Batterietriebzug für nicht- oder nur teil-elektrifizierte Strecken des Schienenpersonennahverkehrs (SPNV)

Förderkennzeichen: 03EMF0006B

Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2016 - 31.12.2022

Technische Universität Berlin Fachgebiet Bahnbetrieb und Infrastruktur Fachgebiet Methoden der Produktentwicklung und Mechatronik

Endbericht Verwendungsnachweis Teil II – Eingehende Darstellung





Zuwendungsempfänger Technische Universität Berlin

Institut für Land- und Seeverkehr

Fachgebiet Bahnbetrieb und Infrastruktur

Prof. Dr.-Ing. Birgit Milius

Sekr. SG 18 Salzufer 17-19 10587 Berlin

Tel: 030 / 314-23314

E-Mail: info@railways.tu-berlin.de

Technische Universität Berlin

Institut für Maschinenkonstruktion und Systemtechnik

Fachgebiet Methoden der Produktentwicklung und Mechatronik

Prof. Dr.-Ing. Dietmar Göhlich

Sekr. H10

Straße des 17. Juni 135

10623 Berlin

Tel: 030 / 314-22842

E-Mail: sekretariat@mpm.tu-berlin.de

Projektleiterin (Teil TUB): Prof. Dr.-Ing. Birgit Milius

E-Mail: birgit.milius@tu-berlin.de

Bearbeiter: Pavel Boev, FG Methoden der Produktentwicklung und Mechatronik, Technische Universität Berlin

Benjamin Ebrecht, FG Bahnbetrieb und Infrastruktur, Technische Universität Berlin Daniel Walter, FG Bahnbetrieb und Infrastruktur, Technische Universität Berlin Ulrich Zimmermann, FG Bahnbetrieb und Infrastruktur, Technische Universität Berlin



Inhaltsverzeichnis

٩I	bild	lungs	verzeichnis	4
Γε	bell	envei	zeichnis	5
٩I	okür	zung	sverzeichnis	6
1	Wic	htigs	te Ergebnisse und Erkenntnisse	7
	1.1	Wis	senschaftliche und technische Ergebnisse	7
	1.	1.1	Randbedingungen und Systemauslegung für den Batteriebetrieb	7
	1.	1.2	Ladeinfrastruktur	12
	1.	1.3	Wirtschaftlichkeit und Kostenoptimierung	13
	1.	1.4	Umweltbilanz	18
	1.	1.5	Probebetrieb	20
	1.	1.6	Zulassung	26
	1.	1.7	Grenzüberschreitende Verkehr / Reaktivierungen / Touristikverkehre	26
	1.	1.8	Zusammenfassung und Handlungsempfehlungen	30
	1.2	Wic	htigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	31
	1.3	Not	wendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	31
	1.4	Bek	anntgabe relevanter Ergebnisse von dritter Seite	32
	1.5	Ver	wertung der Ergebnisse	32
		.5.1 lesser	Veröffentlichung der Ergebnisse auf nationalen und internationalen Fachkon und Tagungen	
	1.	5.2	Akquise weiterer Projekte	33
	1.	5.3	Abschlussarbeiten und Promotionen	33
	1.	5.4	Veröffentlichungen	34
2	Lite	ratur	verzeichnis	36



Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Batteriekapazität und Ladefenster	7
Abbildung 2: Einflussparameter auf den Energiebedarf	8
Abbildung 3: Längster Dieselabschnitt ohne Wende	8
Abbildung 4: Scatterplot Linieneigenschaften	9
Abbildung 5: Hauptquellen für Störungseinflüsse	10
Abbildung 6: Auszug Details der Störeinflüsse	10
Abbildung 7: Blockdiagramm des Konzepts zum Energiemanagement Reichweitenprädiktion	mit 11
Abbildung 8: Zuständigkeiten Ladeinfrastruktur	13
Abbildung 9: Lebenszykluskosten der jeweiligen Szenarien	15
Abbildung 10: Optimale Infrastruktur für 350 kWh Batteriekapazität	17
Abbildung 11: Optimale Infrastruktur für 800 kWh Batteriekapazität	18
Abbildung 12: Treibhausgasemissionen der jeweiligen Szenarien	19
Abbildung 13: Vergleich der Schadstoffemissionen beim Diesel und dem deutschen Strom 2020	
Abbildung 14: Überblick über die Ziele des Probebetriebes	20
Abbildung 15: Ausschnitt aus der grafischen Darstellung des Betriebsprogramms	21
Abbildung 16: Übersicht der gesammelten Daten aus dem Probebetrieb	22
Abbildung 17: Lageplan / Höhenprofil der Testbetriebs-Strecke Gunzenhausen - Pleinfeld	22
Abbildung 18: Traktionsenergie in Abhängigkeit der Durchschnittsgeschwindigkeit	23
Abbildung 19: Verhältnis Traktions- zu Rekuperationsenergie	23
Abbildung 20: Hilfsbetriebeleistung in Abhängigkeit der Außentemperatur	24
Abbildung 21: Elektrifizierungsanteile grenzüberschreitender SPNV-Linien (links), ausgewäßeispiele (rechts)	
Abbildung 22: Zugang zu Oberleitung bei Reaktivierungskandidaten	29
Abbildung 23: Oberleitungszugang und -anteile Reaktivierungskandidaten	29
Abbildung 24: Längenanteile bei Fahrten zu touristischen Zwecken	30



Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: CAPEX und OPEX Parameter für die TCO-Analyse	14
Tabelle 2: Übersicht der betrachteten Szenarien; fett markiert sind die einzeln variier Parameter, die sich vom Basisszenario unterscheiden	
Tabelle 3: Simulationsparameter für die Optimierung	16
Tabelle 4: Ergebnisse der Optimierung (in Mio. €)	16
Tabelle 5: CO ₂ -Emissionen der Energieträger	18
Tabelle 6: Stage III B Standards for Rail Traction Engines [16]	18



Abkürzungsverzeichnis

BEMU – battery electric multiple unit (Batterietriebzug)

BW - Barwert

CAPEX – capital expenditure (Investitionskosten)

DC – direct current (Gleichspannung)

DMU – diesel multiple unit (Dieseltriebzug)

DoD – depth of discharge

EMU - electric multiple unit (Elektrotriebzug)

LTO - Lithium-Titanat-Oxid

MS-BEMU - Mehrsystem-Batterietriebzüge

MS-EMU - Mehrsystem-Elektrotriebzüge

OLIA - Oberleitungsinselanlage

OPEX – operational expenditure (Betriebskosten)

NMC - Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid

PV - Photovoltaik

SoC – state of charge

SPNV - Schienenpersonennahverkehr

TBS – Traktionsbatteriesystem

TCO – total cost of ownership

Tf – Triebfahrzeugführer/in

THR - tolerable hazard rate



1 Wichtigste Ergebnisse und Erkenntnisse

1.1 Wissenschaftliche und technische Ergebnisse

Das Projekt "Batterietriebzug für nicht- oder nur teil-elektrifizierte Strecken des Schienenpersonennahverkehrs (SPNV)" wurde vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr über die Programmgesellschaft NOW gefördert. Gemeinsam mit dem Konsortialführer Alstom Transportation wurde die Umrüstung eines Elektrotriebzuges vom Typ Talent 3 zu einem Batterietriebzug geplant und durchgeführt. Zu den Arbeitspaketen von Alstom gehörten dabei u.a. die Themen der Fahrzeugtechnik wie Komponentenauslegung, Testing, Umbau und Zulassung. Die wissenschaftliche Begleitung der TU Berlin umfasste vor allem Definition von betrieblichen Randbedingungen, Netzuntersuchungen sowie Betrachtungen zu Wirtschaftlichkeit und Umweltbilanz. Wichtige Meilensteine waren die Erlangung der Zulassung für den Fahrgastbetrieb sowie die gemeinsame Durchführung und Auswertung des Testbetriebs in Baden-Württemberg und Bayern.

1.1.1 Randbedingungen und Systemauslegung für den Batteriebetrieb

Das wichtigste neue Teilsystem eines BEMU-Fahrzeuges ist das Traktionsbatteriesystem (TBS), das neben den Batteriemodulen auch einen DC/DC-Wandler umfasst, über welchen es an den Fahrzeugzwischenkreis angebunden ist. Es versorgt das Fahrzeug in nichtelektrifizierten Abschnitten mit Energie. Folglich muss der Komponente TBS mit allen Auswirkungen eine besondere Aufmerksamkeit zuteilwerden. Dies gilt sowohl für technische Aspekte wie für alle vor- und nachlaufenden Planungsprozesse und betrieblichen Implikationen.

Grundsätzlich werden für Traktionsbatterien mit den hohen im Bahnbereich notwendigen Leistungen verschiedene Batterietechnologien eingesetzt, von denen LTO (Lithium-Titanat-Oxid) sowie NMC (Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid) die gebräuchlichsten sind. Letztere wurde in der Ausprägung als NMC/C-Batterie für die Integration in das BEMU-Fahrzeug ausgewählt, wobei für beide Technologien gilt, dass innerhalb der physikalischen (nominalen) Kapazität der Batterie ein im Regelbetrieb nutzbares Ladefenster (DoD, depth of discharge) definiert werden muss (siehe Abbildung 1). Hierbei spielen sowohl der für das anstehende Betriebsprogramm ausreichende Energievorrat wie auch Aspekte der Lebensdauer eine Rolle. Üblich sind bei NMC-Batterien Ladefenster von 30-80 % SoC (state of charge), wodurch sich eine nutzbare Batteriekapazität von 50 % ergibt.

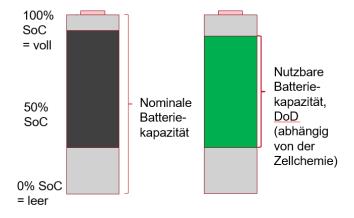


Abbildung 1: Batteriekapazität und Ladefenster



Im Bahnbetrieb sind vielfältige Einflüsse zu bedenken, die Auswirkungen auf den Energiebedarf haben, was bei begrenztem Energievorrat besonderes Gewicht hat. Diese resultieren aus verschiedenen Quellen, die sich grob in die Bereiche Fahrzeug, Betrieb und Infrastruktur unterscheiden lassen. Je mehr Daten hierfür erfasst werden und je genauer hierbei die Erfassungsgenauigkeit gewählt wird, desto präziser lassen sich Voraussagen über die Potentiale der BEMU-Fahrzeuge auf bestimmten Linien bzw. Netzen treffen. Für erste Aussagen reichen meist grobe Werte, sobald aber eine Detailplanung ansteht, deren Ausführung hohe monetäre Auswirkungen hat, muss mit einem passenden Detailgrad operiert werden. Die identifizierten Einflussparameter für den Betrieb lassen sich aus Abbildung 2 entnehmen.

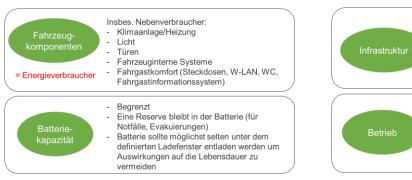




Abbildung 2: Einflussparameter auf den Energiebedarf

Bislang eingesetzte Dieseltriebzüge zeichnen sich durch eine Reichweite von 800 – 1.200 km pro Tankfüllung aus, die auf absehbare Zeit mit Batterietriebzügen nicht zu erreichen sein wird und deren Anstreben auch nicht sinnvoll ist. Ein netzweiter Ersatz ohne weitere Infrastruktur wie Lademöglichkeiten ist daher ausgeschlossen. Eine Analyse der bislang mit Dieselfahrzeugen betriebenen Linien des Schienenpersonennahverkehrs (SPNV) zeigt, dass viele Linien Längen von lediglich bis zu 60 km aufweisen (siehe Abbildung 3) und daher grundsätzlich für BEMU-Fahrzeuge geeignet sind. Eine jeweilige Einzelfallanalyse, welche konkreten Anpassungen erfolgen müssen, beispielsweise Errichtung von Ladeinfrastruktur oder Anpassungen am Fahrund Umlaufplan, um ausreichende Batterieladungen zu gewährleisten, ist in jedem Fall vonnöten.

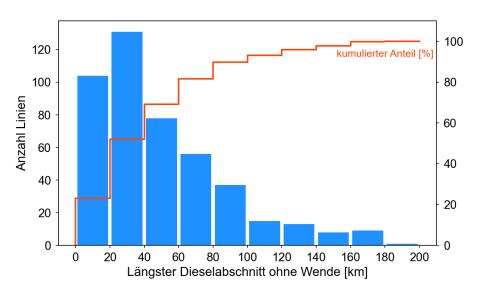


Abbildung 3: Längster Dieselabschnitt ohne Wende



Eine genauere Analyse des SPNV mit weiteren Infrastrukturdaten (siehe Abbildung 4) zeigt eine Konzentration von kürzeren Linien mit mäßigen Höhenunterschieden. Der Elektrifizierungsanteil ist gering und liegt im Durchschnitt bei 20 %, der durchschnittliche Halteabstand bei 6,4 km.

