



Einsatz alternativer Antriebstechnologien im SPNV des Südthüringennetzes

Technische Machbarkeit, Ökobilanz und Wirtschaftlichkeit des Einsatzes von BEMU- und HEMU-Fahrzeugen

Studie

Einsatz alternativer Antriebstechnologien im Schienenpersonennahverkehr des Südthüringennetzes

Schlussredaktion:

Nora Dörr,
VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V.

VDE-Team bei der Studie im Auftrag des Thüringer Ministeriums für Umwelt, Energie und Naturschutz (TMUEN):

Nora Dörr
Nina Guckes
Dr. Wolfgang Klebsch
Dr. Michael Riess

Lektorat:

Annelie Oleniczak,
VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V.

Disclaimer:

Alle folgenden Hinweise und Empfehlungen gelten nur als Richtwerte und sollen dabei helfen, fundierte Entscheidungen zu treffen, bei Lieferanten die richtigen Fragen stellen zu können oder auch die korrekten Begriffe zu verwenden. Die nachfolgenden Details haben keinen Anspruch auf Vollständigkeit und sollen zur Orientierung dienen.

In keinem Fall sind die Verfasser in irgendeiner Stufe vertraglich, deliktisch, verschuldens-unabhängig, haftpflichtig, gewährleistungspflichtig oder anderweitig haftbar für besondere, zufällige oder Folgeschäden wie z. B. Verzögerung, Unterbrechung, Produktverlust, Verlust erwarteter Gewinne oder Einnahmen.

Herausgeber:

VDE Verband der Elektrotechnik
Elektronik Informationstechnik e. V.
Tel. +49 69 6308-0
service@vde.com
www.vde.com

Titelbild:

RB 41 der Süd-Thüringen-Bahn am Bahnhof Grimmenthal,
Sommer 2023, Foto: Nora Dörr

Design:

Medien&Räume | Kerstin Gewalt

Dezember 2023

Inhalt

| | |
|---|-----------|
| Executive Summary | 4 |
| 1. Einleitung und Motivation | 10 |
| 1.1 Anliegen des Auftraggebers TMUEN | 10 |
| 1.2 Herausforderungen der Untersuchung | 10 |
| 1.3 Kurze Vorstellung des VDE e.V. | 11 |
| 1.4 Struktur der Studie | 11 |
| 2. Südthüringennetz und Schwarzatalbahn | 12 |
| 2.1 Betriebsprogramm „Südthüringennetz 2029“ | 12 |
| 2.2 Charakterisierung der Bahnlinien im Untersuchungsraum | 15 |
| 2.3 Charakterisierung der OBS-Schwarzatalbahn (RB 60) | 23 |
| 3. Klimaneutrale Antriebskonzepte und Fahrzeuge | 25 |
| 3.1 Elektrotriebzug und Oberleitungsnetz | 27 |
| 3.2 Batterietriebzug und Ladeinfrastruktur | 29 |
| 3.3 Wasserstofftriebzug und -Tankinfrastruktur | 34 |
| 4. Technische Machbarkeit | 38 |
| 4.1 BEMU für Südthüringennetz und Schwarzatalbahn | 39 |
| 4.2 HEMU für Schwarzatalbahn und Südthüringennetz | 47 |
| 4.3 Fazit zur technischen Machbarkeit | 51 |
| 5. Wirtschaftlichkeit | 52 |
| 5.1 Methodik zur Feststellung der Wirtschaftlichkeitsunterschiede | 52 |
| 5.2 Wirtschaftlichkeitsvergleich für Südthüringennetz und Schwarzatalbahn | 54 |
| 5.3 FAZIT zur Wirtschaftlichkeit | 60 |
| 6. Ökobilanzen | 61 |
| 6.1 Definition der Systemgrenzen für die Ökobilanzierung | 61 |
| 6.2 Berechnung der Ökobilanzen für Diesel-, Batterie- und Wasserstoffzug | 63 |
| 6.3 FAZIT zur Ökobilanz | 66 |
| 7. Allgemeines Fazit und Empfehlungen | 67 |
| Anhang | 69 |
| Nutzwertanalyse | 69 |
| Energierichtlicher Rahmen | 73 |
| Förderoptionen | 75 |
| Literaturverzeichnis | 78 |
| Abbildungsverzeichnis | 79 |
| Tabellenverzeichnis | 80 |

Executive Summary

Der Freistaat Thüringen verfügt über ein Schienennetz von rund 1.500 Kilometern Länge, das heute zu etwa 30 % elektrifiziert ist. Das heißt, auf einem Großteil der Nahverkehrsstrecken in Thüringen werden heute ausschließlich Dieseltriebzüge eingesetzt. Die plangemäß ab Dezember 2028 zum Südthüringennetz zählenden Bahnlinien RE 7 (Erfurt–Würzburg), RB 23 (Erfurt–Saalfeld), RB 40 (Meiningen–Schweinfurt), RB 41 (Eisenach–Neuhaus am Rennweg), RB 43 (Wernshausen–Zella-Mehlis), RB 44 (Erfurt–Meiningen) und RB 46 (Erfurt–Ilmenau) nutzen 362 Kilometer des Schienennetzes, von denen 349 Kilometer weder Oberleitungen noch Stromschienen aufweisen. Das entspricht einem Elektrifizierungsgrad von nur 3,5 %. Elektrifiziert ist heute lediglich die 12,5 km lange Strecke von Erfurt bis Neudietendorf. Zudem verfügen im Südthüringennetz nur die Bahnhöfe in Erfurt, Eisenach, Sonneberg und Saalfeld über Oberleitungen.

Im Südthüringennetz sollen ab 2029 nur Züge mit alternativen Antrieben eingesetzt werden.

Mit Blick auf die vereinbarte vollständige Dekarbonisierung des Verkehrs bis zum Jahr 2045 in Deutschland stehen die zuständigen Thüringer Ministerien TMUEN (Umwelt, Energie und Naturschutz) und TMIL (Infrastruktur und Landwirtschaft) wie auch das Thüringer Landesamt für Bau und Verkehr (TLBV) als verantwortlicher Aufgabenträger aktuell vor der Herausforderung, für Dieselnetze wie das Südthüringennetz die vorhandene Flotte von Dieseltriebzügen baldmöglichst durch umweltfreundliche Alternativen zu ersetzen. Angesichts der in den nächsten Jahren auslaufenden Verkehrsverträge soll der Technologiewechsel bis Ende 2028 vorbereitet werden.

Eine durchgehende Elektrifizierung des Südthüringennetzes würde Jahrzehnte in Anspruch nehmen und Milliarden kosten. Aus Sicht der Verantwortlichen kommt diese Möglichkeit daher nicht in Frage. Die Option Dieselhybridtriebzug, die sich dank elektrischer Unterstützung wesentlich umweltfreundlicher betreiben ließe als Dieseltriebzüge, entfällt aus Mangel an geeigneten Fahrzeugmodellen der Hersteller. Zudem wäre damit nie ein vollständig CO₂-neutraler Betrieb möglich. Ebenso entfiel zum Zeitpunkt der Erarbeitung der Studie die Möglichkeit, auf hinreichend valide Daten bezüglich klimaneutral synthetisierter Dieselmotortreibstoffe, wie hydriertes Pflanzenöl (Hydrotreated Vegetable Oil, kurz HVO), zurückzugreifen. Diese sind notwendig, um Dieselhybride oder Diesel-Bestandsfahrzeuge zu betreiben, doch die im Vergleich zu anderen Antriebskonzepten aktuell noch vergleichsweise hohen Energiekosten stünden der Wirtschaftlichkeit ihres Betriebes im Wege.

In der hier vorliegenden Studie werden für verschiedene Antriebsalternativen die technologischen Gegebenheiten analysiert und die wirtschaftliche Machbarkeit untersucht. Aus den daraus erzielten Ergebnissen wurde eine faktenbasierte Empfehlung für den zukünftig CO₂-neutralen SPNV in Südthüringen gegenüber den Aufgabenträgern abgeleitet.

Die dieser Studie zugrunde liegende und vom TMUEN in Auftrag gegebene Untersuchung des VDE fokussierte sich nach einer vorausgehenden Bewertung von Varianten auf zwei alternative Antriebskonzepte, die sich grundsätzlich ohne Ausstoß klimaschädlicher Gase oder gesundheitsgefährdender Substanzen betreiben lassen: Der Wasserstofftriebzug (kurz HEMU¹) und der Batterietriebszug (kurz BEMU²).

1 HEMU = Hydrogen Electric Multiple Unit

2 BEMU = Battery Electric Multiple Unit

Die technische Machbarkeit des HEMU wird durch die Wasserstoffinfrastruktur bestimmt.

Grundlage der Untersuchung der technischen Machbarkeit von HEMU und BEMU ist das vorgegebene Betriebsprogramm „Südthüringennetz 2029“. Dieses ist – so die Erwartung des TLBV – zwingend einzuhalten, denn gegebenenfalls technologiebedingt verlängerte Halte- oder Fahrzeiten würden die Zufriedenheit und damit die Nachfrage der Kunden gefährden. Für die Bearbeitung im Fahrplanprogramm des TLBV wurden die von Siemens-Mobility bereitgestellten Fahrdynamikdaten des zweiteiligen Wasserstofftriebzugs Mireo-Plus-H verwendet. Vorbehaltlich der noch ausstehenden Testierung der Fahrpläne durch die DB Netz AG ist die Einhaltung der Anforderungen des TLBV somit bereits gegeben, sofern der Hersteller die Dynamikdaten garantieren kann und auch andere Hersteller für entsprechende Fahrzeuge die erforderliche Performance verbindlich zusagen können. Die Machbarkeit bezieht sich im Falle des HEMU also vor allem auf die Infrastruktur: Hierfür ist nachzuweisen, dass sich an den vorgesehenen Standorten tatsächlich Wasserstoff-Tankstellen errichten lassen, die sich verlässlich mit der benötigten Menge an grünem Wasserstoff beliefern lassen. Dass eine solche Tankstelle inklusive Onsite-Elektrolyse in Thüringen technisch grundsätzlich machbar ist, wies die DB Energie bereits Anfang 2020 in einer Umweltstudie für einen Standort nahe des Bahnhofs Rottenbach nach. In diesem Papier wurde allerdings auch darauf hingewiesen, dass der Wasserstoffpreis wegen der hohen Gestehungskosten voraussichtlich über 8 €/kg liegen würde. Aufgrund der politisch-wirtschaftlichen Umbrüche im Jahr 2022 liegt der Wasserstoffpreis für den Endkunden Mitte 2023 bei bereits 12,85 €/kg und stellt damit einen entscheidenden wirtschaftlichen Faktor dar. Auch die aktuellen Erfahrungen mit den ersten im Regelbetrieb eingesetzten HEMU Fahrzeugen zeigen, dass diese Technologie (zumindest derzeit) noch nicht als ausgereift bezeichnet werden kann^{3,4}.

Die begrenzte Reichweite des BEMU erzwingt einen komplexeren Betriebsablauf.

Die technische Machbarkeit ist im Falle von BEMU-Fahrzeugen kritischer zu sehen: Die begrenzte Reichweite, die Notwendigkeit, über den Tag regelmäßig nachladen zu müssen sowie die Randbedingungen für einen „schonenden“ Akkueinsatz stellen ein grundsätzliches betriebliches Risiko dar. Die Fahrzeugarchitektur setzt der Größe und dem Gewicht der Batterien des BEMU enge Grenzen, mit der Folge, dass die Hersteller in der Regel eine Reichweite von nur 80 Kilometern garantieren können. Da statistisch gesehen mehr als drei Viertel aller Oberleitungslücken in Deutschland ohnehin kürzer sind als 80 km, scheint diese Reichweitenbegrenzung in den meisten Fällen akzeptabel zu sein. Im Südthüringennetz ist die Situation eine andere: Hier erweisen sich alle Linien bis auf RB 23 als nicht typisch, das heißt, es genügt nicht, regelmäßig unter vorhandenen Oberleitungen nachzuladen, sondern es sind zusätzliche Lademöglichkeiten vorzusehen, wie separate Schnellladepunkte oder die Verlängerung von Oberleitungen.

Für Schnellladepunkte (bis zu 1,2 MW) gibt es im Vergleich zum Bau von Oberleitungsanlagen preiswerte Lösungen wie z. B. Anlagen des Typs VOLTAP®, die von den Stadtwerken Tübingen angeboten werden. Eine weitere, wesentlich teurere Lösung stellt die sogenannte Oberleitungsinselanlage (OLIA) der DB Netz AG dar, welche die Option anbietet, Züge auch bei der Durchfahrt, also ohne anhalten zu müssen, schnell nachladen zu können. Entsprechende Anlagen entstehen aktuell im Rahmen der Realisierung des sogenannten „Akku-Netz Schleswig-Holstein“ an den Standorten Heide, Husum und Tönning.

3 https://www.rhein-zeitung.de/region/aus-den-lokalredaktionen/kreis-neuwied_artikel,-wasserstoffelektrische-zuege-verband-schienenpersonennahverkehr-stoppt-projekt-_arid.2550468.html und <https://www.lok-report.de/news/deutschland/aus-den-laendern/item/42137-rheinland-pfalz-72-verbandsversammlung-des-spnv-nord-hemu-projekt-wird-nicht-weiterverfolgt-landrat-andreas-kruppert-neuer-stellvertretender-verbandsvorsteher.html> (Abruf am 15.09.2023)

4 <https://www.lnv.de/lnvg/pressemitteilungen/artikel/102-neue-akku-triebzuege-fuer-niedersachsen-lnvg-bereitet-ausschreibung-noch-fuer-2023-vor> (Abruf am 15.06.2023)

Um die technische Machbarkeit von BEMU zu untersuchen, führte der VDE Simulationen des Lade- und Entladeverhaltens von BEMU-Fahrzeugen auf den benannten Nahverkehrslinien des Südthüringennetzes durch. Dafür wurde angenommen, dass es technisch möglich ist, an bestimmten Standorten Schnellladestationen mit 1,2 Megawatt Ladeleistung pro Ladepunkt vorzusehen, an denen BEMU-Fahrzeuge ihre Batterien innerhalb der vom Betriebsprogramm vorgegebenen Haltezeiträumen nachladen können. Unabhängig davon haben auch die Fahrzeughersteller Alstom, CAF, Siemens-Mobility und Stadler anhand der vom TLBV bereitgestellten Daten entsprechende Simulationen durchgeführt. Deren Ergebnisse stimmen im Wesentlichen mit den VDE-Resultaten überein.

Technische Machbarkeit des BEMU ist nicht für alle Linien des Südthüringennetzes gegeben.

Die Simulationen ergaben, dass es grundsätzlich möglich ist, BEMU-Fahrzeuge auf den Linien RB 23, RB 40, RB 43, RB 44 und RB 46⁵⁾ im Einklang mit dem Betriebsprogramm einzusetzen, sofern die infrastrukturellen Maßnahmen (insb. Nachlademöglichkeiten) zeitgerecht umgesetzt werden können. Nicht möglich erscheint dies jedoch im Falle der Linie RE 7, da die vorgegebene zwölfminütige Haltezeit in Grimmenthal zum Nachladen nicht ausreicht, um die oberleitungsfreie Strecke bis Schweinfurt zu überwinden. Das gilt auch für den Rückweg von Grimmenthal bis Neudietendorf.

Ähnliche Probleme ergeben sich im Falle der Linie RB 41: Auch hier sind die vorgegebenen Haltezeiten entlang der Strecke zu kurz, um genügend Strom für die gesamte Strecke nachladen zu können. Eine alternative Möglichkeit wäre, auf der langlaufenden, aller zwei Stunden verkehrenden Linienvariante Eisenach – Meiningen – Eisfeld – Sonneberg – Neuhaus im Bahnhof Meiningen einen Umstieg der Fahrgäste in ein anderes, im vollgeladenen Zustand bereitgestelltes BEMU-Fahrzeug zu „erzwingen“. Diese Alternative würde eine Vergrößerung der BEMU-Flotte um zwei Fahrzeuge erfordern. In der jeweils anderen Stunde würde der Durchlauf Eisenach – Meiningen – Eisfeld mit einer Nachladung in Grimmenthal erfolgen. Inwiefern der erzwungene Umstieg die Zufriedenheit und Akzeptanz der Fahrgäste beeinträchtigen könnte, bleibt zu klären.

Die Wirtschaftlichkeit der Zugsysteme wird maßgeblich durch die Energieeffizienz bestimmt.

Zur Feststellung der Unterschiede in der Wirtschaftlichkeit der beiden Konzepte HEMU und BEMU bedient sich der VDE der sogenannten Kapitalwertmethode, bei der er über einen Betrachtungszeitraum von 30 Jahren nur solche fahrzeug- und infrastrukturbezogenen Kostenpositionen berücksichtigt, die als technologie-spezifisch anzusehen sind. Alle anderen Positionen einschließlich der Einnahmenseite werden bei beiden Konzepten als identisch angenommen.

Fahrzeugseitig zeigt sich, dass neben den Anschaffungs- und Instandhaltungskosten sowie den Kosten für den regelmäßigen Tausch der Technologiekomponenten Batterie bzw. Brennstoffzelle vor allem die Energiebedarfskosten für die Wirtschaftlichkeit eines alternativen Konzeptes kritisch sind. Infrastruktureitig dominieren die Kosten für die Einrichtung und Instandhaltung den resultierenden Kapitalwert. Bei Beschränkung auf die Fahrzeugseite repräsentiert der Kapitalwert das Ergebnis des rein betriebswirtschaftlichen Vergleichs, der für Aufgabenträger und Verkehrsunternehmen entscheidend ist. Die Einbeziehung auch der Infrastruktureite entspricht einer volkswirtschaftlichen Perspektive, die für den Bund und das Bundesunternehmen Deutsche Bahn AG von besonderer Bedeutung ist. Um die Ergebnisse wirtschaftlich einordnen zu können, hat der VDE als Referenz auch die Konzepte Dieseltriebzug (DMU) und Oberleitungs-Elektrotriebzug (EMU) in die Vergleichsrechnung mit aufgenommen.

⁵⁾ Anmerkung: Im Nachgang zur vorliegenden Untersuchung zeigte sich, dass die etwa 19 Kilometer lange Bahnstrecke zwischen Plaue und Ilmenau in die Streckenklasse B2 fällt, die den Einsatz von Zügen mit einer Radsatzlast von über 18 t bzw. einer Meterlast von über 6,4 t/m ausschließt. Hiernach dürften heute auf der Linie RB 46 Batterietriebzüge wie Mireo-Plus-B oder Flirt-AKKU nicht eingesetzt werden.

Das BEMU-Konzept ließe sich im Südthüringennetz wirtschaftlicher betreiben als der HEMU.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Energiebedarfskosten als Produkt des Energiebedarfs pro Kilometer und des Energiepreises pro Mengeneinheit tatsächlich den entscheidenden Unterschied der verschiedenen Antriebssysteme ausmachen. Im Falle des DMU wird bei einem realistischen Dieselpreis von 2 € pro Liter der resultierende Kapitalwert der Investition zu 58 % durch die Energiebedarfskosten bestimmt. Auch bei EMU, BEMU und HEMU tragen die Energiebedarfskosten erheblich (22 %) bis dominant (40 %) bei. Damit wird offenbar, dass Nachteile bei der Energieeffizienz oder bei der Erzeugung des Energieträgers die Wirtschaftlichkeit eines Zugsystems beeinträchtigen. Der Brennstoffzellenantrieb des HEMU hat einen wesentlich geringeren Wirkungsgrad als der reine Batterieantrieb des BEMU. Hinzu kommt, dass auch die Erzeugung von grünem Wasserstoff einen Wirkungsgradnachteil gegenüber dem direkten Bezug von (Grün-)Strom aus der Oberleitung zum Laden der BEMU-Batterien hat. Diese beiden Effizienz-Nachteile sind der Hauptgrund dafür, dass es wirtschaftlich nachteiliger ist, auf das HEMU-Konzept zu setzen, statt auf BEMU.

Infrastrukturseitig erweist sich lediglich die durchgehende Elektrifizierung von Strecken als eine Kostenposition, die erheblichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit aus volkswirtschaftlicher Perspektive hätte. Für das Südthüringennetz ist dieser Einfluss jedoch nicht relevant, da die Option Streckenelektrifizierung für die Verantwortlichen aktuell nicht in Frage kommt.

Ein Vergleich der Ökobilanzen von HEMU und BEMU unterstützt die Entscheidungsfindung.

Hinsichtlich der technischen Machbarkeit erweist sich das HEMU-Konzept für das Südthüringennetz als weniger kritisch als BEMU. Allerdings stellt sich das BEMU-Konzept als das wirtschaftlichere von beiden dar. Es liegt daher nahe, für die Entscheidungsfindung ein weiteres Kriterium einzubeziehen: Die Ökobilanzen der beiden Zugsysteme.

Eine eingehende Betrachtung des VDE zeigt, dass es sinnvoll ist, die für eine Lebenszyklus-Analyse (LCA) benötigte Systemgrenze wie folgt zu wählen: Berücksichtigung des Energiebedarfs der Zugflotte im Südthüringennetz, Erzeugung und Bereitstellung des Energieträgers und Herstellung der Fahrzeuge sowie ihrer Technologiekomponenten Batterien bzw. Brennstoffzellen und deren regelmäßiger Tausch in einem Betrachtungszeitraum von 30 Jahren.

Hiernach ist der CO₂-Ausstoß bzw. das Global Warming Potential (GWP) bei der Herstellung der Technologiekomponenten des BEMU mit 0,78 kg-CO₂e/Zkm um 35 % höher als im Falle des HEMU, bei dem es 0,58 kg-CO₂e/Zkm sind. Dieser auf die Produktionsphase bezogene Nachteil des BEMU wird in der Betriebsphase aufgrund der Wirkungsgradunterschiede überkompensiert mit 0,39 gegenüber 1,16 kg-CO₂e/Zkm. Dieses Resultat beruht auf der Annahme, dass der BEMU stets Grünstrom lädt, was angesichts des heutigen Bahnstrommixes von 60 % und der bilanziell ungleichen Aufteilung zwischen Nah- und Fernverkehr auch nach 2029 noch unrealistisch erscheint. Auf der anderen Seite ist die Nutzung von grünem Wasserstoff im Falle des HEMU eine Grundannahme, an der nicht gerüttelt wird. Dessen Bereitstellung setzt jedoch ebenfalls eine unternormale Nutzung von grüner Primärenergie voraus. In diesem Fall ergibt sich, dass die GWP-Werte für die Systeme HEMU und BEMU über einen längeren Zeitraum nahe beieinanderliegen können, also ökobilanziell keine großen Unterschiede aufzeigen.

HEMU und BEMU sind (technisch) gleichwertige Lösungen für die Schwarzatalbahn (RB 60).

Das TMUEN hat den VDE im Projektverlauf nachträglich damit beauftragt, die anstehende Untersuchung der technischen und wirtschaftlichen Machbarkeit mit Blick auf das Südthüringennetz um die Schwarzatalbahn (RB 60 Rottenbach–Katzhütte) zu erweitern.

Eine Besonderheit dieser Bahnlinie ist, dass sowohl ihr Betrieb als auch die Erhaltung der Infrastruktur in der Verantwortung der Oberweißbacher Berg- und Schwarzatalbahn (OBS) liegen und dass sie verkehrsvertraglich nicht mit den Linien des Südthüringennetzes gekoppelt ist. Diese Sonderstellung legte es nahe, die Möglichkeit der Dekarbonisierung des Zugverkehrs am Beispiel der Schwarzatalbahn öffentlichkeitswirksam zu demonstrieren. In einer Studie der Bauhaus-Universität Weimar von 2019 wurde die Umstellung auf Wasserstofftriebzüge empfohlen. Die Umsetzung sollte im Rahmen eines Vergabeverfahrens erfolgen, das im Jahr 2021 wegen unwirtschaftlicher Ergebnisse aufgehoben werden musste. Es erfolgte eine Notvergabe bis Ende 2023. Anschließend musste ein neues Vergabeverfahren durchgeführt werden, um Zeit für die Suche nach einer angemessenen Lösung für die künftige SPNV Leistungserbringung im Schwarzatal zu gewinnen.

Die Untersuchung des VDE bestätigt die technische Machbarkeit von Wasserstoffzügen auf der Schwarzatalbahn, vorausgesetzt, dass die vorgesehenen Fahrzeuge über die Leistungsfähigkeit von Zügen des Typs Mireo-Plus verfügen. Zudem folgt der VDE der Einschätzung der DB Energie in ihrer Umweltstudie, wonach es technisch möglich sei, in der Nähe des Bahnhofs Rottenbach eine Wasserstofftankstelle mit Onsite-Elektrolyseur zu realisieren. Wegen der steigenden Nachfrage nach HEMU-Fahrzeugen empfiehlt der VDE für RB 60 eine Angleichung der Verkehrsvertragslaufzeit an die für die Linien des Südthüringennetzes ab 2029 vorgesehene Laufzeit. So könnte durch eine spätere und ggf. gemeinsam zu initiiierende Vergabe möglicherweise eine zuverlässigere und kostengünstigere Fahrzeugbereitstellung erzielt werden.

Angesichts der geringen Streckenlänge der Schwarzatalbahn von nur 25 km ist auch die Batterielösung als technisch machbar anzusehen, sofern sich (Schnell-)Ladepunkte an den Standorten Rottenbach und/oder Katzhütte vorsehen lassen, wobei die Machbarkeit von spezifischen Ladepunkten vor Ort noch mit dem jeweiligen Stromnetzanbieter abzuklären wäre.

