

Frank, Fabio; Gnann, Till

Working Paper

Alternative Antriebe im Schienenverkehr

Working Paper Sustainability and Innovation, No. S01/2022

Provided in Cooperation with:

Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research ISI

Suggested Citation: Frank, Fabio; Gnann, Till (2024) : Alternative Antriebe im Schienenverkehr, Working Paper Sustainability and Innovation, No. S01/2022, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe, <https://doi.org/10.24406/publica-fhg-416708>

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/283034>

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.



Alternative Antriebe im Schienenverkehr

Autoren:

Fabio Frank, Till Gnann

No. S 01/2022

Impressum

Alternative Antriebe im Schienenverkehr

Autoren

Fabio Frank, fabio.frank@student.kit.edu;
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Till Gnann, till.gnann@isi.fraunhofer.de;
Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI

Bildnachweis

Deckblatt: Shutterstock.com/ TechSolution

Zitierempfehlung

Frank, F.; Gnann, T. (2022): Alternative Antriebe im Schienenverkehr. Working Papers Sustainability and Innovation, No. S 01/2022. Karlsruhe: Fraunhofer ISI.

Veröffentlicht

Datum	Version	Änderung
Januar 2022	01	
Februar 2024	02	Ungenauere Bezeichnung "Schienennetz der Deutschen Bahn" korrigiert zu "Bundesschienennetz"

Kontakt

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI << Impressum Firma >>

Breslauer Straße 48, 76139 Karlsruhe
Till Gnann, till.gnann@isi.fraunhofer.de

Hinweise

Dieser Bericht einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Die Informationen wurden nach bestem Wissen und Gewissen unter Beachtung der Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis zusammengestellt. Die Autorinnen und Autoren gehen davon aus, dass die Angaben in diesem Bericht kor-

Zusammenfassung

Der Schienenverkehr in Deutschland fährt bereits heute zu einem Großteil elektrisch (~90% der Verkehrsleistung auf ~60% elektrifizierten Strecken). Für eine vollständige Defossilisierung sind jedoch auch für die verbliebenen 10% Fahrleistung Lösungen von Nöten. Aufgrund der lokalen Emissionsfreiheit eignen sich hierfür vor allem batterieelektrische und wasserstoffbetriebene Triebzüge. Es stellt sich dabei jedoch die Frage, welche Alternativen für welche Einsatzzwecke gut geeignet sind. Hierzu werden zwei Szenarien mit kurzen und langen Streckenabschnitten im Schienenpersonennahverkehr aus techno-ökonomischen Gesichtspunkten untersucht. Es zeigt sich, dass batterieelektrische Züge vor allem auf kürzeren Streckenabschnitten zum Einsatz kommen können, während wasserstoffbetriebene Züge zwar flexibler im Einsatz sind, aber einer höheren Auslastung bedürfen. Rund 80% der Streckenabschnitte in Deutschland wären zukünftig mit heutigen batterieelektrischen Zügen zu bewältigen, in 20% der Fälle wären wasserstoffbetriebene Züge geeigneter.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
1 Einleitung	6
2 Fahrzeug- und Antriebskonzepte im Schienenpersonenverkehr	9
2.1 Fahrzeugsegmente und Elektrifizierungsgrade im deutschen SPV	9
2.2 Überblick über etablierte und innovative Antriebstechnologien	9
2.2.1 Hybrid-Dieseltriebzug	9
2.2.2 Zweikrafttriebzug	10
2.2.3 Batterieelektrischer Triebzug	10
2.2.4 Wasserstofftriebzug	10
2.2.5 Weitere Möglichkeiten	10
3 Methodisches Vorgehen	11
3.1 Eingrenzung der Antriebsoptionen	11
3.2 Bestimmung von Kriterien für Vergleich der Antriebsoptionen	11
3.3 Kostenstruktur und Wirtschaftlichkeitsvergleich der Antriebsoptionen	11
3.3.1 Modell- und Szenarienbildung	11
3.3.2 Total Cost of Ownership	12
3.3.3 Berechnung mit Hilfe der Kapitalwertmethode	13
4 Ergebnisse	14
4.1 Eingrenzung der Antriebsoptionen	14
4.2 Vergleich der Antriebsoptionen	15
4.2.1 Fahrzeugbeschaffung	15
4.2.2 Instandhaltungsaufwand	15
4.2.3 Energieeffizienz	15
4.2.4 Speicherkapazität und Reichweite	16
4.2.5 Infrastrukturbedarf	16
4.3 Kostenstruktur der Antriebsoptionen	17
4.4 Analysen zur Wirtschaftlichkeit	17
4.4.1 Annahmen	17
4.4.2 Ergebnisse der TCO-Analyse	18
5 Diskussion	21
5.1 Vor- und Nachteile der Antriebsoptionen	21
5.2 Wirtschaftlicher Vergleich der Alternativen	21
5.3 Implikationen für den deutschen SPNV	22
5.4 Grenzen der Untersuchung	23
6 Fazit	24
6.1 Zusammenfassung	24
6.2 Ausblick	24
7 Literaturverzeichnis	27
A.1 Anhang: Ergänzende Tabellen und Abbildungen	29

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Formelzeichen

A_t	Auszahlung zum Zeitpunkt t	€
C_0	Kapitalwert	€
E_t	Einzahlung zum Zeitpunkt t	€
i	Kalkulationszins	%
I_0	Anfangsinvestition	€
L_n	Liquidationserlös am Ende des Betrachtungszeitraums	€
n	Länge des Betrachtungszeitraums	Jahre

Abkürzungen

BDMU	Battery diesel multiple unit, Hybrid-Dieseltriebzug
BEMU	Battery electric multiple unit, batterieelektrischer Triebzug
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
MU	Multiple Unit, Triebwagen
DEMU	Diesel-electric multiple unit, Zweikrafttriebzug
EMU	Electric multiple unit, Elektrotriebzug
DMU	Diesel multiple unit, Dieseltriebzug
HMU	Hydrogen multiple unit, Wasserstofftriebzug
PtL	Power-to-Liquid
RB	Regionalbahn
SPNV	Schienenpersonennahverkehr
SPV	Schienenpersonenverkehr

1 Einleitung

Im deutschen Schienenverkehr wird etwa 90% der Verkehrsleistung elektrisch erbracht, darunter fallen 93% des Güterverkehrs (in Tonnenkilometern) sowie 98% des Personenfernverkehrs und 83% des Personennahverkehrs (jeweils in Personenkilometern) [1]. Um das im Klimaschutzgesetz verankerte Ziel der Treibhausgasneutralität bis 2045 [2] zu erreichen, müssen auch die übrigen 10% der Verkehrsleistung, die heute mit Dieselfahrzeugen erbracht werden, innerhalb der nächsten 24 Jahre defossilisiert werden. Die Elektrifizierung des deutschen Schienennetzes verläuft langsam: 2020 waren 61% des Bundesschienennetzes elektrifiziert (vgl. Überblick über Schienennetz in Abbildung 2 im Anhang), zehn Jahre zuvor waren es 59%. Durchschnittlich wurde das Oberleitungsnetz um lediglich 65 km im Jahr erweitert. Das ausgerufene Ziel der Bundesregierung, bis 2025 einen Streckenelektrifizierungsgrad von 70% zu erreichen, wird bei gleichbleibender Ausbaugeschwindigkeit nicht erreicht. [1]

Ein essenzielles Hindernis liegt dabei in den hohen Kosten, die für den Aufbau einer Oberleitung und der dazugehörigen Bahnstromversorgung aufzubringen sind. Abhängig von der Topografie kann eine eingleisige Streckenelektrifizierung bis zu 3,6 Millionen Euro pro Kilometer [3] kosten. Der Bahnverkehr auf den bislang nicht elektrifizierten Strecken erbringt jedoch nur einen kleinen Teil der Beförderungsleistung, weshalb sich der kostenintensive Infrastrukturaufbau in der Regel nicht lohnt. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit werden diese Linien mit Dieselfahrzeugen bedient, welche ausreichend Reichweite für den ganztägigen Betrieb mitbringen und nicht auf eine streckenbegleitende Infrastruktur angewiesen sind. Eine im Rahmen der wissenschaftlichen Beratung des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) erstellten Studie von Walther et al. [4] kommt zu dem Ergebnis, dass eine Komplettelektrifizierung des deutschen Schienennetzes Infrastrukturinvestitionen von 21,2 Milliarden Euro erfordern würde. Im Zuge dessen untersuchten die Autoren ein alternatives Szenario, um die verbleibenden 10% der Verkehrsleistung nicht mehr im Dieselbetrieb erbringen zu müssen: Heute nicht elektrifizierte Strecken werden darin nur zum Teil mit Oberleitung ausgestattet, es entstehen sogenannte „Elektrifizierunginseln“. Entsprechende Strecken können im Personenverkehr von hybriden Fahrzeugen bedient werden, welche die maximal 40 km langen Oberleitungslücken batterieelektrisch überbrücken. Die notwendigen Investitionen in eine solche Teilelektrifizierung werden auf 2,7 Milliarden Euro (nur Personenverkehr) bis 6,5 Milliarden Euro (inkl. vollständig elektrifizierten Güterverkehrsstrecken) beziffert und belaufen sich folglich auf 13 bis 31% der Kosten einer Komplettelektrifizierung.

Vor diesem Hintergrund wird deutlich, dass es sich lohnt, den großflächigen Einsatz alternativer Antriebsformen im Schienenverkehr in Erwägung zu ziehen. Ihr Vorteil besteht darin, Dieselfahrzeuge ersetzen zu können, ohne dass die Strecke (vollständig) elektrifiziert werden muss. Lokale Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen sowie Lärm werden eingespart, ohne dabei auf den zeit- und kostenintensiven Ausbau der Oberleitung angewiesen zu sein. Alternative Antriebe tragen folglich zu einer schnelleren und kostengünstigeren Energiewende im Schienenverkehr bei.

Das Ziel der Treibhausgasneutralität ab 2045 setzt die öffentlichen Aufgabenträger in Deutschland unter Handlungsdruck. Ein großer Teil der heute in Deutschland eingesetzten Dieselflotte wurde in den Jahren 1996 bis 2003 gefertigt. Da die Nutzungsdauer eines Dieseltriebfahrzeugs in der Regel 25 bis 30 Jahre beträgt, ist mit vielen Neuanschaffungen innerhalb der nächsten fünf bis zehn Jahren zu rechnen. [5, S. 9]

Sofern keine Streckenelektrifizierung in unmittelbarer Aussicht steht, kann ein lokal emissionsfreier Bahnbetrieb nur durch die Beschaffung alternativer Triebfahrzeuge gewährleistet werden. Wille et al. [6] prognostizieren einen Bedarf von 1.350 innovativen Triebzügen bis 2030 und weiteren 1.150 bis 2050 allein für den Personenverkehr.

