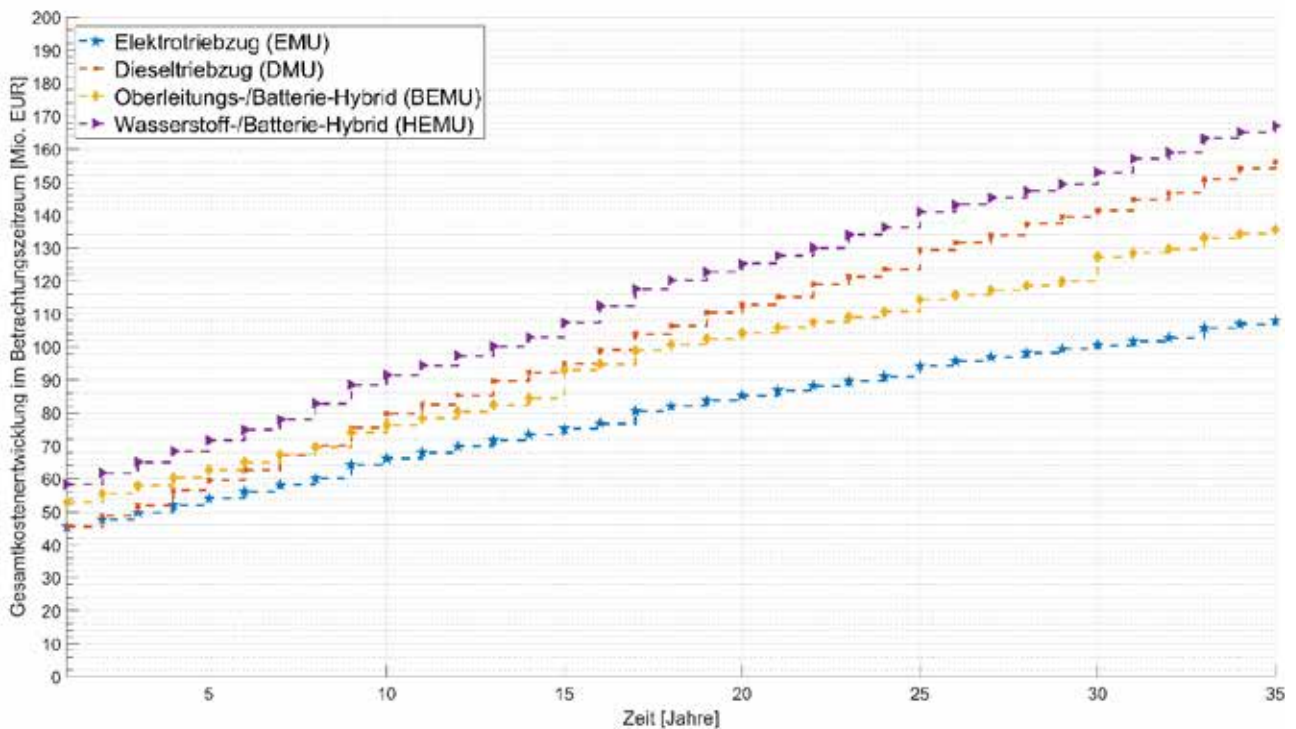


Abbildung 25: Ergebnis der Lebenszykluskostenuntersuchung am Beispiel der Linie RB 34 bei Förderung der Elektrifizierungsinvestitionen Dresden-Klotzsche – Kamenz (eigene Darstellung TU Dresden)

Im Rahmen der Strukturstärkung (vgl. insbesondere Kapitel 3.1.2) ist u. a. der Ausbau und die Vollerlektrifizierung der Strecke Arnsdorf – Kamenz – Hosena vorgesehen. Dies dient neben dem verkehrlichen Nutzen für den regionalen Personenverkehr auch zur Verbesserung des Nord-Süd-Güterverkehrs zwischen der Niederschlesischen Magistrale (Strecke Richtung Polen) und dem Elbtal und hat deshalb eine hohe Bedeutung für das Eisenbahnsystem. Der SPNV kann von diesem Ausbau zusätzlich profitieren, wenn mit EMU- oder BEMU-Fahrzeugen unter Oberleitung gefahren wird. Der daraus resultierende wirtschaftliche Vorteil beim Einsatz von EMU-Fahrzeugen im Nahverkehr wird durch Abbildung 25 veranschaulicht, in der die Förderung der Elektrifizierungsinvestitionen Dresden-Klotzsche – Kamenz durch das InvKG angenommen ist. Ähnliche Effekte existieren auf anderen Strecken und werden in den folgenden Betrachtungen dargestellt. Die durch die Strukturstärkung vorgesehenen Elektrifizierungen sind in jedem Fall ein wesentlicher Betrag für einen wirtschaftlichen SPNV in der Region, sofern die Oberleitungsinfrastruktur von der zum Einsatz gelangenden Technologie auch nutzbar ist.

Lebenszykluskosten VVO-Dieselnetz

Die Gesamtbetrachtung über 35 Jahre in Abbildung 26 zeigt, dass von den alternativen Technologien die Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeuge (BEMU) den höheren wirtschaftlichen Vorteil bieten, wenn die Infrastruktur als maßgebliches Element aller alternativen Antriebssysteme mit betrachtet wird. Die BEMU-Technologie weist für das heutige VVO-Dieselnetz den geringsten Kapitalwert auf:

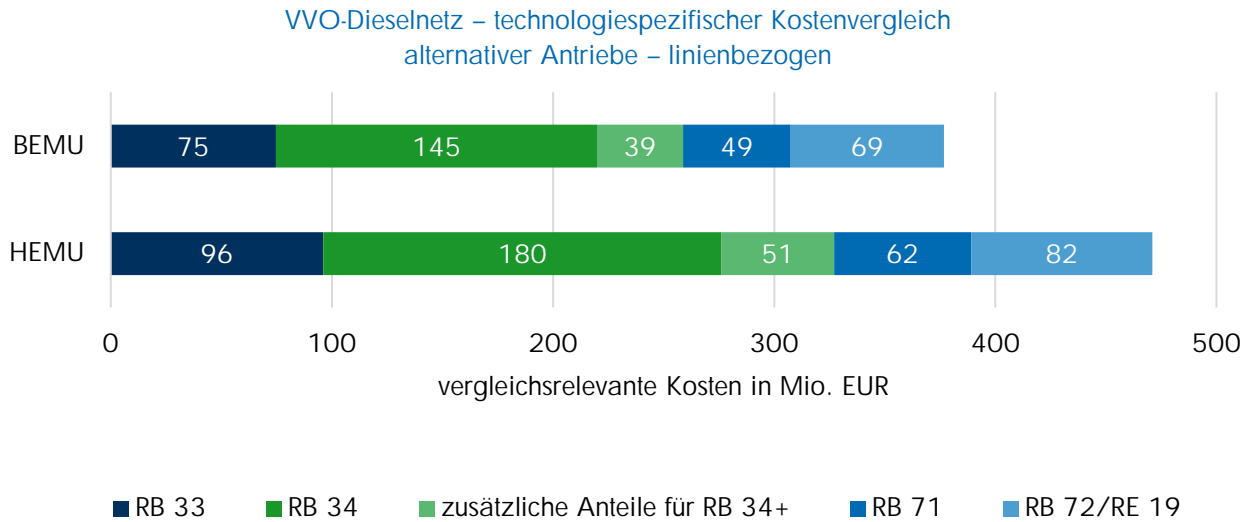


Abbildung 26: Ergebnis der Lebenszykluskostenuntersuchung des VVO-Dieselnetzes

Kostenstruktur für das VVO-Dieselnetz

Maßgebliche Kostenrelevanz für eine dauerhafte Finanzierung des SPNV hat der Anteil der benötigten Regionalisierungsmittel, da diese alle laufenden Ausgaben des Betriebes decken (müssen). Vor dem Hintergrund nur geringfügig ansteigender Regionalisierungsmittel des Bundes für die Länder bzw. im Freistaat Sachsen für die Zweckverbände besteht Dringlichkeit, weitere Gelder zu erschließen, um Angebotsausweitungen (z. B. RB 34+) finanzieren zu können. So existieren beispielsweise im Rahmen der Strukturstärkung weitere Finanzierungsquellen, die Kosten des SPNV tragen können. Abbildung 27 zeigt, wie sich die Anteile die Kostenstruktur der Vergleichsrechnung für das VVO-Dieselnetz zusammensetzt und wie verschiedene potenzielle Finanzierungsquellen (für Betrieb und Investitionen) diese Kosten aus Aufgabenträgersicht tragen können:

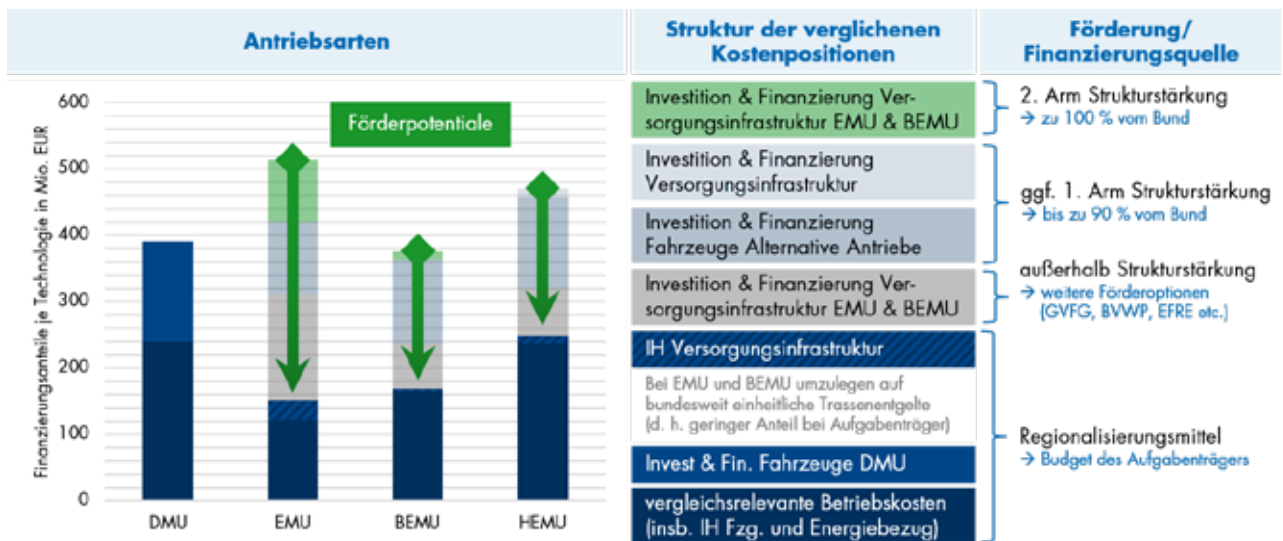


Abbildung 27: Kostenstruktur und Finanzierung im VVO-Dieselnetz (35 Jahre inkl. Restwert)