Unter den gegebenen Rahmenbedingungen der Schwarzatalbahn zeigt die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des VDE, dass in beiden Fällen, HEMU oder BEMU, die technologiespezifischen Kosten relativ hoch sind, da diese nicht mit anderen Linien geteilt werden können. Im Vergleich stellt sich das BEMU-Konzept wirtschaftlich wesentlich vorteilhafter dar als HEMU, weil die Energiebedarfskosten der BEMU-Fahrzeugflotte wegen ihrer höheren Energieeffizienz deutlich niedriger ausfallen. Beide alternativen Antriebskonzepte HEMU und BEMU sind wirtschaftlicher als der Dieselantrieb.

Die Entscheidungsfindung erfordert weitere technische Klärungen für den Einsatz von BEMU.

Die Ergebnisse der Untersuchung für das Südthüringennetz weisen darauf hin, dass insbesondere im Hinblick auf die Feststellung der technischen Machbarkeit noch weiterführende Aktivitäten notwendig sind. Insbesondere sollten Hersteller, die BEMU-Fahrzeuge anbieten, verbindliche Angaben etwa zu Reichweite, Batteriegröße, Ladeleistung und Ladegeschwindigkeit sowie zum Energiebedarf auf den Bahnlinien des Südthüringennetzes liefern.

Zudem ist die grundsätzliche Eignung von BEMU-Schnellladestationen für die angenommenen Lade-Standorte anhand der Rückmeldungen der vor Ort zuständigen Verteilnetzbetreiber zu verifizieren. Es ist davon auszugehen, dass auch eine Prüfung und Zustimmung der Deutschen Bahn dafür einzuholen ist, Schnellladestationen als

Anlagen von Drittherstellern entlang der Bahnstrecken betreiben zu dürfen. Alternativ empfiehlt es sich, die DB Netz AG gegebenenfalls um ein Angebot für eigene einfache Schnellladestationen zu bitten. Vertiefende Gespräche zur Sinnhaftigkeit komplexer Oberleitungsinselanlagen im Südthüringennetz sind ebenfalls sinnvoll, insbesondere im Hinblick auf die festgestellten technischen Herausforderungen im Falle der Linien RE 7 und RB 41.

Der heutige Zuschnitt des Südthüringennetzes sollte gegebenenfalls in Frage gestellt werden.

Vorbehaltlich der noch ausstehenden weitergehenden technischen Klärungen für den Einsatz von HEMU- oder BEMU-Fahrzeugen im Südthüringennetz empfiehlt die Studie, nicht am heutigen Zuschnitt des Netzes festzuhalten. RB 23, RB 40, RB 43, RB 44 und RB 46 eignen sich für den Einsatz von Batterietriebzügen, RB 7 und RB 41 wahrscheinlich nicht. RB 23 und RB 60 (Schwarzatalbahn) weisen fahrplanseitig eine Umsteige-Verknüpfung in Rottenbach auf. Als ein Ergebnis der Studie wäre es technisch gesehen denkbar, das bestehende Flügelkonzept von RB 23 und RB 46 aufzubrechen und eine fahrzeugseitige Gleichstellung von RB 23 und RB 60 herzustellen, z. B. für folgenden Zuschnitt:

- RB 40, RB 43, RB 44 und RB 46 als BEMU-Liniennetz
- RE 7, RB 41, RB 23 und RB 60 als HEMU-Liniennetz.

Eine andere Möglichkeit wäre, die Linie RB 60 in das Flügelkonzept von RB 23 und RB 46 zu integrieren und in das BEMU-Netz aufzunehmen, so dass HEMU-Fahrzeuge nur auf den Linien RE 7 und RB 41 zum Einsatz kämen. Umgekehrt könnten RB 23, RB 46 und RB 60 auch Teil des HEMU-Liniennetzes werden, so dass nur RB 40, RB 43 und RB 44 im BEMU-Liniennetz verblieben.

1. Einleitung und Motivation

In Deutschland stehen heute viele Aufgabenträger vor der schwierigen Entscheidung, ihre Dieselnetze baldmöglichst durch umweltfreundlichere Lösungen zu ersetzen. Diese sollen ihrer Vorstellung nach technisch, betrieblich und wirtschaftlich überzeugen und angesichts der langen Fahrzeugnutzungsdauern von 30 bis 35 Jahren bereits heute einen klimaneutralen Betrieb ermöglichen. Da die in Frage kommenden Antriebskonzepte hinsichtlich des Fahrzeugbetriebs und der Infrastruktur recht unterschiedlich sind, wird die Herbeiführung einer Entscheidung angesichts der langfristigen Konsequenzen zu einer komplexen Herausforderung.

1.1 Anliegen des Auftraggebers TMUEN

Das Thüringer Ministerium für Umwelt, Energie und Naturschutz (TMUEN) beauftragte den VDE im Oktober 2021 mit der Erstellung einer Machbarkeitsuntersuchung für den Einsatz von Nahverkehrszügen mit alternativen Antrieben in Südthüringen. Hierfür wurden in der Leistungsbeschreibung sieben von verschiedenen Verkehrsunternehmen betriebene Diesellinien genannt, für die neue ab Dezember 2028 geltende Verkehrsverträge auszuschreiben sein werden. Als Zeitraum für die Untersuchung wurde November 2021 bis Juni 2022 vereinbart. Für die Feststellung der Machbarkeit erwartete das TMUEN eine technische Analyse auf der Grundlage von Daten zu marktverfügbaren oder perspektivisch verfügbaren Fahrzeugen mit klimaneutralen oder zumindest sehr umweltfreundlichen Antrieben. Zudem sollten die wirtschaftlichen Folgekosten eingeschätzt werden, die mit der Einführung alternativer Antriebstechnologien verbunden sind.

Das TMUEN beauftragte den VDE Ende 2021 zusätzlich mit einer entsprechenden Untersuchung auch der als Schwarzatalbahn bezeichneten und von der OBS betriebenen Bahnlinie RB 60.

1.2 Herausforderungen der Untersuchung

Das für die Einführung eines klimafreundlichen Zugsystems anvisierte Jahr 2029 ist mit Blick auf die Verfügbarkeit geeigneter Fahrzeuge und die Notwendigkeit, dafür die erforderliche Infrastruktur rechtzeitig bereitzustellen, bereits als sehr nahe Zukunft anzusehen. Für die in 2022 zu erstellende Machbarkeitsuntersuchung hingegen erscheint der zu überschauende Zeitraum von 7 Jahren wie ein Blick in die Glaskugel – insbesondere, wenn man bedenkt, wie schnell sich bereits innerhalb des Untersuchungszeitraums die politischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen in Deutschland, Europa und der Welt geändert und meist sogar verschlechtert haben.

Das Anliegen der von TMUEN beauftragten Untersuchung ist der Vergleich der in Frage kommenden Alternativen – technisch wie auch wirtschaftlich. Das setzt voraus, dass Fahrzeughersteller, Infrastrukturanbieter und Energieunternehmen in der Lage sind, bereits heute verbindliche Informationen und Daten zu liefern. Verbindlichkeit setzt auf deren Seite sorgfältige Analysen und Gesprächsbereitschaft voraus. An letzterer fehlte es im Projektverlauf nicht, wohl aber an der Zeit, so dass dem VDE im gegebenen Zeitrahmen nicht alle erforderlichen verbindlichen Daten bereitgestellt wurden.

Trotz dieser Umstände war der VDE in der Lage, anhand der von TLBV und Deutsche Bahn AG bereitgestellten Daten zu den Linien des Untersuchungsraums den erwarteten Wirtschaftlichkeitsvergleich durchzuführen. Dazu nutzte er eigene aktualisierte Datensätze, geeignete Tools und etablierte Verfahren. Die Ergebnisse der Untersuchung sind naturgemäß nicht verbindlich, solange die betroffenen Unternehmen keine qualifizierten

Daten bereitgestellt haben. Allerdings konnte mittels einer Sensitivitätsanalyse nachgewiesen werden, dass die Eingangsdaten gar nicht so präzise sein müssen, wie ursprünglich angenommen: Die kostenmäßigen Unterschiede der zur Wahl stehenden Antriebslösungen erweisen sich bereits als signifikant, selbst dann, wenn kritische Eingangsdaten über eine große Bandbreite variiert werden.

1.3 Kurze Vorstellung des VDE e. V.

Der Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik, kurz VDE, ist eine technisch-wissenschaftliche Organisation mit Hauptsitz in Offenbach am Main. Verfasst wurde die Auftragsstudie 2022 von einem Team des querschnittlich aufgestellten Bereichs Neue Technologien und Services des VDE e. V. sowie des VDE Prüf- und Zertifizierungsinstitutes eGmbH. Der Querschnittsbereich fokussiert sich insbesondere auf Themen, die im Zusammenhang mit der bis zum Jahr 2045 abzuschließenden Dekarbonisierung des Verkehrs stehen. Dazu zählt auch die vertiefte Auseinandersetzung mit grünen Technologien und deren Anwendungen, für die Energieeffizienz ein ebenso wichtiges Kriterium darstellt, wie die Verwendung nachhaltiger Materialien bei der Herstellung reparierbarer und recyclingfähiger Produkte.

1.4 Struktur der Studie

Die vorliegende Studie orientiert sich in seiner Struktur an den Erwartungen, die das TMUEN in seiner Leistungsbeschreibung von Juli 2021 im Einzelnen formuliert hat. Im Projektverlauf wurden zu jedem Arbeitspaket Ergebnispapiere generiert, die von den Auftraggebern gegengelesen und freigegeben wurden. Diese sind die Basis für die vorliegende, zusammenfassende Studie. Da das Anliegen der Untersuchung die Feststellung der technischen Machbarkeit von alternativen Antriebskonzepten im Südthüringennetz und das Aufzeigen wirtschaftlicher Folgekosten war, sind zweitrangige Themen wie Nutzwertanalyse, energierechtlicher Rahmen und Förderoptionen im Anhang dargestellt. Die Ermittlung von Ökobilanzen zu den in Frage kommenden Alternativen hingegen wird als Ergänzung im Sinne einer dritten Dimension neben Technik und Wirtschaftlichkeit verstanden. Somit gliedert sich das Dokument wie folgt:

Kapitel 2 gibt einen Überblick zu den Linien des Südthüringennetzes, welche den gewünschten Untersuchungsraum darstellen. Der Status Quo mit Dieseltriebzügen wird hier ebenso wiedergegeben wie das vom Aufgabenträger TLVB festgelegte und ab dem Jahr 2029 vorgesehene Betriebsprogramm. Zusätzlich wird in diesem Kapitel auch die Schwarzatalbahn betrachtet, mit deren Untersuchung der VDE im Dezember 2021 nachbeauftragt wurde.

In **Kapitel 3** werden die Konzepte klimaneutraler Antriebe am Beispiel marktverfügbarer bzw. perspektivisch verfügbarer Fahrzeugmodelle so weit erläutert, wie es für das Verständnis der im nachfolgenden **Kapitel 4** ausgeführten Einschätzungen der Machbarkeit der Konzepte HEMU und BEMU im Südthüringennetz notwendig erscheint.

In **Kapitel 5** folgt der Vergleich dieser Konzepte als langfristige Investitionsprojekte im Südthüringennetz in Form von Wirtschaftlichkeitsberechnungen nach der Kapitalwertmethode. **Kapitel 6** schließlich widmet sich ausführlich den Ökobilanzen der betrachteten Zugsysteme.

In **Kapitel 7** wird unter Berücksichtigung der Erkenntnisse und Fazits aus den vorangegangenen Kapiteln wie auch der im Anhang untergebrachten Informationen ein zusammenfassendes Fazit gezogen, das um Handlungsempfehlungen zum weiteren Vorgehen ergänzt ist.

2. Südthüringennetz und Schwarzatalbahn

2.1 Betriebsprogramm „Südthüringennetz 2029“

In den Untersuchungsraum zum Südthüringennetz fallen die in → Tabelle 1 genannten Bahnlinien RE 7, RB 23, 40, 41, 43, 44 und 46, wobei die Teilstrecken 41.1, 41.2 und 41.3 der Linie RB 41 heute wie eigene Linien gehandhabt werden, die unterschiedliche Takte aufweisen.

Tabelle 1: Übersicht der Bahnlinien im Untersuchungsraum (Quelle: TLBV)

| Datensammlung Betriebskonzept Alternative Antriebe | | | | | | |
|--|--|----------------|------|----------|--------------------------|------------------------------------|
| Linie | Laufweg | Bedienzeitraum | Takt | Zugpaare | Zkm Thürigen (geschätzt) | Fzg-Umläufe (geschätzt) |
| RE 7 | Erfurt – Würzburg | 5–23 Uhr | 2-h | 10 | 704.685 | 3 (mit je 2 Fzg) |
| RB 23 | Erfurt – Saalfeld | 4–23 Uhr | 1-h | 20 | 771.062 | 3 |
| RB 40 | Meiningen – Schweinfurt | 5–23 Uhr | 2-h | 10 | 151.159 | 2 |
| RB 41 | Eisenach – Eisfeld – Sonneberg – Neuhaus | | | | | |
| RB 41.1 | Eisenach – Eisfeld | 4–22 Uhr | 1-h | 19 | 1.615.360 | 5 |
| RB 41.2 | Eisfeld – Sonneberg | 5–21 Uhr | 2-h | 9 | | 1 |
| RB 41.3 | Sonneberg – Neuhaus | 5–22 Uhr | 1-h | 18 | 339.248 | 2 |
| RB 43 | Wernshausen – Zella-Mehlis | 5–22 Uhr | 1-h | 18 | 374.938 | 2 |
| RB 44 | Erfurt – Meiningen | 6–22 Uhr | 2-h | 9 | 605.249 | 2 |
| RB 46 | Erfurt – Ilmenau | 4–23 Uhr | 1-h | 20 | 537.484 | 2 |
| | | | | | 5.099.185 | 28 (inkl. 10 % Reserve) |

| Datensammlung Betriebskonzept Dieselantrieb | | | | | | |
|---|--|----------------|------|----------|--------------------------|------------------------------------|
| Linie | Laufweg | Bedienzeitraum | Takt | Zugpaare | Zkm Thürigen (geschätzt) | Fzg-Umläufe (geschätzt) |
| RE 7 | Erfurt – Würzburg | 5–23 Uhr | 2-h | 10 | 704.685 | 3 (mit je 2 Fzg) |
| RB 23 | Erfurt – Saalfeld | 4–23 Uhr | 1-h | 20 | 771.062 | 3 |
| RB 40 | Meiningen – Schweinfurt | 5–23 Uhr | 2-h | 10 | 151.159 | 2 |
| RB 41 | Eisenach – Eisfeld – Sonneberg – Neuhaus | | | | | |
| RB 41.1 | Eisenach – Eisfeld | 4–22 Uhr | 1-h | 19 | 1.615.360 | 5 |
| RB 41.2 | Eisfeld – Sonneberg | 5–21 Uhr | 2-h | 9 | | 2 |
| RB 41.3 | Sonneberg – Neuhaus | 5–22 Uhr | 1-h | 18 | 339.248 | 3 |
| RB 43 | Wernshausen – Zella-Mehlis | 5–22 Uhr | 1-h | 18 | 374.938 | 2 |
| RB 44 | Erfurt – Meiningen | 6–22 Uhr | 2-h | 9 | 605.249 | 2 |
| RB 45 | Erfurt – Ilmenau | 7–17 Uhr | | 4 | 100.990 | 2 |
| RB 46 | Erfurt – Ilmenau | 4–23 Uhr | 1-h | 20 | 537.484 | 3 |
| | | | | | 5.200.175 | 33 (inkl. 10 % Reserve) |

Der Aufgabenträger TLBV stellte für die Untersuchung im Januar 2022 den derzeitigen Planungsstand des Betriebsprogramms „Südthüringennetz 2029“, siehe → Abbildung 1, zur Verfügung. Die für die Erstellung verwendete Software nutzte einen Datensatz, der sowohl den Ziel-Fahrplan als auch Streckeneigenschaften wie Steigungen, Kurven, Höchstgeschwindigkeiten, Streckenklassen usw. umfasst. Als Referenz dienten die Dynamikeigenschaften des Dieselfahrzeugs Coradia LINT 41 (Betriebskonzept Dieselantrieb) und die des 2-teiligen Wasserstofftriebzugs Mireo-plus-H (Betriebskonzept Alternative Antriebe)⁶. Ein wichtiger Unterschied zwischen den Konzepten ist, dass die Strecke Erfurt–Ilmenau im Falle leistungsstarker Alternativer Antriebe mit lediglich einer Bahnlinie, der RB 46, auskommt, die, obwohl sie mehr Haltepunkte ansteuert, kaum länger bräuchte als die RE 45. Aus diesem Grund wurde in den weiteren Betrachtungen die Linie RB 46 Erfurt–Ilmenau herangezogen.

Aktuell bieten die Hersteller von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben im Wesentlichen nur solche an, die über ca. 120 oder 160 Sitzplätze verfügen. Der heute auf den Linien des Südthüringennetzes (außer RE 7) eingesetzte RegioShuttle RS1 hat nur ca. 70 Sitzplätze und wird vielfach in Doppeltraktion eingesetzt. Das TLBV geht daher davon aus, dass sich der RS1 durch einen alternativen Fahrzeugtyp mit 120 Sitzplätzen in Einfachtraktion ersetzen lässt. Der heute auf RE 7 eingesetzte RegioSwinger verfügt über ca. 140 Sitzplätze und wird regelmäßig in Doppeltraktion eingesetzt. Auch dieser lässt sich laut TLBV durch den alternativen Fahrzeugtyp mit 120 Sitzplätzen in Doppeltraktion ersetzen. Damit ergibt sich mit dem gegebenen Betriebsprogramm eine Flottengröße von 28 Fahrzeugen inklusive 10% Reserve (gegenüber 33 inkl. 10% Reserve).

⁶ Mit diesen Referenzfahrzeugen ist keine Vorfestlegung auf einen späteren Fahrzeugeinsatz verbunden. Sie dienen lediglich als beispielhafte Grundannahme zu den Berechnungen der Studie.

Linientaktkarte Südthüringen/
Unterfranken 2029
(Siemens Mireo H2)

Arbeitsstand 14.01.2022

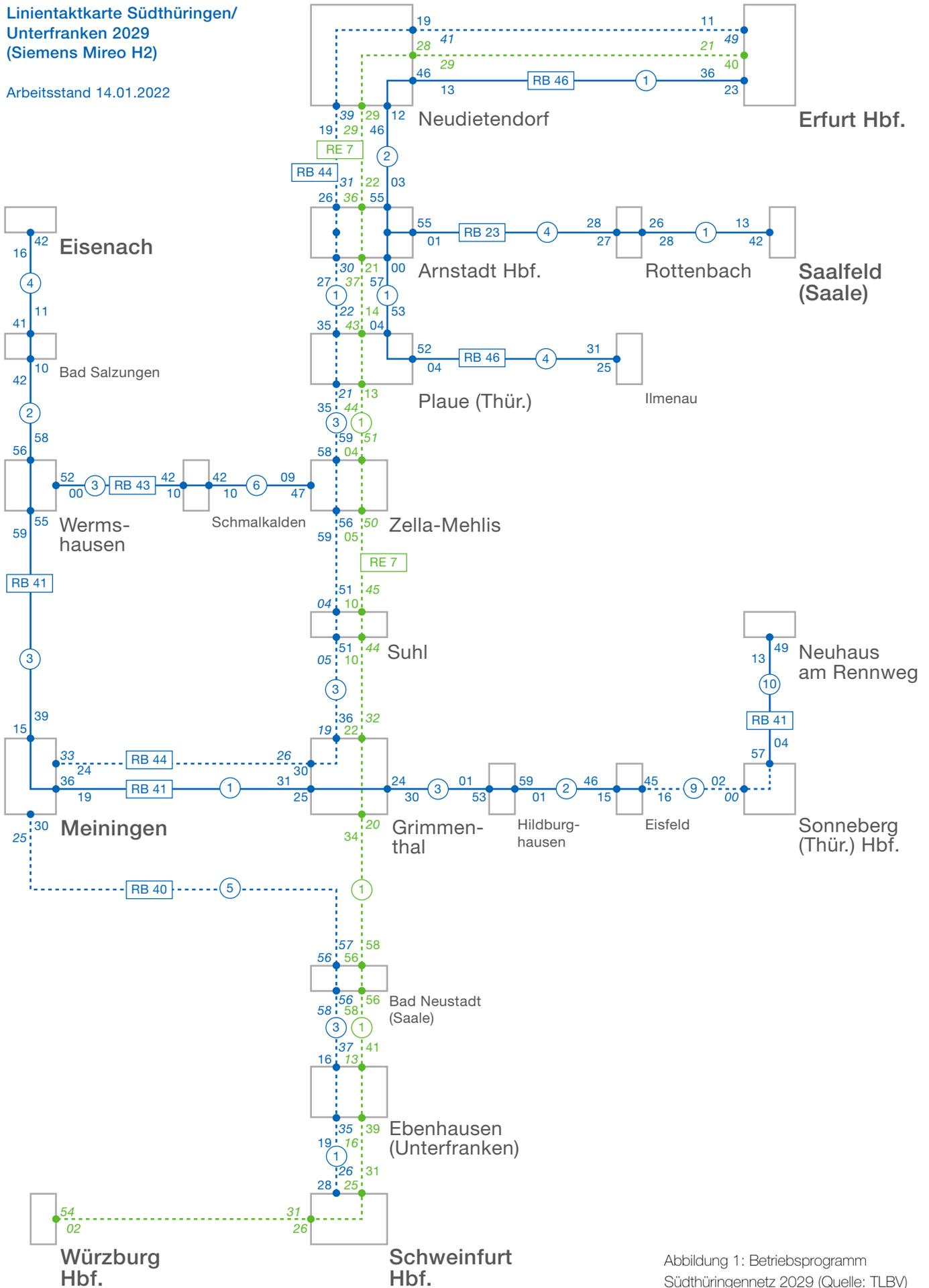


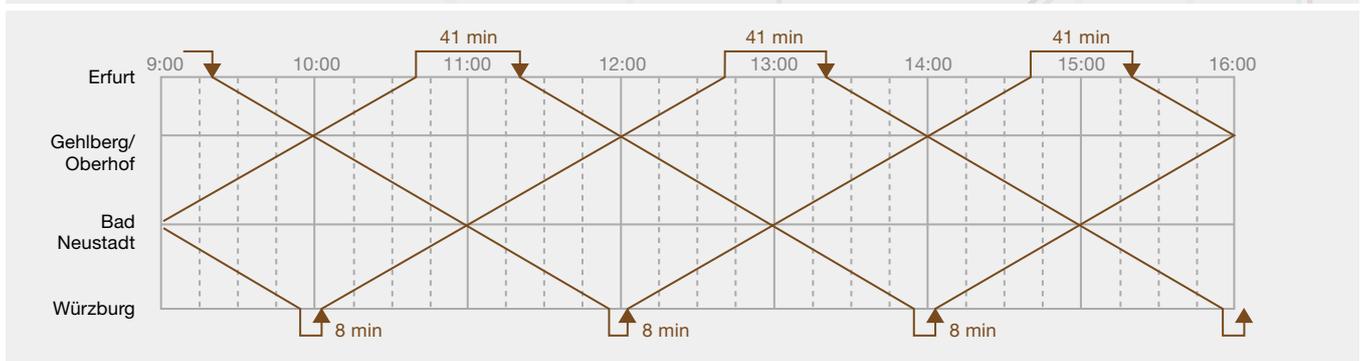
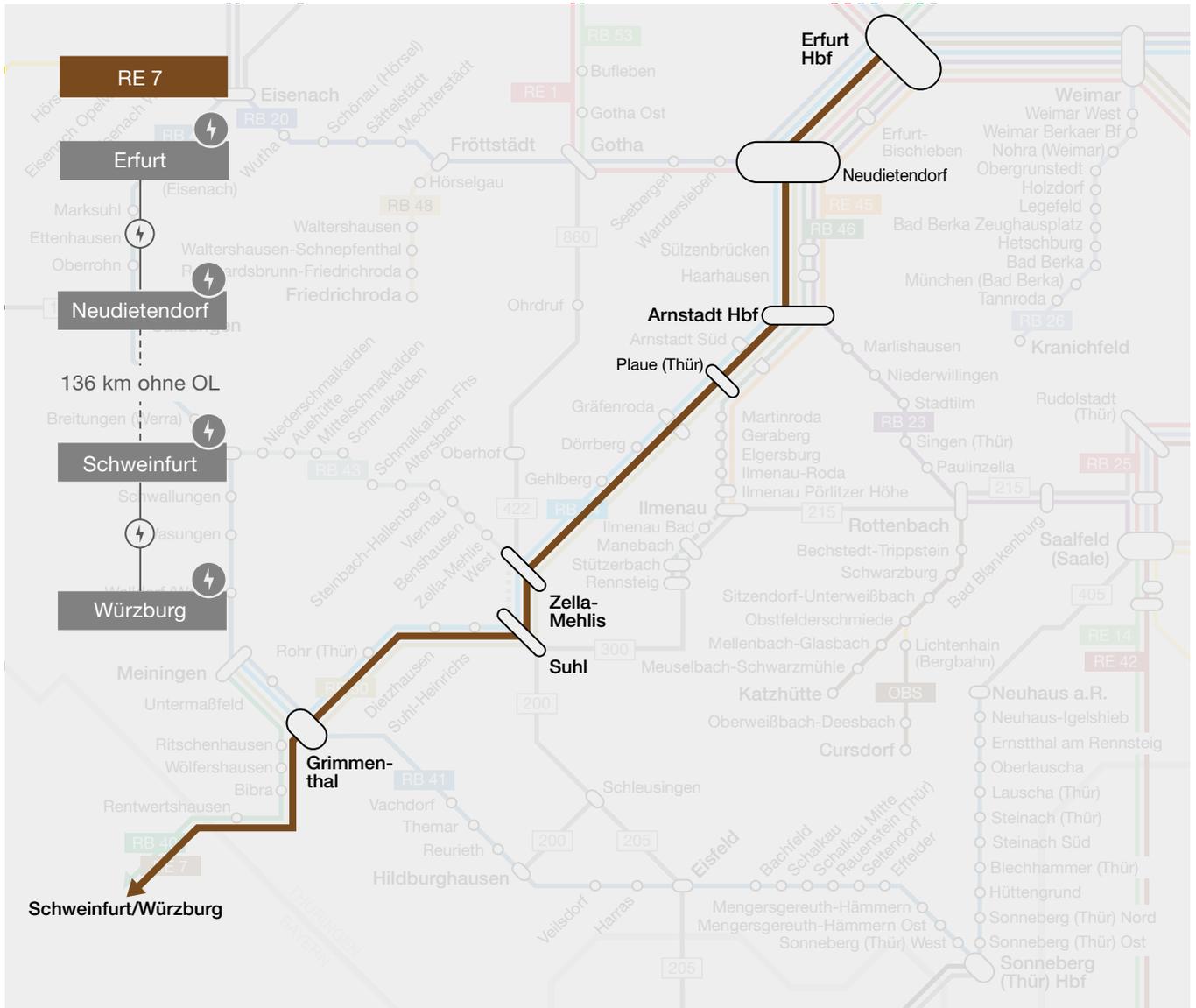
Abbildung 1: Betriebsprogramm
Südthüringennetz 2029 (Quelle: TLBV)



2.2 Charakterisierung der Bahnlinien im Untersuchungsraum

Im Folgenden sind wichtigste Informationen zu den Linien im Untersuchungsraum zusammengestellt. Diese umfassen Informationen zu deren Länge, Verlauf, Stationen, Fahrzeit etc. → Abbildung 2 gibt einen Gesamtüberblick über das Liniennetz im südlichen Thüringen.