Die vorliegende Arbeit soll untersuchen, welche alternativen Antriebe künftig als Ersatz der etablierten, aber treibhausgas- und schadstoffemittierenden Dieseltraktion zum Einsatz kommen könnten und diese miteinander vergleichen. Es findet dabei eine inhaltliche Eingrenzung auf den Personenverkehr sowie auf den deutschen Markt statt. Die Ziele dieser Arbeit sind daher

- die Identifikation von innovativen Antriebstechnologien, die als Ersatz für den Dieselantrieb im deutschen Schienenpersonenverkehr (SPV) infrage kommen,
- die Bestimmung von antriebsspezifischen Einflussfaktoren und Kostentreibern bei der Wahl der Antriebsoption sowie
- die ökonomische Bewertung und Gegenüberstellung der identifizierten Alternativen.

Im Angesicht anstehender Vergaben im öffentlichen Schienenpersonennahverkehr (SPNV) haben verschiedene Aufgabenträger Studien in Auftrag gegeben, um die Umstellung einzelner Bahnlinien oder ganzer Liniennetze auf alternative Antriebe auf technische und wirtschaftliche Machbarkeit zu untersuchen und potenzielle Alternativen zu vergleichen. Daneben sind Veröffentlichungen zu nennen, die eine allgemeine wissenschaftliche Untersuchung alternativer Antriebstechnologien und ihrer Randbedingungen vornehmen, häufig im Auftrag von öffentlichen Stellen oder großen Interessenverbänden. In Tabelle 1 sind relevante Publikationen zusammengefasst.

Neben der Einleitung umfasst die vorliegende Arbeit fünf Kapitel. In Kapitel 2 werden als Grundlage für den Rest der Arbeit die relevanten Triebfahrzeugsegmente sowie etablierte und innovative Antriebstechnologien kurz vorgestellt. Kapitel 3 erläutert die Methodik, mit welcher die gesetzten Ziele der Arbeit erreicht werden sollen. Die Ergebnisse des methodischen Vorgehens werden zunächst in Kapitel 4 vorgestellt, bevor sie in Kapitel 5 interpretiert und diskutiert werden. Kapitel 6 fasst die wichtigsten Erkenntnisse der Arbeit zusammen und gibt abschließend einen Ausblick auf künftige Entwicklungen und Einflüsse.

Tabelle 1: Studien zu alternativen Antrieben im Schienenverkehr

Autoren (Institutionen)	Jahr	Auftraggeber	Titel	Verweis
Ramboll Deutschland GmbH NahverkehrsBeratung Südwest PG	2021	Zweckverband SPNV Rheinland-Pfalz Nord	Machbarkeitsstudie Alternative Antriebe im ZV SPNV RP Nord	[7]
Walther et al. (PTV ¹ , TU Berlin, TU Dresden)	2021	BMVI	Elektrifizierungsvarianten für das deutsche Schienennetz	[4]
Klebsch et al. (VDE ²)	2020	–	Bewertung klimaneutraler Alternativen zu Dieseltriebzügen	[8]
Pagenkopf et al. (DLR ³)	2020	NOW ⁴	Marktanalyse alternativer Antriebe im deutschen Schienenpersonennahverkehr	
Wille et al. (SCI Verkehr GmbH, FH Aachen, IZT ⁵)	2020	BMVI	Identifizierung von Forschungsansätzen und technischen Grundlagen zur Entwicklung eines leiseren, umweltfreundlicheren und betriebswirtschaftlich darstellbaren innovativen Triebfahrzeugs für bislang nicht elektrifizierte Netze	[6]
Klebsch et al. (VDE)	2019	–	Alternativen zu Dieseltriebzügen im SPNV	[9]
Plank-Wiedenbeck et al. (Bauhaus-Universität Weimar)	2019	Freistaat Thüringen	Pilotprojekt Einsatz von H2BZ-Triebwagen in Thüringen	[10]

Autoren (Institutionen)	Jahr	Auftraggeber	Titel	Verweis
Ruf et al. (Roland Berger GmbH)	2019	FCH JU, S2R JU ⁶	Study on the use of fuel cells and hydrogen in the railway environment	[11]
Wittmann und Meinelt (TU Dresden)	2019	Zweckverband SPNV Rheinland-Pfalz Süd	Bewertung von konventionellen und alternativen Antrieben für den Rheinland- Pfalz-Takt 2030 unter besonderer Betrachtung des Pilotprojekts „Pfalznetz“	[12]
Müller (TU Dresden)	2017	BEG ⁷	Wissenschaftliche Bewertung von alternativen, emissionsarmen Antriebskonzepten für den bayerischen SPNV	[13]
Ernst & Young et al.	2016	BMVI	Wasserstoff-Infrastruktur für die Schiene	[14]
¹ PTV Planung Transport Verkehr AG ² VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V. ³ Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt e.V. ⁴ Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW GmbH) ⁵ IZT - Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung gGmbH ⁶ Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, Shift2Rail Joint Undertaking (Technologieinitiativen der Europäischen Union) ⁷ Bayerische Eisenbahngesellschaft mbH				

2 Fahrzeug- und Antriebskonzepte im Schienenpersonenverkehr

Dieser Abschnitt gibt einen Technologieüberblick und bildet die Grundlage für die nachfolgenden Untersuchungen. Zuerst werden Fahrzeugsegmente im Schienenpersonenverkehr differenziert und Potenziale für alternative Antriebe vorgestellt. Für die relevanten Fahrzeugsegmente werden im Anschluss kurz die bereits etablierten Diesel- und Elektroantriebe vorgestellt und anschließend der Fokus auf neue innovative Antriebsarten gerichtet.

2.1 Fahrzeugsegmente und Elektrifizierungsgrade im deutschen SPV

Wille et al. [6] differenzieren in ihrer Bestandsaufnahme der in Deutschland eingesetzten Triebfahrzeuge fünf Segmente: städtischer Commuter-/S-Bahn-Verkehr, Regionalbahn, Regionalexpress, Intercity und Hochgeschwindigkeitsverkehr. S-Bahn sowie Hochgeschwindigkeitsverkehr sind bereits komplett elektrifiziert, im Intercity-Segment werden weniger als 5% der Fahrzeuge von einem Dieselmotor angetrieben. Signifikante Anteile haben Dieseltriebzüge nur in den Segmenten Regionalbahn (70% von 3800) und -express (20% von 250 Fahrzeugen). Das höchste Mengenpotenzial für den Einsatz alternativer Fahrzeuge bieten die Regionalbahnen (RB), von denen etwa 2700 heute diesel- betrieben sind (vgl. Abbildung 3).

Für die wenigen nicht elektrifizierten Intercity-Strecken ist von einer künftigen Streckenelektrifizierung auszugehen, sodass in Zukunft keine Neubeschaffung von Dieseltriebzügen für den Fernverkehr erforderlich sein wird. Die technologische Transformation im SPV auf nicht elektrifizierten Strecken in Richtung alternative Antriebe findet folglich ausschließlich im Regionalverkehr statt. Dementsprechend sind alternative Antriebe bisher nur für die im Regionalverkehr üblichen Triebwägen (englisch: multiple unit, MU) vorgestellt worden.

2.2 Überblick über etablierte und innovative Antriebstechnologien

Im deutschen SPV sind zwei verschiedene Antriebstechnologien etabliert. Der Elektrotriebzug (electric multiple unit, EMU) verfügt über keinen Energiespeicher, sondern bezieht seine Traktionsenergie mittels Stromabnehmer aus einer Oberleitung. Der Dieseltriebzug (diesel multiple unit, DMU) bezieht seine Energie aus mitgeführtem Dieselmotorkraftstoff und existiert in dieselmechanischer, dieselhydraulischer und dieselektrischer Ausführung. Da er nicht auf eine streckenseitige Energieversorgung angewiesen ist, wird er heute auf allen Strecken, die nicht vollständig elektrifiziert sind, eingesetzt. Alle im folgenden Abschnitt vorgestellten innovativen Antriebskonfigurationen zielen auf eine Reduktion der CO₂-Emissionen im Vergleich zu einem herkömmlichen DMU ab. Dies gelingt durch Energieeffizienzverbesserungen oder den vollständigen Verzicht auf fossile Brennstoffe. Je nach Technologievariante werden dazu alternative Energiespeicher verwendet oder die Nutzung gegebenenfalls vorhandener, von DMU nicht nutzbarer Oberleitungsinfrastruktur ermöglicht.

2.2.1 Hybrid-Dieseltriebzug

Ein Batterie-Diesel-Hybrid (battery diesel multiple unit, BDMU) ist ein Dieseltriebzug, der zusätzlich über einen Elektromotor und eine kleine Batterie verfügt. Er kann als Mild- oder Vollhybrid ausgeführt sein. Während er Mildhybrid lediglich die Rekuperation von Bremsenergie und eine höhere Effizienz ermöglicht, kann der Vollhybrid auch rein elektrisch gefahren werden. [6, S. 59]

2.2.2 Zweikrafttriebzug

Ein Zweikrafttriebzug kombiniert die Funktionsweise eines herkömmlichen EMUs mit der eines DMUs. Auf elektrifizierten Abschnitten bezieht der Elektromotor die benötigte Energie aus der Oberleitung, auf nicht elektrifizierten Abschnitten aus einem Dieselaggregat. Das auch als DEMU (Diesel-electric multiple unit) bezeichnete Fahrzeug kann als Last-Mile-Triebzug mit kleinem Dieselmotor (ab 2,5% der installierten elektrischen Leistung) oder als Dual-Mode-Triebzug mit leistungsfähigem Dieselmotor (bis zu 70% der elektrischen Leistung) ausgeführt sein. [6, S. 63]

2.2.3 Batterieelektrischer Triebzug

Ein batterieelektrischer Triebzug (battery electric multiple unit, BEMU) basiert auf einem herkömmlichen EMU und bezieht während der Fahrt unter Fahrdraht mittels eines Stromabnehmers elektrische Energie. Da er jedoch zusätzlich über einen Batteriespeicher verfügt, kann er nicht elektrifizierte Streckenabschnitte autonom überbrücken. Die Batterie wird während der Fahrt oder im Stillstand unter einer Oberleitungsanlage geladen. [6, S. 64]

2.2.4 Wasserstofftriebzug

In einem Wasserstoff-Triebzug (hydrogen multiple unit, HMU) wird Strom durch eine Brennstoffzelle erzeugt, welche den in Drucktanks mitgeführten Wasserstoff mit Sauerstoff aus der Umgebungsluft reagieren lässt. Als Nebenprodukte fallen lediglich Wasserdampf und Abwärme an, sodass der Brennstoffzellenantrieb lokal emissionsfrei ist. Die produzierte elektrische Energie wird in einer Batterie zwischengespeichert, welche Rekuperation der Bremsenergie sowie die Bereitstellung maximaler Leistung ermöglicht, und treibt schließlich Elektromotoren an. [6, S. 62]

2.2.5 Weitere Möglichkeiten

Grundsätzlich sind weitere Topologien bimodaler oder trimodaler Antriebe denkbar, welche die Hybridkonzepte miteinander kombinieren (siehe dazu [5, S. 15]).