Dargestellt sind die Anteile für Regionalisierungsmittel (laufende Betriebskosten wie z. B. Fahrzeuginstandhaltung und Energie), für sonstige Finanzierungsquellen (insbesondere Investitionen außerhalb

des Lausitzer Reviers) sowie der 1. und 2. Arm der Strukturstärkung. Die Strukturstärkung kann als Finanzierungsquelle allerdings nur für die Linien RB 33 und RB 34/RB 34+ genutzt werden, da nur diese im Lausitzer Revier liegen. Die Elektrifizierungskosten für die Linien RB 34/RB 34+ (entsprechend Leistungsvolumen aufgeteilt auf VVO-Dieselnetz und Ostsachsennetz) werden im 2. Arm der Strukturstärkung für den EMU- und BEMU-Verkehr abgebildet. In der Darstellung für den 1. Arm der Strukturstärkung ist dabei auch die Beschaffung der benötigten Fahrzeuge für die Strecken nach Königsbrück (RB 33) und Kamenz (RB 34 bzw. RB 34+) enthalten.

Es zeigt sich erneut, dass Oberleitungsfahrzeuge (EMU) aufgrund der niedrigen Betriebskosten besonders vorteilhaft bezüglich eines effizienten Einsatzes von Regionalisierungsmitteln sind. Diesen folgt der Betrieb mit Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeugen (BEMU). BEMU können im heutigen VVO-Dieselnetz schon unter aktuellen Randbedingungen und auch unter Berücksichtigung der erforderlichen Infrastrukturinvestitionen ähnliche Kosten wie der herkömmliche Dieselbetrieb erzielen. Die Vollelektrifizierung der Strecke Dresden-Klotzsche – Kamenz – Hosena, wie sie im Rahmen der Strukturstärkung vorgesehen ist, ist also für den wirtschaftlichen Einsatz von Regionalisierungsmitteln besonders vorteilhaft. Beim HEMU entstehen erhebliche Betriebskosten aufgrund der Wirkungsgradverluste entlang der Prozessketten von der Erzeugung mit Elektrolyse über Verdichtung und Umwandlung in der Brennstoffzelle bis zur Traktion im Fahrzeug. Diese Verluste sind physikalisch bedingt und letztlich kostenwirksam. Für die Erzeugung und für die Belange des SPNV notwendige Distribution wurden im Rahmen dieser Studie Kosten in Höhe von 4 EUR für 1 kg H₂ errechnet. Kostenpositionen wie z. B. Investitionen in die erforderliche Versorgungsinfrastruktur sind in den vorstehend genannten 4 EUR/kg H₂ nicht enthalten, werden aber im Rahmen der Vergleichskostenbetrachtung berücksichtigt.

Durch die Abgeltung von Trassennutzungsentgelten durch das beauftragte EVU sind indirekt auch die Instandhaltungskosten der (Oberleitungs-)Infrastruktur anteilig durch Aufgabenträger zu tragen. Diese sind entsprechend im Kostenanteil der Regionalisierungsmittel in Abbildung 27 enthalten, werden jedoch eigentlich im Rahmen der Instandhaltung der DB Netz AG finanziell über deren Gesamtnetz bundesweit umgelegt. Sie sind damit real für den Aufgabenträger nicht direkt in der hier dargestellten Höhe wirksam, sodass der Kostenunterschied zwischen EMU und BEMU noch deutlicher zu Gunsten des EMU ausfallen würde, wenn der volkswirtschaftliche Betrachtungsansatz durch einen betriebswirtschaftlichen ersetzt würde.

Eine vor Vertragsbeginn 2031 abgeschlossene Elektrifizierung zwischen Dresden-Klotzsche und Arnsdorf wird betrieblich für die Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen zudem vorausgesetzt und ermöglicht letztlich den Einsatz von ebenfalls wirtschaftlich günstigen BEMU-Fahrzeugen.

Da eine Umsetzung einer Vollelektrifizierung im übrigen VVO-Dieselnetz (RB 33, RB 71, RB 72, RE 19) als nahezu ausgeschlossen gelten kann und die Migration auf vollelektrischen Betrieb auf der RB 34+ nicht bis 2031 abgeschlossen sein wird, können Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeuge (BEMU) als wirtschaftlich vorteilhafteste Technologie für das VVO-Dieselnetz angesehen werden. Die BEMU-Technologie erreicht sogar knapp bessere Werte als die als Referenz berechneten Dieselfahrzeuge, trotz hoher Kosten für die Energiespeicherung mittels Batterien und signifikanten Investitionen in die Infrastruktur.

Für den Betrieb im VVO-Dieselnetz zeigt sich die hohe Relevanz der Strukturstärkungsmittel für ein leistungsfähiges und kostengünstiges Angebot im SPNV in der Lausitz, insbesondere für die Aspekte der Infrastruktur- und Fahrzeugfinanzierung. Im Ergebnis kann durch einen sinnvollen Mitteleinsatz ein

wesentlicher Beitrag zur angestrebten Strukturstärkung im heutigen VVO-Dieselnetz durch eine leistungsfähige Nahverkehrsverbindung in die regionalen und überregionalen Zentren geschaffen werden. Dies ist letztlich auch deswegen möglich, weil durch die Gelder der Strukturstärkungsmittel günstige Rahmenbedingungen für einen effizienten Einsatz von Regionalisierungsmitteln und somit für Angebotsausweitungen geschaffen werden.

Ostsachsennetz

Ein ähnliches Bild wie für das heutige VVO-Dieselnetz ergibt sich für das Ostsachsennetz (vgl. Abbildung 28). Auch in diesem Fall sind unter den alternativen Antrieben die Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeuge (BEMU) die wirtschaftlich vorteilhafteste alternative Technologie. BEMU können im Ostsachsennetz schon unter aktuellen ökonomischen Randbedingungen und auch unter Berücksichtigung der erforderlichen Infrastrukturinvestitionen ähnliche Kosten wie der herkömmliche Dieselbetrieb erzielen (vgl. Abbildung 29). Dabei ist weiterhin zu berücksichtigen, dass die Kosten des Dieselbetriebs sich in Anbetracht der aktuellen politischen Debatte um eine gesteigerte CO₂-Bepreisung absehbar erhöhen werden, was hier noch nicht berücksichtigt ist. Für den Einsatz der BEMU-Fahrzeuge im Ostsachsennetz ist im Rahmen der Wirtschaftsbetrachtung unterstellt, dass bis 2031 ca. 2/3 der Strecke Dresden – Görlitz, konkret der Abschnitt Dresden – Demitz-Thumitz, als Teil der Ausbaumaßnahme Nr. 20 gemäß Investitionsgesetz Kohleregionen und für den Zittauer Ast entsprechend der Abschnitt Dresden – Bischofswerda elektrifiziert ist. Voraussetzung für die Aufnahme eines Verkehrs mit BEMU ist zudem, dass die notwendige Ladeinsel zwischen Mittelherwigsdorf und Zittau sowie ein Stillstands-lademöglichkeit in Görlitz ebenfalls bis 2031 umgesetzt sind (vgl. Kapitel 5.3.3). Diese Elektrifizierungen werden im Ergebnis für die Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen technisch-betrieblich vorausgesetzt und kostenseitig in der Betrachtung der BEMU-Technologie berücksichtigt. Der Anteil der Elektrifizierungskosten wird auf alle betrachteten Linien des Ostsachsennetzes sowie auf die Linie RB 34/RB 34+ des VVO-Dieselnetzes, die bis Arnsdorf die Strecke Dresden – Görlitz mit nutzt, aufgeteilt.

Bei der Ermittlung der Kosten für die Linie RE 2 ist anzumerken, dass nur der auf dem deutschen Streckenabschnitt befindliche Anteil der Elektrifizierungskosten in die Berechnungen eingeflossen ist. Grund für diese Vereinfachung ist, dass auf dem tschechischen Streckenabschnitt von der Grenze bis Liberec die Investitionen für einen vollelektrischen Betrieb mit Oberleitung durch den tschechischen Netzbetreiber SŽ zu tragen wären. Ähnliches gilt für den Transitverkehr durch Polen und den polnischen Netzbetreiber PKP-PLK.