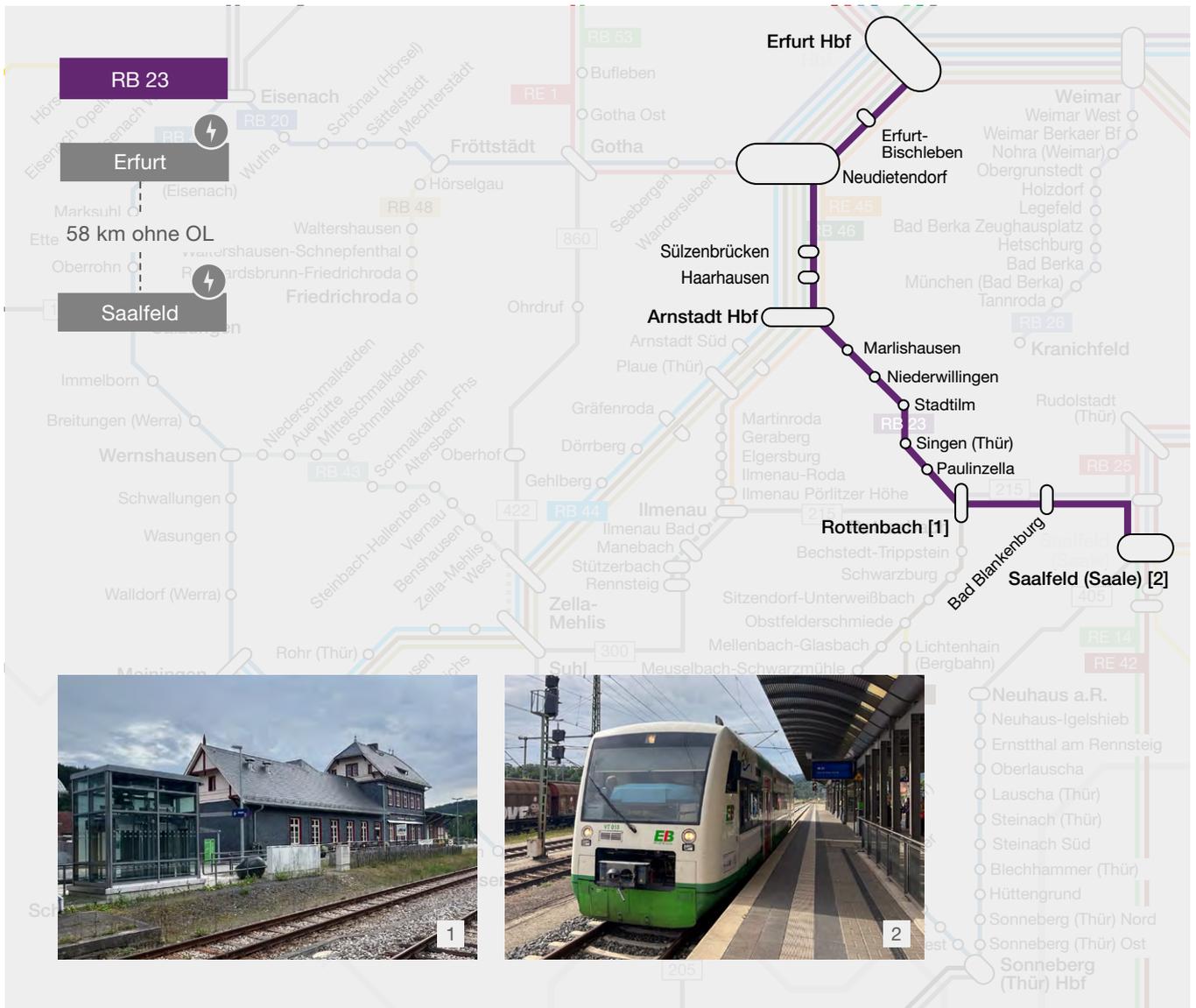
Abbildung 2: Nahverkehrs-
linien im südlichen Thüringen
(Stand 2021)



RE 7 Erfurt–Würzburg

Der im 2h-Takt eingesetzte Regionalexpress RE 7 fährt auf einer Strecke von 192 km Länge. Davon liegen 94 km in Thüringen mit Haltestellen in Neudietendorf, Arnstadt, Plau, Zella-Mehlis, Suhl und Grimmenthal. Die einfache Fahrzeit beträgt 2,5 Stunden. Elektrifiziert ist die Strecke zwischen Erfurt und Neudietendorf (= 12,5 km) sowie zwischen Schweinfurt und Würzburg (= 44,1 km) – bei fast durchgehend eingleisiger Streckenführung. Oberleitungsfrei ist die Strecke somit auf 136 km Länge. Ein Kreuzungspunkt dieser Linie liegt bei Gehlberg, ein weiterer in Bayern bei Neustadt an der Saale. Die Wendezeit in Erfurt beträgt 41 Minuten, in Würzburg lediglich 8 Minuten.

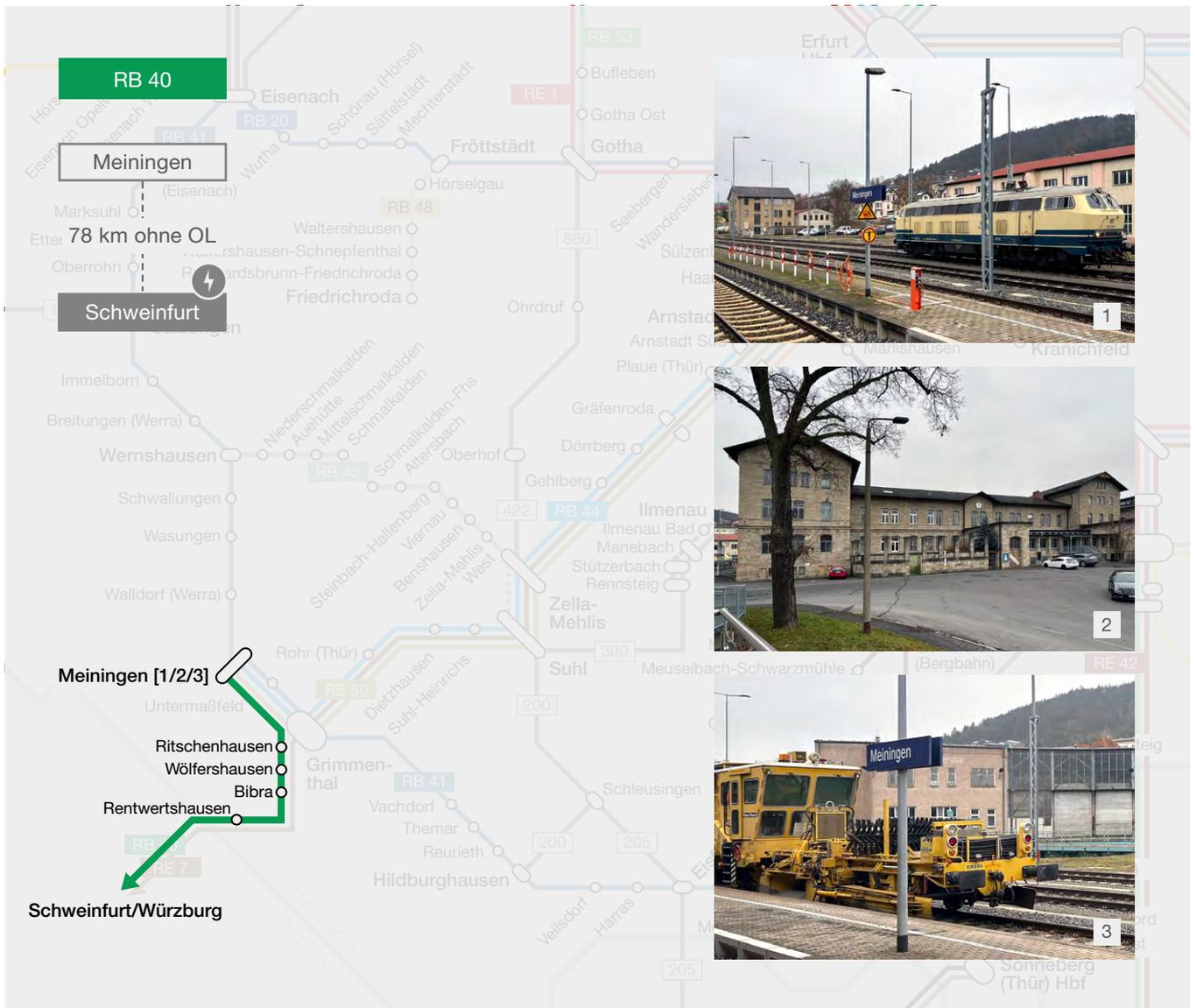
Abbildung 3: RE 7 Erfurt–Würzburg: Streckenverlauf und Betriebskonzept



RB 23 Erfurt–Saalfeld

Die Regionalbahn RB 23 fährt im 1h-Takt und bedient eine Strecke von ca. 70 km. Diese verläuft bis Arnstadt parallel zum RE 7 und zweigt dann eingleisig Richtung Saalfeld ab. Zug-Kreuzungspunkte befinden sich in Arnstadt und in Rottenbach. Die einfache Fahrzeit beträgt etwa 1 Stunde, mit einer Wendezeit von 13 Minuten in Erfurt bzw. 31 Minuten in Saalfeld. Der Bahnhof Saalfeld ist elektrifiziert. Die Länge der durchgehend oberleitungsfreien Strecke beträgt etwa 58 km.

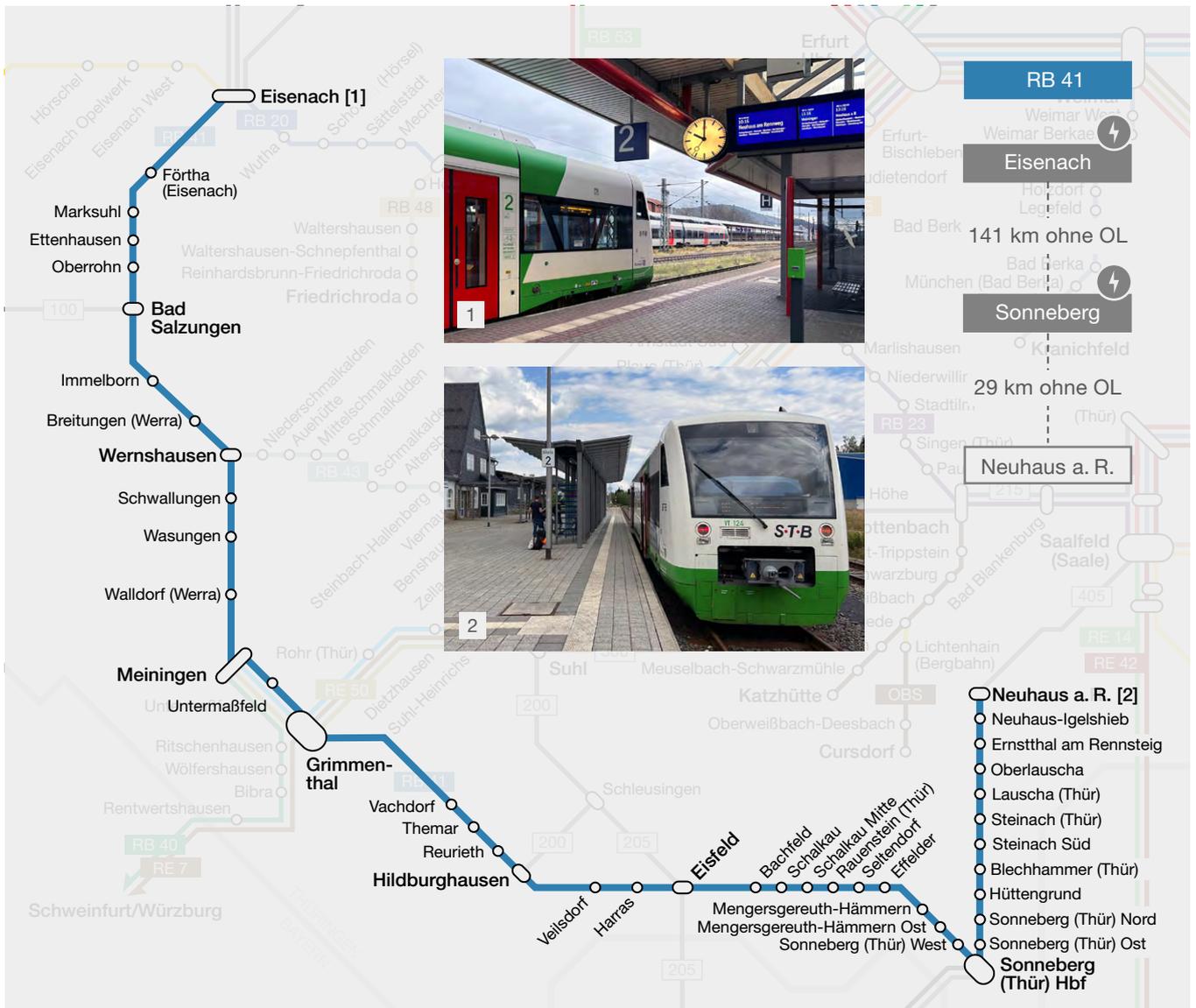
Abbildung 4: RB 23 Erfurt–Saalfeld: Streckenverlauf (Fotos: N. Dörr)



RB 40 Meiningen–Schweinfurt

Die RB 40 fährt im 2h-Takt und bedient eine Strecke von 78 km. In Thüringen hält der Zug an vier Orten. Rentwertshausen, etwa 15 km von Meiningen entfernt, ist die letzte Station vor der bayrischen Grenze. Somit liegt der größte Teil dieser vorwiegend eingleisigen Strecke in Oberfranken. Ein Kreuzungspunkt befindet sich in Bad Neustadt an der Saale. Die einfache Fahrzeit beträgt ca. 1 Stunde. Die Wendezeiten sind 55 Minuten in Meiningen bzw. 58 Minuten in Schweinfurt. Elektrifiziert ist auf der Strecke nur der Bahnhof in Schweinfurt, d. h. oberleitungsfrei sind 78 km.

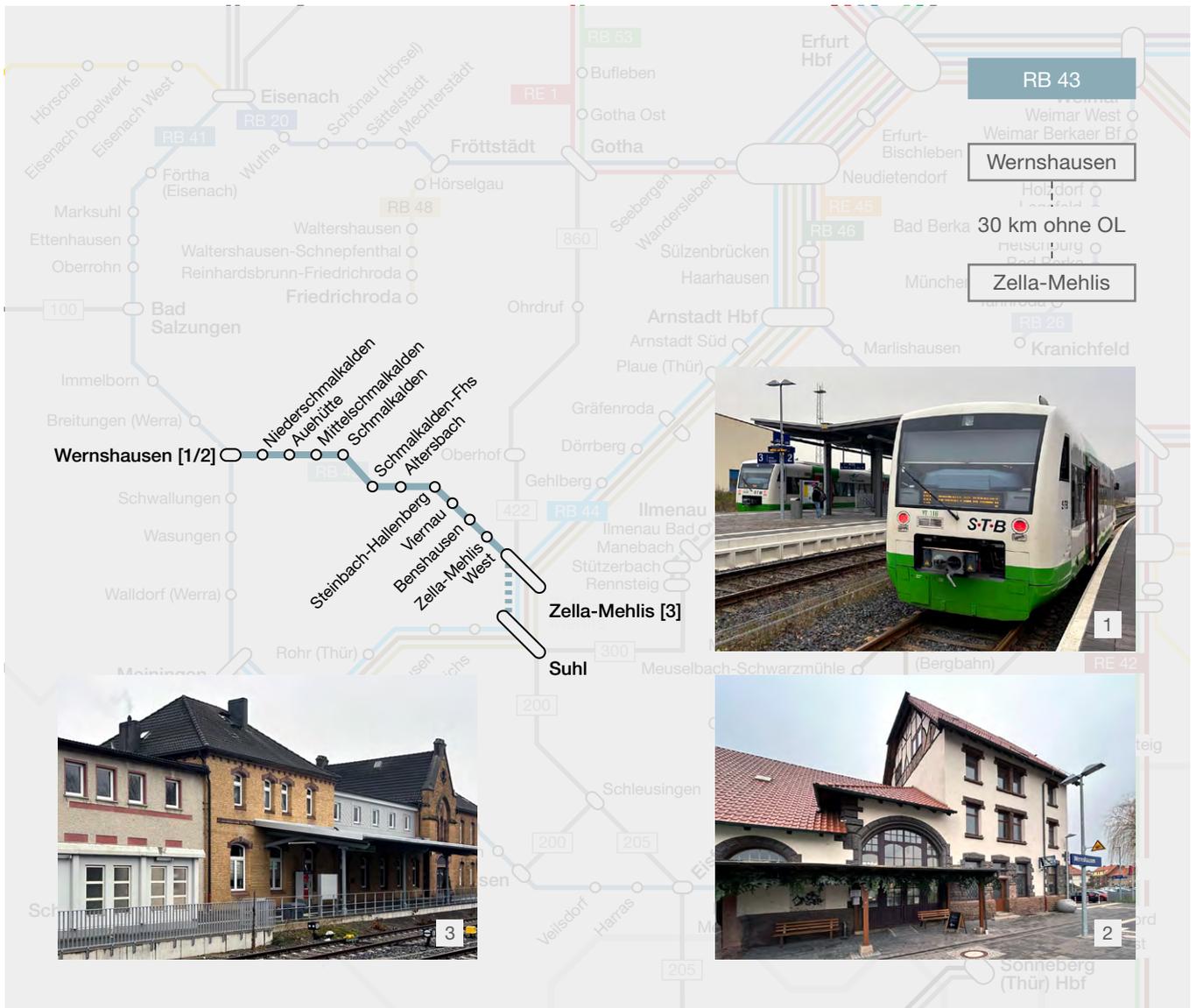
Abbildung 5: RB 40 Meiningen–Schweinfurt: Streckenverlauf (Fotos: N. Dörr)



RB 41 Eisenach–Eislefeld–Sonneberg–Neuhaus am Rennweg

Die RB 41 ist auf der gesamten Strecke von insgesamt 170 km Länge eingleisig und nicht elektrifiziert. Lediglich die Bahnhöfe Eisenach und Sonneberg verfügen über Oberleitungen. RB 41 setzt sich aus drei unterschiedlich getakteten Teillinien zusammen: RB 41.1 Eisenach–Eislefeld (1h-Takt), RB 41.2 Eislefeld–Sonneberg (2h-Takt) und RB 41.3 Sonneberg–Neuhaus (1h-Takt). An den Stationen Eislefeld und Sonneberg fahren die Züge den Takten entsprechend weiter oder kehren zurück. RB 41.1 hat Kreuzungspunkte in Marksuhl, Wernshausen, Grimmenthal und Hildburghausen; RB 41.3 hat einen Kreuzungspunkt in Lauscha.

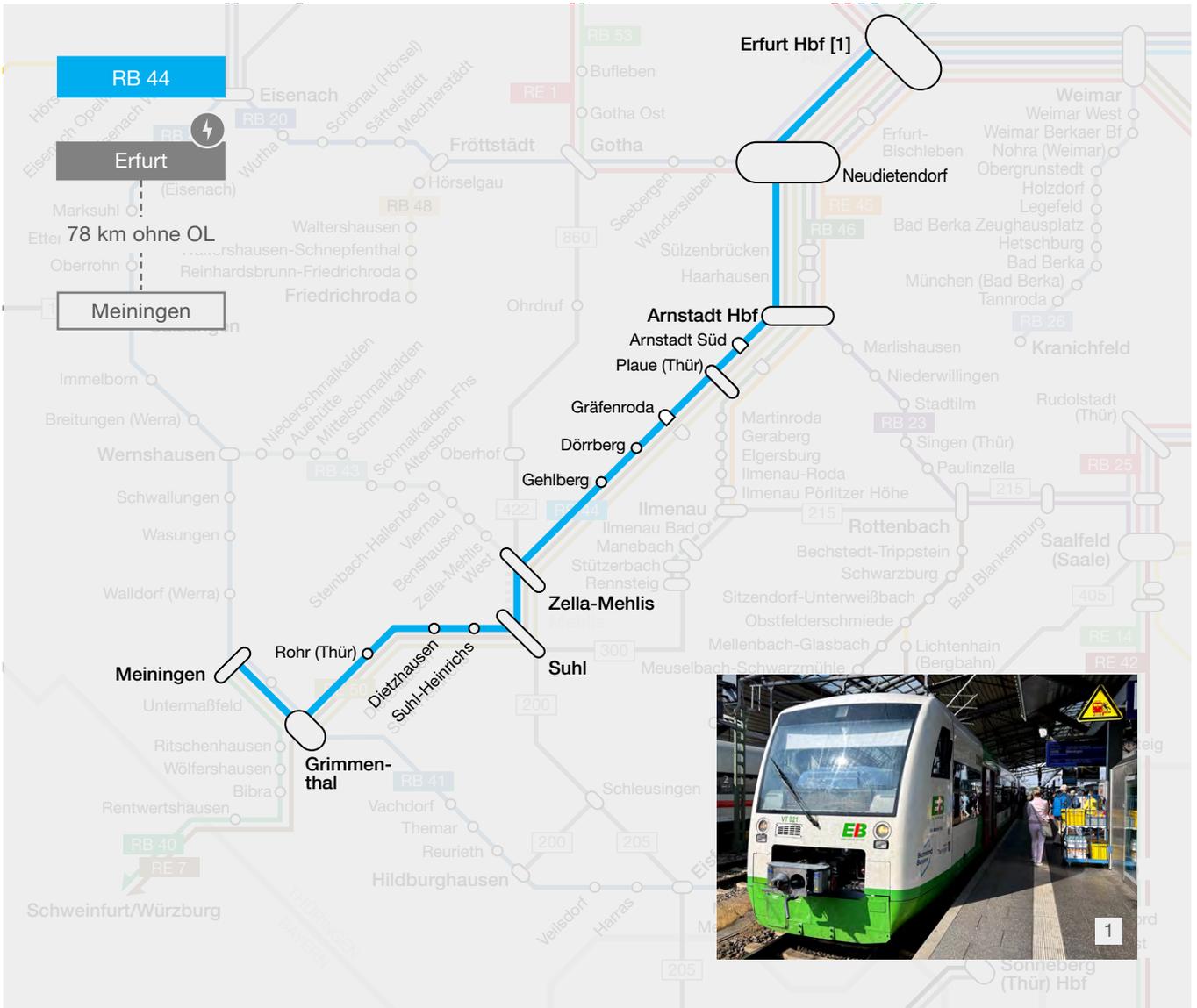
Abbildung 6: RB 41 Eisenach–Neuhaus: Streckenverlauf (Fotos: N. Dörr)



RB 43 Wernshausen–Zella-Mehlis

Die RB 43 fährt im 1h-Takt und bedient eine Strecke von nur ca. 30 Kilometern Länge mit dicht aufeinanderfolgenden Haltepunkten. Die einfache Fahrzeit beträgt ca. 45 Minuten, mit Wendezeiten von 8 Minuten in Wernshausen bzw. 22 Minuten in Zella-Mehlis. Der Kreuzungspunkt entlang der eingleisig geführten und durchgehend oberleitungsfreien Strecke liegt in der Region Steinbach-Hallenberg. Die Strecke ist durchgehend oberleitungsfrei, und selbst die Anfangs- und Endbahnhöfe sind nicht elektrifiziert.