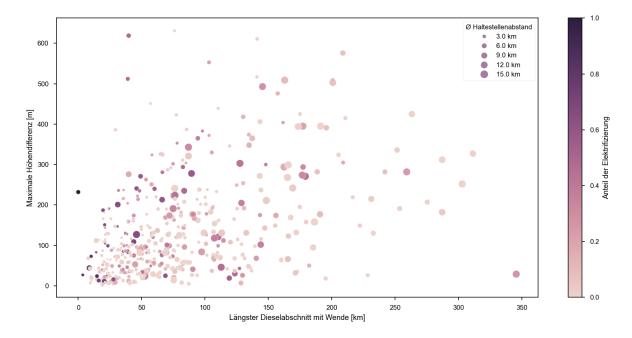


Abbildung 4: Scatterplot Linieneigenschaften (jeder Punkt bildet eine SPNV-Linie ab)

Größtes Potential für die Nachladung von BEMU-Fahrzeugen besteht trotz infrastrukturseitig beschränkter Standladeleistungen während der Wendezeiten, was sowohl in der Betriebsplanung wie für die Auswahl von geeigneten Orten für Nachladeinfrastruktur bedacht werden muss. Die Neuerrichtung von Ladeinfrastruktur an Zwischenhalten ist dagegen nur in seltenen Fällen sinnvoll. Zusätzlich ist aufgrund der hohen Investitionskosten sowie der Tatsache, dass einmal errichtete Ladeinfrastruktur nur schwierig bis gar nicht zu versetzen ist, eine möglichst präzise Langfristplanung für die Standortfindung anzustreben.

Störfallkonzepte

Die im Vergleich zu Diesel- oder Wasserstoff-Brennstoffzellenfahrzeugen (HEMU) deutlich geringere Reichweite von Batteriefahrzeugen macht eine spezifische Berücksichtigung von Störeinflüssen notwendig. Die drei Hauptaspekte sind in Abbildung 5 aufgeführt. Dies dient zum einen der Fahrzeugauslegung, die von betrieblichen und infrastrukturellen Anforderungen bestimmt wird. Zum anderen ist zusätzlich dazu vor einer BEMU-Einführung in einem bestimmten SPNV-Netz eine Analyse sinnvoll, welche Störeinflüsse an welchen Stellen im betrachteten Netz vorkommen. Sie kann als solide Basis für Störfallkonzepte und Störfallszenarien sowie auch für die Auslegung der Ladeinfrastruktur dienen.

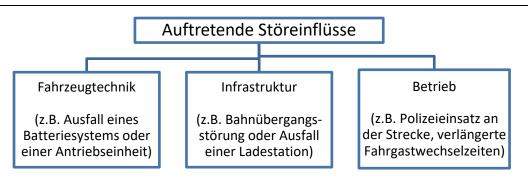


Abbildung 5: Hauptquellen für Störungseinflüsse

Darauf basierend wurde in Abstimmung mit Alstom und unter Einbezug der assoziierten Projektpartner eine detaillierte Liste entwickelt, die sämtliche Störeinflüsse auf den Betrieb und deren Auswirkungen erfasst. Ein Beispielauszug findet sich in Abbildung 6. Es zeigt sich, dass nahezu alle Störungen auf die Problematik hinauslaufen, dass ein BEMU-Fahrzeug im nichtelektrifizierten Abschnitt liegenbleibt und nicht mehr aus eigener Kraft weiterfahren kann. Es existieren mehrere Optionen, diesem Problem zu begegnen, die im Folgenden kurz aufgezeigt werden sollen. Diese sind in sich abgeschlossen und werden sinnvollerweise im Verbund angewendet.

Bezeichnung	Art der Einschränkung	Auswirkung	Beispiel
Planmäßig nächste Ladestation kann im Standardmodus mit aktuellem SOC nicht mehr erreicht werden	Fahrzeug	SOC Batterie eingeschränkt	Ausfall TBS oder ESCH
	Fahrzeug	Fahrdynamik eingeschränkt, Verlängerung Fahrzeit	Ausfall Antriebseinheit
	Fahrzeug	Verlängerung Standzeit	Türstörung
	Infrastruktur	Verlängerung Fahrzeit	Langsamfahrstelle
	Infrastruktur	Verlängerung Standzeit	Hindernis auf Gleis LST/BÜ-Störung Weichenstörung
	Infrastruktur	Ladung während der Fahrt nicht möglich	Vereiste Oberleitung
	Betrieb	Verlängerung Fahrzeit	Betriebliche Anordnung
	Betrieb	Verlängerung Standzeit	Polizeieinsatz Verlängerte Fahrgastwechselzeiten

Abbildung 6: Auszug Details der Störeinflüsse

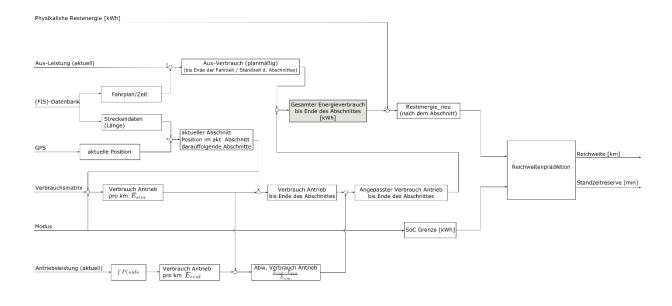
- 1. Das Fahrzeug selbst kann Einstellungen für das Fahrpersonal bereithalten, die bei drohendem Liegenbleiben aktiviert werden können und den Energiebedarf des Fahrzeugs vermindern. Hauptangriffspunkt sind dabei die Energiebedarfe für Heizen bzw. Kühlen sowie die Aktivierung eines Reservebereiches in der Batterie, der im Regelfall nicht genutzt werden soll. Eine solche Abstufung in drei Fahrmodi ist im BEMU-Versuchsträger implementiert.
- 2. Auslegung des Fahrzeugs, insbesondere beim Thema Batteriegröße, sodass häufig aufkommende kürzere Störungen vom Fahrzeug "bewältigt" werden können, ohne liegenzubleiben oder die Batterie bis in lebensdauerverkürzende Bereiche entladen zu müssen. Eine Auslegung auf nur äußerst selten vorkommende langandauernde betriebliche Störungen ist dagegen nicht sinnvoll. Diese können durch entsprechende Havariekonzepte wie Abschleppen abgefangen werden, wie dies auch bislang im Bahnbetrieb schon vorgesehen ist.



Energiemanagement/Reichweitenprognose

Die begrenzte Reichweite des Triebzuges im Batteriebetrieb verlangt ein Neudenken des Fahrzeugenergiemanagements. Es reicht nicht mehr z.B. Handlungsempfehlungen für energiesparende Fahrweise an das Fahrpersonal zu geben. Damit das Fahrzeug nicht liegen bleibt, vor allem bei unvorhersehbaren Ereignissen und Störfällen, muss zu jedem Zeitpunkt ersichtlich sein, wie weit das Fahrzeug noch mit der aktuellen Batterieladung fahren kann bzw. wie lange es mit laufenden Nebenverbrauchern (z.B. Heizung/Kühlung) stehen kann. Mit der Entwicklung der Störfallkonzepte und der daraus hervorgegangenen Energiesparmodi konnten die Letzteren im Energiemanagement implementiert werden. Einerseits kann damit auf einfache Art und Weise die Reichweite im Notfall erweitert werden (durch Ausschalten bestimmter Komfortfunktionen), andererseits dienen sie als Basis für die Entwicklung einer algorithmusbasierten Reichweitenprädiktion.

Es wurden mehrere Komplexitätsstufen entwickelt, die wegen der begrenzten Ressourcen im Förderprojekt im Fahrzeug nicht implementiert worden sind. Eine davon ist beispielhaft in Abbildung 7 dargestellt. Die Reichweitenprognose basiert auf simulierten Traktionsenergiebedarfen in Abhängigkeit des Fahrmodus, die in Form einer Verbrauchsmatrix gespeichert sind. Zusätzlich werden die aktuelle GPS-Position, Antriebs- und Nebenverbraucher-Leistung, Traktionsbatteriedaten sowie der aktivierte Fahrmodus als Input verwendet. Um eine praxisnahe Entwicklung zu gewährleisten wurden in Hennigsdorf Workshops mit Betriebspersonalen durchgeführt.



Verbrauchsmatrix [kWh/km]						
Abschnitt-ID Modus	1	2	3	n		
Standard	5,2	4,8	7,4			
Range maximum	4,3	4,1	6,6			
Low battery evacuation	4,3	4,1	6,6			

Abbildung 7: Blockdiagramm des Konzepts zum Energiemanagement mit Reichweitenprädiktion

In diesem Zusammenhang konnten viele praxisrelevante Anforderungen für Führerstandsanzeigen zusammengetragen werden, zumal auch beim Betriebspersonal zum Teil unterschiedliche



Meinungen zu einzelnen Aspekten vorherrschen. Die Leitgedanken waren dabei, diese so einfach wie möglich und gleichzeitig so detailliert wie nötig zu gestalten. Sie sollte im Regelbetrieb keine Ablenkung des Tf darstellen.

1.1.2 Ladeinfrastruktur

Die Lademöglichkeit des Batteriezuges wird auf die Schnittstelle Oberleitung – Stromabnehmer festgelegt, die analog zum EMU (electric multiple unit) eine Versorgung mit 15 kV, 16,7 Hz ermöglicht. Damit sind Ladeleistungen im Stand bis zu 1,2 MW (limitiert aufgrund der statischen Kontaktstelle zwischen Stromabnehmer und Oberleitung [1]) und während der Fahrt bis zur Grenze der elektrischen Ausrüstung des Fahrzeugs (je nach sonstigem Energiebedarf des Fahrzeugs durch Traktion und Nebenverbraucher) möglich. Eine Ladung über die bislang schon standardisierten Elektranten oder Zugvorheizanlagen wurde für dieses Projekt verworfen, auch wenn es für Nachtabtstellungen außerhalb von Ballungsräumen einzelne Anwendungsfälle gibt.

Dies dient gleichsam als Anforderung an die Ladeinfrastruktur, die sich an den bereits bestehenden Regularien für den elektrischen Betrieb orientieren muss (DIN EN 50388, DB Richtlinie 997, Technische Netzzugangsbedingungen). Es deuten sich über das Projekt hinaus auch Lösungen für Ladeinfrastruktur mit 15 kV, 50 Hz sowie 25 kV, 50 Hz [2] an, dies wird als grundsätzlich mit dem BEMU-Fahrzeug im Speziellen und der Technologie im Allgemeinen als kompatibel angesehen. Alle Sicherheitsaspekte für elektrische Bahnanlagen sowie die Wechselwirkungsfreiheit gegenüber beispielsweise Leit- und Sicherungstechnik können sich ebenfalls auf schon bestehende Regularien stützen.