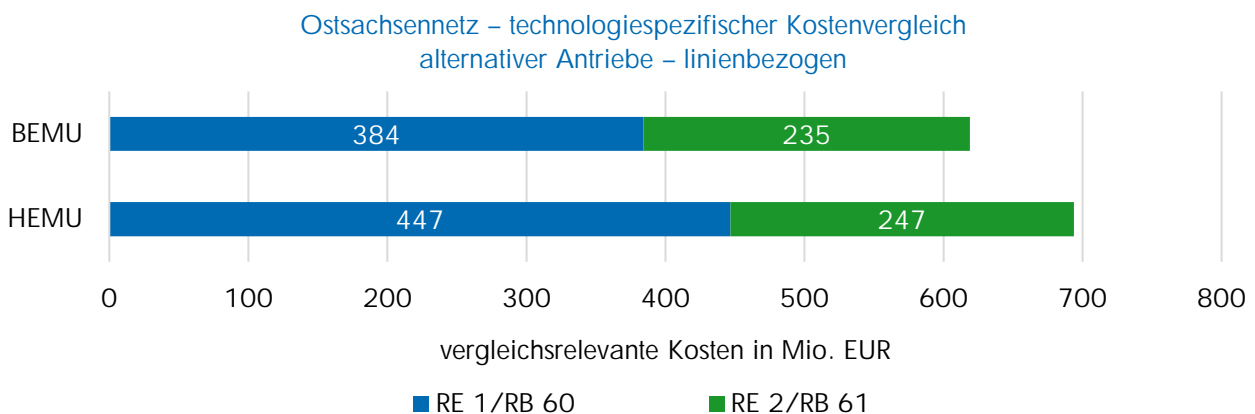


Abbildung 28: Ergebnis der Lebenszykluskostenuntersuchung des Ostsachsennetzes (inkl. RE 2 nach Liberec)

Kostenstruktur im Ostsachsennetz

Wird der im Rahmen der Strukturstärkung vorgesehene Ausbau samt Vollelektrifizierung der Strecken Dresden – Görlitz / – Zittau unterstellt, so zeigt sich vor allem für konventionell-elektrische Fahrzeuge (EMU) der große kostenseitige Vorteil eines fahrleitungsgebundenen Betriebes und eine entsprechende Schonung des Regionalisierungsmittelbudgets. Abbildung 29 veranschaulicht dies in besonderem Maße, wobei der größte Teil der technologiebezogenen Kosten, der hohe Investitionskostenanteil, durch den 2. Arm der Strukturstärkung getragen werden kann. Allerdings sind sowohl die Elektrifizierung Dresden – Bischofswerda – Görlitz (Projekt-Nummer 20 im InvKG) als auch jene der Strecke Bischofswerda – Zittau (Projekt-Nummer 21 im InvKG) derzeit nicht Bestandteil der im Bund-Länder-Koordinierungsgremium (BLKG) am 01.04.2021 beschlossenen Maßnahmenliste für das Lausitzer Revier, die durch die Pressekonferenz der Sächsischen Staatsregierung am 25.06.2021 vorgestellt wurde.

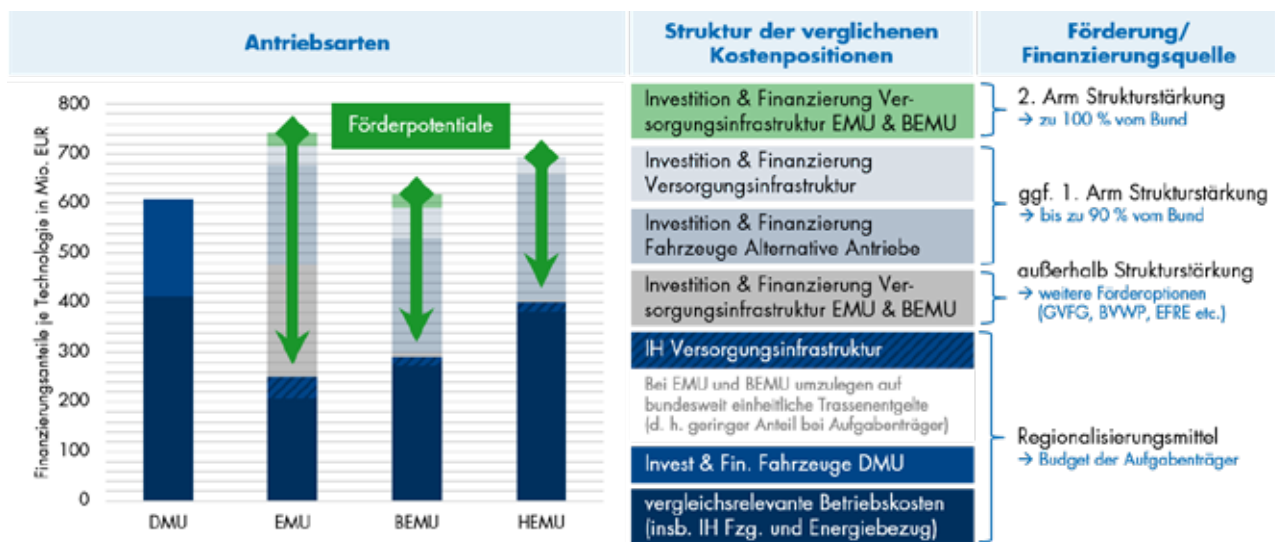


Abbildung 29: Kostenstruktur und Finanzierung im Ostsachsennetz (35 Jahre inkl. Restwert)

Dabei zeigt sich für den Betrieb im Ostsachsennetz in der hier durchgeführten Untersuchung die hohe Relevanz der Strukturstärkungsmittel für ein leistungsfähiges und kosteneffizientes Angebot im SPNV in der Lausitz, insbesondere für die Aspekte der Infrastrukturfinanzierung. Letztere kann einen wesentlichen Beitrag zur angestrebten Strukturstärkung durch eine leistungsfähige Nahverkehrsverbindung in die regionalen und überregionalen Zentren leisten. Es können mit den vorgesehenen Infrastrukturinvestitionen günstige Rahmenbedingungen für einen effizienten Einsatz von Regionalisierungsmitteln geschaffen werden.

Wird die Vollumstellung auf durchgehenden Oberleitungsbetrieb durch den 2. Arm der Strukturstärkung erreicht, so ist im Ostsachsennetz (ohne den Abschnitt Zittau – Liberec) der Einsatz reiner EMU-Fahrzeuge anzustreben. Da für die grenzüberschreitende Strecke nach Liberec derzeit keine absehbare Elektrifizierungsperspektive besteht (vgl. Kapitel 2.3), wäre hierbei allerdings die Durchbindung des RE 2 über Zittau hinaus nach Liberec aufzugeben.

Solange nur die Strecke nach Görlitz (abschnittsweise) elektrifiziert sein wird, nicht jedoch der Zittauer Ast, sind Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeuge (BEMU) die vorteilhafteste Technologie. Für den BEMU-Einsatz auf dem Zittauer Ast ist gleichwohl mindestens die Elektrifizierung des Abschnitts Mittelherwigsdorf –

Zittau erforderlich. Dadurch kann zudem die Durchbinung des RE 2 bis Liberec aufrechterhalten werden. Die BEMU-Technologie sichert zudem die Migrationsfähigkeit für fortschreitende Elektrifizierungen, beispielsweise auch auf weiteren SPNV-Linien in Ostsachsen (L 7, RB 64 oder RB 65)²⁴. Da die Fahrleitungsanlage neben der Nutzung für den SPNV insbesondere auf der Strecke nach Görlitz auch das Verkehren von Fern- und Güterverkehr ermöglicht, ist grundsätzlich die Vollelektrifizierung für die Strecken des Ostsachsennetzes anzustreben. Die Kosten der Fahrleitungsanlage sind in der Untersuchung hier gleichwohl vollständig dem SPNV angelastet. Der hohe Anteil an den laufenden Betriebskosten für den HEMU kann insbesondere mit den entsprechend erforderlichen Energiekosten begründet werden, die aufgrund der Wasserstoffprozessketten entstehen und letztlich kostenwirksam sind (siehe dazu auch im Abschnitt zum VVO-Dieselnetz innerhalb dieses Kapitels).

5.5 CO₂-Emissionsbetrachtung

Neben technisch-betrieblichen und ökonomischen Fragestellungen wurde mit der Ermittlung der CO₂-Emissionen auch ein ökologischer Aspekt untersucht. Dies geschah vor dem Hintergrund, dass der maßgebliche gesellschaftliche und politische Treiber für die Einführung alternativer Antriebe die hohe erwartete Einsparung von CO₂-Emissionen ist. Diese Erwartung kann, wie in Abbildung 30 dargestellt, sowohl mit HEMU- als auch mit EMU- und BEMU-Fahrzeugen vollständig erfüllt werden.

Basis der zu erwartenden CO₂-Emissionen im VVO-Dieselnetz, im Ostsachsennetz sowie kumuliert im gesamten Untersuchungsraum ist, dass die von der DB Energie angestrebten Anteile erneuerbarer Energien im Bahnstrommix (80 % bis 2030; 100 % bis 2038 zeitgleich zum Kohleausstieg) erreicht werden können. Der durch die Bundesregierung angestrebte Kohleausstieg bis 2038 lässt dies als realistisch erscheinen. Für die Betrachtung der HEMU-Fahrzeuge wurde unterstellt, dass der eingesetzte Wasserstoff grün erzeugt wird, was allerdings mit entsprechenden Wirkungsgradverlusten einhergeht (siehe auch Kapitel 4.1) und sich letztlich auch in der CO₂-Bilanz bemerkbar macht. Die Emissionen wurden bei allen Technologieoptionen für gängige Fahrzeuge mit ca. 120 Sitzplätzen ermittelt.

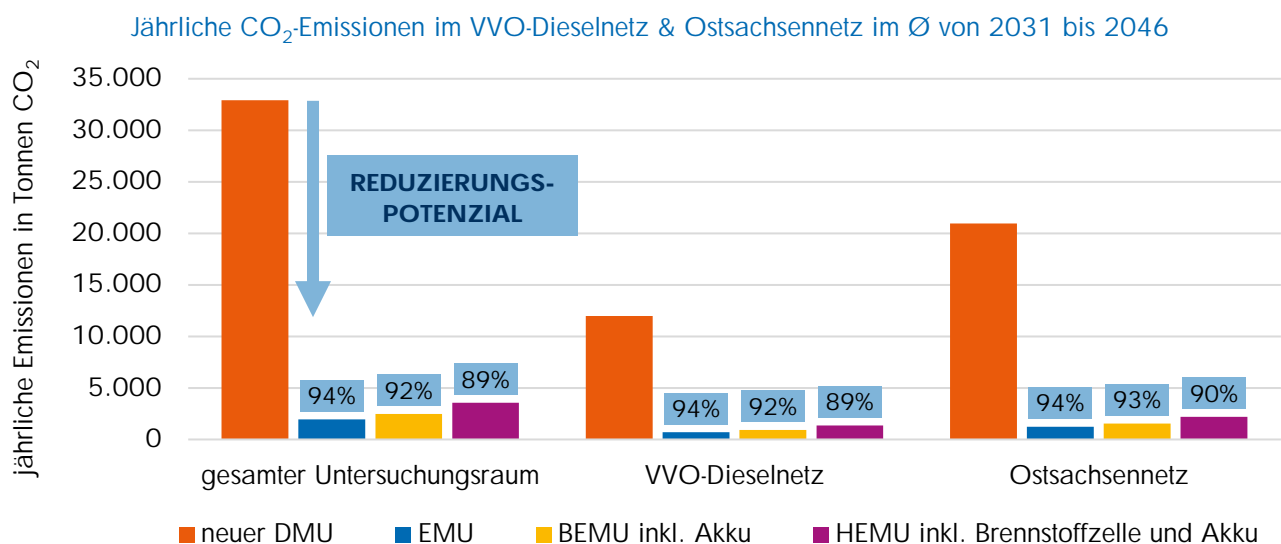


Abbildung 30: Erwartete jährliche CO₂-Emissionen betrachteter Antriebstechnologien

²⁴ Dies gilt vorbehaltlich weiterer Prüfungen. Der ZVON lässt derzeit den Einsatz alternativer Antriebe auf den genannten Strecken untersuchen (Stand August 2021).