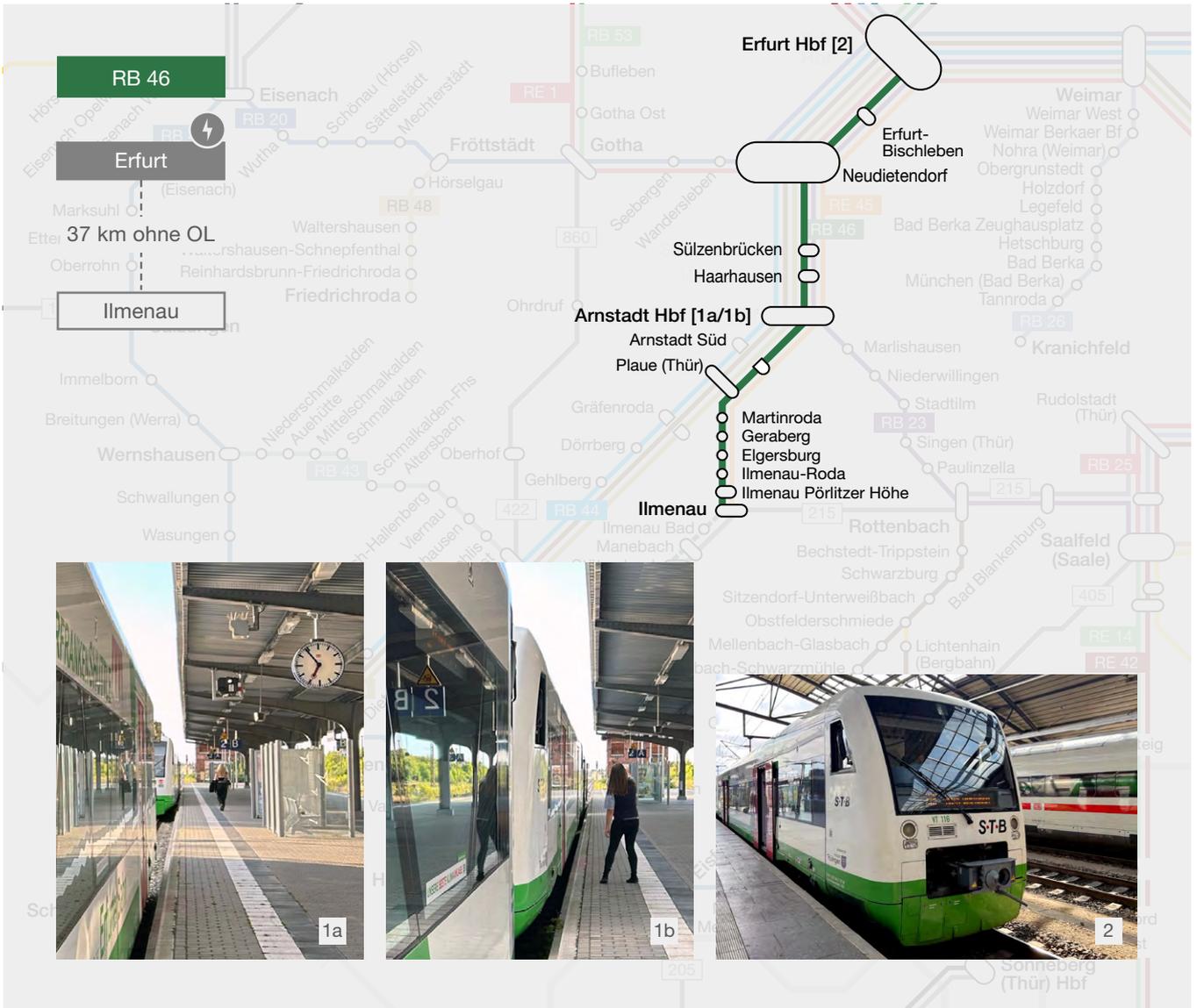
Abbildung 7: RB 43
Wernshausen–Zella-Mehlis:
Streckenverlauf
(Fotos: N. Dörr)



RB 44 Erfurt–Meiningen

Die RB 44 fährt im 2h-Takt. Die insgesamt 90 km lange Strecke verläuft bis Grimmenthal parallel zur RE 7 und zweigt dann Richtung Meiningen ab, das etwa 10 km von Grimmenthal entfernt liegt. Die einfache Fahrzeit beträgt ca. 1 Stunde und 25 Minuten, mit Wendezeiten von 22 Minuten in Erfurt bzw. 51 Minuten in Meiningen. Ein Kreuzungspunkt befindet sich in Zella-Mehlis. Durchgehend oberleitungsfrei ist die Strecke zwischen Neudietendorf und Meiningen, also auf 78 km Länge.

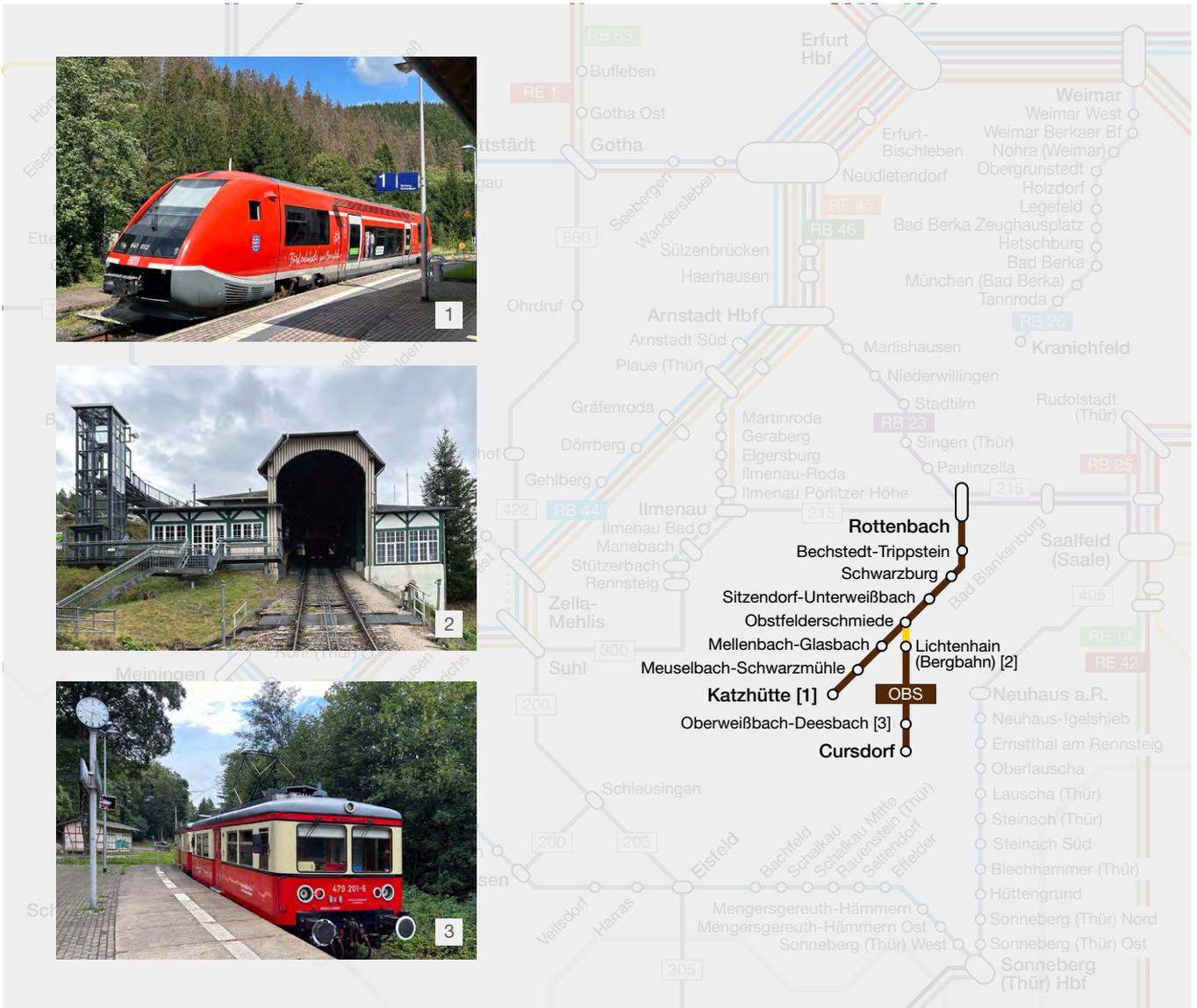
Abbildung 8: RB 44 Erfurt–Meiningen: Streckenverlauf (Foto: N. Dörr)



RB 46 Erfurt–Ilmenau

Die RB 46 fährt im 1h-Takt. Bis Plaua verläuft sie parallel zur RE 7 und zweigt dann Richtung Ilmenau ab und bedient damit eine Strecke von insgesamt ca. 50 km Länge, die von Neudietendorf an bis einschließlich Ilmenau, also über etwa 37 km oberleitungsfrei ist. Der Zugkreuzungspunkt dieser Linie befindet sich in Arnstadt. Die einfache Fahrzeit beträgt ca. 50 Minuten. Die Wendezeiten liegen bei 13 Minuten in Erfurt bzw. 6 Minuten in Ilmenau.

Abbildung 9: RB 46 Erfurt–Ilmenau: Streckenverlauf (Fotos: N. Dörr)



2.3 Charakterisierung der OBS-Schwarzatalbahn (RB 60)

Anlass für die Aufnahme der Schwarzatalbahn in die Untersuchung durch den VDE war die Aufhebung einer SPNV Ausschreibung für diese Strecke. Ziel der Ausschreibung war ursprünglich, im Schwarzatal auf der Strecke von Rottenbach nach Katzhütte ab 2022 zwei Wasserstoff-Brennstoffzellen-Fahrzeuge einzusetzen. Das zuständige Thüringer Ministerium für Infrastruktur und Landwirtschaft (TMIL) musste das Vorhaben einstellen, weil die Oberweißbacher Berg- und Schwarzatalbahn (OBS) bzw. die DB RegioNetz Verkehrs GmbH in ihrem Verkehrsangebot von erheblich höheren Kosten ausgingen, als ursprünglich angenommen wurde.

Daraufhin wurde ein neuer Verkehrsvertrag mit der DB RegioNetz Verkehrs GmbH im Rahmen einer Notvergabe bis zum 9. Dezember 2023 vergeben, da eine reguläre Neuvergabe zeitlich nicht mehr umsetzbar war. Gleichzeitig wurde Zeit für eine differenzierende und vertiefende Machbarkeitsuntersuchung gewonnen, mit welcher der VDE nachbeauftragte wurde.

Abbildung 10: RB 60
Rottenbach–Katzhütte
(OBS Schwarzatalbahn):
Streckenverlauf
(Fotos: N. Dörr)

RB 60 Rottenbach–Katzhütte (Schwarzatalbahn)

Im Schlussbericht der Bauhaus-Universität Weimar von Januar 2019 zu einer Machbarkeitsuntersuchung wurde die Schwarzatalbahn als für den Einsatz von Wasserstofftriebzügen besonders gut geeignet identifiziert, u. a. weil das Verkehrsunternehmen OBS sie als Einzelbahnlinie, also unabhängig von den übrigen Linien betreibt; → Abbildung 10.

Diese auch als RB 60 bezeichnete Regionalbahn verbindet Rottenbach mit Katzhütte und ist mit einer Länge von nur 25 km recht kurz. Von der RB 23 Erfurt–Saalfeld ausgehend zweigt sie in Rottenbach nach Süden ab und bedient eine Strecke, die bis zur Station Schwarzburg zunächst steil ansteigt, um anschließend in einer engen Schleife bis zur Station Sitzendorf-Unterweißbach steil hinunterzuführen. Die restliche Strecke führt flussaufwärts, vielen Windungen des Flüsschens Schwarza folgend, mit moderater Steigung bis Katzhütte.

Auf halber Strecke, bei km 14,4, liegt die touristisch bedeutsame Station Obstfelderschmiede. Sie ist Ausgangspunkt der „Bergbahn“, einer Standseilbahn, welche zur 324 m höher gelegenen Station Lichtenhain führt. Oben, von Lichtenhain ausgehend, ist ein historischer Elektrotriebwagen im Einsatz. Er wird mit Gleichstrom aus einer 600-Volt-Oberleitung betrieben und fährt auf flacher Strecke bis zur 2,5 km entfernten Endstation Cursdorf, siehe → Abbildung 11.

Auf der Schwarzatalbahn sind bei Erstellung der Studie zwei Dieseltriebwagen des Typs Coradia A-TER (Baureihe 641) im Einsatz, die montags bis freitags im Mittel 15,5 Zügepaare, samstags, sonn- und feiertags im Mittel 14,5 Zügepaare bilden und dabei einen Zeitraum zwischen 5:30 Uhr und 21:30 Uhr bedienen. Die resultierende Betriebsleistung beträgt 0,29 Mio. Zkm. Ein dritter Dieseltriebwagen desselben Typs dient als Reserve.

Abbildung 11: Oberweißbacher Bergbahn: Talstation (oben), Güterbühne mit geschlossenem Aufsatzwagen (links unten) und Personenwagen (rechts unten) (Fotos N. Dörr)



3. Klimaneutrale Antriebskonzepte und Fahrzeuge

Alternative Antriebskonzepte sollten lokal umweltfreundlicher als Dieseltriebzüge (engl. *diesel multiple unit*, DMU) sein. Darüber hinaus sollten sie klimaneutral betrieben werden können, um die anstehende Dekarbonisierung des Verkehrs bis 2045 zu unterstützen. Folgende Alternativen kommen in Frage:

1. Durchgehende Elektrifizierung, um Oberleitungs-Elektrotriebzüge einsetzen zu können;
2. Einsatz von Elektrotriebzügen, die mit Hilfe von Akkumulatoren Oberleitungslücken überbrücken und ansonsten wie Oberleitungs-Elektrotriebzüge eingesetzt werden;
3. Einsatz von Elektrotriebzügen mit Brennstoffzellen, die Wasserstoff in Antriebsstrom umwandeln und damit von Oberleitungen gänzlich unabhängig sind;
4. Einsatz von Dieselhybridzügen, die elektrisch unterstützt umweltfreundlich betreibbar sind.

Die Optionen 1 bis 3 ermöglichen bei Verwendung von Grünstrom bzw. grünem Wasserstoff einen klimaneutralen Schienenpersonennahverkehr. Im Falle von Dieselhybridzügen müsste dafür mittelfristig zusätzlich z. B. auf klimaneutral synthetisierten Kraftstoff umgestellt werden. Jede dieser Optionen kommt nur dann in Frage, wenn sie die im Südhüringennetz heute eingesetzten Dieselfahrzeuge betrieblich gleichwertig ersetzen können.

Im Einsatz sind heute 41 (+ fünf Reserve) DMU des Typs RegioShuttle RS1 von Stadler (VT 650), → Abbildung 13 sowie 8 (+ eins) zweiteilige Neigetechnik-DMU des Typs RegioSwinger von Bombardier (VT 612), → Abbildung 12. Beide Typen werden heute i. d. R. in Doppeltraktion eingesetzt. Fahrzeuge mit 70 Sitzplätzen wie RS1 werden nicht mehr produziert. Unabhängig von der Technologie weisen Neufahrzeuge heute mindestens 120 Sitzplätze auf. Das in 2.1 genannte Betriebsprogramm lässt sich daher mit weniger Fahrzeugen in Einfachtraktion realisieren, nämlich mit 30 (+ drei) Dieselfahrzeugen des Typs LINT 41 bzw. 25 (+ drei) Fahrzeugen mit alternativen Antrieben.

Abbildung 12: RegioSwinger in Doppeltraktion
(Foto: W. Klebsch)





Abbildung 13: RegioShuttle RS1 (Foto: W. Klebsch)

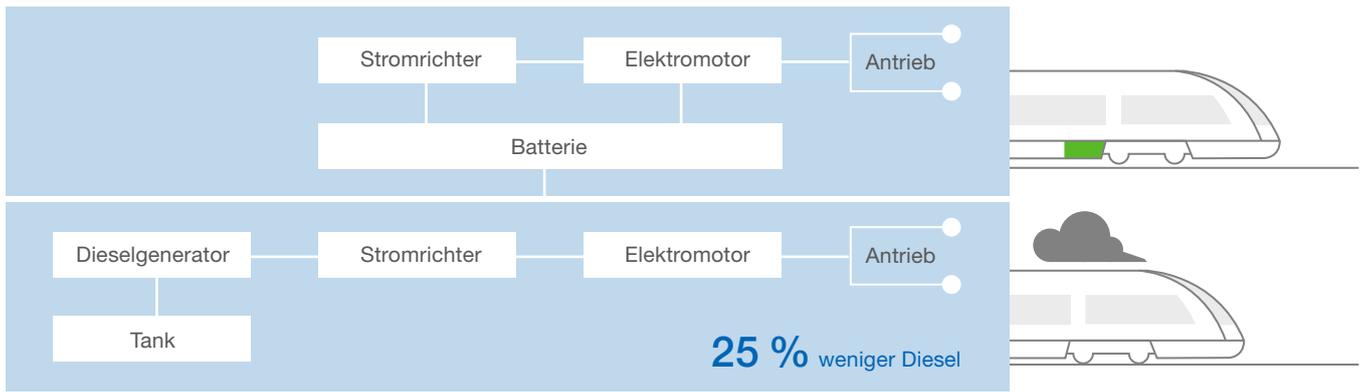


Abbildung 14: EcoTrain – nicht zugelassener Prototyp (Foto: L. Oppermann)

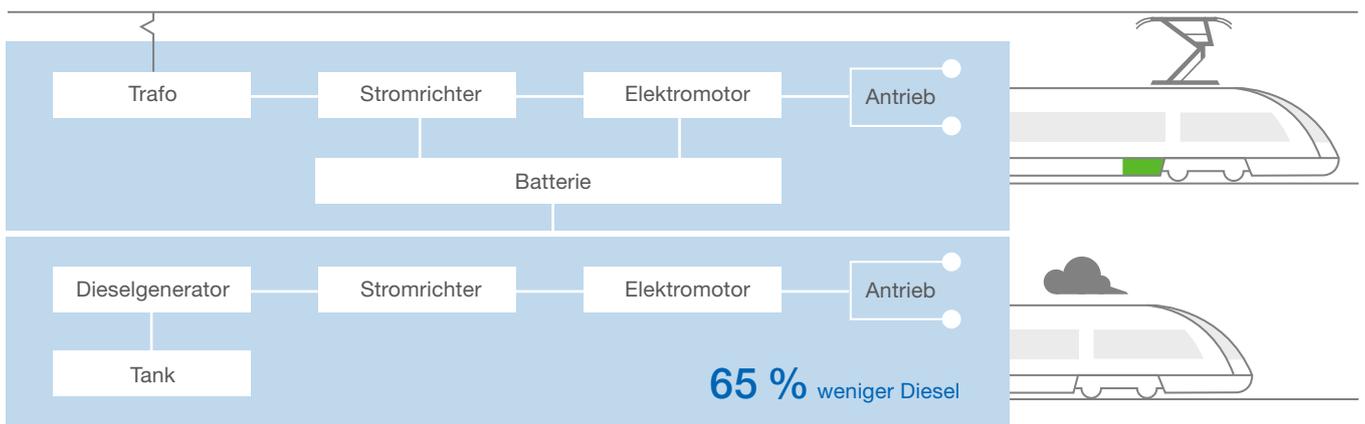
Der oben als vierte Option genannte Dieselhybridtriebzug stellt ein Konzept dar, das sich dank elektrischer Unterstützung wesentlich umweltfreundlicher betreiben lässt als herkömmliche Dieseltriebzüge.⁷ Als fortschrittlicheres Beispiel gilt der EcoTrain, der im Rahmen eines Förderprojektes entwickelt wurde. Dieser besteht aus einer diesel-elektrischen und einer Batterietriebzuginheit, die zusammen als EcoTrain HybridMode bezeichnet wird, → Abbildung 15. EcoTrain DualMode heißt eine Variante, die zusätzlich das Laden der Batterie über die Oberleitung ermöglicht, → Abbildung 15. Eine Besonderheit von EcoTrain ist, dass er durch den Umbau vorhandener Dieselfahrzeuge wie Desiro-Classico oder LINT 41 entstehen sollte. Serienreife Fahrzeuge stehen bis heute nicht zur Verfügung, da eine Zulassung des Prototyps bislang nicht erteilt wurde, → Abbildung 14.

⁷ Eine Dieselhybrid-Variante ist der Diesel-Elektro-Triebzug, der in Deutschland wegen seiner Fehleranfälligkeit aber selten eingesetzt wird.

EcoTrain HybridMode



EcoTrain DualMode



Im Folgenden sind die zugrunde liegenden Besonderheiten der Antriebskonzepte Oberleitungs-Elektrotriebzug, Batterietriebzug und Wasserstofftriebzug zusammengestellt.

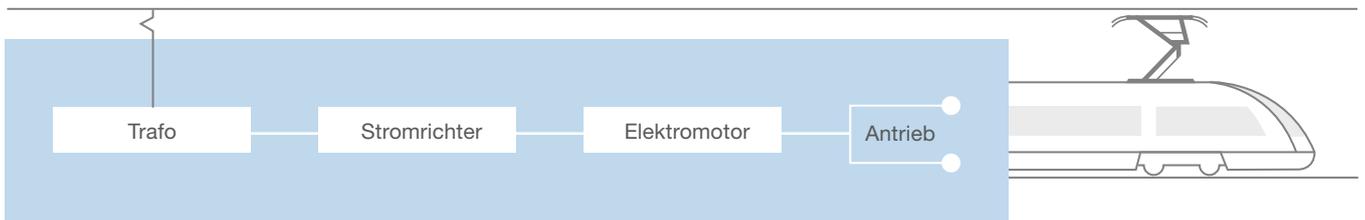
Abbildung 15: EcoTrain Dieselhybrid-Konzept

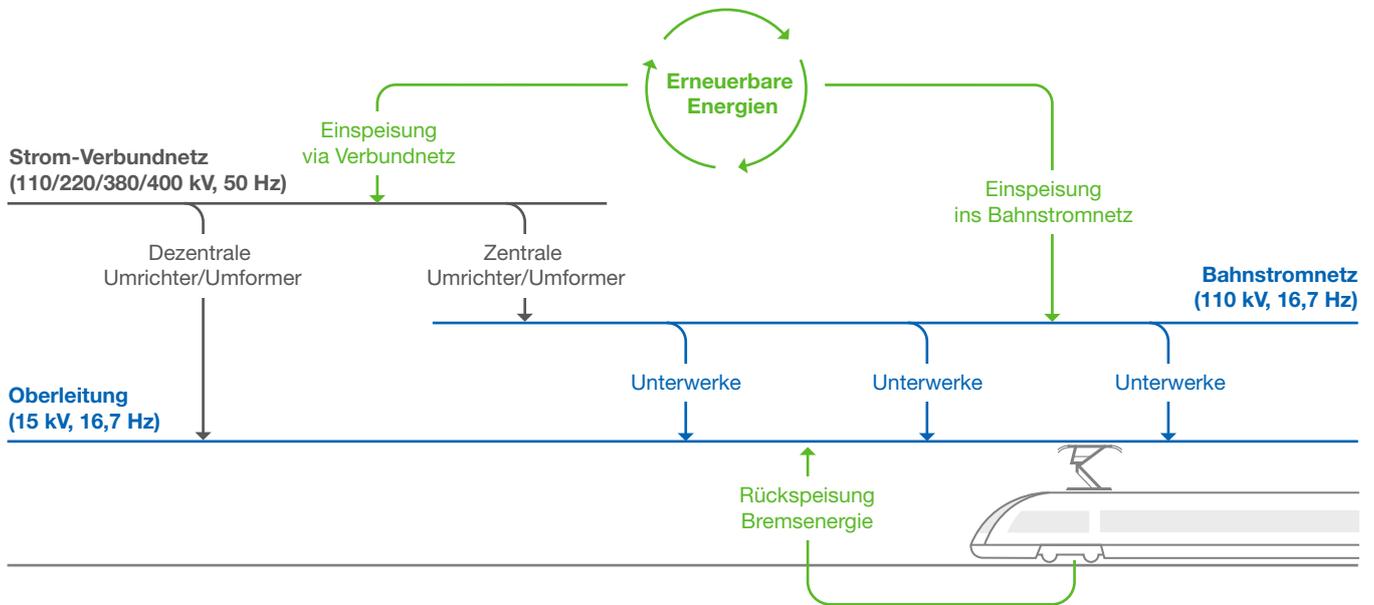
3.1 Elektrotriebzug und Oberleitungsnetz

Auf durchgehend elektrifizierten Bahnlinien ist der Oberleitungs-Elektrotriebzug (engl. *electric multiple unit*, EMU) die energieeffizienteste und damit einzig sinnvolle Antriebslösung. Deren Konzept ist in → Abbildung 16 dargestellt. Die für den Antrieb benötigte elektrische Energie wird in Kraftwerken erzeugt, die in das Bahnstromnetz (110 kV, 16,7 Hz) einspeisen. Die Versorgung des Oberleitungsnetzes erfolgt über Unterwerke, die das Spannungsniveau auf 15 kV absenken. Dezentrale Umrichter oder Umformer erlauben alternativ eine Umsetzung aus dem 50 Hz-3-Phasen-Strom-Verbundnetz in das 16,7 Hz-Oberleitungsnetz, → Abbildung 17.

Abbildung 16: EMU-Konzept

Elektrotriebzug EMU





In der Literatur [1] wird für den Antriebsstrang eines EMU ein Wirkungsgrad von 85 Prozent angegeben, der im Wesentlichen durch die Verlustleistung des Transformators und des Stromrichters bestimmt wird. Laut DB AG [2] entfallen bis zu 20 Prozent des Energieverbrauchs auf die Funktionen Klimatisieren, Abführung von Verlustwärme, Frostschutz, Druckluft und Steckdosen. Im Mittel gelangen rund 68 Prozent der aus der Oberleitung bezogenen Energie an die Antriebsachsen des Zuges. Diese Energie wird für Beschleunigung und Überwindung von Widerstandskräften aufgrund von Steigungen, Luftreibung oder Rollwiderstand eingesetzt.