Allerdings haben sich einige Abweichungen von der bisherigen Regelwerkslage für den Betrieb von BEMU-Fahrzeugen entwickelt:

- Sinnvoll ist ein Einsatz von Nachladung sowohl im Stand als auch während der Fahrt. um das Potential der BEMU voll auszuschöpfen. Für den Traktionswechsel, der u.a. ein Heben bzw. Senken des Stromabnehmers erfordert, müssen betriebliche Regelwerke angepasst werden, die die Potentiale der BEMU-Fahrzeuge nutzbar machen, aber auch Sicherheitsaspekte berücksichtigen. DB Netz hat dem mit der Ausnahme A 239 zur Richtlinie 408 ("Züge fahren und rangieren") Rechnung getragen, welche mittlerweile in das Regelwerk der Richtlinie 408 integriert wurde.
- Im Stand kann alternativ eine Steckerlösung per Elektrant oder Zugvorheizanlage zum Einsatz kommen, wie es heute schon insbesondere für Abstellung und Vorheizung von Fahrzeugen der Fall ist. Die BEMU-Fahrzeuge müssen dafür ausgerüstet sein, dies ist aber technisch machbar. Allerdings sind die erzielbaren Ladeleistungen per Stecker deutlich geringer, wodurch sich die Ladezeiten entsprechend verlängern. Insbesondere in der Nachtabstellung kann diese Fremdeinspeisung aber eine Möglichkeit sein, die Traktionsbatterien der BEMU-Fahrzeuge zu schonen. [3] Relevant sind hier UIC-Kodex 550 "Elektrische Energieversorgungseinrichtungen für Wagen der Reisezugwagenbauart", sowie UIC-Kodex 552 für Zugsammelschiene bzw. Steckverbindungen.
- Die DB hat in ihrem Regelwerk bereits sog. Oberleitungsinselanlagen (OLIA) spezifiziert, unter denen sowohl während der Fahrt wie auch im Stand geladen werden kann. Diese sind als Streckeninfrastruktur zu betrachten, während es zusätzlich sogenannte Ladestationen gibt, unter denen nur im Stand geladen werden darf. Letztere sind als



Serviceeinrichtung zu betrachten und müssen daher nicht zwingend vom zuständigen Eisenbahninfrastrukturunternehmen errichtet werden (siehe Abbildung 8). [4]

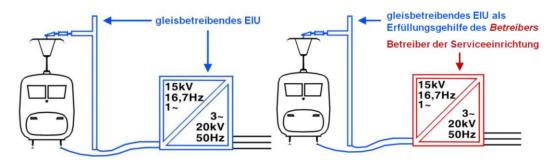


Abbildung 8: Zuständigkeiten Ladeinfrastruktur

- Neben der klassischen Oberleitung mit einer Frequenz von 16,7 Hz wurden auch Ladestationen entwickelt, die eine Frequenz von 50 Hz nutzen wie dies die Netze der
 Stromversorger in den Landesnetzen tun. Die Anpassung der Fahrzeuge hierfür sind
 sehr gering, meist genügt ein Softwareupdate. Diese 50 Hz-Ladestationen kommen mit
 weniger Umrichtertechnik aus und sind daher kostengünstiger. [4]
- Die Positionierung von OLIA oder Ladestationen muss sich am jeweiligen Einzelfall orientieren, grundsätzlich eignen sich Linienenden aufgrund der Wendezeiten der Züge am besten. Zusätzlich muss geprüft werden, ob eine Verlängerung bestehender Oberleitungsinfrastruktur eine valide Option ist, da sie u.U. ohne zusätzliche Einspeisepunkte bzw. Versorgungsinfrastruktur wie Umrichterwerke auskommt. Sollte eine Versorgung nicht über das Bahnstromnetz, sondern über die Landesnetze angestrebt werden, muss frühzeitig der dort zuständige Versorger einbezogen werden. Insbesondere in dünn besiedelten Regionen kann die Netzbelastung durch mehrere gleichzeitig ladende BEMU-Fahrzeuge die verfügbare Landesnetzleistung übersteigen.

1.1.3 Wirtschaftlichkeit und Kostenoptimierung

Um die Wirtschaftlichkeit des batterie-elektrischen Triebzuges darzustellen, wird eine vergleichende TCO-Analyse (total cost of ownership) durchgeführt, die diesen sowohl dem Dieseltriebzug, als auch einer Vollelektrifizierung eines Netzes gegenüberstellt. Als Verfahren wird die Kapitalwertmethode angewendet, welche zeitlich auseinanderliegende Ein- und Auszahlungen in einem Barwert zusammenfasst. Der Barwert (BW) einer Investition über einen Zeitraum T berechnet sich aus der Summe aller mit einem Zinssatz (i) auf das Basisjahr diskontierten Zahlungsströme (Z) [5].

$$BW = \sum_{t=0}^{T} Z(1+i)^{-t}$$

Hierfür wird pro Antriebstechnologie (Diesel, Elektro und Batterie) ein Basisszenario berechnet. Darauf aufbauend werden weitere BEMU-Szenarien entwickelt, bei welchen jeweils genau ein Inputparameter verändert wird. Auf diese Weise wird der Einfluss einzelner Parameter auf die Gesamtwirtschaftlichkeit hervorgehoben. Praktisch besteht ein starker Zusammenhang zwischen den einzelnen Parameter.



Die in der TCO eingesetzten Investitions- (CAPEX) und Betriebsausgaben (OPEX) mit angenommenen Kostenentwicklungen sind in Tabelle 1 dargestellt. Es wird angenommen, dass die Investitionsausgaben mit eigenen Mitteln getätigt werden, somit keine Kapitalkosten anfallen. Weiterhin wird ein Kalkulationszinssatz von 1,7 % gesetzt. Alle Ausgaben werden auf das Basisjahr 2021 diskontiert. Die Projektdauer wird auf die Fahrzeuglebensdauer gesetzt. Die nach der Projektlaufzeit verbliebenen Restwerte (z.B. bei der Oberleitung) werden vom finalen Szenariowert abgezogen. In Tabelle 2 sind die verwendeten Fahrzeug- und Infrastrukturparameter für die jeweiligen Szenarien zusammengefasst.

Tabelle 1: CAPEX und OPEX Parameter für die TCO-Analyse

Investitionsausgaben (CAPEX)						
	Kosten pro Einheit	Lebensdauer	Entwicklung			
Basisfahrzeug DMU	4,5 Mio. €	30	-			
Basisfahrzeug BEMU	5 Mio. € [6]	30	-			
Basisfahrzeug EMU	4,5 Mio. € [6]	30	-			
Batteriesystem (NMC/C)	750 €/kWh [7]	6	-2 % p.a.			
Dieselpowerpack	160.000 € [8]	3	1.5 % p.a.			
Ladestation	1 Mio. €	30	-			
Oberleitung	1 Mio. €/km	70	-			
	Betriebsausgaben (OPEX)					
Instandhaltung DMU	1,02 €/km [8]	-	1.5 % p.a.			
Instandhaltung EMU/BEMU	0,69 €/km [8]	-	1.5 % p.a.			
Dieselkosten	1,20 €/I	-	4 % p.a.			
Stromkosten	0,13 € /kWh	-	4 % p.a.			

Tabelle 2: Übersicht der betrachteten Szenarien; fett markiert sind die einzeln variierten BEMU-Parameter, die sich vom Basisszenario unterscheiden.

Szenario	Fahrzeug- km	Anzahl Fahr- zeuge	Durchschn. Energiebe- darf	Installierte Batterieka- pazität	Batterie- lebens- dauer	Anzahl Ladesta- tionen	Oberlei- tung
DMU			1,1 l/km	-		-	
EMU			4,5 kWh/km	-			140 km
BEMU_sz0	150.000	⁰⁰ 15	5 kWh/km	800 kWh	6 Jahre	5	
BEMU_sz1	km/a		5 kWh/km		6 Jahre	10	
BEMU_sz2			5 kWh/km		4 Jahre	5	
BEMU_sz3			6 kWh/km			5	

In Abbildung 9 sind die Lebenszykluskosten der Szenarien dargestellt. Es ist erkennbar, dass das Szenario mit den Dieselfahrzeugen die höchsten Kosten über die Projektlaufzeit verursacht. Dieser Wert ist vor allem auf die Energiekosten, die mehr als 40 % ausmachen, zurückzuführen. Die Elektrifizierung des Beispielnetzes mit klassischer Oberleitung mit einer Länge von 140 km führt trotz hohem Investitionsaufwand für die Energieinfrastruktur zu einer Reduktion der Kosten um etwa 10 %. Das liegt grundsätzlich an den niedrigen Energiekosten des elektrischen Betriebs. Die Elektrifizierungskosten eines Netzes / einer Strecke sind sehr stark von den lokalen Gegebenheiten abhängig. Somit ist eine Prognose über die anfallenden Kosten ohne bauliche



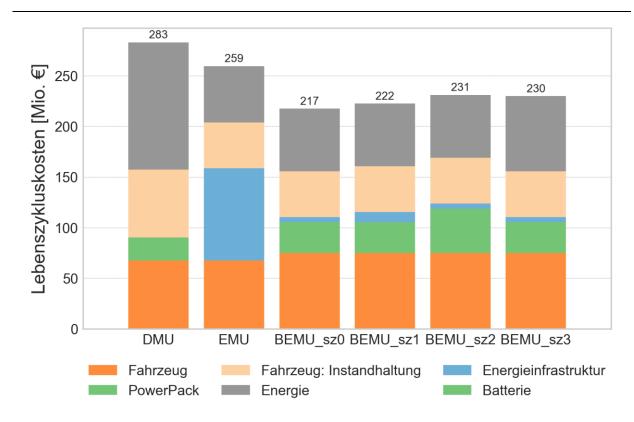


Abbildung 9: Lebenszykluskosten der jeweiligen Szenarien

Vorplanung nur bedingt machbar. Untersuchungen zeigen, dass eine Streckenelektrifizierung mit Blick auf das Betriebsprogramm untersucht werden sollte und in der Regel ab einem Halbstundentakt die günstigste Lösung ist [8].

Weiterhin wird deutlich, dass alle BEMU-Szenarien unter den betrachteten Randbedingungen die günstigste Alternative sind. Verglichen mit den Dieselszenario werden die Lebenszykluskosten für das BEMU-Sz0 um 25 % reduziert. Kostensteigerungen können bei BEMU-Betrieb bei deutlich verringerten Lebensdauern der Batterie auftreten (Szenario 2). Zwar wurden im Vorfeld der Integration der Batterien entsprechende Belastungstests durchgeführt, trotzdem ist ein dauerhaftes Monitoring der Batterien nach Betriebseinführungen sinnvoll, um eventuell von der Planung abweichende Lebensdauern frühzeitig zu erkennen. Dennoch verbleibt in diesem Szenario eine Ersparnis gegenüber dem Dieselszenario von 20 %. Die Verdopplung der Anzahl Ladestationen erhöht die Gesamtkosten nur marginal, da, wie zu sehen ist, die Energieinfrastruktur einen eher geringen Anteil an den Kosten hat. Allerdings ist dies sehr von der notwendigen Ladeinfrastruktur abhängig; so können Elektrifizierungen im komplexen Umfeld wie bei Tunneln oder Brücken erhebliche Kostensteigerungen verursachen.

Grundsätzlich ist der Einsatz von BEMU-Fahrzeugen nicht in allen Fällen wirtschaftlich den Alternativen überlegen. Aufgrund der Vielzahl an Linien mit kurzen nichtelektrifizierten Abschnitten kann aber von einer guten wirtschaftlichen Anwendbarkeit für einen größeren Anteil an bislang dieselbetriebenen Linien ausgegangen werden.

Kostenoptimierung

Bei der Auslegung eines Netzes für den Betrieb mit BEMU können insbesondere Oberleitungserweiterungen, -inselanlagen und Ladestationen aufgebaut oder die Batteriekapazität angepasst werden. Es wurde ein Verfahren entwickelt, um eine solche Auslegung kostenoptimal für



eine Linie oder ein Gesamtnetz vorzunehmen. Für die Bestimmung der Batterielebensdauer (berücksichtigt wird hier nur die zyklische Alterung) wird das Rainflow-Verfahren verwendet, welches die Anzahl der Zyklen (vereinfacht) in Abhängigkeit der Entladetiefe ermittelt. Der nötige Batterieladestandsverlauf der Fahrzeuge wird über die fachgebietsinterne Simulationssoftware eFLIPS ermittelt. Die Auswahl punktueller Ladestationen erfolgt statisch (Elektrifizierung der Endhaltestellen und beim Überschreiten einer definierten Mindesthaltedauer), Oberleitungen werden abschnittsweise (Segmente) zwischen zwei Bahnhöfen errichtet. Variable Batteriekapazitäten werden berücksichtigt, indem die Optimierung für jede Batteriekapazität einzeln erfolgt und aus allen entstehenden Lösungen die günstigste gewählt wird. Das entwickelte Modell wird beispielhaft auf das Dieselnetz des Verkehrsverbundes Oberelbe (VVO) angewendet. Der benötigte Umlaufplan wurde anhand der Fahrplandaten 2020 erstellt. Rechnerisch werden 13 Fahrzeuge für das Gesamtnetz benötigt.

Im verwendeten Modell verfügen alle Fahrzeuge über die gleiche Konfiguration (Fahrzeugparameter, Traktionsbatterie). Die Batteriekapazität wird zwischen 350 kWh bis 800 kWh in einer Schrittweite von 150 kWh variiert. Es wird die Annahme getroffen, dass Zyklen mit einer Entladetiefe von unter 10 % (Mikrozyklen) keinen nennenswerten Einfluss auf die Batteriealterung haben. Der Traktionsenergiebedarf wird aus einer konstanten Komponente und der potentiellen Energie, die aus dem Fahrzeuggewicht und den Höhenprofil der Strecke hervorgeht, berechnet. Die Fahrzeugkosten werden nur als Differenzkosten betrachtet. Die Kostensätze für die Optimierung können aus Tabelle 1 entnommen werden. Die zusätzlichen Simulationsparameter sind in Tabelle 3 erläutert.

Tabelle 3: Simulationsparameter für die Optimierung

Simulationsparameter				
Leermasse	121.000 kg			
Nebenbetriebe	100 kW			
Traktionsenergiebedarf (ohne Steigung)	4,5 kWh/km			
Wirkungsgrad Entladen	0,95			
Wirkungsgrad Laden	0,95			
Wechselzeit Oberleitungs- zu Batteriebe- trieb	15 s			

Die Kapitalwerte der Ergebnisse und zum Vergleich die durch die Optimierungsfunktion ebenfalls bestimmten Kosten für die Vollelektrifizierung sind in Tabelle 4 dargestellt. Der Algorithmus wählt die Lösung für 800 kWh als optimale Infrastruktur für dieses Netz aus. Die Ergebnisse stellen eine erste Annäherung an das optimale Ergebnis dar, da zum einen die Schritte zwischen den betrachteten Batteriegrößen noch recht groß sind und zum anderen diverse Details in der Betrachtung noch nicht mit einbezogen sind. Beispielsweise können Elektrifizierungsprojekte je nach Komplexität der Randbedingungen bei gleicher Länger sehr unterschiedlich ausfallen, beispielsweise abhängig davon, ob es sich um eine Erweiterung einer bestehenden Oberleitung oder eine neu zu versorgende OLIA handelt.