Zusätzlich fallen alle lokal durch die Verbrennung von Dieselkraftstoff in den Dieselmotoren anfallenden Emissionen an Stickoxiden (NOx), Feinstäuben (PM) sowie unverbrannten Kohlenwasserstoffen (HC) vollständig weg. Gleiches gilt für die durch die Dieselmotoren verursachten Lärmemissionen.

5.6 Ergebnis der Vergleichsuntersuchungen

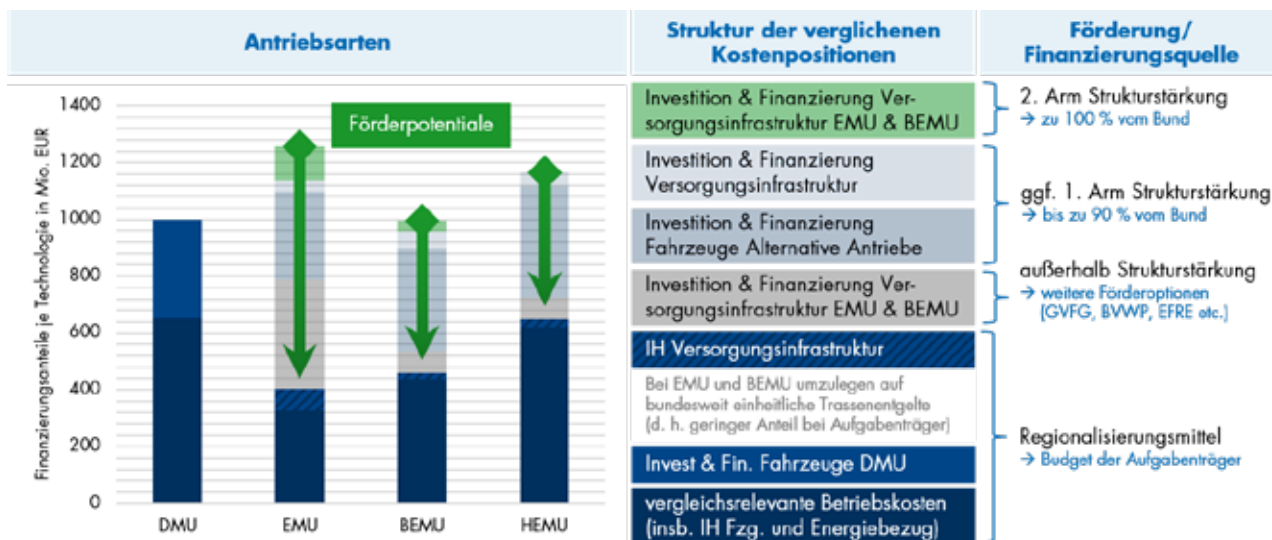


Abbildung 31: Kostenstruktur und Finanzierung, gesamthaft für VVO-Dieselnetz & Ostsachsennetz (35 Jahre inkl. Restwert)

Die umfangreichen betrieblichen, technischen, wirtschaftlichen und ökologischen Untersuchungen des heutigen VVO-Dieselnetzes und des Ostsachsennetzes haben den wirtschaftlichen und erheblichen ökologischen Vorteil alternativer Antriebe gegenüber dem Dieselbetrieb auf den untersuchten Strecken bestätigt.

Die technischen Untersuchungen haben gezeigt, dass schon heute auf dem Markt angebotene Fahrzeuge sowohl mit wasserstoff- als auch batteriebasierten Antriebssystemen die beiden Netze zuverlässig befahren können, wenn die notwendigen Infrastrukturausbauten umgesetzt sind. Der Betrieb mit Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeugen (BEMU) ist – selbst unter Berücksichtigung der entsprechenden Infrastrukturkosten – in der Lebenszyklusbetrachtung dabei schon heute so wirtschaftlich wie der Referenzfall Dieselbetrieb.

Die alternativen Antriebssysteme weisen allerdings eine große Abhängigkeit vom rechtzeitigen Infrastrukturausbau auf, wobei dies sowohl die Wasserstoffversorgungs- und Betankungsinfrastruktur für HEMU-Fahrzeuge als auch die (zusätzliche) Oberleitungsinfrastruktur für EMU- und BEMU-Fahrzeuge betrifft.

HEMU-Fahrzeuge fallen zudem durch vergleichsweise hohe Betriebskosten auf. Die Betriebskosten sind jedoch vsl. gar nicht oder u. U. nur für einen kurzen Zeitraum förderfähig, sodass hohe Betriebskosten im Ergebnis zu einer Belastung des Regionalisierungsmittelbudgets der Aufgabenträger führen würden. Im Hinblick auf einen langfristig finanzierbaren SPNV im Freistaat Sachsen ist es deshalb sinnvoll, die im Investitionsgesetz Kohleregionen verankerten Elektrifizierungsmaßnahmen umzusetzen und so die laufende Betriebskostenlast durch den Einsatz von EMU bzw. BEMU, welche die Oberleitungsanlagen und entsprechend elektrische Energie effizient nutzen können, signifikant zu minimieren.

6 Vergabestrategie

Im Rahmen der beauftragten Beraterleistungen wurde eine Strategie zur Beschaffung von Triebzügen mit alternativen Antrieben, sowie deren Instandhaltung, Finanzierung und Betrieb entwickelt.

6.1 Denkbare Vergabemodelle

Für die Beschaffung wurden vier Grundmodelle entwickelt. Diese orientieren sich an verschiedenen Vergabemodellen im SPNV. Die Modelle unterscheiden sich hinsichtlich der Aufteilung bzw. Zusammenfassung der Herstellung der Triebzüge, deren Instandhaltung, deren Finanzierung und des SPNV-Betriebes. Diese Aufteilung kann auch als Fachlosbildung bezeichnet werden.

Die nachstehende Grafik weist darauf hin, welche Gruppen von Unternehmen als Bieter im Rahmen einer Vergabe der entsprechenden Leistungsgegenstände zu erwarten sind. Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU), Hersteller oder Finanzierer werden nach Vergabeabschluss als Auftragnehmer Vertragspartner des Auftraggebers (AT). Im Falle des Ostsachsennetzes können mit ZVOE und ZVON auch zwei Aufgabenträger die Funktion des Auftraggebers ausfüllen. Während und im Vorfeld der Vergabeverfahren tritt ein späterer Auftraggeber als Vergabestelle auf. Entsprechend können diese Bezeichnungen hier synonym verstanden werden.





MODELLBEZEICHNUNG LEISTUNGSgegenSTAND	A INTEGRIERTES VERGABEMODELL	B FAHRZEUG- FINANZIERUNGS- MODELL	C BEREITSTELLUNGS- MODELL	D FACHLOS- MODELL
BETRIEBSLEISTUNG 	EVU-Leistungen inkl. Züge ca. 15 Jahre	EVU-Leistungen inkl. Züge ohne deren Finanzierung ca. 15 Jahre	EVU-Leistungen ca. 15 Jahre	EVU-Leistungen ca. 15 Jahre
INSTANDHALTUNG 			Bereitstellung von Zügen ca. 30 Jahre	Fahrzeugbau inkl. Instandhaltung ca. 30 Jahre
FAHRZEUGBAU 		Vergabe oder AT direkt (Pool) ca. 30 Jahre		Vergabe oder AT direkt (Pool) ca. 30 Jahre
FAHRZEUG- FINANZIERUNG 				
vorrangig EVU als Bieter erwartbar		vorrangig Hersteller als Bieter erwartbar		bei Vergabe Finanzierer als Bieter erwartbar

Abbildung 32: Übersicht denkbarer Vergabemodelle für SPNV-Fahrzeuge mit Neufahrzeugen alternativen Antrieben (eigene Darstellung VVO/KCW)

Bei allen Modellen werden Fahrzeugbau und Fahrzeuginstandhaltung von einem Auftragnehmer verantwortet. Eine gesonderte Beschaffung dieser Leistungen durch den Auftraggeber ist derzeit bei der Beschaffung von Zügen mit alternativen Antrieben nicht ratsam, da die Instandhaltungskosten maßgeblich vom Bau der Triebzüge, insbesondere den eingesetzten Komponenten, deren Wartungsaufwand und deren Langlebigkeit abhängen. Unter anderem hinsichtlich der Langlebigkeit von Batterien sowie der Langlebigkeit und Wartungsintensität von Brennstoffzellen und deren Komponenten erscheinen konkrete Vorgaben weder praktikabel noch wirtschaftlich sachgerecht zu sein. Daher werden Modelle mit Aufteilung der Beschaffung von Fahrzeugbau und Fahrzeuginstandhaltung nicht vorgeschlagen und betrachtet.

Nachfolgend werden die vier herausgearbeiteten Grundmodelle skizziert:

Modell A: Integriertes Vergabemodell

Bei Modell A wird die Erbringung der SPNV-Verkehrsleistungen ausgeschrieben. Hierbei wird vorgegeben, dass die Verkehrsleistungen mit Triebzügen mit alternativen Antrieben zu erbringen sind. Die Beschaffung der Triebzüge, deren Finanzierung sowie deren Instandhaltung sind damit Aufgabe des Auftragnehmers. Typischerweise werden Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) als Bieter erwartet, die somit ihrerseits die Fahrzeugbeschaffung und -finanzierung sowie die Instandhaltung übernehmen oder verantworten müssten. Aufgrund der Vorgaben des Artikels 4 Abs. 3 der VO 1370/2007²⁵ ist die Laufzeit der Verträge im Regelfall auf 15 Jahre beschränkt, unter bestimmten in Artikel 3 Abs. 4 der Verordnung genannten Voraussetzungen sind auch längere Laufzeiten (maximal 22,5 Jahre) zulässig.