Abbildung 17: Bahnstrom-Einspeisungswege (eigene Darstellung nach Grafik DB)

Ein Vorzug der für den Antrieb eingesetzten Asynchronmotoren ist, dass sie beim Abbremsen des Fahrzeugs als Stromgeneratoren wirken. Diese Form der „Rückverstromung“ von Bewegungsenergie erlaubt es, den Energiebedarf eines Elektrotriebzugs signifikant zu reduzieren, sofern sichergestellt werden kann, dass die in die Oberleitung zurückgespeiste (rekuperierte) Energie zeitgleich von anderen Elektrotriebzügen genutzt werden kann. Die rekuperierte Bahnstrommenge (Rückspeiseenergie) wird von der DB Energie zu einem nach Zeitzonen differenzierten Preis vergütet. In der Literatur [3] wird als typischer Energiebedarf eines EMU unter Berücksichtigung der Rekuperation ein Wert von 30 Wh/t/km angegeben.

Abbildung 18: OL-Elektrotriebzug (Foto: W. Klebsch)



3.2 Batterietriebzug und Ladeinfrastruktur

Batterietriebzüge (engl. *battery electric multiple unit*, BEMU) stellen in ihrer typischen Konfiguration, so wie sie heute etwa von Stadler, Siemens-Mobility, CAF oder Alstom angeboten werden, objektiv Oberleitungs-Elektrotriebzüge (EMU) dar, die in der Lage sind, mit Hilfe großer Lithium-Ionen-Akkumulatoren vorhandene Oberleitungslücken zu überbrücken. → Abbildung 19, → Abbildung 20

Ein Batterietriebzug lässt sich grundsätzlich in vier verschiedenen Modi betreiben:

1. als EMU, der mit hochgeklapptem Pantografen unter der Oberleitung fährt;
2. als EMU auf der Fahrt unter der Oberleitung, der zugleich den BEMU-Akku auflädt;
3. als BEMU, der mit gesenktem Pantografen auf einer oberleitungsfreien Strecke fährt;
4. als BEMU, der in Parkposition unter einer Oberleitung mit gehobenem Pantografen lädt.

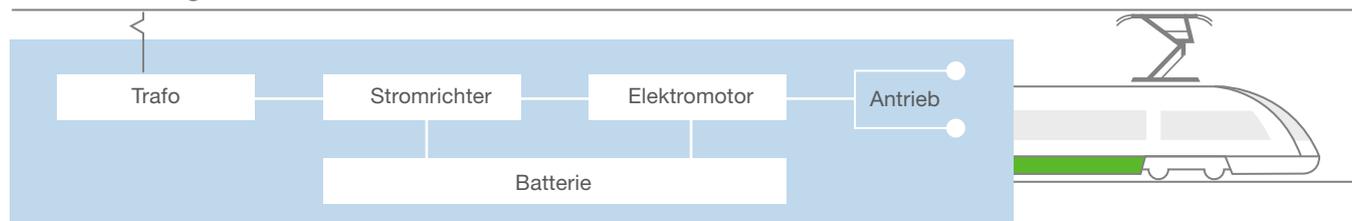
Im **Modus 1 (EMU-Modus)** verfügt der BEMU über die Leistungsfähigkeit eines EMU mit der typisch hohen Antriebsleistung und Spurtkraft, ohne dabei die Batterie zu belasten.

Im **Modus 2 (EMU-Batterielademodus)** wird die von der Oberleitung bereitgestellte Leistung für den Antrieb und für das Laden aufgeteilt. Die Möglichkeit, während der Fahrt zu laden, ist betrieblich vorteilhaft, allerdings muss die elektrifizierte Strecke dafür lang genug sein: Für eine zusätzliche Reichweite von 20 km, beispielsweise, muss der Akku bei einer effektiven Ladeleistung von 1 MW mindestens 6 Minuten nachgeladen werden⁸. Bewegt sich der Zug dabei mit 100 km/h, sollte die Oberleitungsstrecke somit mindestens 10 Kilometer lang sein.

Im **Modus 3 (BEMU-Modus)** fährt der Zug komplett auf Batterie. Die Akkuspannung liegt mit etwa 1 kV bereits auf dem Spannungsniveau der Fahrmotoren und Hilfsbetriebe. Um die Asynchronmotoren anzutreiben, wird der Batteriegleichstrom in dreiphasigen Wechselstrom mit variabler Frequenz und Spannung gewandelt. Der Wirkungsgrad des Batterieantriebs wird durch den Innenwiderstand der Batterie, die Umwandlung des Gleichstroms in den variablen Wechselstrom und durch die Motoren bestimmt und erreicht etwa 85 %, ist also mit dem eines EMU vergleichbar. Allerdings mindern die beim Laden der Batterie auftretenden Leistungsverluste diesen Wirkungsgrad um ca. 10 % auf um die 77 %.

Abbildung 19: BEMU-Konzept

Elektrotriebzug BEMU



⁸ unter der Annahme eines Energiebedarfs von 5 kWh/km



Im **Modus 4 (BEMU-Lademodus)** wird die Leistung aus der Oberleitung ausschließlich für das Laden der Batterie genutzt. Da der Fahrdrat bei stehendem Fahrzeug mit maximal 80 Ampere belastet werden darf, beträgt die höchste zulässige Ladeleistung 1,2 Megawatt.

Anzumerken ist, dass der Energiebedarf eines BEMU zum einen durch die Wirkungsgrade in den genannten Modi wie auch durch die Möglichkeit der Rekuperation beeinflusst wird. Angesichts der Leistungsverluste beim Laden und Entladen der Batterie ist davon auszugehen, dass der Energiebedarf eines BEMU höher ist als der eines EMU, also höher 30 Wh/t/km liegt. Entsprechend werden sich auch die Energiekosten eines BEMU von denen eines EMU unterscheiden, wobei die Selbstnutzung rekuperierter Energie kostenmäßig der Vergütung von Rückspeiseenergie in die Oberleitung gegenüberzustellen sein wird.

In → Tabelle 2 sind die technischen Daten einiger BEMU-Modelle zusammengestellt, die auf dem Markt zur Verfügung stehen oder perspektivisch verfügbar sein werden.

Abbildung 20: BEMU-Modelle von Stadler, Siemens, CAF und Alstom (Bilder: Hersteller)

| BEMU | FLIRT Akku 3 | Mireo Plus B | Civity 2 | Talent 3 BEMU |
|--|-------------------|--------------------------------|-------------------|--------------------------------|
| | 2-teilig | 2-teilig | 2-teilig | 3-teilig |
| Länge über Kupplung | 46.000 mm | 46.560 mm | 44.600 mm | 56.200 mm |
| Sitzplätze | 124 | ~120 | 120 | 165 |
| Stehplätze | 123 | k. A. | k. A. | k. A. |
| Gesamtmasse | k. A. | k. A. | 99.700 kg | > 114.000 kg |
| Antriebsleistung | 1.000 kW | 1.7000 kW | 1.000 kW | 1.800 kW |
| Höchstgeschwindigkeit im Batteriemodus | 160 km/h k. A. | 140 km/h k. A. | 140 km/h k. A. | 140 km/h k. A. |
| Max. Beschleunigung im Batteriemodus | k. A. k. A. | 1,10 m/s ² k. A. | k. A. k. A. | 1,10 m/s ² k. A. |
| Batteriekapazität Reichweite Batterie | k. A. 80 km | 580 kWh 80 km | k. A. 80 km | k. A. 100 km |
| Hersteller | Stadler | Siemens-Mobility | CAF | Bombardier |

Traktionsbatterien müssen im Bahnbereich höchsten Anforderungen genügen [4]

Batterietriebzüge werden – wie konventionelle Triebzüge auch – täglich fast rund um die Uhr, zu jeder Jahreszeit, bei Hitze und Kälte bis zu 30 Jahre lang im Einsatz sein. Ihre betrieblichen Eigenschaften und möglichen Einschränkungen werden in erster Linie durch die der Traktionsbatterie bestimmt, die beim Anfahren, Beschleunigen oder Berganfahren mit hohen Entladeströmen belastet und bei Bremsvorgängen und insbesondere beim Laden über den Fahrdrabt sehr hohe Ladeströme aufnehmen muss. Ausschlaggebend sind somit neben Speichergröße, Volumen und Gewicht des Akkus, die zulässige Ladeleistung und maximalen Entladeströme, zudem die Leistungsfähigkeit bei tiefen oder hohen Außentemperaturen sowie die Akku-Lebensdauer.

Die Lebensdauer einer Batterie wird wesentlich durch die Anzahl der Lade- und Entladezyklen sowie die Art und Weise des Ladens (z. B. häufiges Schnellladen) im Verlauf ihres Lebens bestimmt. Abweichungen von vorgegebenen zulässigen C-Raten können die Lebenserwartung der Batterie erheblich reduzieren. In jedem Fall gilt, dass, sobald der nutzbare Energieinhalt auf unter 80 % des nominalen Energieinhaltes sinkt, die Batterie als verbraucht gilt, das heißt, ihr Lebensende (engl. *end of life*, EoL) erreicht hat. Besonders belastend wirkt das Entladen auf einen Zustand (engl. *state of charge*, SoC) nahe 0 % und das Aufladen auf einen SoC von 100 %, also die Nutzung einer Entladungstiefe (engl. *depth of charge*, DoD) von 100 %. Die Lebensdauer wird maßgeblich durch die Häufigkeit bestimmt, mit der diese Belastung auftritt. Für eine lange Nutzungsdauer sollte nach Experteneinschätzung das SoC-Fenster möglichst zwischen 10 und 90 % liegen, der DoD also auf maximal 80 % begrenzt werden.

Wie viel Energie in einer Batterie gespeichert werden kann, hängt von der Energiedichte ab, die durch die Zelltechnologie vorgegeben ist. Diese kann auf das Volumen oder die Masse bezogen angegeben sein, im Sinne einer volumetrischen Energiedichte [in Wh/l] oder gravimetrischen Energiedichte in [Wh/kg]. Je höher die Energiedichte ist, umso kleiner oder leichter ist die Batterie bei gleichem Energieinhalt. Das ist ein wichtiger Aspekt bei der Dimensionierung der Akkus von Batteriefahrzeugen. Für eine garantierte Reichweite von 80 Kilometern müsste bei einem angenommenen mittleren Energieverbrauch von 5 kWh/km den EoL/DoD-Anforderungen entsprechend für die Batteriepacks eine Größe von mindestens 600 kWh vorgesehen werden. Im Falle von LTO-Batterien, deren gravimetrische Energiedichte auf Packebene brutto rund 70 Wh/kg beträgt, müsste mit einem Eigengewicht von rund 9 Tonnen gerechnet werden.

Tabelle 2: Technische Daten zu BEMU-Fahrzeugen (Quelle: Hersteller)

Andere Technologien wie beispielsweise NMC haben sehr viel höhere Energiedichten, so dass das Eigengewicht des Batteriepacks bei gleichem Energieinhalt um einige Tonnen geringer ausfiele.

Zughersteller beschränken sich heute auf die Technologien LTO oder NMC, die sich in ihren Eigenschaften signifikant unterscheiden: LTO-Batterien sind wegen ihrer geringeren Energiedichte wesentlich schwerer als NMC-Batterien. Dafür weisen LTO-Batterien erhebliche technologie-bedingte Vorteile auf, die insbesondere im Bahnbereich eine wichtige Rolle spielen. Dazu zählen C-Raten von bis zu 5C für das Laden und hohe Zyklenfestigkeit, also die Möglichkeit, besonders viele Lade- und Entladezyklen zu durchlaufen, ohne dass die Batterie dabei schnell altert. Die hohe Leistungsdichte der LTO-Batterien erlaubt höchste Entladeströme, die für die Fahrzeugbeschleunigung benötigt werden, und sie ermöglichen dies sogar im Falle von Kaltstarts bei -30 °C. Alle diese Eigenschaften tragen zur hohen Lebenserwartung dieses Batterietyps bei, die in Batterietriebzügen eingesetzt nach Expertenaussagen 15 Jahre betragen dürfte. Das ist doppelt so hoch wie die für NMC-Batterien zu erwartende Lebensdauer von ca. 8 Jahren. Allerdings ist der Preis für LTO-Batterien pro kWh heute etwa doppelt so hoch wie der von NMC-Batterien, so dass bei gleicher Batteriespeichergröße mit ähnlich hohen Tauschkosten zu rechnen ist.

Separate Ladepunkte unterstützen die Überbrückung größerer Oberleitungslücken

Die Fahrzeugarchitektur setzt der Größe und dem Gewicht der Batterien des BEMU enge Grenzen, mit der Folge, dass die Hersteller in der Regel eine Reichweite von nur 80 km garantieren. Da statistisch gesehen mehr als Dreiviertel aller Oberleitungslücken in Deutschland kürzer als 80 km sind [5], → Abbildung 21, scheint diese Reichweitenbegrenzung für die meisten Diesellinien akzeptabel zu sein. Damit kann für typische Bahnlinien mit Oberleitungslücken angenommen werden, dass heutige BEMU-Fahrzeuge unter den vorhandenen Oberleitungen nachgeladen werden können, also keine zusätzliche Ladeinfrastruktur benötigt wird.

Die Linien des Südthüringennetzes erweisen sich bis auf RB 23 jedoch durchweg als nicht typisch, wie bei der Charakterisierung der Bahnlinien in Abschnitt 2.2 bereits deutlich wurde.

Abbildung 21: Statistische Verteilung der Länge von Oberleitungslücken in Deutschland

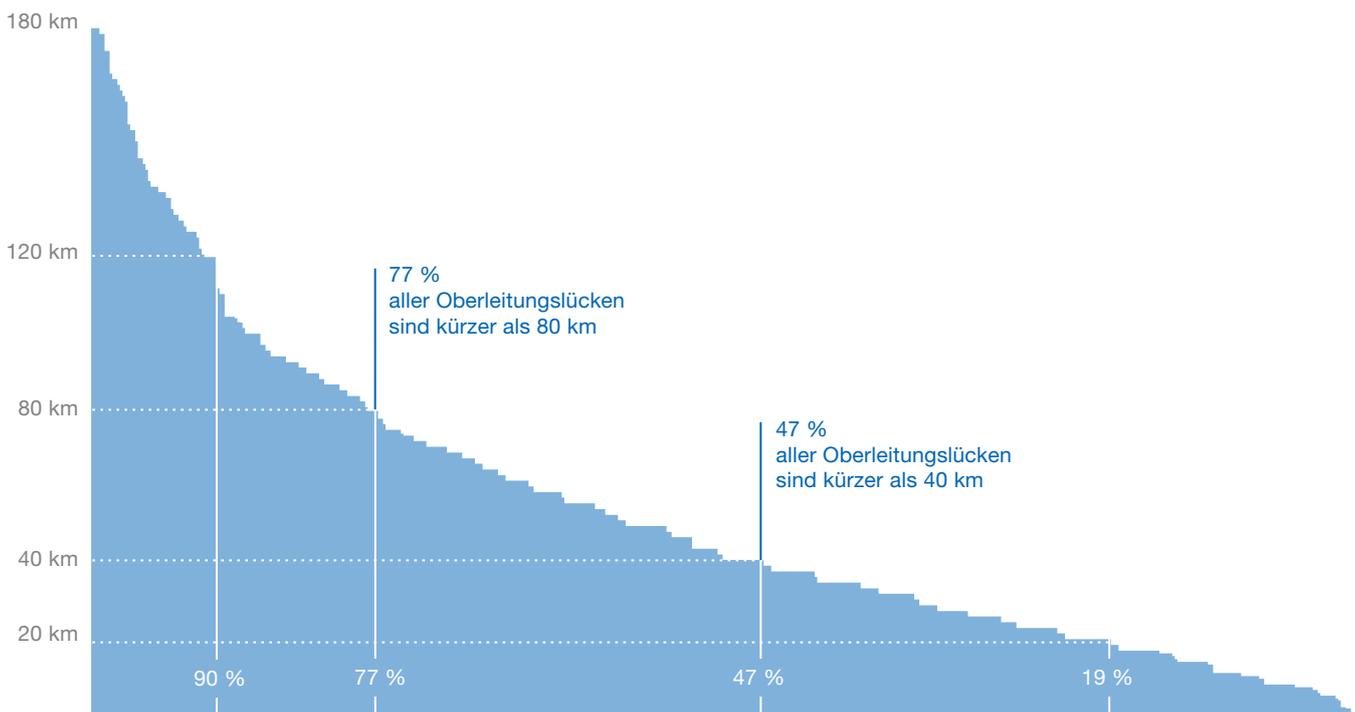




Abbildung 22: FLIRT-Akku an der VOLTAP®-Demo-Anlage beim Haltepunkt Pfäffingen (Foto: Stadtwerke Tübingen)

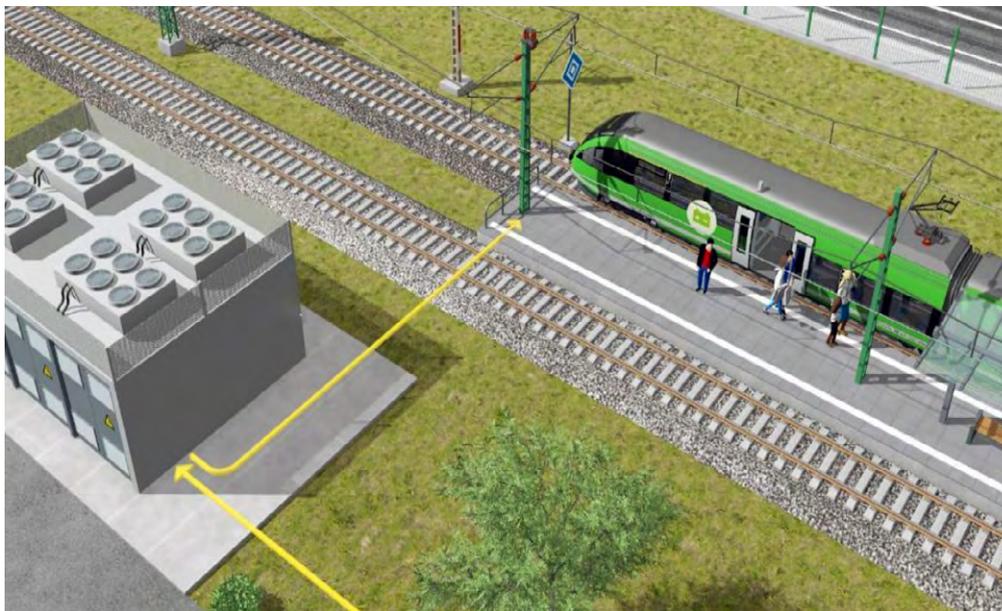
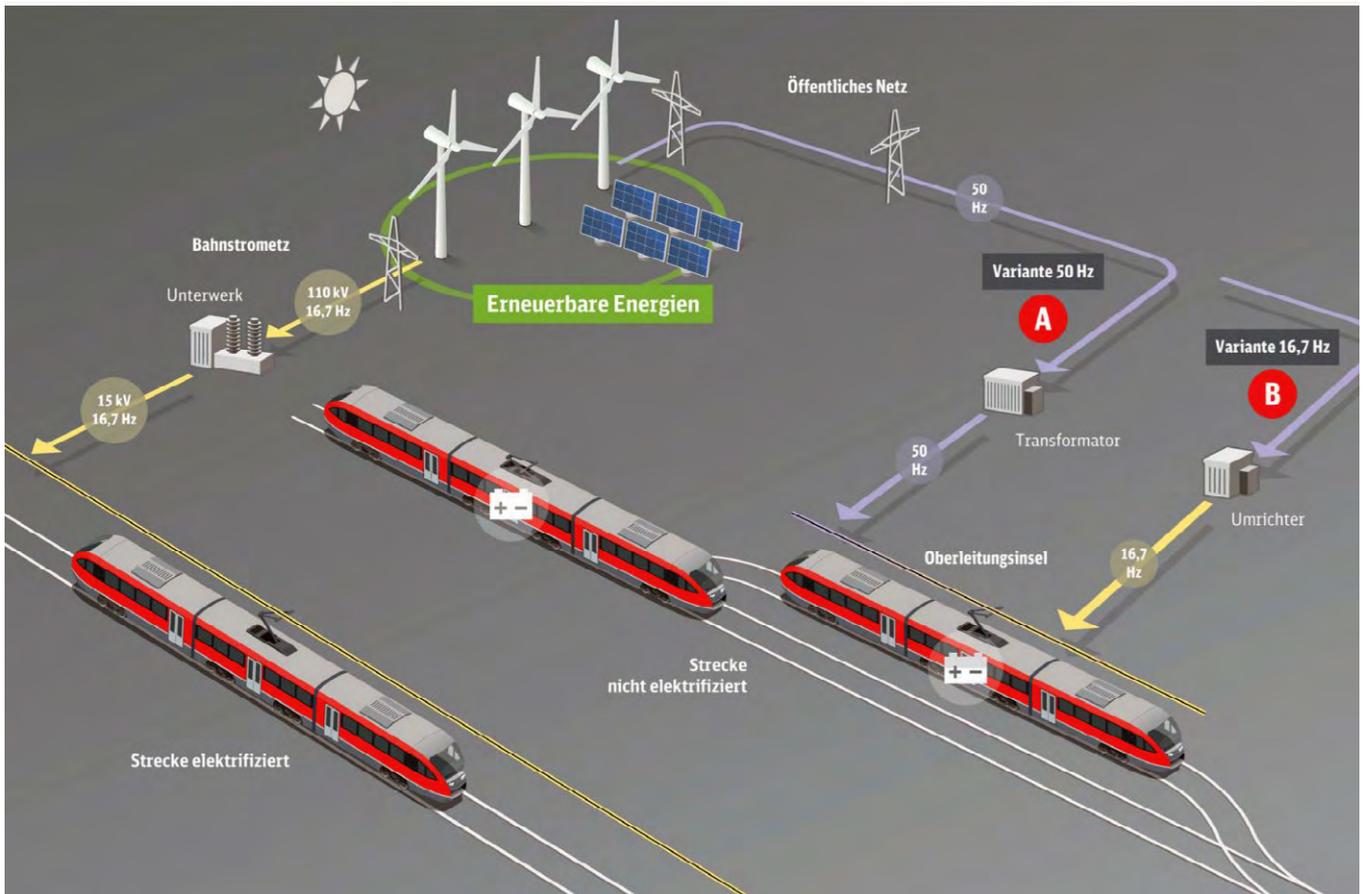


Abbildung 23: Oberleitungsinselanlage (Quelle: DB Energie GmbH)

Ladepunkte lassen sich vergleichsweise preiswert realisieren, sofern das Betriebsprogramm es zeitlich zulässt, BEMU-Fahrzeuge stehend nachzuladen. Die Strombegrenzung an der Kontaktstelle des Pantografen mit der Oberleitung beschränkt die Ladeleistung auf 1,2 MW. Das Produkt VOLTAP® der Stadtwerke Tübingen, → Abbildung 22, stellt eine verfügbare Lösung dar, auch wenn bislang noch kein Einsatz im Streckennetz der DB Netz realisiert wurde. Ihr Konzept hat wohl auch die DB Netz AG überzeugt, denn diese entwickelt in einem wissenschaftlichen Verbundprojekt ein ähnliches Produkt: eine transportable Ladeinfrastruktur für BEMUs verbaut in einem Container, erstmalig eingesetzt am Bahnhof Annaberg-Buchholz (Süd) in Sachsen [6].

Die aktuell teuerste Lösung stellt die sogenannte Oberleitungsinselanlage (OLIA) der DB Netz AG dar [7], so wie sie heute in Schleswig-Holstein z. B. an den Standorten Heide, Husum und Tönning entstehen; → Abbildung 23, → Abbildung 24. Eine solche Anlage erscheint dann gerechtfertigt, wenn – langfristig gesehen – die Möglichkeit der vollständigen Elektrifizierung offen gehalten werden soll. Die Anlage muss regelkonform, im Einklang mit den Technischen Netz Zugangsbedingungen (TNB), realisiert werden. Dies betrifft u. a. das Leistungs- und Lastmanagement nach DIN EN 50388, Kap. 7, und das Einschaltverhalten nach prEN 50388-Inrush. Die damit verbundenen Aufwände schlagen sich in den Kosten nieder.



3.3 Wasserstofftriebzug und -Tankinfrastruktur

Die von Herstellern wie Alstom und Siemens-Mobility angebotenen Wasserstofftriebzüge (engl. *hydrogen electric multiple unit*, HEMU) werden – wie Batterietriebzüge auch – von Elektromotoren angetrieben. Der erforderliche Antriebsstrom wird von Brennstoffzellen bereitgestellt, die den mitgeführten Wasserstoff kontrolliert mit Luft-sauerstoff zu Wasserdampf reagieren lassen.

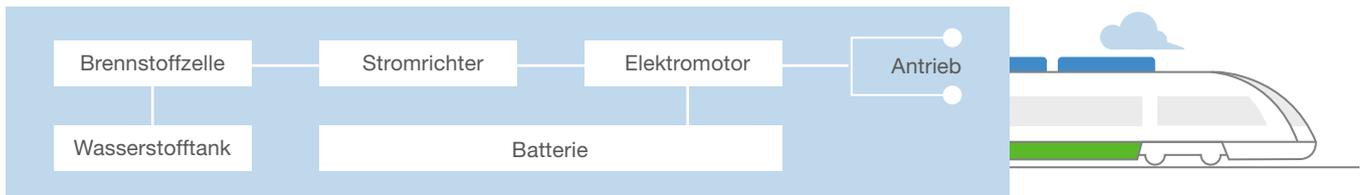
Tatsächlich handelt es sich um Gleichstrom-generierende Brennstoffzellen-Stacks, → Abbildung 26 links, deren Ausgangsspannung bereits im Spannungsbereich des Traktionskreises und der Hilfsbetriebe liegt. Der Gleichstrom muss über einen Puls-wechselrichter noch in den variablen dreiphasigen Wechselstrom für die Asynchron-motoren umgewandelt werden.