3 Methodisches Vorgehen

Im Fokus der vorliegenden Arbeit steht der Vergleich von potenziellen Dieselalternativen. Hierfür wird zunächst eine Auswahl an Antriebskonzepten getroffen, die dann anhand von verschiedenen Einflussfaktoren allgemein gegenübergestellt werden. Anschließend wird die Wirtschaftlichkeit der Alternativen aus Betreiberperspektive näher untersucht. Dieses Kapitel beschreibt die dabei verwendeten Methoden und nennt die Quellenbasis, auf der die getroffenen Annahmen aufbauen.

3.1 Eingrenzung der Antriebsoptionen

In einem ersten Schritt wird eine engere Auswahl aus dem Kreis der im Abschnitt 2 vorgestellten Alternativen bestimmt, die im weiteren Verlauf der Arbeit im Detail qualitativ und quantitativ untersucht werden. Die Auswahl erfolgt dabei anhand von zwei Aspekten:

- 1) *Technologische Reife*: Der große Neuanschaffungsbedarf der Aufgabenträger in Deutschland verlangt nach Lösungen, die schon heute technisch machbar sind und in den nächsten Jahren im großen Maßstab umgesetzt werden können. Die Bewertung des technologischen Stands erfolgt anhand von Literaturangaben zum Technology Readiness Level (TRL) der verschiedenen Alternativen. Die Skala unterscheidet insgesamt neun Stufen, wobei man ab TRL 7 von einer Marktreife in weniger als fünf Jahren ausgeht (übernommen aus [6])
 - TRL 7: Prototyp im Einsatz
 - TRL 8: Qualifiziertes System mit Nachweis der Funktionstüchtigkeit im Einsatzbereich
 - TRL 9: Qualifiziertes System mit Nachweis des erfolgreichen Einsatzes
- 2) *Vereinbarkeit mit Klimaschutzpolitik*: Die Abkehr vom bewährten und auf nicht elektrifizierten Strecken in der Regel wirtschaftlichen Dieselantrieb erfolgt in erster Linie aufgrund seiner CO₂-Emissionen, die zur globalen Erwärmung beitragen. Folglich kommen als langfristiger Dieseleratz nur jene Antriebsalternativen infrage, die im Einklang mit dem im Klimaschutzgesetz festgeschriebenen Ziel der Klimaneutralität bis 2045 stehen.

3.2 Bestimmung von Kriterien für Vergleich der Antriebsoptionen

Wichtige Einflussfaktoren und Kostentreiber werden anhand einer Literaturrecherche auf Basis der in Tabelle 1 aufgelisteten Studien bestimmt. Ihre Erkenntnisse werden aggregiert, um ein möglichst ganzheitliches Bild zu erhalten. Die identifizierten Kriterien sowie die Performance der Antriebsoptionen hinsichtlich dieser Parameter werden im Kapitel 5 in tabellarischer Form zusammengeführt und qualitativ gegenüber dem bewährten Dieseltriebzug bewertet.

3.3 Kostenstruktur und Wirtschaftlichkeitsvergleich der Antriebsoptionen

3.3.1 Modell- und Szenarienbildung

Um die Wirtschaftlichkeit der Alternativen zu vergleichen, werden zwei Modelllinien betrachtet, die jeweils einen typischen Regionalverkehrsbetrieb zwischen zwei Endbahnhöfen abbilden. Auf eine Modellierung der Zwischenhalte wird verzichtet, sodass das Modell aus zwei Endpunkten besteht, zwischen denen die Züge mit konstant angenommener Geschwindigkeit pendeln. Nach Ankunft im jeweiligen Zielbahnhof wird so lange pausiert bis der Taktfahrplan die Abfahrt in die entgegengesetzte Richtung vorsieht. Sowohl die Strecke als auch die Bahnhöfe entlang der Strecke sind bisher für die reine Dieseltraktion ausgelegt: Es bestehen weder Oberleitungsanlagen noch sonstige für Alternativen günstige Infrastruktur.

Szenario 1: kurze Regionalbahn-Linie

Das erste Szenario bildet eine RB-Linie zwischen zwei 40 km entfernten Endbahnhöfen ab. Die resultierende Reisegeschwindigkeit zwischen den beiden Endpunkten beträgt 60 km/h (typisches RB-Geschwindigkeitsniveau [13, S. 19]), sodass eine einfache Überwindung der Strecke 40 min dauert. Es werden zwei Regionalzüge eingesetzt, um in beide Richtungen täglich einen 1-h-Takt anzubieten. Diese absolvieren im Laufe des Betriebstags jeweils acht Umläufe (Start des ersten Umlaufs: 06:00 Uhr, Ende des letzten Umlaufs: 21:40 Uhr). Es ergibt sich eine Wendezeit von 20 min zwischen der Ankunft eines Zuges und der Abfahrt desselben Zuges in die entgegengesetzte Richtung. Bei ganzjährigem täglichem Betrieb ergibt sich eine Jahresfahrleistung von insgesamt 467.200 km. Die Annahmen sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Szenario 2: lange Regionalbahn-Linie

Das zweite Szenario ist analog zum ersten Szenario aufgebaut, allerdings wird hier eine 80 km lange Strecke angenommen, welche in beide Richtungen fünfmal täglich im 1,5-h-Takt bedient wird (Start des ersten Umlaufs: 06:00 Uhr, Ende des letzten Umlaufs: 20:50 Uhr). Es stellt sich bei gleicher Reisegeschwindigkeit eine geringere Wendezeit von 10 min und eine höhere Jahresfahrleistung von 584.000 km im Vergleich zu Szenario 1 ein (vgl. Tabelle 2).

3.3.2 Total Cost of Ownership

Für die Anschaffungsentscheidung und somit den Markthochlauf der Technologiealternativen sind die Gesamtkosten aus Sicht der Betreiber entscheidend. Für den Vergleich der Wirtschaftlichkeit wurde daher das Verfahren der „Total Cost of Ownership“ (TCO) gewählt. Dabei werden neben den unmittelbaren Investitionen zum Zeitpunkt der Anschaffung möglichst alle Kosten, die im Laufe der Fahrzeugnutzungsdauer für den Betreiber anfallen, berücksichtigt. Auf Basis der zuvor durchgeführten Literaturrecherche wird die Kostenstruktur der Antriebsoptionen ermittelt und Annahmen für die kostenbeeinflussenden Parameter getroffen, um die einzelnen Kostenpositionen errechnen zu können.

Tabelle 2: Übersicht über gebildete Betriebsszenarien

	Einheit	Szenario 1 Kurze RB-Linie	Szenario 2 Lange RB-Linie
Streckenlänge einfach	km	40	80
Umlauflänge	km	80	160
Reisegeschwindigkeit	km/h	60	60
Takt	min	60	90
Fahrtzeit	min	40	80
Wendezeit	min	20	10
Benötigte Fahrzeugzahl	–	2	2
Tägliche Umläufe je Fahrzeug	–	8	5
Tägliche Fahrleistung je Fahrzeug	km	640	800
Betriebstage p. a.	–	365	365
Jahresfahrleistung je Fahrzeug	km	233.600	292.000
Jahresfahrleistung der Linie	km	467.200	584.000

3.3.3 Berechnung mit Hilfe der Kapitalwertmethode

Die TCO werden mittels einer dynamischen Investitionsrechnung ermittelt, die sich an dem Vorgehen von [13, S. 22–25] und [8, 34f.] orientiert. Unter Berücksichtigung eines Kalkulationszinssatzes von $i = 0,49\%$ (analog zu [8, 13]) werden Kapitalwerte C_0 über die gesamte Nutzungsdauer n der Fahrzeuge gemäß Gleichung 3.1 errechnet:

$$C_0 = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{E_t - A_t}{(1+i)^t} + \frac{L_n}{(1+i)^n} \quad (3.1)$$

Investitionsgüter werden dabei über ihre Lebensdauer linear abgeschrieben. Der Restwert der Fahrzeuge wird daher als 0 angenommen, ihr realer Liquidationserlös sowie alle danach anfallenden Kosten (z. B. Entsorgung) bleiben unberücksichtigt. Im Falle von langlebigen Investitionsgütern, deren Nutzungsdauer die Fahrzeuglebensdauer übersteigt, werden die Restwerte L_n in Höhe des abgezinsten Buchwerts als Erlös realisiert. Alle nicht antriebsspezifischen Kapitalflüsse wie etwa Personalkosten, Stationsgebühren oder Umsatzerlöse aus Ticketverkäufen werden ebenfalls vernachlässigt, da diese für jede Antriebsoption gleich und somit irrelevant für den Wirtschaftlichkeitsvergleich sind.

Da neben den Liquidationserlösen der Restwerte keine Einzahlungen E_t betrachtet werden, werden Auszahlungen A_t und Anfangsinvestitionen I_0 im Sinne der Übersichtlichkeit durch positive Beträge ausgedrückt. Die Technologiealternative mit dem geringsten Kapitalwert (den geringsten „antriebsspezifischen“ Gesamtkosten) ist die ökonomisch günstigste Wahl aus Betreiberperspektive im jeweiligen Szenario.

4.1 Eingrenzung der Antriebsoptionen

Alle im Abschnitt 2 näher vorgestellten alternativen Antriebsstrangkonfigurationen haben bereits heute eine sehr hohe technologische Reife erreicht (vgl. Tabelle 3), die einen zeitnahen Praxiseinsatz ermöglicht. Aus klimapolitischer Sicht sind die (zukünftigen) Treibhausgasemissionen, die durch den Betrieb der Fahrzeuge verursacht werden, entscheidend. Aufgrund der langen Nutzungsdauer von Triebzügen (>25 Jahre) und ihren hohen Laufleistungen fallen die CO₂-Emissionen bei der Produktion von Fahrzeug und Technologiekomponenten kaum ins Gewicht (vgl. [5, S. 22]). Die CO₂-Senkungspotenziale der Antriebsoptionen im Fahrzeugbetrieb unterscheiden sich jedoch erheblich.