Chance und Risiko eines Restwertes der Fahrzeuge nach Vertragsende liegen beim Auftragnehmer, in diesem Modell also bei (den) Eisenbahnverkehrsunternehmen.

Modell B: Fahrzeugfinanzierungsmodell

Modell B entspricht in der Grundanlage dem Modell A. Das heißt, es werden SPNV-Leistungen ausgeschrieben, Fahrzeugbeschaffung und Instandhaltung sind Aufgabe des entsprechenden Auftragnehmers. Abweichend vom Modell A werden die vom Auftragnehmer beschafften Triebzüge jedoch vom Auftraggeber oder einem vom Auftraggeber beauftragten Dritten gekauft, was im Ergebnis i. d. R. einen gegenüber Modell A reduzierten Zuschussbedarf mit sich bringt. Der Auftraggeber trägt dabei Chance und Risiko der Weiterverwendung bzw. eines Restwertes der Fahrzeuge nach Vertragsende. Zur Risikosteuerung ist ein umfassendes Controlling bei der Begleitung der Fahrzeugherstellung und -instandhaltung durch den Auftraggeber angezeigt. Aufgrund der Vorgaben des Artikels 4 Abs. 3 der VO (EG) 1370/2007 ist die Laufzeit der Verkehrsverträge grundsätzlich auf 15 Jahre beschränkt.

Im sogenannten Fahrzeugfinanzierungsmodell erfolgt der Kauf durch eine Fahrzeugpoolgesellschaft des Auftraggebers zu Vertragsbeginn. Möglich ist aber auch, dass der Kauf durch einen vom Auftraggeber in einem gesonderten Vergabeverfahren ausgewählten Finanzierer erfolgt. Zum anderen kann statt eines Kaufs der Fahrzeuge zu Vertragsbeginn auch eine Garantie – häufig als Wiedereinsatzgarantie bezeichnet – ausgesprochen werden, die eine Übernahme der Fahrzeuge zu einem im vornhinein festgelegten Preis zum Vertragsende vorsieht. Alternativ können im Rahmen einer Leasingstruktur Garantien des Auftraggebers gegenüber dem Leasinggeber ausgesprochen werden, die im Gegenzug Eintrittsrechte in den Leasingvertrag für den Auftraggeber oder für einen von diesem benannten Dritten vorsehen (Fahrzeugzugriff für den Garanten), wenn der Auftragnehmer nicht mit dem Folge-Verkehrsvertrag beauftragt wird. Diese Untervarianten haben eine ähnliche Risikoverteilung wie das Fahrzeugfinanzierungsmodell und wurden daher zu einem Modell zusammengefasst.

²⁵ Verordnung (EG) Nr. 1370/2007 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23.10.2007 über öffentliche Personenverkehrsdienste auf Schiene und Straße und zur Aufhebung der Verordnungen (EWG) Nr. 1191/69 und (EWG) Nr. 1107/70 des Rates (ABl. L 315 vom 03.12.2007, S. 1), zuletzt geändert durch Verordnung (EU) 2016/2338 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 14.12.2016

Modell C: Bereitstellungsmodell

Beim Modell C wird in einer ersten Vergabe die Bereitstellung von Triebzügen ausgeschrieben. Gegenstand ist die tägliche Bereitstellung einer bestimmten Anzahl von Triebzügen für den Fahrgastbetrieb. Der Auftragnehmer (folgend: „Bereitsteller“) hat die tägliche Verfügbarkeit der Triebzüge sicherzustellen und hierfür die Fahrzeuge zu beschaffen, zu finanzieren und instand zu halten.

In einem zweiten Schritt wird die Erbringung der Verkehrsleistungen mit diesen Zügen ausgeschrieben und an ein oder mehrere EVU vergeben.

Während die Laufzeit des Verkehrsvertrages aufgrund der bereits erwähnten Vorgaben der VO 1370/2007 im Regelfall auf 15 Jahre begrenzt ist, kann der Bereitstellungsvertrag auch über längere Zeiträume laufen. Mit Blick auf die wirtschaftliche Lebensdauer der Triebzüge einerseits und auf die Risiken überlanger Vertragslaufzeiten für beide Vertragsparteien andererseits, erscheinen derzeit Laufzeiten für den Bereitstellungsvertrag von 25 bis 35 Jahren empfehlenswert.

In den Leistungsbeschreibungen ist zum einen die Übergabe und Rückgabe der Triebzüge zwischen Bereitsteller und EVU zu regeln. Hierzu gehören insbesondere:

- Die Anzahl der bereitzustellenden Triebzüge, diese kann nach Verkehrszeiten und/oder Wochentagen gestaffelt werden
- Ort der Übergabe vom Bereitsteller an das EVU und der Rückgabe vom EVU an den Bereitsteller
- Prozedere zur Abstimmung der Übergabe- und Rückgabezeitpunkte
- Zustand der Triebzüge bei Übergabe
- Prozedere zur Feststellung des Zustandes bei Übergabe und Rückgabe

Des Weiteren sind die Aufteilung des Risikos für Schäden an den Triebzügen, sowie die Aufgabenteilung bei der Instandhaltung und Reinigung der Triebzüge zwischen Bereitsteller und EVU zu regeln. Hier sind verschiedene Modelle denkbar und werden in aktuellen Verträgen in Deutschland praktiziert. Die Varianten sind für die hier durchzuführenden Modellbetrachtungen sekundär.

Modell D: Fachlosmodell

Modell D entspricht in der Grundanlage dem Modell C. Abweichend vom Modell C werden die vom Auftragnehmer beschafften Triebzüge jedoch vom Auftraggeber oder einem vom Auftraggeber beauftragten Dritten zu Vertragsbeginn gekauft. Die Finanzierung der Triebzüge ist damit nicht Aufgabe des Auftragnehmers, der die Fahrzeuge baut und instand hält.

Der Kauf kann durch den Auftraggeber oder eine Fahrzeugpoolgesellschaft des Auftraggebers erfolgen (so im RRX-Modell von VRR, NWL, NVR sowie SPNV-Nord) oder durch einen vom Auftraggeber in einem gesonderten Vergabeverfahren ausgewählten Finanzierer (so im XMU-Modell der NAH.SH).

Nachdem die Fahrzeuge gebaut und gekauft sind, verbleibt bei dem für die Fahrzeuge zuständigen Auftragnehmer die Aufgabe der Instandhaltung. Die Schnittstellen zwischen diesem Instandhalter und dem oder den EVU sind wie in Modell C beschrieben zu regeln.

Gegenüber Modell C trägt der Auftraggeber in diesem Modell im Kern das Risiko der vorzeitigen Beendigung des Instandhaltungsvertrages, da er in diesem Fall Fahrzeuge besitzt oder finanzieren muss, die ggf. nicht mehr oder nur zu höheren Kosten als geplant instandgehalten werden können.

Die Laufzeit der Verkehrsverträge beträgt wiederum maximal 15 Jahre, der Instandhaltungsvertrag und ein etwaiger Fahrzeugfinanzierungsvertrag können längere Laufzeiten von z. B. 25 bis 35 Jahren haben. Üblicherweise sind die Laufzeiten letzterer Vertragswerke kongruent zur geplanten Nutzungsdauer der Fahrzeuge.

Im Ergebnis führt dieses Modell zur größtmöglichen Differenzierung von Fachlosvergaben (erstens Betriebsleistung, zweitens Fahrzeugbau und -instandhaltung, ggf. drittens Finanzierung), sodass Modell D auch als Fachlosmodell bezeichnet werden kann.

6.2 Finanzierungskonditionen

Die Finanzierung der Fahrzeuge war in der Vergangenheit üblicherweise integrierter Bestandteil von ausgeschriebenen EVU-Leistungen (analog zum vorstehend beschriebenen Modell A) und auch für ZVOE und ZVON das gewählte Vergabemodell. Aufgrund der Diskrepanz zwischen der Vertragslaufzeit der EVU-Leistungen und der Abschreibungsdauer der beschafften Fahrzeuge haben sich im deutschen SPNV-Markt folgende Instrumente entwickelt:

6.2.1 Wiedereinsatzgarantie

Im Rahmen einer sog. Wiedereinsatzgarantie (WEG) garantiert der Auftraggeber, die Fahrzeuge nach Ablauf des ersten Verkehrsvertrages weiterzuverwenden bzw. die Fahrzeuge zu einem vorher vereinbarten Restwert zu übernehmen. Die Aufgabenträger, auf deren Territorium die von der WEG erfassten Fahrzeuge einzusetzen sind, übernehmen dabei gegenüber dem Eigentümer der Fahrzeuge (EVU) oder nach dessen Wahl gegenüber einem von diesem schriftlich benannten Dritten, z. B. Leasinggeber, das Risiko der Wiederverwendung der Fahrzeuge nach Ablauf des Verkehrsvertrages. Ein Auftraggeber steht somit dafür ein, dass ein von ihnen benannter Dritter oder sie selbst alle von der Wiedereinsatzgarantie umfassten Fahrzeuge nach dem Ende der Laufzeit des Verkehrsvertrags für eine weitere Laufzeit gegen ein monatlich gleichbleibendes Nutzungsentgelt mietet bzw. zum Restwert kauft bzw. durch einen beauftragten Dritten kaufen lässt. In der Regel wird dabei auf die Investitionskosten und den damit verbundenen offenen Finanzierungsbetrag abgestellt.

6.2.2 Kapitaldienstgarantie

Entscheidet sich der Auftraggeber zu flankierenden Maßnahmen zur Erleichterung der Finanzierung der benötigten Neufahrzeuge, geschieht dies im Rahmen von Modell A häufig auch in Form einer Kapitaldienstgarantie (KDG). Dies geschieht zur Förderung des Wettbewerbs um die zu vergebenden Verkehrsleistungen und somit in der Erwartung günstigerer Angebotspreise. Das Ziel besteht dabei darin, mit der Gewährung der Kapitaldienstgarantie allen Bietern den Zugang zu kommunalkreditähnlichen Konditionen zu ermöglichen und Unterschiede in den Kapitalkosten verschiedener Bieter zu eliminieren. Gleichsam wird so der Zuschussbedarf, der allein auf die Finanzierungskosten der Fahrzeuge entfällt, reduziert.