Tabelle 4: Ergebnisse der Optimierung (in Mio. €)

Szenario	Gesamt-	Ladeinfrastruktur-	Batterie-	Einsparung ggü.
	kosten	kosten	kosten	Vollelektrifizierung
	KOSteri	ROSteri	ROSIGII	vollelektrilizierung



Vollelektrifizierung	190,79	-	-	-
350 kWh	176,57	40,75	30,44	7,5 %
500 kWh	166,62	32,31	29,62	12,7 %
650 kWh	157,88	23,99	29,46	17,2 %
800 kWh	157,47	24,06	29,66	17,5 %

Die zu den vier Batteriekapazitäten jeweils gehörigen Mengen an (Neu-)Elektrifizierungen, die laut dem Algorithmus zu einem Kostenminimum bei dieser Batteriekapazität führen sowie vergleichend die Bestandselektrifizierungen, sind in Abbildung 10 und Abbildung 11 dargestellt. Die Linien sind als anschauliches Beispiel dem Dieselnetz der Verkehrsverbundes Oberelbe nachempfunden:

- Linie 248: Pirna Neustadt Sebnitz
- Linie 246: Heidenau Altenberg
- Linie 227: Kamenz Dresden Hbf
- Linie 226: Dresden Hbf Königsbrück

Orange gekennzeichnete Stationen und Segmente verfügen über eine Elektrifizierung in Form von Oberleitungen beziehungsweise punktuellen Ladestation, grau dargestellte nicht. Der Unterschied der benötigten Ladeinfrastruktur ist deutlich zu erkennen, trifft aber noch keine Aussage über die konkrete Machbarkeit der vorgesehenen Infrastruktur.

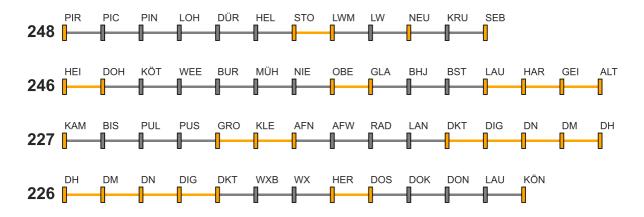


Abbildung 10: Optimale Infrastruktur für 350 kWh Batteriekapazität

Zur Gesamtbetrachtung würden wie bereits angedeutet auch noch betriebliche Elemente wie Änderungen des Fahrplan- und Wendezeitkonzeptes gehören sowie die Betrachtung, ob ein eventueller BEMU-Fahrzeugmehrbedarf trotzdem die wirtschaftlichere Lösung sein kann, was allerdings algorithmisch anspruchsvoll zu implementieren wäre. Der vorliegende Optimierungsansatz bietet eine erste Perspektive, wie das Verhältnis von Fahrzeug- zu Infrastrukturausstattung im Optimalfall aussehen kann. Ob es sinnvoll ist, für detaillierte Untersuchungen von Netzen einen Optimierer mit der notwendigen Detailfülle auszustatten und alles mathematisch zu beschreiben, ist aufgrund der Vielzahl der zu betrachtenden und je nach Netz sehr unterschiedlich ausgeprägten Randbedingungen fraglich und konnte im Rahmen des Projektes nicht abschließend beantwortet werden. Die während der Projektlaufzeit von verschiedenen Akteuren



durchgeführten Machbarkeitsstudien deuten eher darauf hin, dass eine manuelle Bearbeitung der Detailplanung der bessere Ansatz ist, allerdings ist es möglich, zumindest als erstes Grundgerüst die mathematische Optimierung zu nutzen.

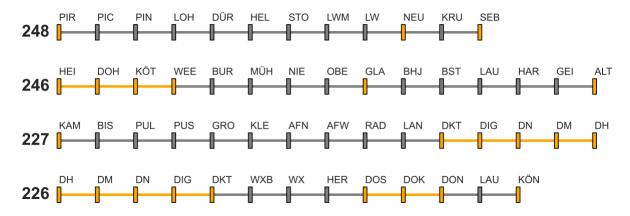


Abbildung 11: Optimale Infrastruktur für 800 kWh Batteriekapazität

1.1.4 Umweltbilanz

Die Untersuchung der Umweltbilanz umfasst neben den Treibhausgasen auch die Luftschadstoffe, die beim Betrieb der Fahrzeuge entstehen. Zusätzlich werden die Emissionen auf Grund der Herstellung und Entsorgung der Traktionsbatterien beim BEMU betrachtet. Die Treibhausgase werden als CO2-Äquivalente (CO2eq) dargestellt. Sie fassen das Treibhausgaspotential der Treibhausgase Kohlendioxid (CO2), Methan (CH4) und Lachgas (N2O) aus dem "Fifth Assessment Report" (AR5) des IPCC, der in 2013 erschienen ist, zusammen [9]. Die Emissionen der für den Vergleich genutzten Energieträger sind in Tabelle 5 dargestellt.

Energieträger CO₂-Äquivalente (Well-2-Wheel)

Diesel 3170 gCO2eq/l [10]

Deutscher Strommix 2020 366 gCO2eq/kWhel [11]

Bahnstrommix 2021 193 gCO2eq/kWhel [12]

Wasserkraft 3.97 gCO2eq/kWhel [13]

Windkraft offshore 5.998 gCO2eq/kWhel [13]

Batterieherstellung und -entsorgung 65 kgCO2eq/kWh [14]

Tabelle 5: CO₂-Emissionen der Energieträger

Zu dieser Betrachtung gehören auch der Einbezug der passenden Schadstoffwerte sowie die spezifischen Emissionsfaktoren des deutschen Strommix im Bearbeitungsjahr des Arbeitspaketes (2020). Diese wurden mit 0,169 gCO₂/kWh, einem NOx-Wert von 0,355 g/kWh_{el} sowie einem PM₁₀-Wert von 0,008 g/kWh angenommen [15]. Der Vergleich der Schadstoffe basiert auf den von der Direktive 2004/26/EC [16] bestimmten Normen für Dieseltriebzüge, welche in Tabelle 6 aufgestellt sind.

Tabelle 6: Stage III B Standards for Rail Traction Engines [16]

Category	Net Power	Market Placement Date	СО	HC	NOx	PM ₁₀



	[kW]		<u> </u>	[g/k\	Wh]	
RC B (railcar)	130 <p< td=""><td>01.2012</td><td>3,5</td><td>0,19</td><td>2,0</td><td>0,025</td></p<>	01.2012	3,5	0,19	2,0	0,025

Für das Dieselfahrzeug wird ein Dieselverbrauch von 1,1 l/km angenommen. Der Verbrauch des batterie-elektrischen Triebzuges liegt für diese Berechnung bei 5 kWh/km. Als Energiespeicher wird eine NMC/C-Batterie mit einer Gesamtkapazität von 600 kWh und Lebensdauer von 6 Jahren angenommen. Zusätzlich wird ein Stromnetzwirkungsgrad von 94 % und 160 Sitzplätze pro Fahrzeug zugrunde gelegt. Die Ergebnisse basieren auf eine Laufzeit von 30 Jahren. In Abbildung 12 sind die Treibhausgasemissionen pro Sitzplatz und Kilometer dargestellt.

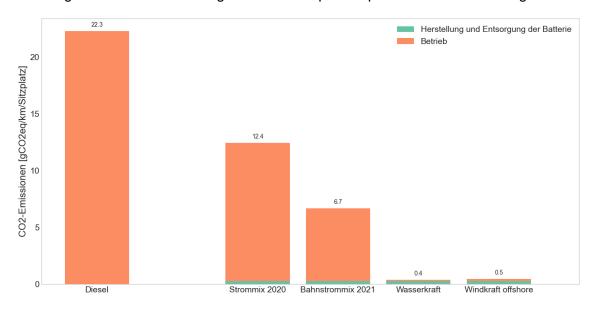


Abbildung 12: Treibhausgasemissionen der jeweiligen Szenarien

Der mittlerweile erreichte Anteil emissionsarmer Energieträger im deutschen Strommix macht den BEMU-Betrieb bereits heute deutlich emissionsärmer als den Dieselbetrieb, auch unter Berücksichtigung der Emissionen aus der Herstellung der Traktionsbatterien. Werden ausschließlich erneuerbare Energien genutzt, können die Treibhausgasemissionen um bis zu 98 % reduziert werden, selbst wenn die Bilanz der Batterieherstellung über den Zeitraum von 30 Jahren statisch bleibt. Bei hohen Laufleistungen (hier: 150.000 km/a) der Triebzüge umfasst der Emissionsanteil der Batterieproduktion einen vernachlässigbar geringen Anteil bezogen auf die Szenarien mit Bahnstrommix sowie allgemeinem Strommix.

Der Vergleich der Schadstoffe ist in Abbildung 13 gezeigt. Für den BEMU wird nur der deutsche Strommix 2020 als Referenz genommen, da die Stromerzeugung mit Wind, Wasser oder Photovoltaik (PV) kaum Schadstoffe emittiert. Darüber hinaus entstehen bei der heutigen Stromerzeugung keine Kohlenwasserstoffe. Im Vergleich zum DMU entstehen beim batterie-elektrischen Triebzug keine lokalen Schadstoffe. Somit kann der Zug auch künftig uneingeschränkt eingesetzt werden, u.a. in Innenstädten und gegenüber den DMU zusätzlich in bis zu 5 km langen (City-)Tunneln.

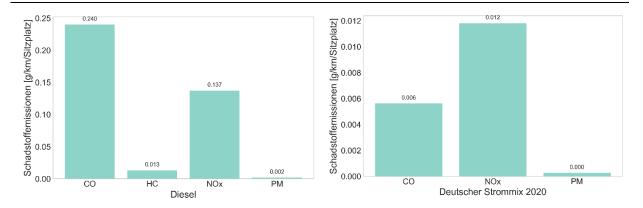


Abbildung 13: Vergleich der Schadstoffemissionen beim Diesel und dem deutschen Strommix 2020

1.1.5 Probebetrieb

Im Rahmen des Kapitels werden die Ziele des Probebetriebs vorgestellt. Die Vorgehensweise bei der Auswahl geeigneter Strecken, sowie die Gestaltung des Betriebsprogramms werden erläutert. Darauf aufbauend wird auf die Methodik der Datenauswertung eingegangen sowie die Vorstellung ausgewählter Ergebnisse.

Die Durchführung des Probebetriebs ist entscheidend nicht nur für die Validierung des BEMU-Konzeptes, sondern auch für die Gewinnung wertvoller Erkenntnisse für die Weiterentwicklung künftiger Serienfahrzeuge. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden Ziele definiert, die in vier Gruppen geclustert werden können und in Abbildung 14 zusammengefasst sind.

Erkenntnisse für den BEMU-Betrieb / Praxistauglichkeit des Konzepts

- Evaluation des Betriebskonzeptes
- Reichweite im Batteriemodus
- Energiemanagement
- Störfälle
- Umlaufplangestaltung

Einflüsse auf die Teilsysteme

- Einflussfaktoren auf den Energiebedarf (Traktion, Nebenverbraucher)
- Einflüsse auf das Batteriesystem
- Optimierung der jeweiligen Systeme und ihr Zusammenspiel

Validierung der Simulationsmodelle

- Validierung bestehender Tools zur Simulation und Auslegung
- Die Grundlagen zur Planung des künftigen BEMU-Betriebs werden verbessert

Akzeptanzstudie

- Befragung von Fahrgästen und Trassenanwohnern
- Verknüpfung der Aussagen mit aufgenommenen Daten (z.B. Fahrgastraumtemperatur)

Abbildung 14: Überblick über die Ziele des Probebetriebes

Mit DB Regio als assoziiertem Projektpartner war bereits im Voraus ein Betreiber-EVU festgelegt, welches in der vorgesehenen Probebetriebs-Region zahlreiche SPNV-Linien betreibt. Die sich daraus ergebenden Möglichkeiten zur Erprobung waren auf BEMU-spezifische Anforderungen sowie auf weitere allgemeine Einsatzkriterien für das Demonstratorfahrzeug zu prüfen. Die Entscheidung über einen Fahrgastprobebetrieb ist als mehrstufiger Prozess zwischen den beteiligten Projektpartnern erfolgt. Basierend auf einer gemeinsamen Identifikation potentiell geeigneter Linien hat der Betreiber verschiedene Betriebsprogramm-Vorschläge vorgelegt. Im zweiten Schritt wurde eine Ersteinschätzung der technischen Machbarkeit vorgenommen, welche die Analyse der Infrastruktur auf Ausschlusskriterien sowie eine energetische Rechnung bezüglich der notwendigen Reichweiten und Wendezeiten im Batteriebetrieb beinhaltet. Bei positivem Zwischenstand erfolgte schließlich eine Bewertung der Erfüllung abzubildender



Testfälle. Erst nach Bestehen aller dieser Prüfschritte erfolgt abschließend eine detaillierte energetische Verifizierung des Betriebsprogramms inklusive Störfallbetrachtung.