- BDMUs sind durch die verbesserte Energieeffizienz zwar verbrauchsärmer als herkömmliche DMUs, ihre Energiebereitstellung basiert aber weiterhin auf der Verbrennung von Dieselmotoren, was in einem ständigen CO₂-Ausstoß während des Betriebs resultiert.
- DEMUs arbeiten im Betrieb unter Fahrdraht emissionsfrei und können so auf teilelektrifizierten Strecken zu einer erheblichen Reduktion der CO₂-Emissionen führen. Im dieselelektrischen Modus auf nicht elektrifizierten Streckenabschnitten wird jedoch weiterhin CO₂ emittiert.
- BEMUs und HMUs werden ausschließlich elektromotorisch angetrieben und sind somit lokal emissionsfrei. Der mit dem Betrieb in Verbindung stehende CO₂-Ausstoß ist abhängig von der Art der Bahnstrom- bzw. Wasserstoffherzeugung und somit vom Status der allgemeinen Energiewende. Durch die Nutzung von regenerativ erzeugtem Strom bzw. grünem Wasserstoff ist ein treibhausgasneutraler Betrieb möglich.

Bei der Verwendung von fossilem Kraftstoff sind dieselbasierte Hybride ebenso wie konventionelle DMU nicht mit dem Ziel der Klimaneutralität vereinbar. Eine bilanziell klimaneutrale Lösung ergibt sich bei der Verwendung von synthetischem Kraftstoff („Power-to-Liquid“ (PtL)), da die bei der Verbrennung entstehende CO₂-Menge zuvor bei der Produktion des Kraftstoffs gebunden wurde. Aufgrund des im Vergleich zur reinen Strom- oder Wasserstoffherstellung ineffizienten und damit kostenintensiven Herstellungsprozess von PtL-Kraftstoff (4,50 Euro je Liter Dieseläquivalent [15]) ist eine wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit von PtL-Dieseltriebzügen nicht absehbar. Dieselhybride können möglicherweise als umgebaute Bestandsfahrzeuge kurzfristig einen Beitrag zur CO₂-Verminderung leisten, flächendeckende Neuanschaffungen erscheinen mit Blick auf die Klimaziele, der langen Fahrzeuglebensdauer und der schwierigen Wirtschaftlichkeit von synthetischen Kraftstoffen bei gleichzeitiger Verfügbarkeit von emissionsfreien und effizienten Alternativen am Markt unrealistisch. Obwohl alle vier betrachteten Antriebsalternativen technologisch ausgereift sind oder es zeitnah sein werden, erscheint folglich nur der Einsatz von BEMU und HMU langfristig plausibel. Alle weiteren Untersuchungen dieser Arbeit werden dementsprechend auf diese beiden Alternativen eingegrenzt.

Tabelle 3: Technologiereifegrade innovativer Triebzüge im SPNV

Antriebsoption	BDMU	DEMU	BEMU	HMU
TRL nach [6]	8	9	8	8

4.2 Vergleich der Antriebsoptionen

4.2.1 Fahrzeugbeschaffung

Die Preise (alternativer) Triebzüge können sich in Abhängigkeit von Sitzplatzkapazität, Antriebsart, installierter Speicherkapazität, Losgröße oder enthaltener Vertragsbestandteile stark unterscheiden [5, S. 19]. Dementsprechend variieren auch die angegebenen Beschaffungspreise verschiedener Quellen zwischen 4,3 und 6,2 Mio. € für BEMUs und zwischen 4,5 und 6,9 Mio. € für HMUs (vgl. Übersicht in Tabelle 12 im Anhang). Bei sonst gleichen Voraussetzungen ist die Beschaffung eines HMU aufgrund des komplexeren Antriebsstrangs aus H₂-Drucktank, Brennstoffzellensystem und Batterie im Vergleich zum BEMU mit höheren Kosten verbunden.

4.2.2 Instandhaltungsaufwand

Elektrisch angetriebene Triebzüge sind grundsätzlich wartungsärmer als DMUs. Sie haben eine erwartete Nutzungsdauer von 30 Jahren [8, S. 63]. Während dieses Zeitraums findet eine regelmäßige Instandhaltung statt, die sich in drei Gruppen unterteilen lässt:

- 1) Laufende Fahrzeuginstandhaltung in Abhängigkeit der Fahrleistung
- 2) Zyklische Revisionen im Rahmen der Hauptuntersuchung (alle acht Jahre)
- 3) Austausch von Technologiekomponenten

Aufgrund des komplexeren Antriebsstrangs (Brennstoffzellensystem) ist sowohl die laufende Instandhaltung (0,95 € je Zugkilometer) als auch die zyklische Revision (245.000 €) für HMUs kostenintensiver als für BEMUs (0,85 €/km und 230.000 €) [8, S. 60].

Die Lebensdauer von Batterien und Brennstoffzellensystemen reichen heute nicht an die Nutzungsdauer der Fahrzeuge heran. Dies führt dazu, dass Schlüsseltechnologiekomponenten von BEMUs (Batterien) und HMUs (Brennstoffzellenstacks und Batterien) im Laufe der Fahrzeugnutzungsdauer mehrmals komplett ausgetauscht werden müssen. In der Literatur finden sich Austauschintervalle von 8 bis 15 Jahren für Batterien und von 4 bis 8 Jahren für Brennstoffzellensysteme (vgl. Tabelle 11 im Anhang). Es ist mit Kosten von 1000 €/kWh [4, 13] bis 1300 €/kWh [8, S. 60] für den Batterie-tausch und mit 1000 €/kW [13, S. 33] bis 2000 €/kW [8, S. 60] für den Austausch der Brennstoffzellensysteme zu rechnen.

4.2.3 Energieeffizienz

Die Energiekosten, die für den Betrieb eines Triebzugs anfallen, hängen von den Energiebezugskosten und dem Energieverbrauch ab. Dieser wird von der Wirkungsgradkette des Antriebsstrangs bestimmt.

Der Wirkungsgrad eines elektrischen Antriebsstrangs beträgt aufgrund von Transformator- und Umrichterverlusten 85%. Dieser stellt sich bei einem BEMU während der Fahrt unter der Oberleitung ein. Auf nicht elektrifizierten Streckenabschnitten fallen Verluste von 10% für die Zwischenspeicherung des Stroms in der Batterie an, weshalb sich der Wirkungsgrad auf $90\% \cdot 85\% = 77\%$ reduziert. Im Regionalverkehr verbraucht ein BEMU unter Berücksichtigung von Rekuperation typischerweise etwa 5 kWh/km. [8, S. 54–58] Die von der Oberleitung gelieferte elektrische Energie stammt aus dem Bahnstromnetz und wird vom Netzbetreiber mit etwa 0,12 €/kWh abgerechnet [13, S. 27]. Insgesamt ergeben sich damit spezifische Traktionsenergiekosten von 0,60 €/km.

Beim HMU werden die zum Anfahren und Beschleunigen benötigten hohen Ströme ebenfalls von einer Batterie bereitgestellt. Der dort zwischengespeicherte Strom wird von einer Brennstoffzelle erzeugt, welche eine Effizienz von etwa 60% aufweist. Es ergibt sich folglich ein Wirkungsgrad von $60\% \cdot 90\% \cdot 85\% = 46\%$ [8, S. 54]. Es stellt sich im RB-Verkehr ein kilometerspezifischer Verbrauch von 230 g Wasserstoff ein [8, S. 58], was bei einer Energiedichte von 33,33 kWh/kg [16] einem

Energieverbrauch von 7,7 kWh/km entspricht. Der Bezugspreis von Wasserstoff unterscheidet sich je nach Herstellungs- und Distributionspfad, seine zukünftige Entwicklung ist nicht exakt vorhersehbar. Bukold [17, S. 8] erwartet eine Produktionskostendegression von grünem Wasserstoff von 5,50 €/kg (2019) auf 3 €/kg bis 2050. Bei der Professur für Elektrische Bahnen der TU Dresden geht man nach Gesprächen mit Alstom von einem langfristigen Wasserstoffbezugspreis von 5 €/kg aus [13, S. 28]. Dieser ist gemäß [14] für grünen Wasserstoff plausibel, sofern der Strom für die On-Site-Elektrolyse künftig von sämtlichen Umlagen und Netznutzungsentgelten befreit wird. Klebsch et al. [8] kalkulieren mit einem durchschnittlichen Preis von 4,50 €/kg. In den weiteren Berechnungen wird ein zukünftiger durchschnittlicher Preis von 5 €/kg angenommen.

4.2.4 Speicherkapazität und Reichweite

Konventionelle DMU verfügen über eine Reichweite von 800-2000 km und bewältigen so die im SPNV üblichen täglichen Fahrleistungen von 300-1200 km, ohne Tankpausen einlegen zu müssen [5, S. 17]. Bei der Wahl einer Dieselalternative für nicht oder teilweise elektrifizierte Strecken spielt die Reichweite jedoch eine wesentliche Rolle.

Die Reichweite eines BEMU auf nicht elektrifizierten Streckenabschnitten hängt im Wesentlichen von der installierten Batteriekapazität ab, welche durch das verfügbare Platzangebot, die gewünschte maximale Masse sowie die volumetrische und gravimetrische Energiedichte der Batterien limitiert ist. Traktionsbatterien für den Einsatz im Schienenverkehr erreichen heute eine gravimetrische Energiedichte von 140 Wh/kg [18]. Die Reichweiten der am Markt verfügbaren BEMUs liegen laut Herstellerangaben im Bereich 70-150 km (vgl. Tabelle 10). Dies macht eine regelmäßige Zwischenladung während des Betriebstags erforderlich. HMUs hingegen führen die benötigte Energie in Form von Wasserstoff mit, welcher eine extrem hohe Energiedichte von 33,33 kWh/kg aufweist. Die Drucktanks der am Markt verfügbaren HMUs fassen bis zu 260 kg Wasserstoff (vgl. Tabelle 10), womit Reichweiten von bis zu 1000 km ermöglicht. Damit ist ein Betrieb ohne untertägige Betankung analog zum DMU-Betrieb in den meisten Anwendungsfällen möglich. Im Vergleich zum BEMU ist ein HMU resilienter, da auf Betriebsstörungen flexibel mit Umleitungen, auch über lange nicht elektrifizierte Strecken, reagiert werden kann.