Der ZVOE und der ZVON würden sich verpflichten, ein Garantiedokument auszustellen, das es den Finanzierern ermöglicht, die durch die Zahlungsgarantie garantierten Forderungen bspw. als

Deckungswerte für öffentliche Pfandbriefe zu verwenden und keine Eigenkapitalanforderungen darauf erfüllen zu müssen. Der Umfang der Garantie ist dabei zumeist auf die kalkulierten Anschaffungs- und Herstellungskosten nebst Finanzierungskosten (also Zinsen, Tilgung und ggf. Finanzierungsnebenkosten) für die angebotenen Fahrzeuge beschränkt, auf einen bestimmten Höchstbetrag gedeckelt und an die Laufzeit von zwei Verkehrsverträgen gekoppelt. In der Regel wird diese Garantie im Rahmen der Vergabe daran gebunden, dass die Finanzierung über eine Leasingstruktur erfolgt und entsprechende Eintrittsrechte vereinbart werden (Fahrzeugzugriff für den Garanten). Der Garant kann auf Zahlungen aus dieser Garantie nur in Anspruch genommen werden, sofern das EVU gegenüber dem Leasinggeber seine Zahlungsverpflichtungen aus dem Leasingvertrag ganz oder teilweise nicht erfüllt oder die Auftraggeber die ggf. an den Leasinggeber oder die refinanzierende Bank abgetretenen Forderungen nicht erfüllt.

Neben den Verträgen mit EVU über die Erbringung der Betriebsleistung kann eine Kapitaldienstgarantie grundsätzlich auch bei einer Finanzierungsvergabe gemäß der Modelle B und D als Angebotsoption seitens der Auftraggeber zur Anwendung kommen.

6.2.3 Eigenfinanzierter Aufgabenträgerpool

Eine weitere Möglichkeit um, unter Einbezug eines öffentlichen Eigentümers, günstige Finanzierungsbedingungen realisieren zu können, stellen sogenannte Fahrzeugpoolösungen dar. Diese werden insbesondere in Niedersachsen (LNVG und ZGB), Nordrhein-Westfalen (Eigenbetrieb des VRR) und Baden-Württemberg (SFBW) eingesetzt. In Sachsen ist ein derartiges Poolmodell beim ZVMS mit den Fahrzeugen für das E-Netz Mittelsachsen zu finden.

In der Regel wird das von den EVU zu zahlende Fahrzeugüberlassungsentgelt in Höhe der Darlehensannuität (oder einem Refinanzierungsbeitrag bei Eigenfinanzierung des Aufgabenträgers) zuzüglich eines pauschalen Zuschlages für Kosten des Instandhaltungscontrollings festgesetzt. Dabei kann über die Gesamtnutzungsdauer ein Überschuss als Risikovorsorge (ggf. einschließlich Gewinn) einkalkuliert werden.

Aufgabenträgereigene Poolmodelle vereinen die Merkmale von Leasingmodellen mit der Eigentumsübernahme durch öffentliche Fahrzeuggesellschaften (im Eigentum der Länder bzw. der Gesellschafter der Zweckverbände), die bei der Beschaffung von der letztinstanzlichen Haftung der öffentlichen Hand und damit deren guter Bonität profitieren. Das Weiterverwendungsrisiko der Fahrzeuge liegt damit beim Aufgabenträger, die Wertschöpfungstiefe beim EVU ggü. Modell A wird reduziert. Für den ZVOE (und ggf. auch den ZVON) sind jedoch weitere Kompetenzen zu den Themen Finanzierung, Beschaffung, Eigentumsmanagement und -controlling aufzubauen.

6.3 Einbeziehung von Fördermöglichkeiten

Wie in Kapitel 3 bereits ausgeführt, stehen insbesondere im Rahmen der Strukturstärkung für die Kohleregionen erhebliche Fördermöglichkeiten für das Lausitzer Revier im Raum. Diese sollen nach Möglichkeit für den SPNV nutzbar gemacht werden. Vor diesem Hintergrund hat der VVO bereits entsprechende Vorhaben für die Projektliste im Rahmen der Strukturstärkung eingereicht (siehe Kapitel 3.1.1). Die Einbeziehung von Fördermöglichkeiten stellt somit auch einen wichtigen Aspekt für die Bewertung einer Vergabestrategie dar.

Wenn entsprechende Fördermöglichkeiten für den SPNV im Lausitzer Revier nutzbar gemacht werden sollen, sind insbesondere der Gegenstand der Förderung, die Eignung des Förderempfängers, die

zeitliche Verfügbarkeit der jeweiligen Förderung und auch die Wahrung der Zweckbindung der Förderung zu beachten. Antragsberechtigt sind dabei die Gebietskörperschaften oder ihre Zusammenschlüsse. Um einen Fahrzeugpool einzurichten, müssten daher ZVOE und ZVON als Fördermittelempfänger selbst in die Beschaffung eintreten. Diese Aspekte sind als entscheidungserhebliche Belange in die Bewertung der Vergabemodelle eingegangen.

6.4 Bewertung der Vergabemodelle

Das wirtschaftliche Ergebnis der Vergabe(n) wird maßgeblich abhängig von der Verfahrensbeteiligung sein. Aufgrund der im Verhältnis wenigen Schnittstellen und aktuellen Kompetenzprofile hat sich das Integrierte Vergabemodell (Modell A) in den vergangenen Ausschreibungen bewährt. Da die Fahrzeugrisiken hierbei vollständig beim EVU liegen, kann der Controllingaufwand beim Aufgabenträger hinsichtlich der Fahrzeuge und deren Instandhaltung geringgehalten werden. Die mit Blick auf die Fahrzeugamortisation kürzere Laufzeit des Vertrages in Modell A sowie die Zuordnung von Fahrzeugfinanzierungsrisiken zu den EVU als Bietern lassen jedoch in Zukunft – insbesondere in Hinblick auf die besonderen Spezifikationen bei Fahrzeugen mit alternativen Antrieben – eine geringere Anzahl von Wettbewerbern und tendenziell höhere Preise erwarten. Eine Abschwächung dieser Risiken ist durch verschiedene Finanzierungsinstrumente, wie beispielsweise die Wiedereinsatzgarantie, denkbar.

Modell B beinhaltet erhebliche Risiken für den Aufgabenträger, die sich daraus ergeben, dass er Fahrzeuge kauft oder für deren Kauf garantiert, die vom Erstbeauftragten EVU ausgewählt werden. Es scheint unrealistisch, dass der Aufgabenträger hierbei die Langlebigkeit und langfristig wirtschaftliche Instandhaltungskosten der Triebzüge sicherstellen kann.

Bei der anstehenden Beschaffung wird davon ausgegangen, dass aus Strukturstärkungsmitteln eine hohe Förderung von Triebzügen mit alternativen Antrieben erfolgen kann (vgl. Kapitel 3.1.1). Daher ist die Integration der Förderung in das oder die Vergabeverfahren erforderlich. Dieses ist mit Abstand am einfachsten, wenn der Aufgabenträger die Fahrzeuge kauft und diese in einen Aufgabenträger-Fahrzeugpool einstellt, welcher die Fahrzeuge an die EVU vermietet. Hierfür kommen nur die Modelle B und D in Frage. Ein eigenfinanzierter Aufgabenträgerpool ist gegenüber Modellen, bei denen der Aufgabenträger einen Dritten als Eigentümer und Finanzierer der Fahrzeuge beauftragt, nicht nur hinsichtlich der Förderung einfacher, sondern auch wirtschaftlich vorteilhaft und vermindert die Schnittstellen.

Vor dem Hintergrund der Förderkulisse aus dem Investitionsgesetz Kohleregionen (InvKG) wird im Ergebnis das Modell D mit einem eigenfinanzierten Aufgabenträger-Fahrzeugpool empfohlen, da dieses über die Lebensdauer der Fahrzeuge den geringsten Zuschussbedarf erwarten lässt und die Einbeziehung von Förderungen ermöglicht. Für die Umsetzung ist ein für ZVOE und ZVON größerer Vergabe- und Controllingaufwand erforderlich, da mehrere Vergabeverfahren erfolgen müssen (Fahrzeug inkl. Instandhaltung, EVU-Leistungen). Ferner ist ein detailliertes Fahrzeug- und Instandhaltungscontrolling zu empfehlen, um zu erreichen, dass die Fahrzeuge die vorgesehene 30-jährige Einsatzdauer erreichen.

Das Modell D bietet den Aufgabenträgern zudem die Möglichkeit, flexibler auf die stufenweisen Elektrifizierungen im heutigen VVO-Dieselnetz und Ostsachsenetz zu reagieren und einen Durchtausch von Fahrzeugen zwischen verschiedenen Einsatzgebieten zu ermöglichen.

7 Systementscheidung VVO-Dieselnetz

Unter der Maßgabe eines umweltfreundlichen Schienenverkehrs als Beitrag zur Dekarbonisierung und zum Klimaschutz ist ein Dieselbetrieb über die Laufzeit des aktuellen Verkehrsvertrages für den Schienenpersonennahverkehr (SPNV) hinaus nicht darstellbar. Mit Auslaufen des gültigen Vertrages im Dezember 2031 ist somit ein [Systemwechsel der Antriebstechnologie für den SPNV im heutigen VVO-Dieselnetz](#) anzustreben. Die technisch-betrieblichen Untersuchungen zeigen, dass eine Umstellung des Netzes auf alternative Antriebe grundsätzlich möglich ist.