Die Reichweite eines HEMU wird durch den Wasserstoffverbrauch pro Kilometer und durch die Größe der Wasserstofftanks bestimmt und wird mit bis zu 1.000 km angegeben.

HEMU-Fahrzeuge benötigen zusätzlich zum Brennstoffzellen-Stack zur Unterstützung der Beschleunigung, bei der sehr hohe Ströme fließen, eine Dynamikbatterie, die ebenso leistungsfähig sein muss, wie bei BEMU-Fahrzeugen. Diese Batterie puffert die während der Bremsvorgänge rekuperierte Energie und stellt diese in der nächsten Beschleunigungsphase wieder zur Verfügung. Die erforderliche Größe der Dynamik-batterie hängt unter anderem davon ab, mit wie viel Rekuperation zu rechnen ist und in welchem Umfang Wasserstoff gespart werden soll. In jedem Fall ist diese Batterie wesentlich kleiner auszulegen als BEMU-Traktionsakkumulatoren.

Abbildung 24: Stromver-sorgung für BEMU-Fahrzeuge an Oberleitungsinselanlage (Quelle: DB Energie GmbH)

Elektrotriebzug HEMU



Anders als der BEMU verfügt ein HEMU typischer Bauart über keinen EMU-Modus, er hat also keinen Pantografen, mit dem er Strom aus der Oberleitung beziehen könnte. Damit entfällt die Notwendigkeit eines Transformators, durch den Traktionsleistung geleitet werden müsste. Dieser Architekturunterschied ist vorteilhaft hinsichtlich der Komponentenkosten und des Wirkungsgrades. Allerdings wird der Wirkungsgrad des HEMU-Antriebsstrangs maßgeblich bestimmt durch den der Brennstoffzellen, der im Falle der FC-PEM-Technologie⁹ etwa 60 % erreicht. Der Antrieb und das notwendige Zusammenspiel mit der Dynamikbatterie drücken den resultierenden Wirkungsgrad auf etwa 50 %. Dieser ist damit signifikant niedriger als im Fall von BEMU (77 %) oder EMU (85 %). Angesichts dieses Unterschiedes wird deutlich, dass der Energiebedarf eines HEMU grundsätzlich höher sein muss als der eines BEMU oder EMU.

Abbildung 25: HEMU-Konzept

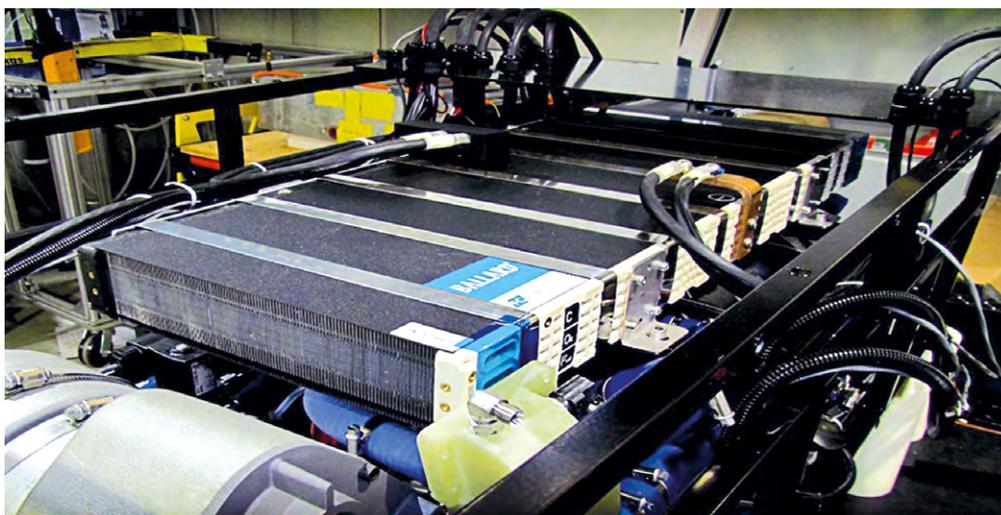
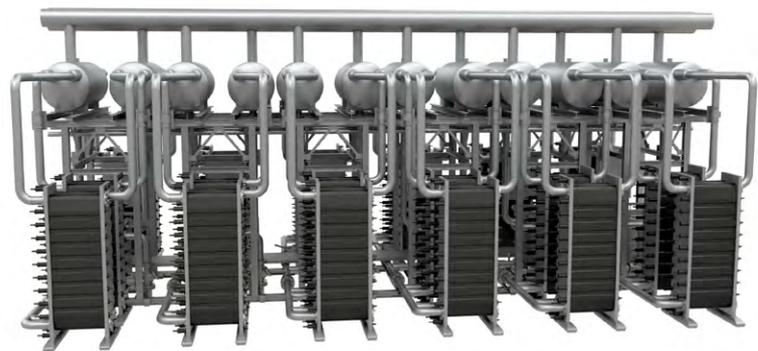


Abbildung 26: Brennstoffzellen-Stack (Ballard Power; links) und Elektrolyseur (Siemens Silyzer 300; oben) (Fotos: Hersteller)

⁹ FC = fuel cell = Brennstoffzelle; PEM = Proton Exchange Membrane (= Membran für den Austausch Protonen)

| HEMU | iLINT 54 [Typ II] | Mireo Plus H | Mireo Plus H |
|--|----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| | 2-teilig | 3-teilig | 2-teilig |
| Länge über Kupplung | 54.270 mm | 62.900 mm | 46.560 mm |
| Sitzplätze | 156 | 155–194 | 105–139 |
| Stehplätze | k. A. | k. A. | k. A. |
| Gesamtmasse | 119.000 kg | k. A. | k. A. |
| Antriebsleistung | 2 x 367 kW | 1.700 kW | 1.000 kW |
| Höchstgeschwindigkeit | 140 km/h | 140 km/h | 140 km/h |
| Max. Beschleunigung | 1,10 m/s ² . | 1,00 m/s ² | 1,10 m/s ² |
| Brennstoffzellen-Leistung Größe der Wasserstofftanks Fahrzeug-Reichweite | 2 x 200 kW 260 kg 1.000 km | 2 x 200 kW 250 kg 900 km | 2 x 200 kW 130 kg 550 km |
| Hersteller | Stadler | Siemens-Mobility | Siemens-Mobility |

In → Tabelle 3 sind die technischen Daten zweier HEMU-Modelle zusammengestellt, die auf dem Markt zur Verfügung stehen oder perspektivisch verfügbar sein werden.

Der für den klimaneutralen Antrieb des HEMU benötigte grüne Wasserstoff wird durch Elektrolyse von Wasser erzeugt, bei der erneuerbarer Strom eingesetzt wird. Der Wirkungsgrad eines Elektrolyseurs der PEM-Technologie, → Abbildung 26 oben, beträgt etwa 70%.

Tabelle 3: Technische Daten zu HEMU-Fahrzeugen (Quelle: Hersteller)



Abbildung 27: HEMU-Modelle iLINT 54 und Mireo-plus-H (Fotos: Alstom, Siemens)



Tankstellen für grünen Wasserstoff sind Teil einer komplexen Wasserstoff-Infrastruktur.

Wasserstofftankstellen sind ähnlich wie Dieseltankstellen an solchen Standorten zu platzieren, an denen der Aufwand der notwendigen Tankfahrten minimal gehalten werden kann. Zugleich ist eine Wasserstofftankstelle Teil einer notwendigen Wasserstoffinfrastruktur, die im Falle von grünem Wasserstoff komplex ausfallen kann. Beispielsweise werden Grünstrom-produzierende Windkraft- oder Photovoltaik-Anlagen angemessener Größe und Leistung sowie Elektrolyseure für die Herstellung der benötigten Menge an grünem Wasserstoff benötigt. Der Transportweg zwischen Elektrolyseuren und Tankstellen darf nicht zu groß sein. Zudem müssen die Tankstellen selbst so dimensioniert sein, dass sie den Energiebedarf der HEMU-Flotte in dem betrachteten Netz möglichst über mehrere Tage hinweg abdecken können.

Eine Wasserstofftankstelle mit Onsite-Elektrolyseur, so wie sie z. B. von Siemens vorgeschlagen wurde, ist in → Abbildung 28 konzeptionell dargestellt.

Abbildung 28: Konzept einer Wasserstoff-Tankstelle
(Grafik: Siemens AG)

4. Technische Machbarkeit

Eine Voraussetzung für die Feststellung der technischen Machbarkeit im Südhüringen-netz ist die Verfügbarkeit geeigneter Fahrzeuge, die mit der gewünschten Antriebs-technologie ausgestattet sind und im vorgesehenen Zeitraum bis Ende 2028 getestet, zugelassen und in der benötigten Anzahl verfügbar sein werden. Entsprechendes gilt für die Bereitstellung der jeweils erforderlichen Infrastruktur, also für Wasserstofftank-stellen oder Ladepunkte bzw. Oberleitungen.

Technische Machbarkeit ist tatsächlich noch weiter zu fassen: Die Fahrzeuge müssen dem Betriebsprogramm „Südhüringen-netz 2029“ genügen – auch unter widrigsten Umgebungs- und Wetterbedingungen. Fahrzeugkonzepte wie DMU und HEMU zeichnen sich dadurch aus, dass sie technologiebedingt über große Reichweiten verfügen, bei Störungen der Oberleitung grundsätzlich unbeeinflusst bleiben und selbst bei extremer Witterung Resilienz zeigen. Wenn diese Fahrzeuge zudem die für die Einhaltung der Fahrpläne erforderlichen Anforderungen wie Höchstgeschwindigkeit und Beschleunigungs-vermögen erfüllen, sind sie betrieblich gesehen ideal einsetzbar. Entsprechend hat sich der Aufgabenträger TLBV bei der Erstellung des Betriebsprogramms an den Eigenschaften des DMU Coradia LINT 41 von Alstom → Abbildung 29 und des HEMU Mireo-plus-H von Siemens-Mobility → Abbildung 30 ausgerichtet.

Abbildung 29:
DMU Coradia LINT 41
(Quelle: A. Schwarz)

Abbildung 30:
HEMU Mireo-plus-H
(Quelle: Siemens-Mobility)



4.1 BEMU für Südthüringennetz und Schwarzatalbahn

Technische Machbarkeit ist insbesondere im Falle von BEMU-Fahrzeugen kritisch zu sehen: Deren begrenzte Reichweite und die Notwendigkeit, über den Tag regelmäßig nachladen zu müssen, stellen ein grundsätzliches betriebliches Risiko dar, dem mit einer gut durchdachten Ladeinfrastruktur begegnet werden muss. Für die Machbarkeitsuntersuchung ging der VDE in Ermangelung verbindlicher Daten der Hersteller von folgenden Annahmen aus:

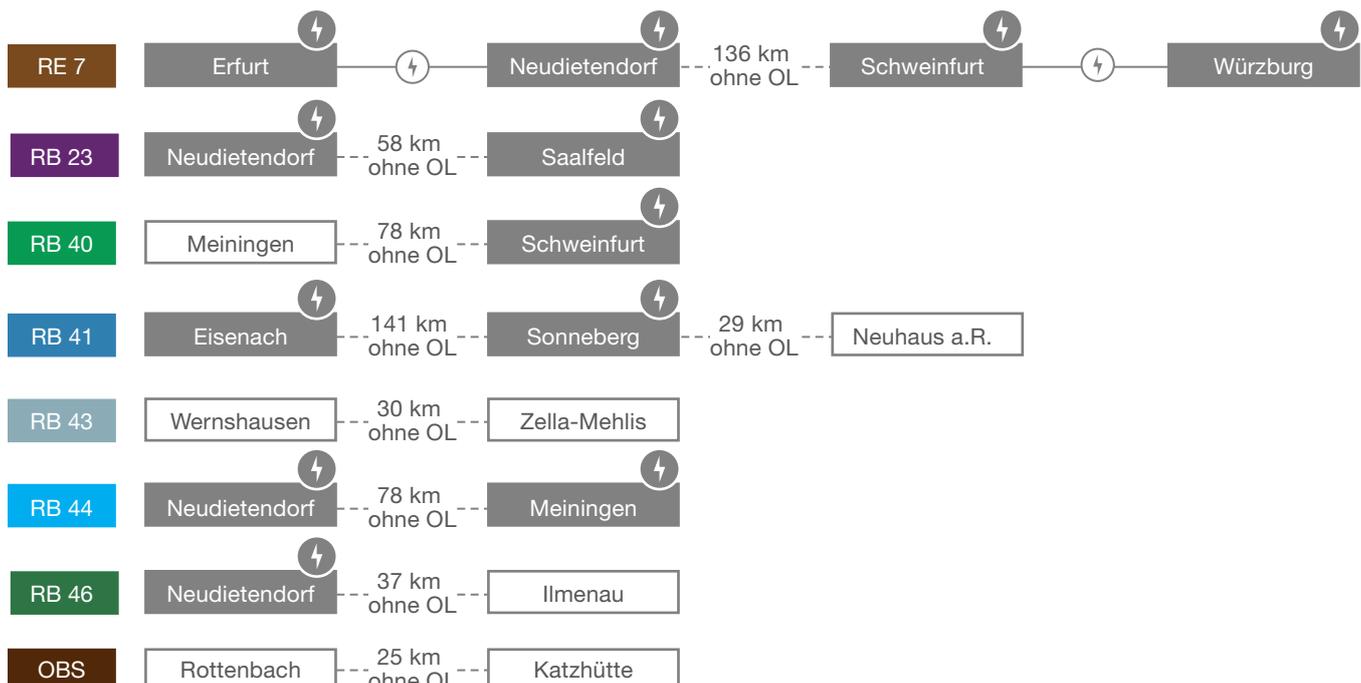
- Die Fahrzeuge der BEMU-Flotte verfügen über maximal 120 Sitzplätze.
- Der Energiebedarf beträgt (ohne Rekuperation) im Mittel 7 ± 1 kWh/km.
- Eine Reichweite von 80 km erfordert einen verfügbaren Batterieinhalt von 560 kWh.
- Für eine Batteriebensdauer von 15 Jahren muss die nominale Batteriegröße um 20 % größer sein als der verfügbare Energieinhalt, also mindestens 700 kWh betragen.
- Bei einer Ladeleistung von 1,2 MW an der Oberleitung lässt sich die Batterie mit etwa 17 kWh/min laden, das heißt, geladen wird die Batterie effektiv nur mit 1 MW.

Im Südthüringennetz ist technische Machbarkeit mit BEMU nur eingeschränkt gegeben.

Auf obiger Datenbasis hat der VDE für die Linien des Südthüringennetzes die Möglichkeit des Betriebes mit BEMU untersucht, unter der Annahme, dass sich an 13 Standorten Schnelllade-Anlagen vorsehen lassen: Wernshausen, Meiningen, Grimmenthal, Hildburghausen, Eisfeld, Neuhaus am Rennweg, Zella-Mehlis, Ilmenau, Gehlberg, Steinbach-Hallenberg, Rottenbach, Katzhütte und Neustadt (Saale) – jeweils ausgestattet mit zwei Ladepunkten → Abbildung 32.

Bei der Wahl der möglichen Standorte der Ladestationen orientierte sich der VDE an den zu überbrückenden Oberleitungslücken der Bahnlinien. → Abbildung 31 gibt einen Überblick.

Abbildung 31: Oberleitungslücken der untersuchten Bahnlinien





Die im April 2022 vom VDE an das TLBV berichteten Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen: Es erscheint grundsätzlich möglich, das Südthüringennetz mit BEMU-Fahrzeugen zu betreiben, vorausgesetzt, dass sich an den oben genannten Standorten tatsächlich Schnellladestationen, z. B. des Typs VOLTAP®, installieren lassen. Dafür müssen vor Ort geeignete Mittelspannungsnetze vorhanden und die Verteilnetzbetreiber in der Lage und bereit sein, die benötigten Mittelspannungsleitungen an die Ladestationen zu führen. Im Falle von VOLTAP®-Anlagen sind gegebenenfalls technische Freigaben der DB Netz AG als Infrastrukturbetreiber einzuholen.

Abbildung 32: Nahverkehrsnetze in Südthüringen (inkl. einiger Bushauptlinien) und mögliche Standorte für Schnellladestationen gemäß VDE-Analyse

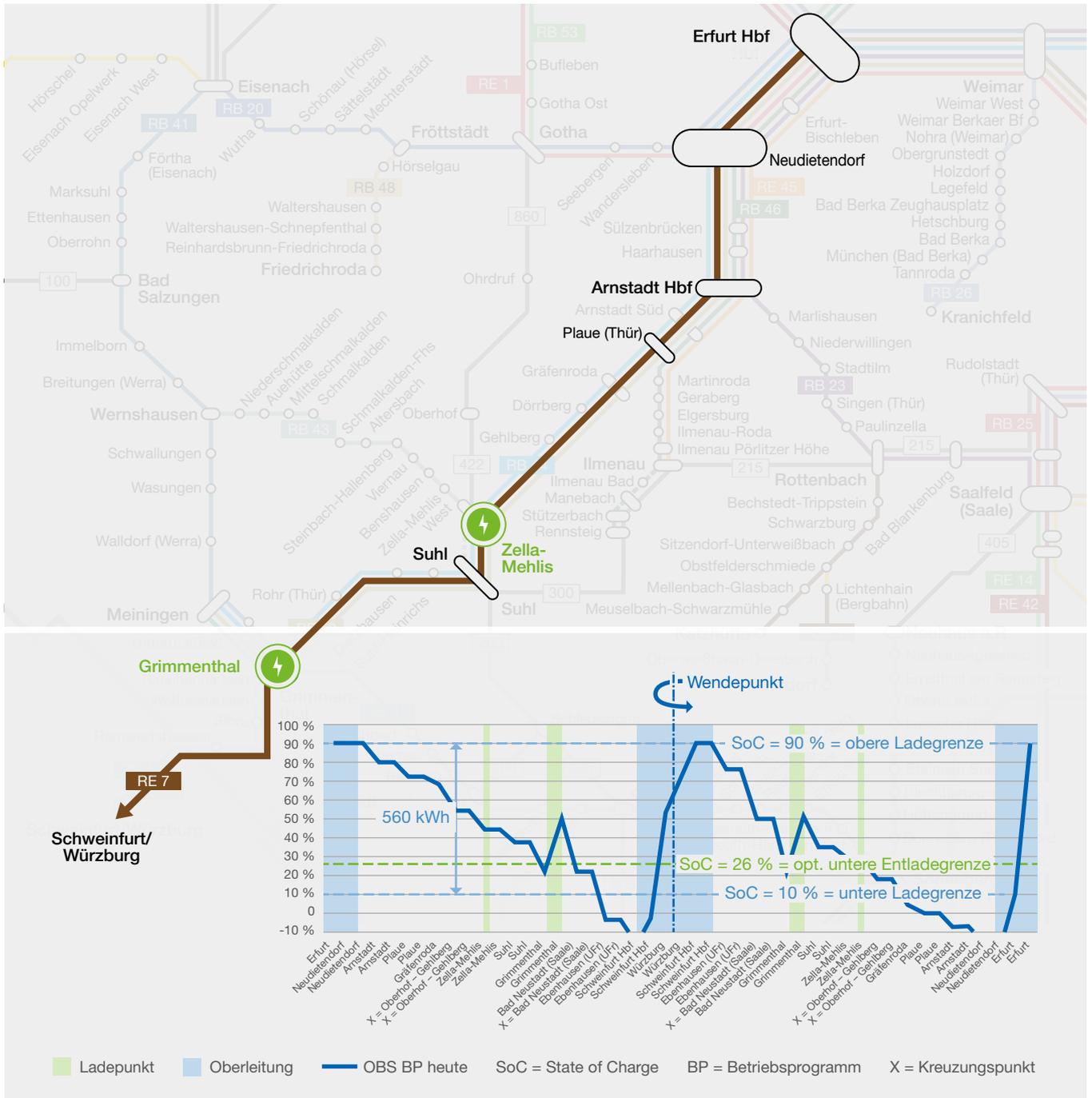
Im Falle der Linien RE 7 und RB 41 wären dafür jedoch Anpassungen des vorgegebenen Betriebsprogramms „Südthüringennetz 2029“ erforderlich. Verlängerte oder zusätzliche Haltezeiten und somit verlängerte Reisezeiten stellen aus Sicht des TLBV eine Verschlechterung des Betriebsprogramms dar, welche die Akzeptanz der Fahrgäste beeinträchtigen werden. Aus diesem Grunde legte TLBV fest, dass solche Änderungen nicht vertretbar sind. **Mit dieser Vorgabe erweist sich eine einheitliche BEMU-Lösung für das gesamte Netz als nicht realisierbar.**



Das TLBV hatte den Herstellern Alstom, CAF, Siemens-Mobility und Stadler für die Simulation von Lade- und Entladeverläufen Daten zu den Linien des Südthüringen-netzes zur Verfügung gestellt, dafür als Szenario nur **sechs Schnellladestandorte vorgegeben: Meiningen, Grimmenthal, Eisfeld, Neuhaus am Rennweg, Zella-Mehlis und Ilmenau**. Begründet wurde dies damit, dass das Betriebsprogramm nur an diesen Haltepunkten genügend Zeit für das Nachladen inklusive Andockung biete. Die Hersteller stellten Ende Mai 2022 ihre Simulationsergebnisse zur Verfügung, die das TLBV daraufhin dem VDE in einem Online-Meeting anhand der Simulationsergebnisse eines Herstellers vorstellte. Die gezeigten Lade- und Entladekurven stimmten gut überein mit den Ergebnissen des VDE, womit sich bestätigte, dass der VDE von korrekten Annahmen ausgegangen war. Da das TLBV weder verbindliche Fahrzeugdaten der Hersteller noch Simulationsergebnisse und -darstellungen an den VDE weiterleiten durfte, erlaubt sich der VDE in dieser Studie, die selbst generierten grafischen Darstellungen der Lade- und Entladekurven beispielhaft wiederzugeben. Die reduzierte Anzahl an Schnelllade-Anlagen wurde berücksichtigt, siehe → Abbildung 33.

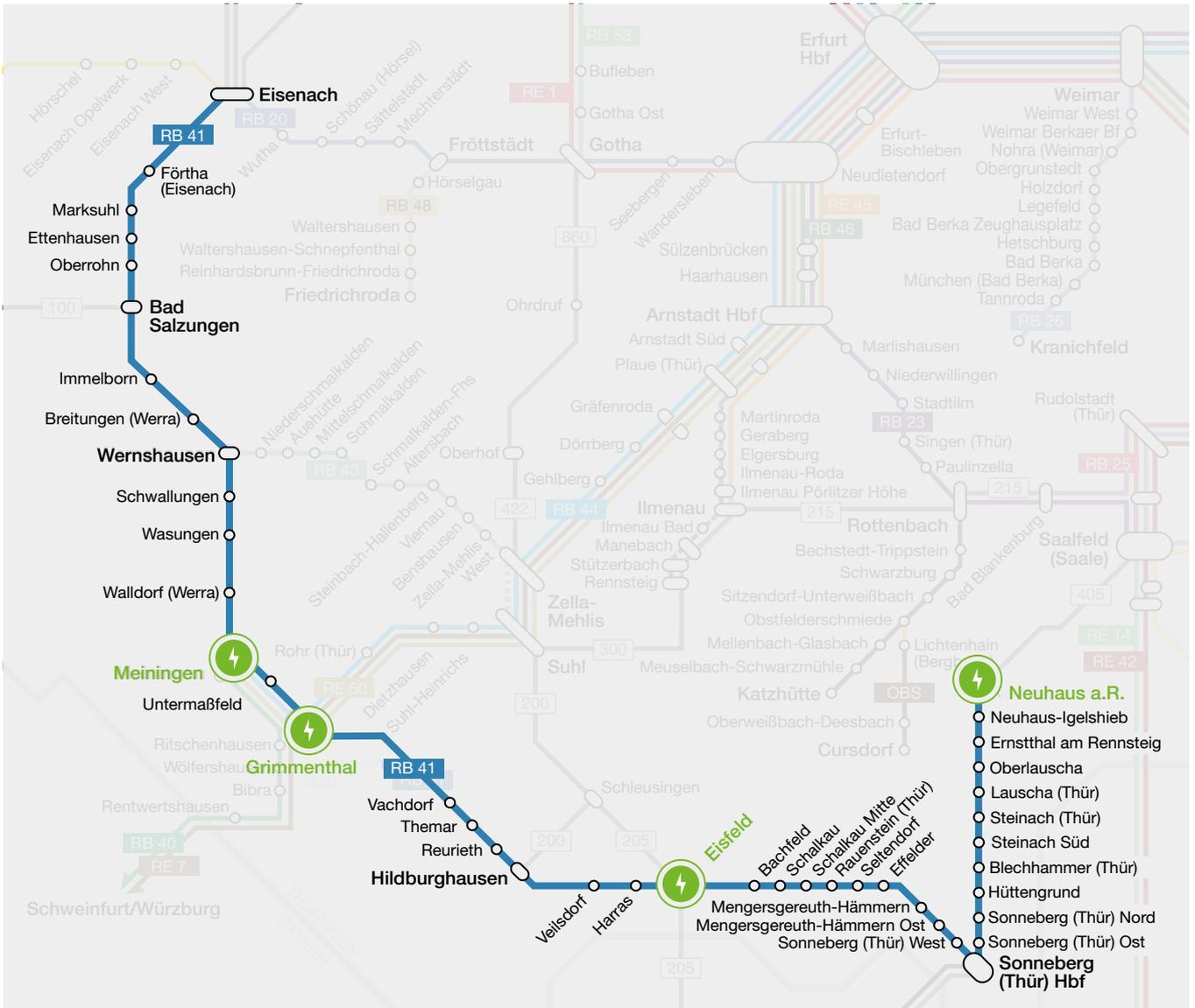
Die weiteren Teildarstellungen der einzelnen Linien beziehen sich auf die oben genannten 6 Schnellladestandorte gemäß TLBV-Vorgabe. Zwei weitere Lade-standorte (Rottenbach und Katzhütte) sind beispielhaft für die RB 60-Linie ergänzt.