4.2.5 Infrastrukturbedarf

Ein BEMU nimmt über einen Stromabnehmer elektrische Energie aus einer Hochspannungsoberleitung auf. Im deutschen Schienenverkehr sind hierfür 15 kV Nennspannung und 16,7 Hz Nennfrequenz üblich. Dabei sind im Stillstand Ströme bis zu 80 A möglich, sodass sich eine maximale Ladeleistung von 1,2 MW einstellt. Je nach Anwendungsfall kann bei der Umstellung von Diesel- auf Batterietriebzüge auf bereits vorhandene Infrastruktur zurückgegriffen werden (elektrifizierte Bahnhöfe und Teilstrecken), sodass keine oder nur wenige infrastrukturseitige Anpassungen notwendig sind. Die erwartete Lebensdauer der Oberleitungsanlagen geht mit 76 Jahren [13, S. 23] weit über die einzelner Triebzüge hinaus. Bei Bedarf kann BEMU-spezifische Ladeinfrastruktur technisch auf zwei unterschiedliche Arten umgesetzt werden [19, S. 16]:

- 1) Ein Nachladepunkt (auch Stromtankstelle) ist eine kurze Oberleitung, an der ausschließlich im Stillstand geladen werden kann. Da die Befahrbarkeit mit gehobenem Stromabnehmer nicht sichergestellt werden muss, ist diese Variante im Vergleich zur klassischen Streckenelektrifizierung technisch weniger aufwendig und damit kostengünstiger. Die Errichtung einer 700-kW-Ladestation lässt sich laut [6, S. 65] mit 250.000 € abschätzen. Außerdem fallen jährliche Betriebskosten in Höhe von 10.000 € an.
- 2) Ein Nachladeabschnitt entspricht einer klassischen Oberleitung, welche auch Traktionsströme für den fahrenden Zug bereitstellen kann. Nachladeabschnitte sind erforderlich, wenn die stationäre Nachladung während der gewünschten Haltezeiten nicht ausreicht. Für den Aufbau ist

von Investitionen von etwa 950.000 €/km auszugehen¹. Hinzu kommen jährliche Betriebskosten, die etwa 1% der Investitionssumme betragen. [4, S. 86–92]

Ein HMU hingegen benötigt keine zusätzliche Infrastruktur auf der Strecke, sondern nur eine erreichbare Wasserstofftankstelle (zum Beispiel im Depot). Da bisher kein Tankstellennetz existiert, muss vor Aufnahme des Betriebs in der Regel (mindestens) eine neue Wasserstofftankstelle aufgebaut werden [6, S. 63], welche 30 Jahre genutzt werden kann [8, S. 60]. Sie erfordert eine Investition von 1 Mio. € sowie jährliche Betriebskosten von 30.000 €.

Technische Performance: Geschwindigkeit, Beschleunigung, Leistung

Im Regionalverkehr eingesetzte DMU verfügen typischerweise über eine Gesamtantriebsleistung von 530 kW bis 780 kW, mit welcher Beschleunigungen im Bereich $0,6 \text{ m/s}^2$ bis $1,2 \text{ m/s}^2$ und Geschwindigkeiten von 100 km/h bis 140 km/h erreicht werden [9, S. 42]. Dieses Spektrum kann folglich als ausreichend für die Aufgabenbewältigung im Regionalverkehr angesehen werden. Sowohl BEMUs als auch HMUs reihen sich am oberen Ende dieses Spektrums ein und übertreffen die Werte von Dieseltriebzügen teilweise deutlich (für Details s. Tabelle 9). BEMUs können darüber hinaus während des Betriebs unter Fahrdraht ihre Antriebsleistung signifikant erhöhen (vgl. Bombardier Talent 3 in Tabelle 9) und bis zu 160 km/h schnell fahren.

4.3 Kostenstruktur der Antriebsoptionen

Die Ausgaben, die in Zusammenhang mit der Wahl der Antriebsart stehen, teilen sich auf die drei Säulen „Fahrzeug“, „Energie“ und „Infrastruktur“ auf und umfassen

- die Anfangsinvestition in die Fahrzeuge,
- laufende Fahrzeuginstandhaltungskosten,
- zyklische Revisionskosten,
- Austauschkosten,
- die im laufenden Fahrbetrieb anfallenden Energiekosten,
- Investitionen in antriebspezifische Infrastruktur und
- Infrastrukturbetriebskosten.

Die Ausgaben fallen je nach Position in Abhängigkeit

- der Nutzungsdauer (Revision, Technologietausch, Infrastrukturbetrieb),
- der Fahrleistung (laufende Instandhaltung, Energiekosten),
- der Flottengröße (Fahrzeugbeschaffung, Revision, Technologietausch) und/oder
- des Infrastrukturbedarfs (Investitionen in Streckenelektrifizierung, Ladestationen und Tankstellen sowie Betriebskosten der Infrastruktur)

an.

4.4 Analysen zur Wirtschaftlichkeit

4.4.1 Annahmen

Um die in Abschnitt 3.3.1 definierten Szenarien simulieren zu können, müssen Annahmen bezüglich aller kostenbeeinflussenden Parameter getroffen werden. Die gewählten Werte basieren auf den

¹ Der Aufbau einer klassischen Oberleitungsanlage kostet durchschnittlich etwa 750.000 €/km, die notwendige Bahnstromversorgungsanlage etwa 200.000 €/km. Da beim Aufbau von Nachladeabschnitten für BEMUs günstig zu elektrifizierende Teilstrecken ausgewählt werden, ist davon auszugehen, dass keine sonstigen Kosten für Umbaumaßnahmen (zum Beispiel an Brücken oder Tunneln, durchschnittlich 200.000 €/km), anfallen.

Ergebnissen der Literaturrecherche zu Einflussfaktoren und Kostenstruktur, die in den vorangegangenen Abschnitten 4.2 und 4.3 erläutert wurden (detaillierte Auflistung siehe Anhang, Tabelle 13). Als Betrachtungszeitraum wird die typische Fahrzeugnutzungsdauer von 30 Jahren gewählt.

4.4.2 Ergebnisse der TCO-Analyse

Basierend auf den getroffenen Parameterannahmen ergeben sich für die Kostenarten und Investitionsgüter spezifische Beträge, die in Tabelle 4 aufgeführt sind. Fahrleistung sowie Fahrzeug- und Infrastrukturbedarf sind vom jeweiligen Betriebsszenario und der gewählten Antriebsoption abhängig.

Implikationen für Szenario 1

Die jährliche Fahrleistung von 467.200 km ist durch die Umlauflänge und den Taktfahrplan in den Szenarien definiert (vgl. Abschnitt 3.3.1). Beim Einsatz von HMUs ist die minimale Flottengröße von zwei Triebzügen ausreichend, da keine unertägigen Tankfahrten notwendig sind (Reichweite der HMUs größer als tägliche Fahrleistung von 640 km). Es wird eine Wasserstofftankstelle benötigt.

Tabelle 4: Kostensätze und Investitionsbeträge der modellierten Fahrzeuge und Infrastruktur, 2020

	Einheit	BEMU	HMU
<i>Anfangsinvestitionen in Fahrzeuge und Infrastruktur</i>			
Investition je beschafftes Fahrzeug	€	6.200.000	6.900.000
Investition je elektrifizierter Kilometer	€	950.000	–
Investition je Ladestation/Tankstelle	€	250.000	1.000.000
<i>Zyklische Fahrzeugkosten</i>			
Revisionskosten (alle 8 Jahre)	€	230.000	245.000
Austauschkosten Batterie (alle 12 Jahre)	€	600.000	350.000
Austauschkosten Brennstoffzelle (alle 8 Jahre)	€	–	400.000
<i>Jährliche Infrastrukturbetriebskosten</i>			
Betriebskosten p. a. Streckenelektrifizierung	€/km	9.500	–
Betriebskosten p. a. je Ladestation/Tankstelle	€	10.000	100.000
<i>Fahrleistungsspezifische Kosten</i>			
Laufende Fahrzeuginstandhaltungskosten	€/km	0,85	0,95
Spezifische Traktionsenergiekosten	€/km	0,60	1,15

Der Einsatz von BEMUs ist immer mit der durch den Fahrplan vorgegebenen minimalen Anzahl an Triebzügen möglich, sofern genügend Ladeinfrastruktur vorhanden ist. Im Szenario 1 ist keine Streckenelektrifizierung notwendig, da die Reichweite für eine einfache Fahrt von 40 km ausreicht (Energieverbrauch von 200 kWh, installierte Batteriekapazität von 600 kWh) und die Batterie in der 20-minütigen Wendezeit vollständig nachgeladen werden kann (potenzielle Nachladung von 233 kWh an 700-kW-Ladestation). Es werden folglich lediglich zwei Nachladepunkte an den Endbahnhöfen benötigt.

Implikationen für Szenario 2

Analog zu Szenario 2 sind Jahresfahrleistung und Fahrzeugbedarf durch die Rahmenbedingungen von Szenario 2 festgelegt.

Beim Einsatz von BEMUs ist das stationäre Laden an den Endpunkten nicht ausreichend, da in der 10-minütigen Wendezeit nur 117 kWh an elektrischer Energie aufgenommen werden können, nachdem auf der 80 km langen Strecke 400 kWh verbraucht wurden. Durch die Elektrifizierung von Streckenabschnitten wird sowohl die Batterie geladen (bei einer angenommenen Ladeleistung von 1,2 MW und Reisegeschwindigkeit von 60 km/h ergibt sich eine Energieaufnahme von 20 kWh/km) als auch die Energieentnahme aus der Batterie verringert (Oberleitung liefert Traktionsenergie auf elektrifiziertem Abschnitt). Um den Energiebedarf des RB-Betriebs im Modell zu decken sind jeweils mindestens 11,33 km Oberleitung auf der einfachen Strecke erforderlich. Es wird im Folgenden angenommen, dass eine Streckenelektrifizierung von insgesamt 23 km durchgeführt wird.

Kapitalwerte

Die resultierenden Kapitalwerte für die beiden Antriebsoptionen in den Betriebsszenarien sind gemäß der in Unterabschnitt 3.3.3 erläuterten Methode berechnet und in Tabelle 5 aufgeführt. Abbildung 1 illustriert die Ergebnisse.