Das Maßnahmenpaket im Rahmen des Kohleausstiegs im Lausitzer Revier sieht eine durch den Bund finanzierte [Elektrifizierung der Strecke Dresden – Arnsdorf – Kamenz – Hosena](#) vor. Die Förderung der Elektrifizierungsinvestition bietet die Möglichkeit, den verdichteten Verkehr zwischen Dresden und Kamenz langfristig am kostengünstigsten (vgl. Abbildung 26) und mit maximaler Reduktion der CO₂-Emissionen mit elektrischen Zügen (EMU) zu betreiben. Nur durch die hierdurch eingesparten laufenden Betriebskosten könnte eine etwaige Durchbindung der Fahrten von Dresden aus über Kamenz bis Hoyerswerda/Senftenberg (RB 34+) kofinanziert werden. Unabhängig von der Antriebstechnologie ist für das SPNV-Angebot auf der für den SPNV zu reaktivierenden Strecke Kamenz – Hoyerswerda/Senftenberg ein [Ausbau der Schieneninfrastruktur](#) erforderlich, [um das angedachte Betriebsprogramm hier künftig fahren zu können](#). Die entsprechenden Maßnahmen (Verbindungskurve „Johannisthal“ bei Hosena, Zweigleisigkeit Kamenz – Hausdorf) können im Rahmen der Ausbaumaßnahme Nr. 22 gemäß Investitionsgesetz Kohleregionen umgesetzt werden. Als Zwischenstufe bis zur vollständigen Elektrifizierung könnten bereits nach Elektrifizierung des Abschnitts Dresden-Klotzsche – Arnsdorf batterieelektrische Züge (BEMU) auf der Strecke zum Einsatz kommen. Abhängig vom Zeitpunkt der vollständigen Elektrifizierung der Kamenzener Strecke und einer möglichen Neuordnung der Verkehre zu den Vertragsnetzen können die Leistungen auf der Strecke somit vorübergehend mit BEMU Fahrzeugen erbracht werden.

Da die Instandhaltungskosten für die Versorgungsinfrastruktur bei elektrischem Betrieb auf Strecken der DB Netz AG bundesweit umgelegt werden, weist der vollelektrische Betrieb für das VVO-Dieselnetz die wirtschaftlichste und ökologischste Option auf, sofern die Investitionen in die für die Versorgung der Fahrzeuge mit Energie erforderlichen Infrastruktur gefördert werden. Die [Vollelektrifizierung des heutigen Dieselnetzes](#) ist jedoch [perspektivisch nicht absehbar](#). In der Betrachtung der Lebenszykluskosten über 35 Jahre weist die BEMU-Technologie für das heutige VVO-Dieselnetz einen nur knapp höheren Kapitalwert als die EMU-Technologie auf. Ohne jegliche Förderperspektiven wäre die [BEMU-Technologie kostenseitig mit dem heutigen Dieselbetrieb vergleichbar](#) und im Vergleich zu EMU und HEMU die wirtschaftlich günstigste Option, EMU und HEMU (Wasserstoff-Züge) liegen jeweils deutlich darüber (vgl. Abbildung 27). Im Lichte der vorstehend gewonnenen Erkenntnisse sollte [für die Linien RB 33, RB 71 und RB 72/RE 19](#) eine [Umstellung auf die BEMU-Technologie mit Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeugen](#) angestrebt werden. Mit dem Einsatz von BEMU können zudem die CO₂-Emissionen gegenüber dem Dieselbetrieb erheblich gesenkt werden (vgl. Kapitel 5.5).

Die [BEMU-Technologie ist aus Sicht des Aufgabenträgers ZVOE gegenüber gegenüber der HEMU-Technologie \(Wasserstoff\) vorzuziehen](#), denn aufgrund der vergleichsweise geringen Energie- und Instandhaltungskosten der BEMU ergibt sich somit ein reduzierter Zuschussbedarf. Dies zeichnet diese Technologie insbesondere gegenüber der HEMU-Technologie aus, die insbesondere bei Verwendung von grünem Wasserstoff vergleichsweise hohe Energiekosten aufweist (vgl. Abbildung 27). Dies ist umso mehr für den ZVOE von Bedeutung, als dass laufende Betriebskosten oftmals nicht förderfähig sind (vgl. Kapitel 3.2). Im Ergebnis ermöglicht die BEMU-Technologie einen effizienten Einsatz von

Regionalisierungsmitteln. Die sich aufgrund der geringeren Betriebskosten ergebenden Einsparungen stehen letztlich dem Aufgabenträger an anderer Stelle z. B. für Angebotsausweitungen zur Verfügung (vgl. Kapitel 5.4.2 i. V. m. Kapitel 2.1.2).

Den **1. Arm der Strukturstärkung** für das Lausitzer Revier sollte der ZVOE für weitere Investitionen wie für eine **neue Werkstatt**, die neuen Fahrzeuge sowie ggf. für über die genannten **infrastrukturellen Maßnahmen** notwendige Investitionen nutzbar machen (vgl. Kapitel 3.1.1). Entsprechend gute Möglichkeiten hierfür werden im Rahmen der Vergabestrategie mit einem eigenfinanzierten **Aufgabenträger-Fahrzeugpool** gesehen (vgl. Kapitel 6.4). Ein derartiger Fahrzeugpool könnte auch das für das Ostsachsenetz künftig benötigte Rollmaterial umfassen.

Im **südlichen Teil des heutigen Dieselnetzes**, der sich außerhalb des Fördergebiets der Strukturstärkung befindet, muss zur Finanzierung der dort einzusetzenden Fahrzeuge und der notwendigen **Oberleitungs- bzw. Nachladeinfrastruktur** auf **weitere Finanzierungsquellen** zurückgegriffen werden (vgl. Kapitel 3.3). Hierzu wird der ZVOE entsprechende Prüfungen einleiten.

Der Einsatz der BEMU-Fahrzeuge in Verbindung mit einem eigenfinanzierten Aufgabenträger-Fahrzeugpool nutzt die sich aus der Strukturstärkung ergebenden Möglichkeiten (Förderungen aus dem 1. Arm, Inwertsetzung der angekündigten Ausbaumaßnahmen aus dem 2. Arm) und wird im Ergebnis zu einem **effizienten Einsatz von Regionalisierungsmitteln** führen, was wiederum Angebotsausweitungen zugutekommen kann. Sollte die erforderliche BEMU-Infrastruktur nicht rechtzeitig bis 2031 zur Verfügung stehen, kann eine kurzzeitige Verlängerung des bis dahin laufenden Vertrags und somit eine kurze Weiterführung des Dieselbetriebs in Erwägung gezogen werden. Aus ökonomischer und ökologischer Sicht ist jedoch eine **Betriebsaufnahme mit BEMU-Fahrzeugen im Jahr 2031 zu befürworten** und auch realistisch umsetzbar.

Die [Vorteile der BEMU-Technologie](#) im Überblick:

- Geringste Lebenszykluskosten in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der verschiedenen Antriebe – selbst bei Nichtbetrachtung der Förderpotenziale für die Versorgungsinfrastruktur
- Nur geringfügig höhere Betriebskosten als bei EMU; im Vergleich zum HEMU deutlich günstiger
- Effizienter Einsatz von Regionalisierungsmittel, insb. dank vergleichsweise geringer Energiekosten
Schonung des Aufgabenträgerbudgets, Einsatz der Mittel für Angebotsausweitungen möglich
- Hoher Umweltnutzen durch erhebliche CO₂-Einsparungen gegenüber dem Dieselbetrieb, auch unter Berücksichtigung der Akkuherstellung und -entsorgung

Die [Vorteile eines eigenfinanzierten Aufgabenträger-Fahrzeugpools](#) im Überblick:

- Geringster Zuschussbedarf im Vergleich mit anderen Vergabemodellen über die Lebensdauer der Fahrzeuge erwartbar
Schonung des Aufgabenträgerbudgets, Einsatz der Mittel für Angebotsausweitungen möglich
- Einbeziehung von Förderungen (insb. 1. Arm Strukturstärkung für den nördlichen Teil des heutigen Dieselnetzes) möglich

[Erforderliche Maßnahmen für den geplanten Systemwechsel im bisherigen VVO-Dieselnetz:](#)

- Elektrifizierung Dresden-Klotzsche – Arnsdorf als Bestandteil der Ausbaumaßnahme Nr. 20 oder Nr. 22 im Investitionsgesetz Kohleregionen (ermöglicht BEMU-Betrieb als Migrationslösung bis zur Vollelektrifizierung)
- Elektrifizierung Arnsdorf – Kamenz als Bestandteil der Ausbaumaßnahme Nr. 22 im Investitionsgesetz Kohleregionen (ermöglicht EMU-Betrieb auf Strecke Dresden – Kamenz)
- Elektrifizierung Heidenau – Köttewitz (– Mühlbach)
- Anhebung der Streckenklasse Köttewitz – Altenberg
- Ladestation Neustadt (Sachs)

[Erforderliche Maßnahmen für Angebotsausweitungen im bisherigen VVO-Dieselnetz von Kamenz bis Hoyerswerda/Senftenberg \(RB 34+\)](#), unabhängig von der Antriebstechnologie:

- Elektrifizierung Kamenz – Hosena als Bestandteil der Ausbaumaßnahme Nr. 22 im Investitionsgesetz Kohleregionen (ermöglicht EMU-Betrieb auf Strecke Dresden – Kamenz – Hoyerswerda/Senftenberg)
- Verbindungskurve „Johannisthal“ bei Hosena als Bestandteil der Ausbaumaßnahme Nr. 22 im Investitionsgesetz Kohleregionen
- Zweigleisigkeit Kamenz – Cunnersdorf – Hausdorf als Bestandteil der Ausbaumaßnahme Nr. 22 im Investitionsgesetz Kohleregionen

8 Handlungsempfehlung Ostsachsennetz

Für das Ostsachsennetz wird an dieser Stelle eine Handlungsempfehlung ausgesprochen. Neben dem Zweckverband Verkehrsverbund Oberelbe (ZVOE) ist auf deutschem Gebiet der Zweckverband Verkehrsverbund Oberlausitz-Niederschlesien (ZVON) verantwortlicher SPNV-Aufgabenträger für dieses Netz. Auf tschechischer Seite ist zudem der Liberecký kraj aufgrund der Leistungen des RE 2 nach Liberec tangiert (vgl. Kapitel 2.2.1). Eine Technologieentscheidung über die künftige Antriebsart im Ostsachsennetz ist daher zwischen den zuständigen Aufgabenträgern, die in den künftigen Verkehrsvertrag (ab 2031) einbezogen werden, abzustimmen.