Abbildung 33: Nahverkehrsnetze in Südthüringen (inkl. einiger Bushauptlinien) und Schnellladestandorte gemäß TLBV, inkl. möglicher Lade-standorte des RB 60



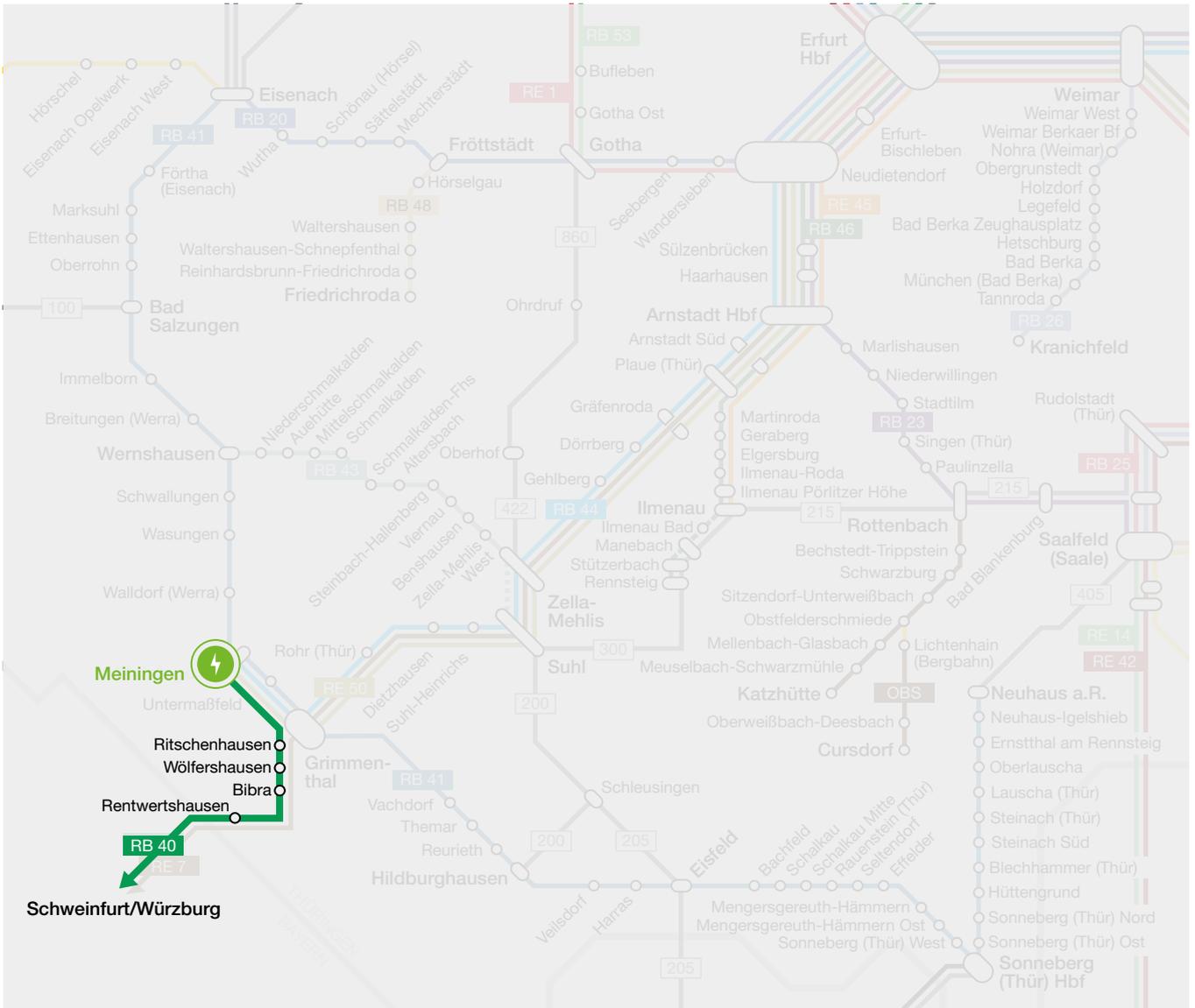
Hiernach eignet sich der RE 7 (Erfurt–Würzburg) ohne Anpassungen des Betriebsprogramms tatsächlich **nicht** für den Einsatz von Batterietriebzügen. Auf der fast 200 km langen Strecke wäre gemäß aktuellem Fahrplan ein relevantes Nachladen auf der Oberleitungsfreien Streckenteil von 136 km lediglich am Bahnhof Grimmenthal möglich. Die Nachladung in Zella-Mehlis ist annähernd vernachlässigbar. Ein vollständig in Erfurt geladener Zug würde das Ziel Schweinfurt nicht sicher erreichen, wie der Lade- und Entladekurven des RE 7 in → Abbildung 34 zu entnehmen ist. Gleiches gilt für die Rückfahrt von Schweinfurt nach Erfurt.

Abbildung 34: RE 7 Erfurt–Würzburg: Streckenverlauf und Schnelllade-standorte sowie Lade- und Entladekurven



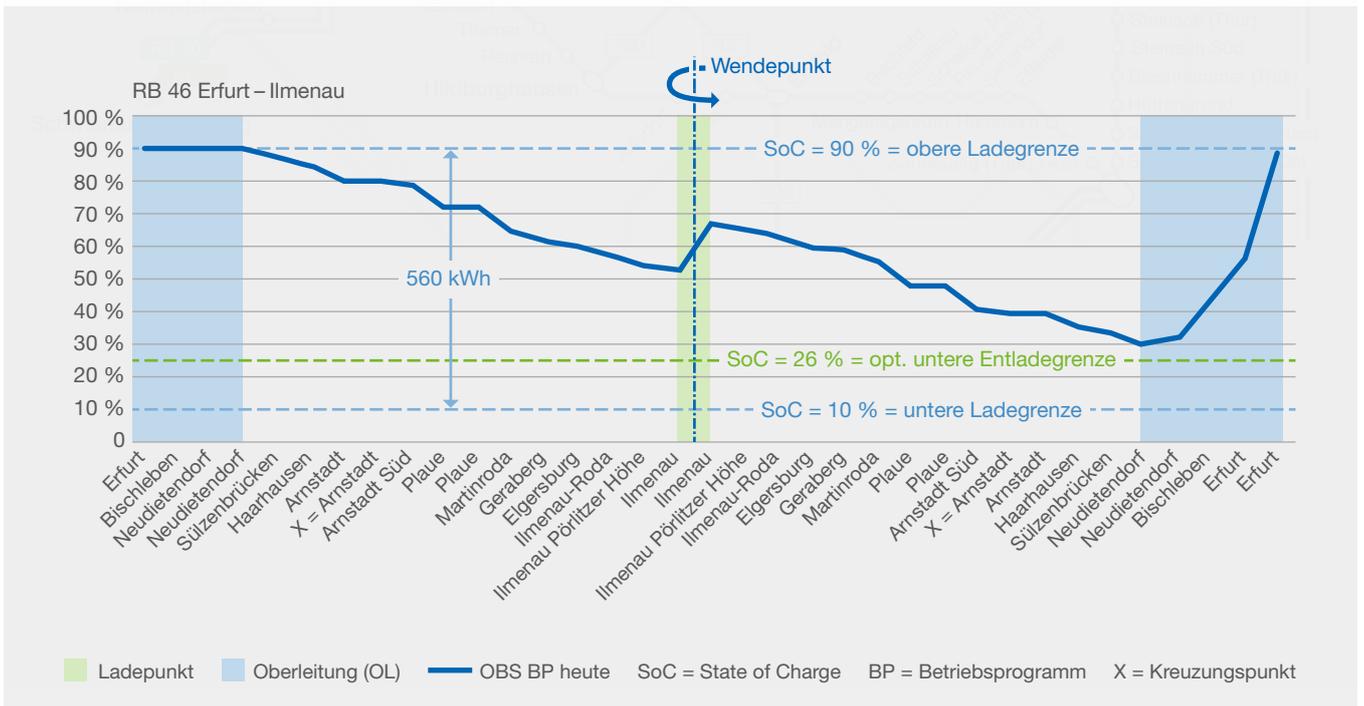
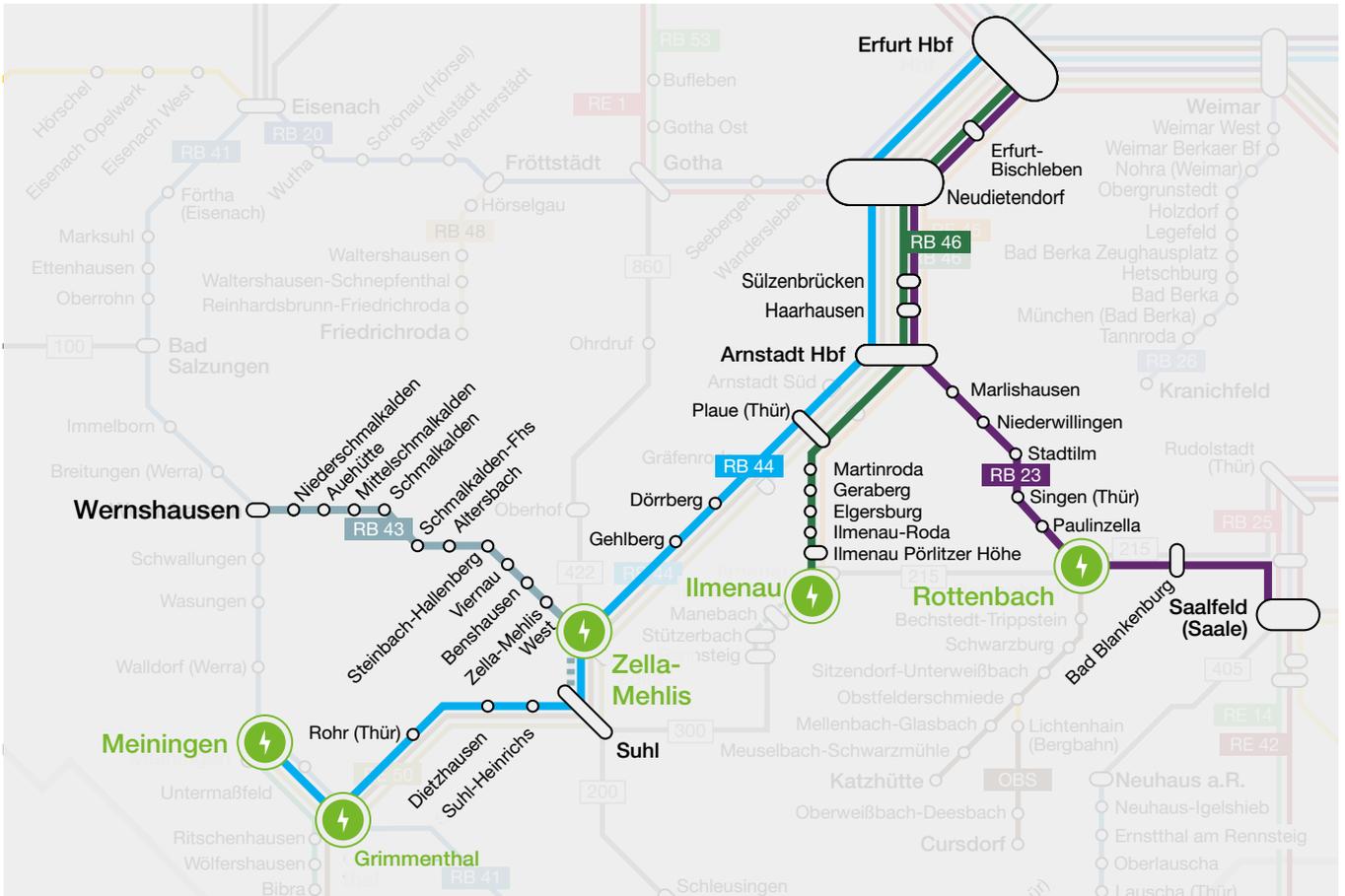
Auch RB 41 eignet sich **nicht** für den BEMU-Betrieb, weil die im Betriebsprogramm vorgegebenen Haltezeiten auf der 170 km langen oberleitungsfreien Strecke von Eisenach bis Sonneberg nur an wenigen Orten genügend Zeit zum Nachladen bieten würden. Eine grundsätzliche Alternative wäre, am Bahnhof Meiningen in beiden Richtungen überschlagene Wenden vorzusehen. Diese Maßnahme würde jedoch zwei zusätzliche BEMU-Fahrzeuge erforderlich machen.

Abbildung 35: RB 41 Erfurt–Neuhaus a.R.: Streckenverlauf und Schnellladestandorte



Als **kritisch** sieht das TLBV auch den BEMU-Betrieb auf RB 40 an, weil ein in Meiningen vollgeladen startender Zug (SoC = 90 %) bis Schweinfurt auf 13 % entladen würde und damit nah an die untere Grenze des nutzbaren Bereiches der Batterie (SoC = 10 %) geriete.

Abbildung 36: RB 40 Meiningen–Schweinfurt: Streckenverlauf und Schnellladestandorte



RB 23 (Erfurt–Saalfeld) wie auch die anderen Linien RB 43, RB 44 und RB 46¹⁰⁾ sind aufgrund ihrer geringen Streckenlängen für den Betrieb mit BEMU-Fahrzeugen entsprechend der vorgeschlagenen Lokalisation der Schnelllade-Anlagen grundsätzlich geeignet.

10 Bitte Fußnote 3 im Abschnitt Executive Summary beachten!

Abbildung 37:
 RB 23 Erfurt–Saalfeld, RB 43
 Wernshausen–Zella-Mehlis,
 RB 44 Erfurt–Meiningen,
 RB 46 Erfurt–Ilmenau:
 Streckenverläufe und Schnell-
 ladestandorte

4.2 HEMU für Schwarzatalbahn und Südthüringennetz

Die Reichweite eines HEMU hängt, neben dessen Verbrauch pro Kilometer, vor allem von der Größe seines Wasserstofftanks ab. Für den iLINT 54 gibt Alstom eine Reichweite von 1.000 km an, bei einer Tankgröße für 260 kg Wasserstoff. Siemens-Mobility verspricht für den zweiteiligen Mireo-plus-H eine Reichweite von „nur“ 550 km, allerdings bei einer Tankgröße für 130 kg Wasserstoff. Beide Hersteller gehen offenbar von einem mittleren Verbrauch von 250 g-H₂/km aus.

In einem Punkt unterscheiden sich iLINT 54 und Mireo-plus-H jedoch signifikant: die Antriebsleistung des Siemens-Zuges ist mit 1.700 kW mehr als doppelt so stark ausgelegt als der Alstom-Zug, für dessen stärkere Variante (Typ II) eine Antriebsleistung von nur 734 kW angegeben wird; vgl. Abschnitt 3.3 → Tabelle 3. Der Mireo-plus-H ist somit signifikant schneller und spurtstärker. Von dessen Dynamikdaten ist das TLBV bei der Konstruktion des Betriebsprogramms „Südthüringennetz 2029“ mit dem Fahrplanbearbeitungssystem (FBS) ausgegangen¹¹. Sofern Siemens-Mobility tatsächlich in der Lage ist, diese Daten für Mireo-plus-H über die Fahrzeugserie zu garantieren, kann davon ausgegangen werden, dass die technische Machbarkeit für den Einsatz von Wasserstoffzügen dieses Typs auf den Linien des Südthüringennetzes bereits gegeben ist.

Somit reduziert sich das Thema der technischen Machbarkeit auf die Wasserstoff-Infrastruktur und -Logistik, also auf die Anlagen für erneuerbare Energien, Elektrolyseure, Tankstellen und Transportwege im südlichen Thüringen. Darauf wird im Folgenden näher eingegangen.

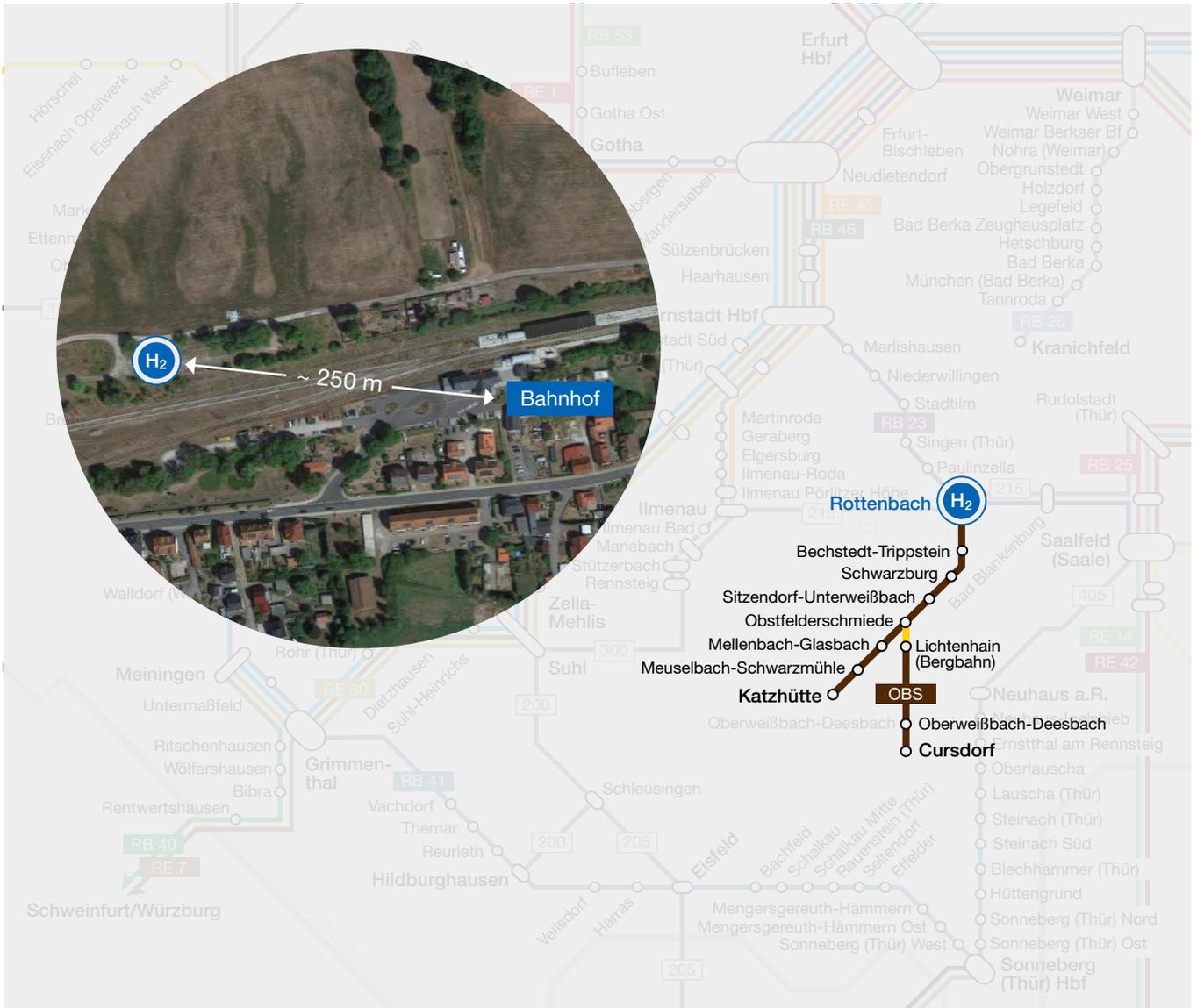
Eine H₂-Tankstelle in Rottenbach mit Onsite-Elektrolyse macht RB 60 HEMU-tauglich.

Im Schlussbericht der Bauhaus-Universität Weimar von Januar 2019 zur Machbarkeitsuntersuchung „Pilotprojekt Einsatz von H₂BZ-Triebwagen in Thüringen“ [8] hatten die Experten fünf Bahnlinien identifiziert, die sich kurz- oder mittelfristig grundsätzlich für den Einsatz von Wasserstofftriebwagen eignen sollen. Die von der OBS als Einzelinie betriebene Schwarzatalbahn (RB 60) von Rottenbach nach Katzhütte wurde als dafür besonders gut geeignet eingeschätzt.

Eine Herausforderung der daraufhin getroffenen Entscheidung zugunsten der Wasserstoff-Lösung für die Schwarzatalbahn war, dass lediglich zwei bis drei Fahrzeuge benötigt würden und die Studie davon ausging, dass Wasserstoffzüge des Typs Coradia iLINT 54 kurzfristig verfügbar sein würden. Jedoch selbst im Falle einer Beschränkung auf lediglich zwei gebrauchte Test-Fahrzeuge konnte Alstom diesem Wunsch angesichts seiner aktuellen Lieferverpflichtungen z. B. für das Weser-Elbe-Netz in Niedersachsen (14 Fahrzeuge ab Juni 2022) oder für das Taunusnetz in Hessen (27 Fahrzeuge ab Dezember 2022) nicht entsprechen. Zu späteren Zeitpunkten, etwa ab 2024, wäre neben Alstom auch Siemens-Mobility grundsätzlich in der Lage, geeignete Wasserstofftriebzüge zu liefern. Allerdings ist selbst 2024 und später weiterhin mit konkurrierender Nachfrage für andere Netze in Deutschland zu rechnen, so dass vieles dafürspräche, einen deutlich späteren Termin für die Einführung von Wasserstoffzügen im Schwarzatal vorzusehen, beispielsweise ab 2029. Damit wäre die Schwarzatalbahn verkehrsvertraglich synchron mit den anstehenden Verkehrsverträgen zu den übrigen Linien des Südthüringennetzes, für die der VDE ebenfalls die Optionen Wasserstoff oder Batterie geprüft hat.

Auf die notwendige Wasserstoff-Infrastruktur und -logistik bezogen hat die DB Energie GmbH (Bereich: Tankdienste) bereits im Januar 2020 eine vom Thüringer Ministerium für Umwelt, Energie und Naturschutz (TMUEN) in Auftrag gegebene „Umweltstudie über den Bau, den Betrieb und die Bewertung der daraus resultierenden Umwelteinflüsse

¹¹ Laut TLBV reicht im Falle der Schwarzatalbahn die Fahrdynamik eines Coradia iLINT 54 aus.



einer Schienen-Wasserstofftankstelle am Standort Rottenbach“ veröffentlicht [9]. Die Realisierung einer Wasserstofftankstelle wird hiernach als machbar angesehen, weil es einen geeigneten Standort nahe des Bahnhofs Rottenbach gibt, → Abbildung 39.

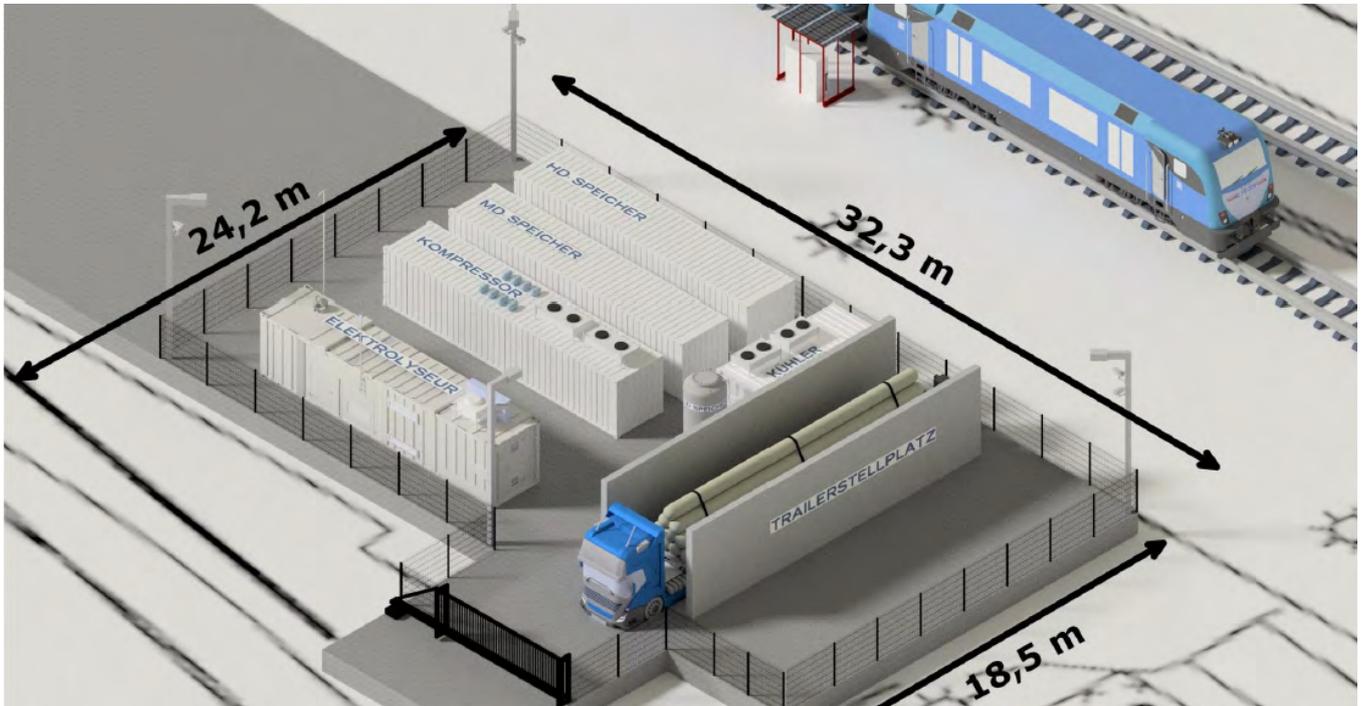
Die Forderung des Thüringer Ministeriums für Infrastruktur und Landwirtschaft (TMIL) in der entsprechenden Verkehrsausschreibung, dass zwingend grüner Wasserstoff¹² einzusetzen sei, hat zur Folge, dass nicht nur die Betankung selbst, sondern auch die Erzeugung und der Transport des Wasserstoffs zentrale Themen der Machbarkeitsuntersuchung durch DB Energie waren. Für diese Kombination unterscheidet die DB-Studie zwei Konzepte:

In **Konzept I** wird angenommen, dass der grüne Wasserstoff angeliefert wird, also die Elektrolyse an dem Ort erfolgt, wo der benötigte Grünstrom¹³ zur Verfügung steht. Als mögliche „Offsite-Elektrolyse“-Standorte werden in der Studie beispielhaft Suhl (ca. 50 km entfernt) und Korbußen (ca. 90 km entfernt) genannt, die beide größere Windparks aufweisen. Der Vorteil der günstigen Betriebskosten des Elektrolyseurs in

Abbildung 39: OBS Schwarza-talbahn (RB 60) mit einer Wasserstofftankstelle in Rottenbach und deren mögliche Lage nahe dem Bahnhof Rottenbach (Luftbild: Google Maps)

¹² Wasserstoff ist „grün“, wenn bei der Elektrolyse von Wasser ausschließlich Strom aus erneuerbaren Energiequellen verwendet wird.