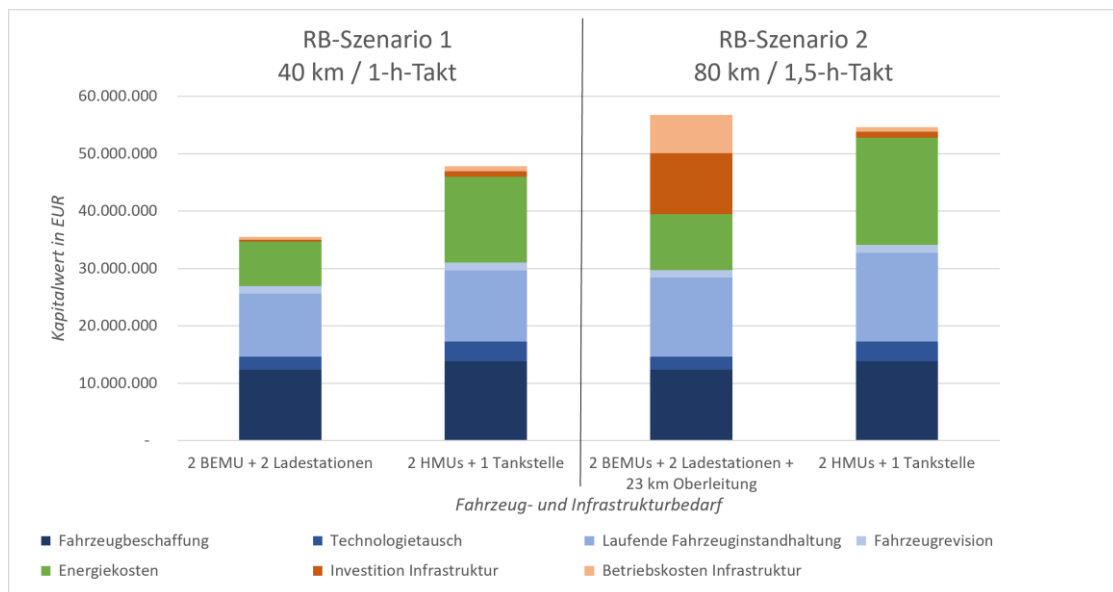
Tabelle 5: BEMU und HMU im TCO-Vergleich. Kapitalwerte in Tausend € über Fahrzeugnutzungsdauervon 30 Jahren, Basisjahr 2020, Kalkulationszins von 0,49%.

Anwendungsfall	Szenario 1: 40 km / 1-h-Takt		Szenario 2: 80 km / 1,5-h-Takt	
	BEMU	HMU	BEMU	HMU
Benötigte Fahrzeuge	2	2	2	2
Benötigte Infrastruktur	2 Ladestationen	1 Tankstelle	2 Ladestationen, 23 km Oberleitung	1 Tankstelle
<i>Anfangsinvestitionen</i>				
Fahrzeugbeschaffung	12.400	13.800	12.400	13.800
Infrastruktur	500	1.000	22.350	1.000
<i>Kosten im Betrachtungszeitraum</i>				
Technologietausch	2.199	3.503	2.199	3.503
Laufende Instandhaltung	11.054	12.355	13.818	15.443
Revision	1.277	1.360	1.277	1.360
Energie	7.803	14.956	9.754	18.695
Betrieb der Infrastruktur	557	835	6.639	835
<i>Restwerte nach Betrachtungszeitraum</i>				
Infrastruktur	261	-	11.683	-
Kapitalwerte gesamt	35.528	47.809	56.753	54.636

Im Szenario 1 ist der Einsatz von BEMUs klar die günstigere Wahl. Dabei sind die Ausgaben für jede einzelne Position geringer als bei der insgesamt rund ein Drittel teureren HMU-Option. Der größte Unterschied ergibt sich bei den Energiekosten, welche beim HMU die betragsmäßig größte Kostenposition darstellen. Auffällig ist, dass die Infrastrukturausgaben bei beiden Antriebsoptionen einen verschwindend geringen Anteil an den Gesamtausgaben ausmachen.

Im Szenario 2 steigt der Anteil der Energiekosten am HMU-Kapitalwert aufgrund der höheren Fahrleistung weiter auf über ein Drittel der Gesamtausgaben an. Allerdings sind für den Betrieb von BEMUs erhebliche Investitionen in den Bau der Oberleitungsinfrastruktur notwendig, die ihren Einsatz trotz der Berücksichtigung der Infrastrukturrestwerte geringfügig kapitalintensiver als den des HMU machen.

Abbildung 1: Ergebnisse der TCO-Berechnung. In dieser Darstellung sind die abgezinsten Restwerte der Infrastruktur innerhalb der Position „Investitionen Infrastruktur“ berücksichtigt.



5 Diskussion

Im folgenden Kapitel werden zunächst die Vor- und Nachteile der Antriebsoptionen diskutiert und ihr Einsatz qualitativ gegenüber der Dieseltraktion bewertet. Anschließend wird die Zusammensetzung der TCO in den beiden durchgeführten Fallstudien analysiert, um entscheidende Einflussfaktoren auf den Wirtschaftlichkeitsvergleich zu ermitteln. Die Erkenntnisse werden auf den deutschen Schienenpersonennahverkehr (SPNV) übertragen. Abschließend werden die Grenzen der Untersuchung diskutiert.

5.1 Vor- und Nachteile der Antriebsoptionen

Tabelle 6 illustriert eine auf den Erkenntnissen der Literaturrecherche in Abschnitt 4.2 basierende qualitative Bewertung von BEMU und HMU mit Hinblick auf verschiedene Kriterien. Als Referenz wird die heute übliche Dieseltraktion auf nicht elektrifizierten Strecken verwendet. BEMUs und HMUs sind nicht nur grundsätzlich geeignet, DMUs zu ersetzen, sondern haben mit ihrem elektrischen Antrieb auch Vorteile abseits der lokalen Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionsfreiheit. Sie bieten höhere Leistungen, Beschleunigungen und Geschwindigkeiten, geringere Energieverbräuche, geringere Lärmemissionen, geringere Wartungsintensitäten sowie längere Fahrzeuglebensdauern. Nachteile ergeben sich durch geringere Reichweiten und die damit verbundene geringere betriebliche Resilienz sowie durch den kostenintensiven Austausch der Hochtechnologiekomponenten.

Im direkten Vergleich der beiden Alternativen ergibt sich ein großer Vorteil des HMUs: die hohe Reichweite, ermöglicht durch die Nutzung von Wasserstoff als Energieträger. Der damit einhergehende komplexe technische Aufbau aus H₂-Drucktank, Brennstoffzellensystem und Batterie führt gegenüber der einfachen BEMU-Konfiguration (direkte Nutzung des Stroms aus der Oberleitung, Zwischenspeicherung in Batterie) allerdings zu höheren Instandhaltungs- und Technologietausch aufwänden und höherem Energieverbrauch. Infrastrukturseitig ist kein pauschaler Vergleich möglich, da der Bedarf von den Gegebenheiten des konkreten Anwendungsfalls abhängt.

Tabelle 6: Vor- und Nachteile von BEMU und HMU gegenüber der Dieseltraktion

Bewertungskriterium	BEMU		HMU
Technische Performance	++		+
Energieverbrauch	++		+
Reichweite	--		-
Lärmemissionen	+		+
Nutzungsdauer	+		+
Wartungsintensität	++		+
Technologietausch	-		--
Infrastrukturbedarf	o bis	--	o bis -

5.2 Wirtschaftlicher Vergleich der Alternativen

Für den Vergleich der Wirtschaftlichkeit bietet es sich an, erneut eine Gruppierung der TCO-Komponenten anhand der drei Säulen „Fahrzeug“, „Energie“ und „Infrastruktur“ vorzunehmen.

Im Bereich „Fahrzeug“ besteht ein vom Szenario unabhängiger wirtschaftlicher Vorteil für den batterieelektrischen Triebzug. Er ist sowohl in der Anschaffung als auch in der Instandhaltung günstiger, da seine Hochtechnologiekomponenten weniger häufig ausgetauscht werden müssen und auch sonst wartungsärmer als die des Brennstoffzellentriebzugs sind.

Auch im Bereich „Energie“ sind BEMUs aufgrund des geringeren Energieverbrauch und den geringeren Energiebezugskosten klar wirtschaftlicher als HMUs. Je höher die Fahrleistung, desto nachteiliger sind die hohen Energiekosten für die TCO des HMU-Betriebs.

Für den Bereich „Infrastruktur“ lassen sich keine pauschalen Aussagen treffen, wie die Szenarien 1 und 2 zeigen. Während der Infrastrukturbedarf für den HMU-Betrieb einer Linie relativ fix ist (in der Regel eine Wasserstofftankstelle) und nur einen sehr geringen Anteil der TCO verursacht, hängt er beim BEMU von der Streckencharakteristik ab. Wird für den BEMU-Betrieb wie im Szenario 1 nur wenig neue Infrastruktur benötigt, so kann die Errichtung von kurzen Oberleitungsanlagen günstiger sein als die Inbetriebnahme einer neuen Wasserstofftankstelle. Für lange Strecken und Fahrpläne mit kurzen Haltezeiten (vgl. Szenario 2) können die Kosten für die Streckenelektrifizierung die Infrastrukturkosten des HMU-Betriebs jedoch um ein Vielfaches übersteigen. Da der BEMU in den Bereichen Fahrzeug und Betrieb immer die kostengünstigere Wahl darstellt, ist die Aufnahme eines HMU-Betriebs nur dann die wirtschaftliche Wahl, wenn geringere Infrastrukturinvestitionen und -betriebskosten die vorher genannten Mehrkosten ausgleichen. Dies ist nur für Anwendungsfälle denkbar, bei denen ein BEMU-Betrieb mit signifikantem Aufbau von neuer Infrastruktur einhergeht.

5.3 Implikationen für den deutschen SPNV

Die beiden Fallstudien bilden zwei exemplarische Betriebsszenarien ab, an denen der Einfluss von Streckenlänge, Wendezeit und Fahrleistung auf die TCO deutlich wird. Aufgrund der Vielfalt der möglichen Liniencharakteristiken und Rahmenbedingungen kann keine allgemeine Aussage über die wirtschaftliche Wahl abgeleitet werden. Im konkreten Anwendungsfall muss eine genaue Kostenrechnung durchgeführt werden. Es können jedoch Faktoren identifiziert werden, welche sich im direkten Wirtschaftlichkeitsvergleich vor- oder nachteilig für eine Alternative auswirken. Diese sind in Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7: Liniencharakteristiken und Rahmenbedingungen als Kostentreiber für den Einsatz von Dieselalternativen und deren Einfluss auf den Wirtschaftlichkeitsvergleich zwischen BEMU und HMU.