Im gemeinsamen Abstimmungsprozess zwischen Betreiber, Fahrzeughersteller und Universität fiel die Wahl auf einen unterwöchigen Fahrgastprobebetrieb auf der Gäubahn zwischen Stuttgart und Horb, der vornehmlich einen Verstärkerzugbetrieb mit zahlreichen vergleichsweisen kurzen Zugfahrten beinhaltet. Die vollständig elektrifizierte Gäubahn ist geeignet, das Portfolio der Testfälle bestmöglich abzubilden. Der gewonnene Freiheitsgrad, maßgeschneiderte Betriebsszenarien mit infrastrukturunabhängigen Traktionswechseln durchzuführen, überwiegt die möglicherweise als zurückhaltend wahrgenommene Außenwirkung eines Probebetriebs mit fortwährend vorhandener Rückfallebene (Oberleitung). Zusätzlich wurde an ausgewählten Wochenenden einen Betrieb auf der nicht elektrifizierten Strecke Pleinfeld – Gunzenhausen mit dem BEMU unter realen infrastrukturellen Bedingungen umgesetzt. Nachladungen waren dort lediglich an den Endpunkten im Stand möglich.

Es wurde eine grafische Repräsentation der örtlich variierenden Systemwechsel entlang der Gäubahn erarbeitet, um dem Fahrpersonal eine kompakte Darstellung der Handlungsanweisung zu ermöglichen. Ein Ausschnitt daraus mit der dazugehörigen Nomenklatur ist auf Abbildung 15 dargestellt. In direkter Koordination mit dem Tf-Ausbildungspersonal wurde die Darstellungsform optimiert und die ergonomische Anbringung in den Führerständen erarbeitet. Die praktische Umsetzung dieses Betriebsmusters der Tf konnte per verbindlicher Dienstanweisung durch das EVU sichergestellt werden.

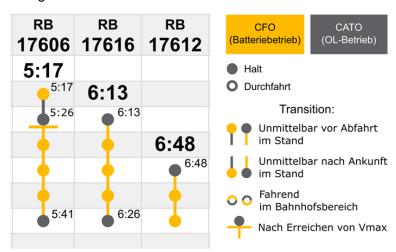


Abbildung 15: Ausschnitt aus der grafischen Darstellung des Betriebsprogramms

Für die Auswertung des Testbetriebs wurden im Fahrzeug eine Reihe fahrdynamischer Daten aufgezeichnet wie etwa Traktionsleistung oder der Batterieladezustand. Zusätzlich wurden Verspätungs- und Ausfalldaten von DB Regio verarbeitet und es bestand für die Tf die Möglichkeit, eine Rückmeldung an das Projektteam abzusetzen, um Störungen am Fahrzeug oder betriebliche Störungen zu melden, deren Ursache aus Sensordaten nicht zu erfassen ist (siehe Abbildung 16).



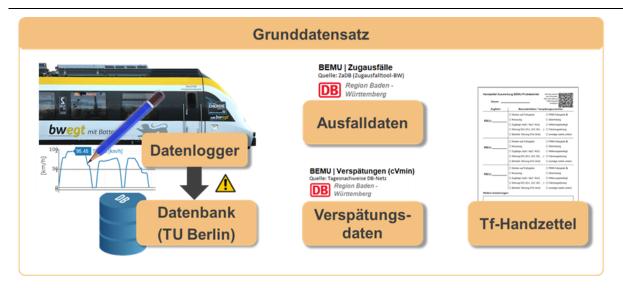


Abbildung 16: Übersicht der gesammelten Daten aus dem Probebetrieb

Im Folgenden werden drei Beispiele für Ergebnisse des Testbetriebs vorgestellt. Insgesamt hat sich gezeigt, dass durch die vielen gleichartigen Fahrten eine ausreichende Datenmenge für eine wissenschaftliche Auswertung vorhanden ist. Insbesondere die Strecke Pleinfeld – Gunzenhausen mit ihrem übersichtlichen Streckenprofil (s. Abbildung 17) bietet hier vielfältige Vergleichsmöglichkeiten. Die Größen und Verläufe der gemessenen Werte im Fahrzeug sind durchgängig plausibel und liegen im Bereich der Erwartungen.

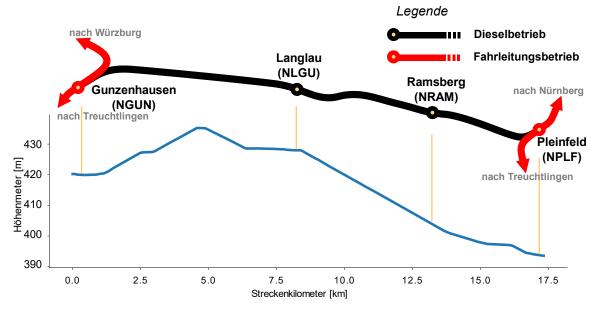


Abbildung 17: Lageplan / Höhenprofil der Testbetriebs-Strecke Gunzenhausen - Pleinfeld

1. Beispiel: Die Auswertung der Daten erfolgte segmentweise, wobei ein Segment ein Abschnitt zwischen zwei Halten ist. Abbildung 18 zeigt, dass einzelne Segmente (je Stationsabschnitt und Fahrtrichtung) abgetrennte Punktwolken erzeugen. Jeder Punkt stellt eine Fahrt im Testzeitraum dar. Die in Abbildung 17 ersichtlichen Höhenunterschiede sind im Traktionsenergiebedarf je Fahrtrichtung abgebildet, so dass der große Einfluss der Topographie auf den Energiebedarf deutlich wird. Zwischen Gunzenhausen und Langlau mit nur geringer Höhendifferenz liegen die Punktwolken daher nahezu deckungsgleich übereinander, die häufig langsameren Fahrten in Richtung Gunzenhausen sind mit der Einfahrgeschwindigkeit in den Bahnhof zu begründen. Es



ist davon auszugehen, dass die Streuung innerhalb der einzelnen Segmente auf die Fahrweise der Tf zurückzuführen ist.

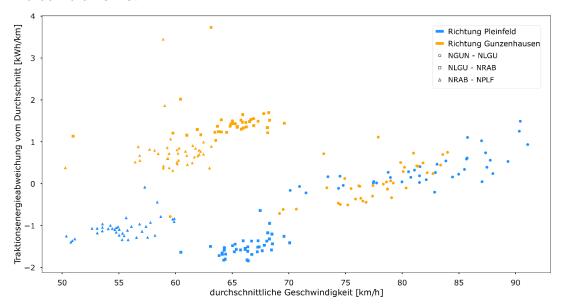


Abbildung 18: Traktionsenergie in Abhängigkeit der Durchschnittsgeschwindigkeit

2. Beispiel: Ein Vorteil von BEMU gegenüber DMU ist, dass Energie, die bei (elektrischen) Bremsvorgängen generiert wird, in die Batterie zurückgespeist werden kann (analog zum Rückspeisen in die Oberleitung unter Fahrleitung). In Abbildung 19¹ finden sich dieselben Punktwolken analog zu Abbildung 18, diesmal allerdings als Verhältnis der Rekuperations- zur verbrauchten Traktionsenergie pro Segment.

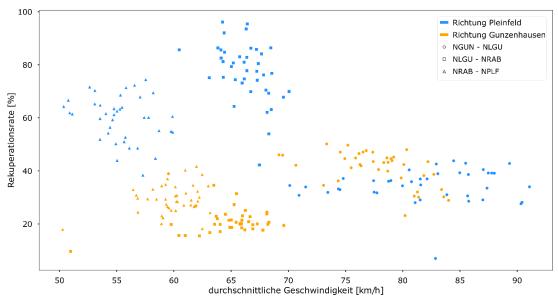


Abbildung 19: Verhältnis Traktions- zu Rekuperationsenergie

Die starke Streuung der Rekuperationsrate ist erneut mit den Höhenunterschieden der Strecke sowie der gewählten Fahrweise erklärbar und verdeutlicht das Potential, auch ohne Fahrleitung Nutzbremsungen durchzuführen. Theoretisch können bei längerer Talfahrt Rekuperationsraten

¹ Aufgrund der öffentlichen Zugänglichmachung des Berichtes wurden die Zahlen der Skala entfernt.



Seite

sich aus potentieller Energie ergeben, die vom Fahrzeug zuvor bei der Bergfahrt aufgenommen wurde. So ist es möglich, dass hier bis zu 80 % der für die Traktion entnommenen Energie wieder in die Batterie zurückgespeist werden kann.

3. Beispiel: Aufgrund der gestiegenen Komfortanforderungen in Bezug auf die Innenraumklimatisierung im Vergleich zu früheren Generationen von Akkufahrzeugen spielt der Energiebedarf der Hilfsbetriebe eine gewichtige Rolle für die Auslegung und den Betrieb des Fahrzeuges. Den Erwartungen entsprechend zeigt sich bei der Betrachtung der Hilfsbetriebeleistung bis zu 15°C Außentemperatur ein sinkender Verlauf mit steigender Außentemperatur (s. Abbildung 20). Zumeist wurden zwischen 40 und 60 % der maximalen Fahrzeug-Hilfsbetriebeleistung abgerufen. Im Bereich von Umgebungstemperaturen zwischen 15 und 20 °C ist der minimale Hilfsbetriebebedarf zu erwarten. Bei darüberhinausgehenden Temperaturen wird dann die Kühlung des TBS sowie des Fahrgastraums notwendig, so dass die durchschnittliche abgerufene Leistung wieder ansteigt. Auf Grund des Testbetriebsendes vor den Sommermonaten zum 01.05.2022 konnten derartige Datensätze im Projektrahmen nicht mehr erfasst werden.

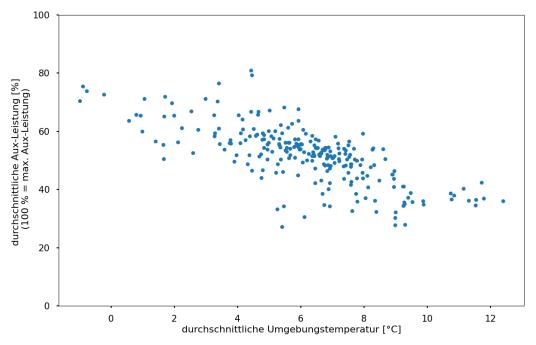


Abbildung 20: Hilfsbetriebeleistung in Abhängigkeit der Außentemperatur

Im Rahmen des Testbetriebes konnten ausreichende Reserven im Bereich der Batteriekapazität nachgewiesen sowie die erfolgreiche Bewältigung von Störeinflüssen demonstriert werden. Die gestellten Anforderungen wurden erfüllt, sodass insgesamt ein positives Fazit gezogen werden kann.

Akzeptanzstudie

Zielstellung der Akzeptanzstudie war der Einbezug der an einem Wechsel von DMU- auf BEMU-Betrieb betroffenen Akteure, da bei größeren Veränderungen von Arbeitsalltag oder Wohnumfeld eine Ermittlung von möglichen Hemmnissen der Akzeptanz der neuen Technologie eine entscheidende Rolle spielt, um solche Risiken im Vorfeld zu adressieren und Lösungen mitzuentwickeln. Im Rahmen dieser Studie wurden sowohl Fahrgäste und Anwohner befragt, als auch Triebfahrzeugführer und weitere Entscheidungsträger interviewt. An dieser Stelle wird eine



kurze Zusammenfassung der Ergebnisse in Form von Stichpunkten vorgestellt. Die vollständige Studie ist in einem separaten Bericht zu finden.

Es wurde ein sehr homogenes, positives Stimmungsbild über alle Teilnehmer an der Studie erfasst. Einige Meinungen sind hier aufgelistet:

- Fahrgäste und Anwohner

- Erwartung: BEMU sind besser für die Umwelt, besseres Fahrverhalten und weniger Lärm als die Dieselfahrzeuge
- Die Einführung weiterer Linien, die mit BEMU betrieben werden, wird stark befürwortet
- Vereinzelt Bedenken wegen möglicher Batteriebrände, der Energieerzeugung (CO₂-neutral) oder der Batterieherstellung (u. A. Abbau von Lithium und Kobalt)

Triebfahrzeugführende:

- Fahrzeughandhabung (insb. die Batteriefunktionen und die Umschaltung zwischen Oberleitungs- und Batteriebetrieb) wird nicht als Zusatzaufwand wahrgenommen
- o Arbeitsalltag bleibt eher unverändert
- BEMU-Prinzip wird als eine "sehr gute Sache" bezeichnet, nicht nur als Haupttechnologie für bestimmte Linien, sondern auch als Überbrückungstechnologie, falls Oberleitung irgendwann gebaut wird.