Auch im Ostsachsennetz ist die Fortführung des Dieselbetriebes im Kontext des Klimaschutzes und der Dekarbonisierung über die aktuelle Vertragslaufzeit hinaus nicht darstellbar. Die technisch-betrieblichen Untersuchungen dieser Studie zeigen, dass eine Umstellung des Netzes auf alternative Antriebe grundsätzlich möglich ist. Alle drei untersuchten Antriebstechnologien (EMU, BEMU, HEMU) sorgen in jedem Fall für eine erhebliche [Senkung der CO₂-Emissionen gegenüber dem Dieselbetrieb](#) (vgl. Kapitel 5.5). Im Lichte der vorstehend beschriebenen Erkenntnisse aus der Wirtschaftlichkeitsuntersuchung ergeben sich [zwei sinnvolle Optionen für das Ostsachsennetz](#):

- Wird die Betrachtung auf die Strecken Dresden – Görlitz und Dresden – Zittau beschränkt, so ist der [EMU-Einsatz mit konventionellen Oberleitungsfahrzeugen](#) anzustreben. Für beide Strecken werden im Rahmen der Strukturstärkung Elektrifizierungsperspektiven benannt (Ausbaumaßnahmen Nr. 20 und 21 im Investitionsgesetz Kohlereionen, vgl. Kapitel 3.1.2). Die Strecke Dresden – Görlitz ist darüber hinaus Bestandteil des Bundesverkehrswegeplans 2030, ist allerdings nicht in den vordringlichen Bedarf aufgestiegen. Die Wirtschaftlichkeitsuntersuchung unterstreicht den grundsätzlichen ökonomischen Vorteil des Oberleitungsbetriebs, insbesondere aus Aufgabenträgersicht (vgl. Kapitel 5.4.2). Im Falle der Vollelektrifizierung der Strecke Bischofswerda – Zittau wären jedoch die Durchbindungen des RE 2 nach Liberec aufzugeben, da für die Strecke Zittau – Liberec derzeit keine absehbare Elektrifizierungsperspektive besteht (vgl. Kapitel 2.3).
- Die Vollelektrifizierung der beiden genannten Strecken bis 2031 erscheint in Anbetracht der am 25.06.2021 verkündeten Maßnahmenliste (vgl. Kapitel 2.2.2) jedoch nicht realistisch. Von daher wird für den Fall, dass nur abschnittsweise Elektrifizierungen bis dahin abgeschlossen sein können, der [BEMU-Einsatz mit Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeuge](#) empfohlen. Mit der BEMU-Technologie auf der Strecke Dresden – Zittau könnten bei Errichtung entsprechender Ladeinfrastruktur zudem die Durchbindungen des RE 2 nach Liberec aufrechterhalten werden.

In der Betrachtung der Lebenszykluskosten über 35 Jahre weist die BEMU-Technologie Vorteile gegenüber dem HEMU (Wasserstoff) auf. Ein Einsatz von BEMU kann dabei – selbst unter Berücksichtigung der Infrastrukturkosten – schon heute so wirtschaftlich wie der Dieselbetrieb sein. Nimmt man die Infrastrukturkosten aus der Vergleichsbetrachtung und reduziert die Betrachtung auf die von den Aufgabenträgern absehbar zu tragenden Kosten, stellt sich die Vollelektrifizierung noch besser dar als die BEMU-Technologie (vgl. Abbildung 29). Somit unterstreichen diese Erkenntnisse die [herausragende Bedeutung der Strukturstärkungsprojekte für das Ostsachsennetz](#), denn erst mit den im Investitionsgesetz Kohlereionen verankerten Elektrifizierungen kann der Einsatz von EMU oder BEMU hier überhaupt möglich werden. Werden die entsprechenden Ausbaumaßnahmen (insb. Elektrifizierungen) umgesetzt, können sowohl EMU als auch BEMU ihre ökonomischen Vorteile mit vergleichsweise geringen Energie- und Instandhaltungskosten ausspielen. [Die Elektrifizierungen aus dem 2. Arm der Strukturstärkung sind somit insbesondere aus Sicht der Aufgabenträger vorteilhaft](#), denn verringerte Betriebskosten schlagen

sich positiv im Zuschussbedarf für das SPNV-Angebot nieder (vgl. Kapitel 5.4.2). Ein [Einsatz von Wasserstofffahrzeugen \(HEMU\)](#) im Ostsachsennetz [würde hingegen absehbar zu vergleichsweise hohen Betriebskosten führen](#) (vgl. auch Abbildung 29), die aus dem Budget an Regionalisierungsmitteln bestritten werden müssten, so dass diese Technologie den Aufgabenträgern nicht empfohlen wird. Dies gilt umso stärker, als dass laufende Betriebskosten oftmals nicht förderfähig sind (vgl. Kapitel 3.2). Die [Realisierung der Infrastrukturprojekte aus dem 2. Arm der Strukturstärkung](#) für das Lausitzer Revier ist somit wie dargestellt [von herausragender Bedeutung für das künftige Ostsachsennetz](#).

Im Ostsachsennetz sollten ab 2031 entweder EMU- oder BEMU-Fahrzeuge zum Einsatz gelangen. Beide Antriebstechnologien können die sich aus der Strukturstärkung ergebenden Möglichkeiten (Förderungen aus dem 1. Arm, Inwertsetzung der angekündigten Ausbaumaßnahmen aus dem 2. Arm) nutzbar machen und im Ergebnis zu einem effizienten Einsatz von Regionalisierungsmitteln führen, was wiederum Angebotsausweitungen zugutekommen kann.

Den [1. Arm der Strukturstärkung](#) für das Lausitzer Revier sollten die Aufgabenträger für weitere Investitionen wie für eine [neue Werkstatt](#), die neuen Fahrzeuge sowie ggf. für über die genannten [infrastrukturellen Maßnahmen](#) notwendige Investitionen nutzbar machen (vgl. Kapitel 3.1.1). Entsprechend gute Möglichkeiten hierfür werden im Rahmen der Vergabestrategie mit einem eigenfinanzierten [Aufgabenträger-Fahrzeugpool](#) gesehen (vgl. Kapitel 6.4). Dies kann in Verbindung mit dem geplanten Aufbau eines Fahrzeugpools für das bisherige VVO-Dieselnetz geschehen, um entsprechende Synergieeffekte zwischen beiden Netzen zu nutzen.

Der Betrieb mit EMU- oder BEMU hängt gleichwohl von der rechtzeitigen [Errichtung der erforderlichen Oberleitungs- bzw. Ladeinfrastruktur bis 2031](#) ab. Zumindest auf den Streckenabschnitten Dresden-Klotzsche – Demitz-Thumitz sowie Zittau – Mittelherwigsdorf und am Bahnhof Görlitz ist dies bis dahin unerlässlich. Erforderlichenfalls kann eine kurzzeitige Weiterführung des Dieselbetriebs in Erwägung gezogen werden, sollte die für EMU oder BEMU erforderliche Infrastruktur erst wenige Jahre nach 2031 zur Verfügung stehen. Aus ökonomischer und ökologischer Sicht ist jedoch eine Betriebsaufnahme mit EMU- oder BEMU-Fahrzeugen im Jahr 2031 zu befürworten.

Im Ergebnis bestehen [wirtschaftliche Vorteile für die EMU- und BEMU-Technologien](#) im Ostsachsennetz:

- Geringe Lebenszykluskosten in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der verschiedenen alternativen Antriebe
- Effizienter Einsatz von Regionalisierungsmittel, insb. dank vergleichsweise geringer Energiekosten
Schonung des Aufgabenträgerbudgets, Einsatz der Mittel für Angebotsausweitungen möglich
- Hoher Umweltnutzen durch erhebliche CO₂-Einsparungen gegenüber dem Dieselbetrieb, auch unter Berücksichtigung der Akkuherstellung und -entsorgung für BEMU

[Weitere ökonomische Vorteile](#) können im Rahmen der Vergabestrategie [mit einem eigenfinanzierten Aufgabenträger-Fahrzeugpool](#) erzielt werden:

- Geringster Zuschussbedarf im Vergleich mit anderen Vergabemodellen über die Lebensdauer der Fahrzeuge erwartbar
Schonung des Aufgabenträgerbudgets, Einsatz der Mittel für Angebotsausweitungen möglich
- Einbeziehung von Förderungen (insb. 1. Arm Strukturstärkung) möglich

Unabhängig von der Antriebstechnologie sind vereinzelte [infrastrukturelle Maßnahmen für das künftige Betriebsprogramm des Ostsachsennetzes](#) nötig (vgl. Kapitel 5.3.3):

- Ertüchtigung Bahnhof Bischofswerda für Flügel-Konzept
- V_{max}-Erhöhung Zittau – Hrádek nad Nisou auf 80 km/h
- V_{max}-Erhöhung Zittau – Mittelherwigsdorf auf 120 km/h
Bestandteil der Ausbaumaßnahme Nr. 21 im Investitionsgesetz Kohleregionen
- ggf. Anhebung der Streckenklasse Zittau – Liberec

Für die EMU- und BEMU-Technologien gilt ferner, dass beide Antriebstechnologien von der rechtzeitigen Errichtung der erforderlichen Oberleitungs- und Ladeinfrastruktur abhängig sind. Für einen [BEMU-Einsatz](#) im Ostsachsennetz müssen [mindestens folgende Maßnahmen bis 2031](#) abgeschlossen sein (vgl. Kapitel 5.3.3):

- Elektrifizierung Dresden-Klotzsche – Arnsdorf als Bestandteil der Ausbaumaßnahme Nr. 20 oder Nr. 22 im Investitionsgesetz Kohleregionen
- Elektrifizierung Arnsdorf – Demitz-Thumitz (– Görlitz)
Bestandteil der Ausbaumaßnahme Nr. 20 im Investitionsgesetz Kohleregionen
- Ladestation in Görlitz (Migrationsvariante, sofern Elektrifizierung des Bahnhofs im Rahmen der vorstehend genannten Ausbaumaßnahme Nr. 20 bzw. im Rahmen der Ausbaumaßnahme Nr. 19 (Cottbus – Görlitz) bis 2031 nicht abgeschlossen)
- Elektrifizierung Zittau – Mittelherwigsdorf
Bestandteil der Ausbaumaßnahme Nr. 21 im Investitionsgesetz Kohleregionen