Einflussfaktor	Beeinflusste Kostenarten	Günstig für
Hohe Fahrleistung	Energiekosten, Instandhaltungskosten	BEMU
Hoher Fahrzeugbedarf	Beschaffungskosten	BEMU
Bereits elektrifizierte Bahnhöfe/ Teilstrecken	BEMU-Infrastrukturinvestitionen	BEMU
Anbindung an bestehende H2-Tank- stelle	HMU-Infrastrukturinvestitionen	HMU
Lange Strecken	BEMU-Infrastrukturinvestitionen	HMU

In Deutschland existieren etwa 450 dieselbetriebene Linien [19, S. 13]. Davon sind 200 weniger als 40 km lang und weisen typischerweise auch am Endbahnhof keine Oberleitungsanlage auf. Die klare wirtschaftliche Überlegenheit des BEMU im Szenario 1 lässt darauf schließen, dass für diese Strecken der BEMU die Vorzugslösung darstellt. Weitere 170 Linien sind zwischen 40 und 100 km lang und verbinden typischerweise mittelgroße Städte. Häufig sind die Endbahnhöfe elektrifiziert, sodass nur geringe Mengen BEMU-spezifische Infrastruktur zusätzlich aufgebaut werden müssten.

Es bietet sich folglich ein BEMU-Betrieb unter Ausnutzung der existierenden Infrastruktur an (vgl. Szenario 2 mit verringerten BEMU-Infrastrukturausgaben). Für die verbleibenden 80 „Langläuferlinien“ (>100 km) ist die Wirtschaftlichkeit des BEMU stark vom Elektrifizierungsgrad der Strecke abhängig. Hier könnte die Reichweitenstärke und der damit verbundene geringe Infrastrukturbedarf des HEMU die günstigere Option darstellen (vgl. Szenario 2).

5.4 Grenzen der Untersuchung

Diese Arbeit hat die wichtigen Faktoren bei der Wahl der Antriebsart identifiziert und ihren Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit aus Betreiberperspektive anhand zweier Fallstudien untersucht. Die Betrachtung beschränkt sich dabei auf den deutschen SPNV, andere Zuggattungen im Personen- und Güterverkehr oder die vorliegenden Bedingungen in anderen Ländern wurden nicht untersucht. Für die durchgeführte Kapitalwertberechnung ist das Treffen von exakten Annahmen für die einzelnen Parameter erforderlich. Teilweise sind diese allerdings mit hoher Unsicherheit verbunden, da Erfahrungen aus dem Realbetrieb fehlen oder zukünftige Entwicklungen ungewiss sind. Um die Auswirkung einer (womöglich falschen) Schätzung zu untersuchen, können Sensitivitätsanalysen für unsichere, aber entscheidende Parameter (z. B. Wasserstoffbezugspreis) durchgeführt werden, auf die im Hinblick auf den Umfang dieser Arbeit verzichtet wurde. Es ist des Weiteren darauf hinzuweisen, dass für die Abschätzung der Infrastrukturbedarfe und Energieverbräuche ein simples Modell verwendet wurde, welches die Zwischenhalte und Geschwindigkeitsveränderungen nicht berücksichtigt, sondern lediglich mit Durchschnittswerten arbeitet. Es wurden zwei Betriebsszenarien betrachtet, die sich bezüglich Streckenlänge, Taktung und Fahrleistung unterscheiden. Hier sind viele weitere Szenarien denkbar, welche untersucht werden können.

6.1 Zusammenfassung

Mit Hinblick auf das Ziel der Treibhausgasneutralität 2045 zeichnen sich im SPNV zwei alternative Antriebsoptionen ab, die die Dieseltraktion auf nicht elektrifizierten Strecken ablösen können. Sowohl BEMU als auch HMU sind heute technologisch reif und weisen neben der lokalen Emissionsfreiheit weitere Vorteile gegenüber den heute auf nicht elektrifizierten Strecken eingesetzten DMU auf: höhere Leistungen, geringere Lärmemissionen, geringere Wartungsintensitäten, längere Nutzungsdauern und höhere Energieeffizienz.

In der direkten Gegenüberstellung der beiden Alternativen kann der HMU durch eine hohe Reichweite und die damit verbundene betriebliche Resilienz punkten. BEMUs können in vielen Fällen bereits vorhandene Oberleitungsinfrastruktur nutzen und sind günstiger in der Anschaffung und im Betrieb, was durch den weniger komplexen, sehr energieeffizienten Antriebsstrang bedingt ist.

Ein Vergleich der Wirtschaftlichkeit beider Alternativen wurde durch eine TCO-Analyse über den Fahrzeugnutzungszeitraum von 30 Jahren realisiert. Die Zusammensetzung der für zwei Regionalverkehrsszenarien berechneten Kapitalwerte belegt den wirtschaftlichen Vorteil, den der BEMU im Bereich der Anschaffung und Betriebs der Fahrzeuge, insbesondere im Bereich der Energiekosten, aufweist. Es ist zu erwarten, dass er auf einem Großteil der im deutschen SPNV bisher nicht elektrifizierten Strecken die Vorzugslösung darstellt. Auf langen Strecken, welche im Bereich der maximalen Reichweite der BEMUs liegen oder darüber hinaus gehen, sind allerdings hohe Infrastrukturinvestitionen für den BEMU-Betrieb notwendig. Hier kann der Aufbau einer Wasserstofftankstelle und der Einsatz von HMUs die wirtschaftliche Wahl darstellen. Der HMU-Betrieb wird des Weiteren von kurzen Halte- und Wendezeiten und geringen Gesamtfahrleistungen begünstigt.

6.2 Ausblick

Innerhalb der nächsten Jahre werden sowohl BEMUs als auch HMUs von verschiedenen Aufgabenträgern im Linienbetrieb eingesetzt. Große Pilotprojekte sind etwa der Einsatz von 55 BEMUs im Schleswig-Holsteiner SPNV-Netz ab 2023 und der Einsatz von 27 HMUs im Taunus-Netz ab 2022 [5, S. 25]. Aufschlussreich für den Vergleich der beiden Antriebsoptionen wird auch die parallele Erprobung von BEMUs und HMUs im Norden von Rheinland-Pfalz sein, welche ab 2024 stattfindet [7]. Insgesamt ist bei den Bestellungen ein Trend Richtung BEMU erkennbar. Der Verband der Bahnindustrie in Deutschland bekräftigt dies mit einem im Juli 2021 erschienenen Strategiepapier, das sich für einen vollständig elektrischen Bahnverkehr ausspricht, der neben der Streckenelektrifizierung durch die Markteinführung batterieelektrischer Triebzüge erreicht werden soll. Die in der vorliegenden Arbeit behandelten alternativen Fahrzeugkonzepte wurden von den Zugherstellern zuerst für den deutschen Markt entwickelt, der in dieser Hinsicht eine Vorreiterrolle einnimmt. Interessant für die Weiterentwicklung der Konzepte können auch die Erfahrungen im europäischen Ausland sein. So ist für den französischen Schienenverkehr, wo seit Jahren Zweikrafttriebzüge mit Dieselmotor und Stromabnehmer eingesetzt werden, der Betrieb von bimodalen HMUs geplant [20].

Tabelle 8: Einfluss künftiger Technologieentwicklungen auf Wirtschaftlichkeit von BEMU und HMU

Potenzielle Entwicklung	Beeinflusste Kostenarten	Günstig für
Energiedichte der Batterien ↑	BEMU-Infrastrukturkosten ↓	BEMU
Preis pro kWh Batteriekapazität ↓	Fahrzeugbeschaffungskosten ↓, Austauschkosten ↓	BEMU
Batterielebensdauer ↑	Austauschkosten ↓	BEMU
Preis von Brennstoffzellensystemen ↓	HMU-Austauschkosten ↓	HMU
Lebensdauer von Brennstoffzellensystemen ↑	HMU-Beschaffungskosten ↓	HMU
Kosten für Elektrolyseure ↓	HMU-Energiekosten ↓	HMU

Neben den Betriebserfahrungen sind für die künftige Entwicklung des Marktes die Weiterentwicklungen der Schlüsseltechnologiekomponenten relevant, welche das Potenzial haben, die TCO bei der Alternativen deutlich zu senken. Unterschiedlich starke Veränderungen können den Wirtschaftlichkeitsvergleich in Richtung einer der beiden Antriebsoptionen beeinflussen (vgl. Tabelle 8).

Danksagung

Diese Veröffentlichung ist entstanden im Rahmen der Profilregion Mobilitätssysteme Karlsruhe, gefördert aus Mitteln des Ministeriums für Wissenschaft, Forschung und Kunst und des Ministeriums für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau Baden-Württemberg und als nationales Leistungszentrum aus Mitteln der Fraunhofer-Gesellschaft.

Beitrag der Autoren

Fabio Frank - Konzeption, Methodik, Validierung, Formale Analyse, Untersuchung, Ressourcen, Datenbereinigung, Verfassen des Manuskripts, Überarbeitung des Manuskripts, Visualisierung.

Till Gnann - Konzeption, Ressourcen, Überarbeitung des Manuskripts, Betreuung, Projektleitung, Fördermittelakquirierung.

7 Literaturverzeichnis

- [1] Allianz pro Schiene. *Elektrifizierung erklärt: Das Schienennetz muss unter Strom stehen*. 2020. URL: <https://www.allianz-pro-schiene.de/themen/infrastruktur/elektrifizierung-bahn/> (besucht am 15.07.2021).
- [2] *Klimaschutzgesetz 2021: Generationenvertrag für das Klima*. 2021. URL: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaschutzgesetz-2021-1913672>
- [3] *Kostenvergleich: Streckenelektrifizierungen versus Einsatz alternative Antriebe*. 2021. URL: <https://www.bmvi.de/goto?id=477908> (besucht am 15.07.2021).
- [4] Walther, C. et al. *Abschlussbericht zur Studie „Elektrifizierungsvarianten für das deutsche Schienennetz“*. Karlsruhe, 25. Juni 2021.
- [5] Pagenkopf, J. et al. *Marktanalyse alternativer Antriebe im deutschen Schienenpersonennahverkehr*. 2020. URL: https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2020/09/now_marktanalyse-schienenverkehr-1.pdf (Besucht am 28.04.2021).
- [6] Wille, N. et al. *Innovatives Triebfahrzeug Innovatives Triebfahrzeug - Abschlussbericht: Identifizierung von Forschungsansätzen und technischen Grundlagen zur Entwicklung eines leiseren, umweltfreundlicheren und betriebswirtschaftlich darstellbaren innovativen Triebfahrzeugs für bislang nicht elektrifizierte Netze*. Köln, 5. Nov. 2020. URL: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/E/innovatives-triebfahrzeug-abschlussbericht.pdf?__blob=publicationFile (besucht am 06.06.2021).
- [7] Ramboll und NahverkehrsBeratung Südwest. *Machbarkeitsstudie Alternative Antriebe im ZV SPNV RP Nord: Anlage Verbandsversammlung*. 2. Juli 2021. URL: https://www.spnv-nord.de/fileadmin/user_upload/zweckverband/versammlungen/nord/66/oeT_01-66-2021_Vorlagen.pdf (besucht am 05.07.2021).
- [8] Klebsch, W., Guckes, N und Heiningen, P. *Bewertung klimaneutraler Alternativen zu Dieseltriebzügen: Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen am Praxis-Beispiel >Netz Düren<*. Hrsg. von VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V. 1. Juni 2020. URL: <https://edocs.tib.eu/files/e01fn20/1737544083.pdf> (besucht am 28.04.2021).
- [9] Klebsch, W., Heiningen, P. und Martin, J. *Alternativen zu Dieseltriebzügen im SPNV*. Hrsg. von VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V. 2019. URL: <https://www.vde.com/resource/blob/1885872/5f42b90859412b8590d0c7539604b0bc/studie-alternativen-zu-dieseltriebzuegen-im-schienenpersonennahverkehr-data.pdf> (besucht am 28.04.2021).
- [10] Plank-Wiedenbeck, U. et al. *Schlussbericht: Machbarkeitsstudie: Pilotprojekt Einsatz von H2BZ-Triebwagen in Thüringen*. Weimar, 1. Jan. 2019
- [11] Ruf, Y. et al. *Study on the use of fuel cells and hydrogen in the railway environment*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2019. ISBN: 9789295215115.
- [12] Wittemann, N. T. und Meinelt, F. *Bewertung von konventionellen und alternativen Antrieben für den Rheinland-Pfalz-Takt 2030 unter besonderer Betrachtung des Pilotprojekts „Pfalznetz“*. Dresden, 24. Juli 2019. URL: https://www.zspnv-sued.de/fileadmin/user_upload/Endbericht_alternative_Antriebe_Pfalznetz_O_.pdf (besucht am 28.04.2021).