Lärmemissionen / betriebliche Vorteile

Eine besondere Rolle innerhalb der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung spielen Aspekte, die nur durch komplexe Annäherungen zu monetarisieren sind.

Dies betrifft zum einen den Bereich Lärmemissionen durch Schienenfahrzeuge, der insbesondere innerhalb geschlossener Ortschaften von großer Bedeutung unter anderem für die Akzeptanz des Bahnverkehr ist. Intensive Recherchen zu entsprechenden Methodiken (u.a. des BVWP-Handbuches) zeigten, dass eine umfassende Berücksichtigung dieser Thematik innerhalb der Wirtschaftlichkeitsberechnung nicht möglich ist, da unter anderem viele hierfür notwendige Daten nicht zur Verfügung stehen. Beispielsweise bemisst sich der Nutzen von Lärmreduktion unter anderem in Abhängigkeit der von der Verbesserung erfassten Personen. Selbst bei einer vereinfachten Betrachtung wäre dies aufgrund der sehr unterschiedlich verteilten Bevölkerungsdichten entlang der dieselbetriebenen SPNV-Linien nicht möglich gewesen. Insgesamt steht aber durch den Einsatz von BEMU-Fahrzeugen aufgrund des vollelektrischen Betriebs eine Reduktion des direkt von Komponenten des Fahrzeuges verursachten Lärms zu erwarten. Im Vergleich zu EMU-Fahrzeugen sind allerdings besonders in Standzeiten die Geräuschemissionen der Batterieladung zu beachten.

Weiterhin stehen durch BEMU-Fahrzeuge Vorteile zur Verfügung, die sich in planerisch-betrieblicher Hinsicht niederschlagen. Hierzu gehören unter anderem die Ausnutzung der höheren Traktionsleistungen elektrischer Triebfahrzeuge, die unter Berücksichtigung infrastruktureller Randbedingungen kürzere Reisezeiten ermöglichen können. Die mögliche Kombination von EMU- und BEMU-Fahrzeugen gleicher Fahrzeugplattformen ermöglicht gemeinsame



Ausschreibungsnetze sowie Linienverknüpfungen und umsteigefreie Verbindungen, die bislang nicht oder nur unter Inkaufnahme längerer Dieselfahrten unter Oberleitung möglich waren. Dies ist kaum in konkrete Geldbeträge umzurechnen, grundsätzlich sind aber schnellere und mit weniger Umsteigen behaftete Verbindungen attraktiver für Fahrgäste.

1.1.6 Zulassung

Im Vordergrund dieses Arbeitspaketes standen Zulassungsfragen, die sich auf die zusätzlich im Fahrzeug integrierten Teilsysteme bzw. die daraus resultierenden Veränderungen auf das Gesamtfahrzeug, beispielsweise im Hinblick auf die höhere Masse. Begleitend zu den Hauptaktivitäten von Alstom wurden in Workshops und Austauschrunden mit den beteiligten Akteuren die anzuwendenden Normen und Richtlinien erarbeitet.

Hier sind die DIN EN 50126-1/2 sowie DIN EN 50657 und DIN EN 50129 zu nennen, die neben der Fahrzeugtechnik selbst auch relevante Regelungen zu Signalerkennung und Fahrzeugsoftware enthalten, was insbesondere im Hinblick auf Fehlerdetektion sowie Branderkennung eine entscheidende Rolle spielt. Entsprechend wurden Sicherheitsziele mit zugehöriger THR (tolerable hazard rate) definiert, welche sich u.a. bezogen auf:

- Verhinderung von Explosion und Bersten
- Verhinderung eines elektrischen Schlages
- Verhinderung von Schäden am Batteriesystem bei herabfallender Oberleitung
- Verhinderung der Einleitung von Rauchgasen in den Fahrgastraum

Entscheidend für den Erfolg der Zulassung war die frühzeitige Einbeziehung der Gutachter, um sämtliche Sicherheitsthemen parallel zur Entwicklung zu adressieren und die Möglichkeit für eventuell notwendige Anpassungen offenzuhalten. In weiteren Schritten fand auch ein Review der für das Fahrzeug neu angefertigten Dokumente statt, beispielsweise angepasste Einsatzmerkblätter sowie die einschlägigen Abschnitte des Betriebs- und Störungshandbuches für die gesamte Fahrzeugfamilie. Für den Probebetrieb wurden dabei auch die Feuerwehren entlang der gewählten Teststrecken einbezogen.

1.1.7 Grenzüberschreitende Verkehr / Reaktivierungen / Touristikverkehre

Grenzüberschreitende Verkehre

Die Einsatzpotentiale von BEMU umfassen grundsätzlich die Überbrückung fahrleitungsloser Abschnitte. Zu diesen können neben klassischen, nicht-elektrifizierten Strecken auch weitere Abschnitte gezählt werden: dazu gehören auch etwaige Elektrifizierungen mit anderen Bahnstromsystemen, die für den jeweiligen BEMU im Fahrleitungsbetrieb nicht nutzbar sind. Derartige Konstellationen sind vor allem im grenzüberschreitenden Betrieb zu finden, weshalb eine vertiefte Untersuchung derartiger SPNV-Linien im Projekt BEMU vorgenommen wurde.

Neben der Fahrzeugenergieversorgung ist im grenzüberschreitenden Kontext auch die Ausrüstung mit ggf. nationalen Zugsicherungssystemen umzusetzen. Im Rahmen dieser BEMU-Untersuchung ist das Teilproblem im Hinblick bestehender Grenzverkehre mit Dieseltriebwagen (DMU) und Mehrsystem-Elektrotriebzügen (MS-EMU) als lösbar eingestuft worden. Exemplarische Herstellerabfragen im Hinblick auf BEMU stützen diese Annahme.



Im Fokus der Untersuchung stehen 62 Gleis-Grenzübergänge von Deutschland zu seinen Nachbarländern, wobei auch ehemalige Gleis-Grenzübergänge als Reaktivierungskandidaten einbezogen wurden. 14 Linien, vor allem nach Österreich und in die Schweiz, sind mit 15 kV-Bahnstromsystem durchgehend elektrifiziert und können mit konventionellen EMU betrieben werden. Darüber hinaus wurden die zu untersuchenden Linien wie folg gegliedert, wobei es zwischen den Kategorien teils Überschneidungen gibt:

- (1) 14 durchgehend, aber mit verschiedenen Bahnstromsystemen elektrifizierte Linien des Bestandsnetzes
- (2) 35 Linien mit oberleitungsfreien Abschnitten im Bestandsnetz
- (3) 20 Reaktivierungskandidaten

Die Elektrifizierungsquoten der jeweiligen Linien sind im linken Teil der Abbildung 21 nicht-topologisch aufgetragen; im rechten Teil der Abbildung sind für mehrere Linien exemplarische Verteilungen angegeben. Der Elektrifizierungsgrad ist bei (1) und (2) höher als bei den Binnenlinien und steigt unter Einbezug der grenzüberschreitenden Reaktivierungskandidaten weiter an. Lediglich 3 Linien haben keinerlei Zugang zu Fahrleitung.

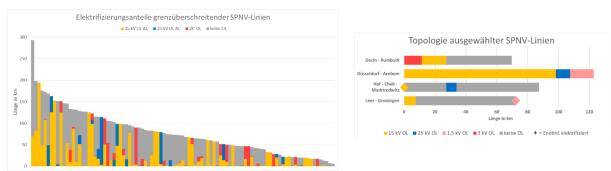


Abbildung 21: Elektrifizierungsanteile grenzüberschreitender SPNV-Linien (links), ausgewählte Beispiele (rechts)²

Die betriebliche Analyse offenbart, dass im Grenzverkehr verschiedenste Bedienmuster teils ohne feste Taktung sowie im Saison- und Gelegenheitsverkehr häufig vorzufinden sind. Dass 4 durchgehend mit verschiedenen Stromsystemen elektrifizierte Linien mit DMU betrieben werden, deutet auf technisch-betriebliche Herausforderungen im grenzüberschreitenden Verkehr hin.

Für alle Linien in (1) – (3) wurden fahrdynamische Simulationen zur Abschätzung des Lade-Infrastrukturbedarfs durchgeführt. Diese zeigen, dass drei Viertel der Linien für einen BEMU-Betrieb keinen Ausbau, eine Ladestation oder maximal 20 km zusätzliche Fahrleitung benötigen. Die in der Untersuchung unterstellten Ausbauten für BEMU-Betrieb sind zu etwa 1/3 deckungsgleich mit ohnehin geplanten Elektrifizierungsprojekten.

In sechs Nachbarländern sind Elektrifizierungsanteile mit dem 25 kV/50 Hz-Bahnstromsystem vorzufinden. Eine Mehrsystemausrüstung für die 15 kV- und 25 kV-Bahnstromsysteme kann technisch durch Einbau eines angepassten Transformators mit geringem Mehrgewicht sowie

² Die Darstellung ist nicht-topologisch und enthält mehrere etwaig kurz-/langlaufende Relationen einer Linie sowie Reaktivierungskandidaten. Für vier dieser Linien ist rechts exemplarisch eine topologische Darstellung der Elektrifizierungsanteile gegeben.



einer Softwareanpassung des Fahrzeugs erzielt werden. Fahrzeughersteller stufen dies auch für BEMU als machbar ein. Derartige Mehrsystem-BEMU (MS-BEMU) würden den Infrastrukturbedarf grenzüberschreitender Linien weiter senken, da 25 kV-Elektrisierungen im Ausland mitgenutzt werden könnten. Darüber hinaus bietet das 25 kV-Bahnstromsystem das Potential, die Standladeleistung von 1,2 MW beim 15 kV-Bahnstromsystem ohne weitere Infrastrukturmaßnahmen auf bis zu 2,0 MW zu steigern. Sofern das Traktionsbatteriesystem auf derartige Ladeleistungen ausgelegt ist, können Nachladezeiten minimiert werden (trifft auf den BEMU Demonstrator nicht zu).

Eine Mehrsystemausrüstung für Gleichstrom-Bahnstromsysteme (DC-Systeme mit 1,5 kV oder 3 kV) ist technisch aufwendiger umzusetzen und wurde hier nicht betrachtet.

Weiterhin wurde eine wirtschaftliche Abwägung bezüglich eines grenzüberschreitenden BEMU-Einsatzes vorgenommen. Für jede Linie wurden dabei zwei Szenarien kalkuliert:

- a. Einsatz von (MS-)BEMU: Betrachtung der Fahrzeugbeschaffung inkl. Batterietauschs (und ggf. MS-Ausstattung) über die Fahrzeuglebensdauer sowie etwaig zu errichtender Nachladeinfrastruktur und Energiekosten.
- b. Einsatz von MS-EMU: Betrachtung der Fahrzeugbeschaffung mit MS-Ausstattung sowie Schließen der Fahrleitungslücken und Energiekosten.

Die Auswertung untermauert zunächst, dass bei durchgehender Elektrifizierung der Einsatz von MS-EMU nicht nur technisch, sondern auch wirtschaftlich sinnvoll ist. Sie zeigt weiterhin, dass bei ausschließlicher Betrachtung des SPNV-Betriebs bei Vorliegen fahrleitungsloser Abschnitte fast immer BEMU wirtschaftlicher sind. Dies gilt bereits für Fahrleitungslücken, die kürzer als 10 km sind. Eine auf das SPNV-Marksegment beschränkte Betrachtung birgt daher die Gefahr, (kurze) Elektrifizierungs-Lückenschlüsse potentiell zu verhindern bzw. Fehlanreize zu setzen.

Es wird daher dringend empfohlen, bei Vorliegen von SPFV bzw. SGV entlang der Gleis-Grenzübergänge eine gesamthafte Betrachtung vorzunehmen. Praxisprojekte wie Berlin – Stettin zeigen, dass auch Elektrifizierungen mit weiteren Ausbauten bis 10 Mio. €/km förderfähig sein können. [17]

Sollte im grenzüberschreitenden Betrieb dennoch ein Einsatz von BEMU in Frage kommen, wird empfohlen, Migrationsstrategien im Betriebskonzept zu berücksichtigen: BEMU können zu EMU zurückgebaut werden und Ladeinfrastruktur lässt sich in Vollelektrifizierungen nachnutzbar auslegen. Mit diesen Bausteinen kann BEMU-Betrieb im grenzüberschreitenden Verkehr volkswirtschaftlich möglichst sinnvoll abgebildet werden.