- [13] Müller, A. *Wissenschaftliche Bewertung von alternativen, emissionsarmen Antriebskonzepten für den bayerischen SPNV*. Dresden, 3. Nov. 2017. URL: <https://beg.bahnland-bayern.de/de/themen/gutachten-alternative-antriebe-im-bahnland-bayern?file=files/media/corporate-portal/aktuelles/2018/Technische%20und%20wirtschaftliche%20Bewertung%20alternativer%20Antriebskonzepte%281%29.pdf> (besucht am 22.06.2021).
- [14] Ernst & Young GmbH Wirtschaftsprüfungsgesellschaft et al. *Ergebnisbericht: Wasserstoff-Infrastruktur für die Schiene*. Berlin, 2016. URL: https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2020/09/h2-schiene_ergebnisbericht_online.pdf (besucht am 06.06.2021).
- [15] Siegemund, S. et al. *The potential of electricity-based fuels for low-emission transport in the EU: An expertise by LBST and dena*. Berlin, 1. Nov. 2017. URL: <https://www.vda.de/dam/vda/publications/2017/E-Fuels-Study/E-Fuels%20Study.pdf> (besucht am 08.08.2021).
- [16] *Rechnen Sie mit Wasserstoff. Die Datentabelle*. 2013. URL: https://www.linde-gas.at/de/images/1007_rechnen_sie_mit_wasserstoff_v110_tcm550-169419.pdf (besucht am 16.08.2021).
- [17] Bukold, S. *Blauer Wasserstoff: Perspektiven und Grenzen eines neuen Technologiepfades*. 1. Jan. 2020. URL: <https://green-planet-energy.de/fileadmin/docs/publikationen/Studien/blauer-wasserstoff-studie-2020.pdf> (besucht am 08.07.2021).
- [18] *Energiespeicher der Elektromobilität: Entwicklung der Energiedichten*. 17. Dez. 2020. URL: <https://www.bundestag.de/resource/blob/819220/31128d3d32638f43627fa8a99bd3cb83/W D-8-090-20-pdf-data.pdf> (besucht am 16.08.2021).
- [19] Culemann, C.-R. et al. *Emissionsfreie Mobilität – Eine Strategie für den Einsatz von batterieelektrischen Triebzügen und Ladeinfrastruktur in Deutschlands Schienenpersonenverkehr*. Berlin, 1. Juli 2021. URL: https://bahnindustrie.info/fileadmin/Leitfaeden_DE/210506_VDB_Strategiepapier_Emissionsfreier_Schienenverkehr.pdf (besucht am 11.07.2021).
- [20] *Erste Bestellung von Wasserstoffzügen in Frankreich – ein historischer Schritt in Richtung nachhaltiger Mobilität*. 8. Apr. 2021. URL: https://www.alstom.com/sites/alstom.com/files/2021/04/09/20210408_PR_Hydrogen_SNCF_Voyageurs_DE.pdf
- [21] Deutsche Bahn. *DB Netze Infrastrukturregister: GeoViewer*. 2021. URL: <https://geovdbn.deutschebahn.com/isr> (besucht am 27.06.2021).

A.1 Anhang: Ergänzende Tabellen und Abbildungen

Tabelle 9: Elektrische Antriebsleistung, maximale Beschleunigung und Höchstgeschwindigkeit von BEMUs und HMUs. Quellen: [5] (BEMU) und [8] (HMU).

Typ	Hersteller / Modell	Antriebsleistung (kW)	Max. Beschl. (m/s ²)	Höchstgeschwindigkeit (km/h)
BEMU	Bombardier Talent 3	1010 (OL: 2020)	1,0	140 (OL: 160)
	Siemens Mireo Plus B	k. A.	1,1 - 1,25	140 (OL: 160)
	Stadler FLIRT Akku	1000	k. A.	140 (OL: 160)
	Alstom Coradia Continental	k. A.	k. A.	160
HMU	Alstom Coradia iLINT	2 x 277 / 367	1,1	140
	Siemens Mireo Plus H	2 x 850	1,0 - 1,1	140 - 160

Abbildung 2: Bundesschiennetz 2021 nach Traktionsart aus dem Infrastrukturregister der Deutschen Bahn [21]: Elektrifizierte DB-Strecken sind hellrot (Oberleitung) und grün (Stromschiene) dargestellt, nicht elektrifizierte DB-Strecken schwarz. Nicht-DB-Strecken sind dunkelrot eingezeichnet.



Abbildung 3: Bestandsanalyse von Wille et al. [6]: Fahrzeugsegmente und Dieselanteil

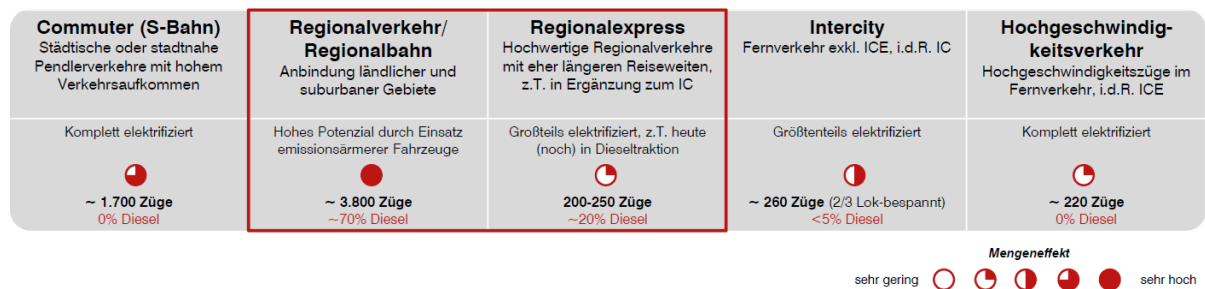


Tabelle 10: Herstellerangaben zu Speicherkapazität und Reichweite von verschiedenen BEMU und HMU. Quelle: [8] (wenn nicht anders angegeben)

Typ	primärer Energie- speicher	Hersteller / Modell	Speicherkapazität	Reichweite (km)
BEMU	Batterie	Bombardier Talent 3	300 - 440 kWh [5]	80 - 100 [5]
		Siemens Mireo Plus B	580 - 700 kWh	80 - 120
		Stadler FLIRT Akku	k. A.	80 - 150 [5]
		Alstom Coradia Continental	k. A.	70 - 120 [5]
HMU	H2-Tank	Alstom Coradia iLINT	260 kg	1000
		Siemens Mireo Plus H	130 - 250 kg	550 - 900

**Tabelle 11: Literaturangaben zum erwarteten Austauschintervall der Hochtechnologie-
komponenten**

Quelle	Austauschintervall für Batterien (Jahre)	Austauschintervall für Brennstoffzellensysteme (Jahre)
[6]	12	8
[8]	8	5
[9]	8 bis 15	4 bis 8

Tabelle 12: Literaturangaben zu Beschaffungspreisen von BEMU und HMU in Mio. €

Quelle	BEMU	HMU	Bemerkungen
[5]	5,5 - 6,5		Mehrkosten von 1,5 Mio. € auf DMU à 4,5 Mio. €
[6]	4,5	4,5 - 4,7	Aufschlag von 25% (BEMU, Marktdaten) bzw. 25-30% (HMU, Schätzung) auf DMU à 3,6 Mio. €
[8]	6,2	6,9	Mehrkosten ggü. EMU (4,3 Mio. €) aufgrund zusätzlicher Technologiekomponenten
[13]	4,3	5,3	-

Tabelle 13: Annahmen der kostenbeeinflussenden Parameter, Basisjahr 2020

Parameter	Einheit	Wert BEMU	Wert HMU
<i>Fahrzeug</i>			
Investition Beschaffung	€	6.200.000	6.900.000
Laufende Instandhaltung	€/km	0,85	0,95
Zyklische Revisionskosten	€	230.000	245.000
Revisionszyklus	Jahre	8	8
Installierte Batteriekapazität	kWh	600	350
Austauschzyklus Batterie	Jahre	12	12
Spezifische Austauschkosten Batterie	€/kWh	1.000	1.000
Installierte Brennstoffzellenleistung	kW	–	400
Austauschzyklus Brennstoffzelle	Jahre	–	8
Spezifische Austauschkosten Brennstoffzelle	€	–	1.000
<i>Energie</i>			
Energieverbrauch	kWh/km	5,00	7,67
Energiepreis	€/kWh	0,12	0,15
<i>Infrastruktur</i>			
Investition Streckenelektrifizierung	€/km	950.000	–
Betriebskosten p. a. Streckenelektrifizierung	€/km	9500	–
Ladeleistung Nachladeabschnitte	kW	1200	–
Investition je Ladestation	€	250.000	–
Betriebskosten p. a. je Ladestation	€	10.000	–
Ladeleistung Ladestation	kW	700	–
Investition je Wasserstofftankstelle	€	–	1.000.000
Betriebskosten p. a. je Tankstelle	€	–	100.000