Reaktivierungsstrecken und -linien

Als Datengrundlage für die Reaktivierungsstrecken wurden die entsprechende Liste von VDV und Allianz pro Schiene sowie die offiziellen Angaben aus den Bundesländern zugrunde gelegt. [18] [19] Daraus ergeben sich 284 zu untersuchende Reaktivierungsstrecken. Da die Reaktivierungsstrecken oft nur genau auf der Länge benannt sind, auf der aktuell kein SPNV stattfindet, wurden bei Bedarf unter Einbezug bereits existierender Strecken bzw. Linien sinnvolle neue Linien gebildet. Diese vermittelt einen Eindruck, in welcher Relation Verkehr stattfinden und welche Durchbindungen möglich sein könnten.

Die Bildung von Linien führt gegenüber den zu reaktivierenden Streckenabschnitten zu Änderungen der Elektrifizierungstopologie und damit zu tendenziell steigenden



Elektrifizierungsanteilen, womit sich die Voraussetzungen für die Befahrbarkeit mit BEMU verbessern (siehe Abbildung 22).

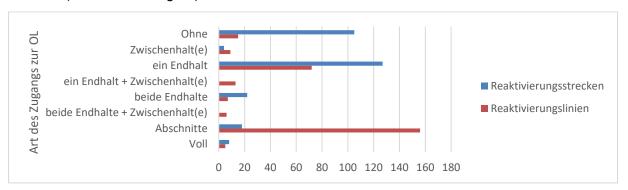


Abbildung 22: Zugang zu Oberleitung bei Reaktivierungskandidaten

Um eine Einschätzung der gebildeten Linien vornehmen zu können, wurden diese sowie die zugrundeliegenden Strecken im Hinblick auf das Vorhandensein mindestens eines Zugangs zur Oberleitung und auf den Anteil der unter Oberleitung zurückzulegenden Strecke mit den aktuell mit Dieselfahrzeugen befahrenen Linien in Deutschland verglichen (siehe Abbildung 23).

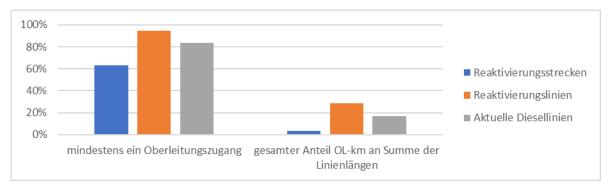


Abbildung 23: Oberleitungszugang und -anteile Reaktivierungskandidaten

Für 84 Linien wurde über den gesamten Linienverlauf oder einen Teil davon – basierend auf historischen oder angenommenen Fahrplänen – eine Energiesimulation durchgeführt. Es ergibt sich eine Befahrbarkeit für BEMU von ca. 25% der Reaktivierungslinien. Diese erste Einschätzung des Potenzials kann als Grundlage für weitere, detailliertere Untersuchungen dienen. Insgesamt ergibt sich ein positives Bild für die Kombination von Streckenreaktivierungen und den Einsatz von BEMU.

Touristische Verkehre

Als Ergänzung zu den bisher betrachteten potenziellen Einsatzgebieten, Rahmenbedingungen und betrieblichen Voraussetzungen wurde auch die Möglichkeit des Einsatzes von BEMU im rein touristischen (Gelegenheits-)Verkehr untersucht. Es gibt für dieses Verkehrssegment keine einheitliche Definition. Im Projektrahmen wurden solche Linienführungen betrachtet, welche insbesondere im saisonal, an Wochenenden und Feiertagen mehrmals pro Tag angeboten werden, als auch solche, die nur wenige Verkehrstage im Jahr aufweisen. Dieses Kriterium erfüllen 32 Linien, wobei eine Vollständigkeit der Aufstellung auf Grund der weit gefassten Definition sowie der unübersichtlichen und dynamischen Datenlage nicht unterstellt wird. Jedoch wird die große Bandbreite innerhalb des Segments anschaulich abgebildet.



Derartige touristische Verkehre können zunächst nach ihrer Bedienhäufigkeit gegliedert werden. Das Spektrum reicht dabei von wenigen jährlichen Fahrten hin bis zu Verkehren, welche an jedem Wochenende stattfinden. Die Verteilung der Bedienlänge der erfassten Linien ist in Abbildung 24 dargestellt. Zudem werden viele Touristikverkehre bereits elektrisch gefahren. Hinzu kommen viele Verkehre, deren Traktion mit Diesel- oder Dampflok allein den Zweck der Fahrt ausmacht und eine erhebliche Anzahl Mischformen. Insgesamt lassen sich basierend auf den Ergebnissen das Potential einer niedrigen vierstelligen Anzahl an Fahrten pro Jahr überschlagen, für die potentiell BEMU-Fahrzeuge eingesetzt werden können.



Abbildung 24: Längenanteile bei Fahrten zu touristischen Zwecken

Zunächst ist zu klären, ob die Linie aufgrund der Zugangspunkte zur Oberleitung bzw. Ladeinfrastruktur generell für den Einsatz von BEMU geeignet ist. Eine Schaffung zusätzlicher Infrastruktur, die ausschließlich für Touristik-Fahrten errichtet werden müsste, dürfte zumindest unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten als unrealistisch bewertet werden. Von den untersuchten Linien sind 75 % mit mindestens einem elektrifizierten Endpunkt ausgestattet. In Kombination mit den Elektrifizierungsanteilen der längeren Linien ist eine positive Perspektive für eine erhebliche Anzahl von Linien gegeben, vorbehaltlich der Prüfung von Wende- bzw. Ladezeiten. Dies war aufgrund der unzureichenden Datenlage nicht für die jeweiligen Einzelfälle überprüfbar. Abschließend ist eine Analyse der Infrastruktur im geplanten Linienverlauf erforderlich. Zwei zentrale Punkte hierbei sind, ob zusätzliche Fahrten möglich sind oder eine planmäßige Fahrt ersetzt werden muss und welche Begrenzungen bei der Zuglänge aufgrund von Bahnsteig- und Gleislängen vorhanden sind. Außerdem sind Streckenklasse(n) und Lichtraumprofil(e) zu erfassen.

1.1.8 Zusammenfassung und Handlungsempfehlungen

Die wichtigsten Ergebnisse und Handlungsempfehlungen sind im Folgenden zusammengefasst:

- Das umgebaute BEMU-Fahrzeug konnte im Test- und Fahrgastbetrieb unter allen betrieblichen Herausforderungen erfolgreich eingesetzt werden. Die Erkenntnisse des Förderprojektes gehen in die Serienproduktion von BEMU-Fahrzeugen ein.
- Viele SPNV-Linien und Netze bieten aufgrund nur kurzer nichtelektrifizierter Abschnitte oder vorhandener Teilelektrifizierung gute Voraussetzungen für einen Betrieb mit BEMU-Fahrzeugen.



- Die Wirtschaftlichkeit ist in vielen Fällen gegenüber dem weiteren Einsatz von Dieselfahrzeugen besser, auch hier muss aber der konkrete Einzelfall betrachtet werden. Sinnvollerweise muss an dieser Stelle auch der Vergleich mit Vollelektrifizierung und Betrieb mit Brennstoffzellenfahrzeugen geprüft werden.
- Um die Sinnhaftigkeit eines BEMU-Einsatzes zu prüfen, ist jeweils der Einzelfall, z.B. ein konkretes Ausschreibungsnetz, zu betrachten. Ansonsten ist der unverzichtbare Einbezug lokaler Gegebenheiten nicht möglich. Zu berücksichtigen sind hierbei auch entsprechende Planungsvorläufe, insbesondere im Bereich Ladeinfrastruktur.
- Es müssen sämtliche durch BEMU-Fahrzeuge gegebenen Randbedingungen berücksichtigt werden. Hierzu gehören Abstellkonzepte (inkl. Energieversorgung), angepasste Fahr- und Wendezeiten sowie Linien- und Umlaufplanung und die in der Tendenz durch die Batteriesysteme höheren Fahrzeugmassen, was wiederum Einfluss auf die benötigte Streckenklasse haben kann. Bei Bedarf sind angepasste Störfallkonzepte zu erstellen, welche die begrenzte Reichweite der Fahrzeuge berücksichtigen.
- Für Aufgabenträger oder Eisenbahnverkehrsunternehmen ist es ratsam, im Vorfeld von Beschaffungen Fahrzeuganforderungen zu definieren, welche die in den vorangegangenen Absätzen genannten Themen aufgreifen und die für das jeweilige Netz notwendige Ausprägung festhalten. Es ist auch zu berücksichtigen, dass sowohl Fahrzeug als auch Ladeinfrastruktur lange Lebenszyklen haben und im Falle letzterer eine spätere Versetzung meist nicht möglich ist. Da die Fahrzeuglebensdauer meist die Laufzeit von Verkehrsverträgen deutlich übersteigt, sollte die Planung einen entsprechend langfristigen Horizont einbeziehen und Sachverhalte wie Nachnutzungskonzepte der Fahrzeuge berücksichtigen.

1.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der zahlenmäßige Nachweis wird separat durch den Servicebereich Forschung der TU Berlin eingereicht.

1.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Als antragstellender Partner war die Technische Universität Berlin ohne externe Unterstützung nicht in der Lage das geplante Vorhaben aus Eigenmitteln zu finanzieren. Es konnte weder auf den Grundhaushalt für Forschungsförderung der TU Berlin noch auf andere externe Mittel zurückgegriffen werden. Auch Haushaltsmittel der Fachgebiete standen im Umfang der beantragten Projektkosten nicht zur Verfügung. Daher wurden an der TU Berlin für die gesamte Projektlaufzeit die notwendigen Personenmonate finanziert. Die für die Durchführung der Forschungsarbeiten notwendige technische Ausstattung sowie Dienstreisen wurden ebenfalls über die bewilligten Projektmittel finanziert. Die Ausgaben wurden nach dem Prinzip der Wirtschaftlichkeit und Sparsamkeit geplant und getätigt.

Aufgrund der Neuartigkeit der Themenstellungen konnte nur äußerst begrenzt auf bestehende Konzepte zurückgegriffen werden. Die neuen Teilsysteme mussten für die in Deutschland vorherrschenden Randbedingungen entwickelt bzw. angepasst werden bzw. die Rahmenbedingungen und Voraussetzungen für die Batterietechnologie und deren Anwendung im Bahnbereich zu Beginn grundsätzlich aufgestellt werden. Dies bezog sich auf eine Vielzahl von Teilgebieten, die sämtlich im Rahmen der Technologieeinführung aufgrund der starken Wechselwirkungen der einzelnen Teilbereiche einbezogen und geprüft werden mussten.



1.4 Bekanntgabe relevanter Ergebnisse von dritter Seite

Zur Laufzeit des Projektes wurden von verschiedener Seite (Machbarkeits-)Studien zur Anwendung von Batterie- bzw. Wasserstofftriebzügen veröffentlicht. Diese enthielten in Teilen ähnliche Fragestellungen, allerdings immer mit Bezug auf konkrete Netze bzw. Regionen unter Einbezug von deren spezifischen Rahmenbedingungen. Auch waren dort konkrete technische Auslegungen sowie die entsprechenden Details der Fahrzeugauslegung nicht thematisiert, wohingegen das Förderprojekt direkt am Fahrzeug und dessen Software arbeiten konnte, wodurch konkrete Lösungsansätze entwickelt und integriert werden konnten, beispielsweise das Energiemanagement. In einzelnen Fällen konnten Erkenntnisse dieser Studien die Ergebnisse des Förderprojektes verbessern, beispielsweise in der Frage nach der konkreten Ausgestaltung betrieblicher Regelwerke für den Wechsel zwischen Oberleitungs- und Batteriemodus, die dann im Testbetrieb mit den Expertinnen und Experten der beteiligten Verkehrs- und Infrastrukturunternehmen gezielt adressiert werden konnten.

1.5 Verwertung der Ergebnisse

Die (Zwischen-)Ergebnisse des Förderprojektes wurden in vielfacher Weise verwertet, die Details sind in den folgenden Unterkapiteln zu finden.

1.5.1 Veröffentlichung der Ergebnisse auf nationalen und internationalen Fachkonferenzen, Messen und Tagungen

Datum	Ort	Titel der Veranstal- tung	Beitrag
22.02.2017	München	Elektromobilität vor Ort	Vortrag
20.11.2018	Horb	Horber Schienentage	Vortrag
29.09.2020	Hamburg	3. Eurailpress-Forum alternative Antriebe	Vortrag
08.09.2021	Annaberg-Buchholz	Digital Rail Summer School / SRCC Digi- tal Rail Convention	Vortrag + Workshop
01.12.2022	Dresden	Rail.S/VDE-Symposium "Elektrische Fahrzeugantriebe und -ausrüstungen"	Vortrag
04.04.2022	Graz	Moderne Schienenfahrzeuge	Vortrag
12.05.2022	Dresden	Rail.S/VDE-Symposium Sicherheit & Zulassung elektrischer Bahnausrüstungen	Vortrag

Datum	Ort	Titel der Veranstal- tung	Beitrag
28.06.2022	Hamburg	5. Eurailpress-Forum alternative Antriebe	Vortrag
10.11.2022	Berlin	NOW Platt- formtreffen Schiene	Vortrag
15.11.2022	Lissabon	Transport Research Arena (TRA)	Vortrag
17.11.2022	Horb	Horber Schienentage	Vortrag
27.06.2023	Hamburg	6. Eurailpress-Forum alternative Antriebe	Vortrag
21.09.2023	Annaberg-Buchholz	Digital Rail Summer School / SRCC Digi- tal Rail Convention	Vortrag

1.5.2 Akquise weiterer Projekte

Durch die umfassende Beschäftigung mit dem Themenkomplex alternative Antriebe konnten mehrere Machbarkeitsstudien für Aufgabenträger des SPNV akquiriert werden, unter anderem für den Verkehrsverbund Oberelbe sowie den Zweckverband Nahverkehr Leipzig. Insbesondere für ersteren entspann sich eine intensive Zusammenarbeit, um die geplante Umstellung des VVO-Dieselnetzes im Jahre 2031 technologisch wie betrieblich vorzubereiten. Hierzu gehörten neben der Technologieentscheidung BEMU/Brennstoffzellentriebzug die Entwicklung eines Ladestationskonzeptes, betriebliche und energetische Fahrzeugsimulationen im Regel- und Störungsbetrieb sowie eine Definition von Anforderungen an zu beschaffende Fahrzeuge. Hierbei konnte der Wissenstransfer in beide Richtungen stattfinden. Viele Grundlagen aus dem Förderprojekt konnten in die Vorbereitung des Flotteneinsatzes von BEMU-Fahrzeugen fließen, während wiederum Erkenntnisse aus den Machbarkeitsstudien die Praxisnähe des Förderprojektes beispielsweise in der Vorbereitung und Durchführung des Testbetriebes verbessern halfen.

Nach Abschluss des Projektes konnten die Ergebnisse als Basis für weitere Anträge genutzt werden, die u.a. gemeinsam mit Alstom gestellt wurden und sich mit weiteren Optimierungen der Fahrzeugkomponenten im Hinblick auf BEMU- oder Wasserstofffahrzeuge befassen. Zusätzlich laufen Vorbereitungen, auch die in den kommenden Monaten und Jahren anstehenden Betriebseinführungen von BEMU-Fahrzeugen wissenschaftlich zu begleiten, woran insbesondere die SPNV-Aufgabenträger großes Interesse gezeigt haben.

1.5.3 Abschlussarbeiten und Promotionen

Thema	Art der Arbeit
Entwicklung von Szenarien zur langfristigen Rolle von alternativen Antrieben im deutschen Schienennetz	Masterarbeit



Optimierung Verteilung Ladestationen Batterietriebzüge	Bachelorarbeit
Untersuchung und Bewertung der Anwendungspotentiale von Batterie- und Wasserstofftechnik zur Dekarbonisierung des Bahnverkehrs	Masterarbeit
Einsatz kleiner BEMU-Fahrzeuge	Bachelorarbeit
Analyse von Ausschreibungsnetzen für den Betrieb mit batterieelektrischen Triebfahrzeugen	Bachelorarbeit
Alternative Antriebe im europäischen Kontext	Bachelorarbeit
Gestaltung von Liniennetzen und Infrastrukturausbau für den Einsatz von BEMU-Fahrzeugen im Rahmen des Deutschland-Taktes	Masterarbeit
Entwicklung einer prozessbasierten Disposition von batterieelektrischen Triebzügen	Bachelorarbeit
Zukunftsorientierter Einsatz von Dieselneufahrzeugen unter Berücksichtigung des Trends zur Dekarbonisierung des Schienenpersonennahverkehrs	Bachelorarbeit
Analyse von Störungsbetrieb in BEMU-Netzen (Arbeitstitel, noch in Erstellung)	Dissertation
Fahrzeugkonzepte mit alternativen Antrieben für SPNV-Nischenmärkte: Kleinfahrzeuge und Kleinflotten, Retrofit und Tailormade-Lösungen (Arbeitstitel, noch in Erstellung)	Dissertation

Darüber hinaus enthält die Lehrveranstaltung Bahnbetrieb des FG BBI seit dem Sommersemester 2022 einen Themenblock "Alternative Antriebssysteme", der direkt durch Erkenntnisse aus dem Förderprojekt gespeist wird und auch von den wissenschaftlichen Bearbeitern des Projektes gestaltet wird. Es wurde ein praxisnahes Planspiel entwickelt, welches die vielfältig vernetzten Aspekte der Thematik alternative Antriebssysteme für die Studierenden greifbar macht. Auch für andere Lehrveranstaltungen der TU Berlin wie z.B. die Lehrveranstaltung "Grundlagen des Schienenverkehrs", das Eisenbahnwesenseminar, die gemeinsame Veranstaltung "Forschung trifft Praxis" (mit dem Verband der Deutschen Eisenbahningenieure) sowie die Ringvorlesung "Neue Technologien" wurden jeweils passende Vorträge und Vorlesungsblöcke entwickelt, die eine Sichtbarmachung der entwickelten Technologie in Lehre und Forschung fördern.

1.5.4 Veröffentlichungen

- Stefan von Mach, Jan Buschbeck, Heinz Flerlage, Ulrich Zimmermann, Pavel Boev, Die Entwicklung und Markteinführung des TALENT 3 Batterietriebzuges, in: Eisenbahntechnische Rundschau 09/2018
- Benjamin Ebrecht, Daniel Walter, Ivo Zedlitz, Ulrich Zimmermann, "Methodik einer Machbarkeitsstudie zum Einsatz batterieelektrischer Triebwagen (BEMU) am Beispiel



- des VVO-Dieselnetzes", in: DVWG Journal für Mobilität und Verkehr, Nr. 3, 2019, https://journals.qucosa.de/jmv/article/view/20
- Ulrich Zimmermann, Pavel Boev, Stefan von Mach, Jan Buschbeck, Optimierungsansätze für den Betrieb von Batteriezügen. Analyse der Wechselwirkungen zwischen Fahrzeug, Infrastruktur und Betrieb, in ZEV Rail 145 (2021), "Sonderheft Tagungsband 46. Tagung Moderne Schienenfahrzeuge-TU Graz, 2021"
- Pavel Boev, Benjamin Ebrecht, Stefan von Mach, Steffen Rohner, Frank Becker, Ulrich Zimmermann, "Vorbereitung des Probebetriebs eines batterie-elektrischen Triebzugs am Beispiel des TALENT 3 BEMU", in: ZEV Rail 146 (2022), "Sonderheft Tagungsband 47. Tagung Moderne Schienenfahrzeuge-TU Graz, 2022"
- Pavel Boev, Ulrich Zimmermann, Benjamin Ebrecht, Stefan von Mach, Shan Yang, "Forschungs- und Entwicklungsprojekt BEMU: Erster Fahrgastbetrieb eines modernen/neuen batterieelektrischen Triebzuges in Deutschland seit den 1960er Jahren", in: Verkehr und Technik 03/2022, https://vtdigital.de/ce/forschungs-und-entwicklungsprojekt-bemu-erster-fahrgastbetrieb-eines-modernen-neuen-batterieelektrischen-triebzuges-in-deutschland-seit-den-1960er-jahren/detail.html
- Benjamin Ebrecht, Dirk Bräuer, "Energetische Betrachtungen alternativer Antriebe in FBS", in: Eisenbahntechnische Rundschau, 03/2022
- Pavel Boev, Benjamin Ebrecht, Stefan von Mach, Ulrich Zimmermann, "Der Alstom BEMU Demonstrator im Fahrgasteinsatz – erste Erfahrungen aus dem Testbetrieb", in: Eisenbahntechnische Rundschau, 09/2022, https://eurailpress-archiv.de/Single-View.aspx?show=4083656
- Pavel Boev, Ulrich Zimmermann, Benjamin Ebrecht, Stefan von Mach, "First Passenger Operation of a State-of-the-art Battery-Electric Multiple Unit (BEMU) in Germany", in: Transport Research Arena (TRA) Conference, Lissabon, 2022
- Benjamin Ebrecht, Julia Tandetzki, Pavel Boev, "Abkehr vom Dieselbetrieb bei grenzüberschreitenden SPNV-Linien mittels Batterie- oder Mehrsystemtriebzügen", in: Eisenbahntechnische Rundschau, 06/2023
- Ulrich Zimmermann, "Überlegungen zum Störungsbetrieb mit BEMU-Fahrzeugen. Gesamthafte Betrachtung von Fahrzeugauslegung, betrieblicher Planung und Disposition", in: Der Eisenbahningenieur, 09/2023



2 Literaturverzeichnis

- [1] "DIN EN 50367:2020-11," 2020.
- [2] Furrer + Frey, "Ladesäule für batterieelektrische Züge," *Eisenbahntechnische Rundschau*, p. 52, 04 2021.
- [3] K. Wittig, "Energieversorgung für abgestellte Elektrotriebzüge mit Akkumulator (ETA) Rückkehr der Zugvorheizanlagen oder Neuauftritt der Elektranten?," *Eisenbahntechnische Rundschau,* pp. 56-59, 01 2021.
- [4] F. Dschung, "50-Hz-Schnellladestation," *Der Eisenbahningenieur*, pp. 31-34, 02 2022.
- [5] A. W. Kunith, Elektrifizierung des urbanen öffentlichen Busverkehrs, Berlin: Springer Vieweg, 2017.
- [6] J. Pagenkopf, T. Schirmer, M. Böhm, C. Streuling und S. Herwartz, "Marktanalyse alternativer Antriebe im deutschen Schienenpersonennahverkehr," NOW Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, Berlin, 2020.
- [7] F. Meishner und D. Uwe Sauer, "Technical and economic comparison of different electric bus concepts based on actual demonstrations in European cities," *IET Electrical Systems in Transportation*, Bd. 10, Nr. 2, p. 144–153, 2020.
- [8] A. Müller, "Wissenschaftliche Bewertung von alternativen, emissionsarmen Antriebskonzepten für den bayerischen SPNV," TU Dresden, 3 November 2017. [Online]. Available: https://beg.bahnland-bayern.de/de/aktuelles/gutachten-alternative-antriebeim-bahnland-bayern?file=files/media/corporate-portal/aktuelles/2018/Technische%20und%20wirtschaftliche%20Bewertung%20alternativer%20Antriebskonzepte%281%29.pdf. [Zugriff am 8 April 2019].
- [9] IPCC, "Fifth Assessment Report," [Online]. Available: https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar5/. [Zugriff am 23 10 2021].
- [10] M. Schmied und M. Mottschall, "Berechnung des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen des ÖPNV".
- [11] P. Icha, "Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 2020," Umweltbundesamt, Dessau-Rosslau, 2021.
- [12] D. Energie, "www.dbenergie.de," DB Energie, [Online]. Available: https://www.dbenergie.de/resource/blob/4716320/81de0c37094d140ad957f5d3937c4f1 2/allgemeines_stromkennzeichnung-1--data.pdf. [Zugriff am 10 02 2023].
- [13] T. Lauf, M. Memmler und S. Schneider, "Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger," Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2019.
- [14] J. C. Kelly, Q. Dai und M. Wang, "Globally regional life cycle analysis of automotive lithium-ion nickel manganese cobalt batteries," *Mitig Adapt Strateg Glob Change*



- (Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change), Bd. 3, Nr. 25, p. 371–396, 2020.
- [15] K. Juhrich, "Spezifische Emissionsfaktoren für den deutschen Strommix," Umweltbundesamt, 02 05 2022. [Online]. Available: https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/emissionen-von-luftschadstoffen/spezifische-emissionsfaktoren-fuer-den-deutschen. [Zugriff am 08 02 2023].
- [16] EU, "DIRECTIVE 2004/ 26/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 21 April 2004 amending Directive 97/68/EC on the approximation of the laws of the Member States relating to measures against the emission of gaseous and particulate pollutants from ...," Brussels, 2004.
- [17] B. Ebrecht, J. Tandetzki und P. Boev, "Abkehr vom Dieselbetrieb bei grenzüberschreitenden SPNV-Linien mittels Batterie- oder Mehrsystemtriebzügen," *Eisenbahntechnische Rundschau,* pp. 57-62, 06 2023.
- [18] VDV, "Auf der Agenda: Reaktivierung von Eisenbahnstrecken," Köln, 2021.
- [19] Allianz pro Schiene, "Reaktivierung von Bahnstrecken Das Comeback der Schiene," [Online]. Available: https://www.allianz-proschiene.de/themen/infrastruktur/reaktivierung-bahnstrecken/. [Zugriff am 10 08 2022].