¹³ Grünstrom ist Strom aus erneuerbaren Energiequellen.



dieser Konstellation steht dem zu erwartenden hohen Aufwand für den regelmäßigen Transport des Wasserstoffs zur Tankstelle in Rottenbach gegenüber.

In **Konzept II** erfolgt die Erzeugung des grünen Wasserstoffs am Standort der Wasserstofftankstelle; → Abbildung 40. Vorteil der „Onsite“-Elektrolyse ist, dass der logistische Aufwand für den Wasserstofftransport entfällt. Stattdessen muss der Elektrolyse-Strom über möglichst nahegelegene EE-Anlagen herangeführt werden. Über Herkunftsnachweise ist zudem vertraglich zuzusichern, dass es sich wirklich um Grünstrom handelt.

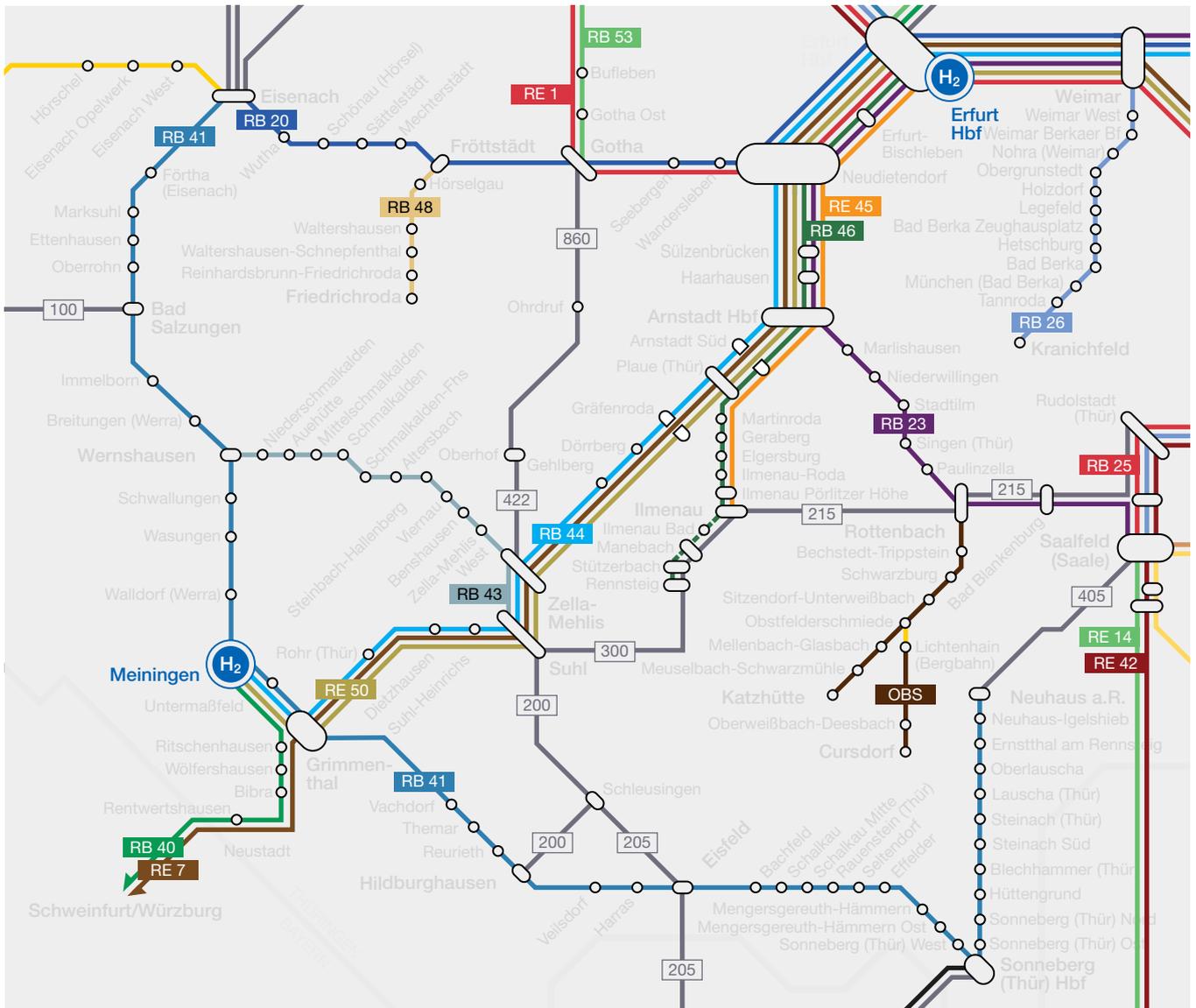
Für den Vergleich der beiden Konzepte werden in der DB-Studie die Kosten für die Erstellung der Wasserstofftankstelle erfasst sowie alle Kostenanteile berücksichtigt, die zum Wasserstoffpreis beitragen. Auf eine Wiedergabe der Details wird hier verzichtet. Es zeigt sich, dass das Konzept II die kostenmäßig vorteilhaftere Lösung darstellt, vorausgesetzt, der onsite verwendete Elektrolyse-Strom wird (von der EEG-Umlage befreit) aus dem öffentlichen Stromnetz bezogen. Die genannten Kosten lauten: ¹⁴

| | |
|--|---------------------------------------|
| Investition Tankstelle inkl. Elektrolyseur | 5,1 Mio. € |
| Anbindung Straße/Schiene plus Nebenkosten | 2,8 Mio. € |
| GESAMTINVESTITION | 7,9 Mio. € |
| H ₂ -Gestehungspreis Onsite-Elektrolyse | 4,4 bis 6,0 €/kg-H ₂ |
| H ₂ -Preis Tankstelle | 3,5 €/kg-H ₂ |
| H₂-GESAMTBEREITSTELLUNGSPREIS | 8,0 bis 9,5 €/kg-H₂ |

Zusammenfassend ist somit festzuhalten, dass die Schwarzatalbahn die technische Machbarkeit der HEMU-Lösung fahrzeug- wie auch infrastruktureseitig gegeben ist.

¹⁴ Da es sich hier lediglich um eine Studie handelt, können die tatsächlichen Kosten höher ausfallen, denn diese hängen auch von der Vertragslaufzeit ab. Im Wasserstoff-Angebot der DB RegioNetz Verkehrs GmbH lagen nach Auskunft des TLBV bereits die Verbrauchskosten (ohne Umlage der Investitionen in die Tankstelle) über den in der Studie genannten Werten.

Abbildung 40: Layout einer möglichen Wasserstofftankstelle in Rottenbach (Grafik: DB Energie)



Das Südthüringennetz ist HEMU-tauglich – Herausforderung sind die Tankstellen-Standorte.

Wie erwähnt, ist die technische Machbarkeit mit Zügen des Typs Mireo-plus-H auch für die Linien des Südthüringennetzes bereits gegeben. Eine Wasserstofftankstelle mit Onsite-Elektrolyseur, wie von der DB Energie für den Standort Rottenbach vorgeschlagen, kommt aus Sicht des TLBV für das Südthüringennetz aus logistischen Gründen nicht in Frage. Stattdessen müsste eine Lösung mit Wasserstofftankstellen in Erfurt und Meiningen, → Abbildung 41, vorgesehen werden, also dort, wo heute bereits Dieseltankstellen vorhanden sind. Für die Frage der Machbarkeit sind Detailfragen zu klären, wie in der erwähnten Umweltstudie der DB Energie [9].

Eine entsprechende Untersuchung wäre erneut mit größerem Aufwand verbunden und kann sinnvoll und verbindlich nur von Experten der DB Energie durchgeführt werden. Für die vorliegende Untersuchung ging der VDE davon aus, dass die Machbarkeit grundsätzlich gegeben ist und die Kosten in vergleichbarer Größenordnung liegen würden.

Auf die Schwarzatalbahn bezogen wäre die veränderte Lage der Wasserstofftankstellen kein unüberwindbares Problem: Die Tankstelle in Erfurt würde an die Stelle der vorgeschlagenen Tankstelle in Rottenbach treten, auch wenn die als Zugpaar eingesetzten zwei Fahrzeuge für ihre Tankfahrten wesentlich größere Strecken überwinden müssen.

Abbildung 41: Wasserstofftankstellen für den HEMU-Einsatz im Südthüringennetz (inkl. Schwarzatalbahn)

4.3 Fazit zur technischen Machbarkeit

Für die technische Machbarkeit von BEMU oder HEMU im Südthüringennetz bzw. auf der Schwarzatalbahn ist die Fahrzeug- wie auch die Infrastrukturseite gleichermaßen zu betrachten.

Objektiv gesehen erweist sich das BEMU-Konzept als die komplexere von beiden Herausforderungen: Zum einen steht die Reichweitenbegrenzung der BEMU-Fahrzeuge im Kontrast zu den über weiten Strecken oberleitungsfreien Bahnlinien. Darüber hinaus steht die Notwendigkeit, separate Schnellladepunkte vorsehen zu müssen, im Konflikt mit der regional eingeschränkten Strominfrastruktur. Die Klärung von Lösungsoptionen auf Systemebene erfordert detaillierte und konzertierte Absprachen der zuständigen Ministerien bzw. des Aufgabenträgers mit den Fahrzeug- und Infrastrukturherstellern, Infrastrukturunternehmen und Verteilnetzbetreibern.

Die vom VDE und den Fahrzeugherstellern simulierten Lade- und Entladeverläufe signalisieren, dass eine einheitliche technische Lösung mit BEMU-Fahrzeugen für Südthüringen ohne Anpassungen des Betriebsprogramms nicht machbar wäre. Zu prüfen ist, ob für RE 7 dreiteilige BEMU-Fahrzeuge mit um 50 % höherer Batteriekapazität lieferbar und auf dieser Strecke einsetzbar wären, zumal auf der RE 7 gemäß Plan ohnehin zweiteilige Fahrzeuge in Doppeltraktion eingesetzt würden. Für RB 41 bliebe zu klären, ob die Vergrößerung der Flotte um zwei zusätzliche BEMU-Fahrzeuge für überschlagene Wendungen in Meiningen eine Lösung darstellen könnte.

Das HEMU-Konzept lässt sich unter der Annahme, dass Mireo-plus-H-Züge eingesetzt werden, fahrzeugseitig realisieren. Hier bleibt die Herausforderung, dass sich möglichst an den Standorten Erfurt und Meiningen geeignet dimensionierte Wasserstofftankstellen vorsehen lassen. Die Vereinbarkeit der Anforderungen der Linien des Südthüringennetzes mit denen der Schwarzatalbahn ist unter der Annahme einer gemeinsamen Wasserstofftankstelle in Erfurt gegeben.

Alternativ sollte die Möglichkeit einer neuen Aufteilung des Südthüringennetzes in Erwägung gezogen werden: RB 23, RB 40, RB 43, RB 44 und RB 46¹⁵⁾ eignen sich grundsätzlich für den Einsatz von Batterietriebzügen, RB 7 und RB 41 wahrscheinlich nicht. RB 23 und RB 60 (Schwarzatalbahn) weisen fahrplanseitig eine Umsteigeverknüpfung in Rottenbach auf. Denkbar wäre es, das bestehende Flügelkonzept von RB 23 und RB 46 aufzubrechen und eine fahrzeugseitige Gleichstellung von RB 23 und RB 60 herzustellen, z. B. für folgenden Zuschnitt:

- RB 40, RB 43, RB 44 und RB 46¹²⁾ als BEMU-Liniennetz
- RE 7, RB 41, RB 23 und RB 60 als HEMU-Liniennetz.

Eine andere Möglichkeit wäre, die Linie RB 60 in das Flügelkonzept von RB 23 und RB 46¹²⁾ zu integrieren und in das BEMU-Netz aufzunehmen, so dass HEMU-Fahrzeuge nur auf den Linien RE 7 und RB 41 zum Einsatz kämen. Alternativ könnten drei auch Teil des HEMU-Liniennetzes werden, so dass nur RB 40, RB 43 und RB 44 zum BEMU-Liniennetz zählen würden.

¹⁵ Bitte Fußnote 3) im Abschnitt Executive Summary beachten!

5. Wirtschaftlichkeit

Dem Fazit zur technischen Machbarkeit ist zu entnehmen, dass das BEMU-Konzept angesichts der besonderen Herausforderungen des Südthüringennetzes gesamtheitlich-technisch gesehen keine naheliegende Lösung ist, sondern das HEMU-Konzept hier unproblematischer erscheint.

Bei der Entscheidungsfindung bietet es sich an, zusätzlich die möglichen Unterschiede der Konzepte HEMU und BEMU hinsichtlich der zu erwartenden Folgekosten und der Wirtschaftlichkeit ihres Betriebes über einen längeren Zeitraum, z. B. von 30 Jahren, zu betrachten.

Damit setzt sich dieses Kapitel auseinander, in dem zunächst die Methodik der Wirtschaftlichkeitsvergleichsrechnung nach der Kapitalwertmethode [10] [3] [11] vorgestellt wird. Darauf folgt die Beschreibung der relevanten Eingangsdaten sowie der Vergleichsrechnungen sowohl auf der Ebene des gesamten Südthüringennetzes als auch für die jeweiligen einzelnen Bahnlinien.

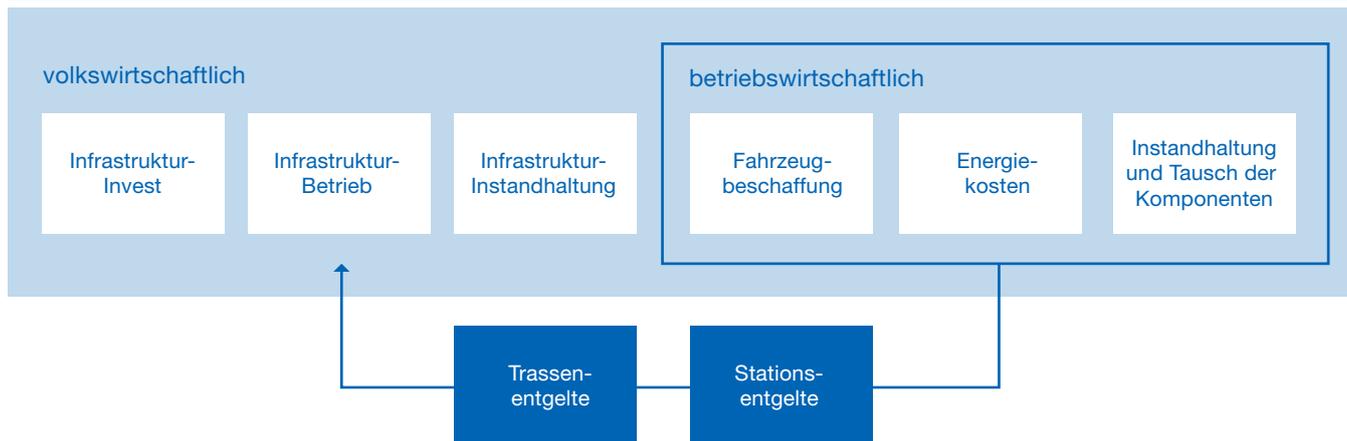
5.1 Methodik zur Feststellung der Wirtschaftlichkeitsunterschiede

Es ist eine komplexe Aufgabe, die Wirtschaftlichkeit von Zugsystemen zu beurteilen. Naheliegender wäre es, das sogenannte Nutzen-Kosten-Verhältnis (NKV) zu bestimmen, wie es beispielsweise im Falle der Reaktivierung von Bahnstrecken üblich ist. Um den Nutzen der Einführung eines klimaneutralen Zugsystems zu ermitteln, müsste u. a. der zu erwartende Grad der Klimaentlastung in seiner monetären Auswirkung eingeschätzt und zudem geprüft werden, ob ein NKV größer 1 möglich wäre. Dieses Vorgehen erwies sich als zu aufwendig, um lediglich einen Vergleich der Wirtschaftlichkeit technisch sinnvoller Zugsystem-Alternativen durchzuführen. Hier liegt ein anderes Vorgehen näher: die Kapitalwertmethode. Deren wichtigste Grundannahme ist, dass es für jedes in Frage kommende System immer möglich sein wird, dieses wirtschaftlich zu betreiben, sofern ggf. die Rahmenbedingungen geeignet angepasst werden.

Ein rationaler Investor würde sich nur dann für die Investition in ein neues Zugsystem entscheiden, wenn sie ihm ebenso vorteilhaft erschiene, wie eine entsprechende Anlage auf dem Kapitalmarkt. Messen lässt sich die Vorteilhaftigkeit einer solchen Investitionsentscheidung mittels des erwarteten Kapitalwertes, der neben den Anfangsinvestitionen alle im Betrachtungszeitraum anfallenden Einnahmen und Ausgaben berücksichtigt. Jede der erwarteten Einnahmen und Ausgaben wird entsprechend dem Jahr ihres Anfallens mit dem sogenannten Kalkulationszinssatz¹⁶ diskontiert, das heißt, je weiter eine Einnahme oder Ausgabe in der Zukunft liegt, umso weniger fällt sie ins Gewicht. Der so definierte Kapitalwert wird auch Gegenwartswert genannt, weil alle Einnahmen und Ausgaben über die Diskontierung in die Gegenwart projiziert werden.

Eine langfristige Investition ist als vorteilhaft anzusehen, wenn der resultierende Kapitalwert CO größer oder gleich null ist. Für die Alternativen BEMU, HEMU (wie auch für EMU und DMU) sind alle „normalen“ Einnahmen identisch, ebenso alle „normalen“ nicht technologiespezifischen Ausgaben. Diese Positionen können beim Vergleich

16 Der Kalkulationszinssatz ist für die Genauigkeit einer Investitionsrechnung maßgeblich. Er hängt vom Nominalzinssatz wie auch von der Preissteigerungsrate ab. Wegen des langen Betrachtungszeitraums von 30 Jahren lassen sich beide Werte kaum sicher vorhersagen, insbesondere angesichts der aktuellen Entwicklung. Aus diesem Grunde beschränkt sich der VDE bei seinen Kalkulationen auf einen Wert, den er im Rahmen einer Studie von 2020 auf der Grundlage von Mittelwerten über die vergangenen 15 Jahre berechnet hatte. Da bei allen Alternativen derselbe Kalkulationszinssatz anzusetzen ist, würde eine Änderung dieses Wertes zwar die absolute Höhe der resultierenden Kapitalwerte der Alternativen beeinflussen, nicht jedoch deren Verhältnisse untereinander. Auf letztere zielt die VDE-Untersuchung jedoch ab!



der Systeme also ignoriert werden. Es verbleiben nur technologiespezifische Kostenpositionen. Die resultierenden Kapitalwerte sind hohe negative Eurowerte. Dasjenige System, bei dem sich der betraglich niedrigste Kapitalwert ergibt, stellt die wirtschaftlichste Investition dar. Beim Vergleich der Alternativen erweist es sich als wichtig, auch den Restwert der Investitionen am Ende des Betrachtungszeitraums zu berücksichtigen, da sich so selbst bei unterschiedlich langen Zeiträumen für die Systeme ähnliche Unterschiede ergeben, also Unabhängigkeit von der gewählten Länge des Betrachtungszeitraums erreicht wird. Der VDE setzt für diesen Zeitraum 30 Jahre an.

Abbildung 42: Technologiespezifische Kostenpositionen bei volks- und betriebswirtschaftlicher Betrachtung

Bei der Auswertung der Ergebnisse ist es wichtig, zu wissen, wen die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung betrifft: Das Bundesland, also den Aufgabenträger bzw. das Nahverkehrsunternehmen oder den Bund bzw. das Bundesunternehmen Deutsche Bahn AG, das für den Betrieb wie auch für die Infrastruktur zuständig ist. Im ersteren Fall ist eher betriebswirtschaftlich zu argumentieren, im anderen eher volkswirtschaftlich. Betriebswirtschaftlich bedeutet hier, dass alle Kosten berücksichtigt werden, welche die Fahrzeuge, ihren Betrieb, die Instandhaltung und den regelmäßigen Ersatz ihrer Technologiekomponenten betreffen. Volkswirtschaftlich bedeutet, dass zusätzlich auch (technologiespezifische) Kosten berücksichtigt werden, welche die Investition, Instandhaltung und regelmäßig anfallenden Retrofits der Infrastruktur betreffen.

Ein Bindeglied zwischen der betriebs- und der volkswirtschaftlichen Perspektive ist das Trassenentgelt, das vom Infrastrukturunternehmen für die Nutzung der Trassen durch das Verkehrsunternehmen erhoben wird. Entsprechendes gilt auch für Bahnhöfe und Haltepunkte, für die Stationsentgelte zu bezahlen sind. Beide Entgelte sind naturgemäß technologieunabhängig, während die benötigte Infrastruktur technologiespezifisch zu realisieren ist. Somit ist anzunehmen, dass es für Infrastrukturbetreiber attraktiver sein könnte, diejenige Lösung vorzuziehen, welche die geringsten Investitionskosten verursacht.

5.2 Wirtschaftlichkeitsvergleich für Südthüringennetz und Schwarzatalbahn

Für den Wirtschaftlichkeitsvergleich sind folgende Kostenpositionen zu berücksichtigen:

Fahrzeug-bezogen:

- Anschaffung der Flotte
- Instandhaltung der Fahrzeuge
- Tausch der Fahrzeug-Technologiekomponenten (ggf. auch Retrofits)
- Energiebedarfskosten (= Energiebedarf x Energiepreis)
- Leerfahrten zur Betankung (relevant im Falle von DMU und HEMU¹⁷)

Infrastruktur-bezogen:

- Einrichtung der Infrastrukturkomponenten
- Instandhaltung der Infrastrukturkomponenten
- Tausch von Elektro-/Elektronik-Bauteilen dieser Komponenten (Retrofits)

Entsprechende gültige Datensätze liegen dem VDE vor. Unabhängig davon, dass Fahrzeuge von verschiedenen Herstellern zu unterschiedlichen Preisen angeboten werden, lässt sich sagen: Bei gleicher Fahrzeugdimensionierung ergeben sich aufgrund der Unterschiede im Fahrzeugaufbau und der verwendeten Komponenten folgende Fahrzeugpreis-Abstufungen („<“ = „billiger als“):

DMU < EMU < BEMU < HEMU

Für die fahrzeugbezogenen Positionen Instandhaltung und Tausch/Retrofit gilt:

EMU < BEMU < HEMU < DMU

Infrastrukturseitig gilt für alle drei Positionen Installation, Instandhaltung und Tausch/Retrofit:

DMU < HEMU < BEMU < EMU

Die bei der Kapitalwertanalyse verwendeten Informationen und Daten, das heißt die relevanten Parameter und deren typischen Werte wurden durch den VDE zusammengestellt. Zusätzlich wurden realistische Schwankungsbreiten dieser Werte angegeben, die der VDE für eine eingehende Sensitivitätsanalyse verwendete, um zu prüfen, wie empfindlich die resultierenden Kapitalwerte von den jeweiligen Parametern abhängen. Sowohl die einzelnen Parameter, ihre typischen Werte und realistische Schwankungsbreiten wurden gegenüber dem Auftraggeber erörtert und liegen diesem vor.

Die Bandbreite möglicher Kapitalwerte ergibt sich, wenn alle Parameter zugleich in die positive oder negative Richtung variiert werden.

¹⁷ Die Dynamikbatterie des HEMU sollte zu Beginn eines Einsatztages vorgeladen sein, da das Laden über die Brennstoffzelle während der Fahrt nicht energieeffizient wäre. Somit sollte bei jeder Betankung mit Wasserstoff auch die Dynamikbatterie nachgeladen werden.

Südthüringennetz – die Energieeffizienz der Zugsysteme beeinflusst deren Wirtschaftlichkeit.

Als Flottengröße wurden 28 Fahrzeuge (inkl. drei Reserve) angenommen. Als Referenz für DMU diene LINT 41, für EMU der FLIRT-2 und für BEMU der FLIRT-2-Akku von Stadler sowie für HEMU der zweiteilige Mireo-plus-H von Siemens-Mobility. Als Betrachtungszeitraum wurden 30 Jahre gewählt. Das entspricht der typischen technischen Nutzungsdauer von Nahverkehrstriebzügen.

Infrastrukturseitig wurde angenommen, dass die für den Dieselbetrieb vorhandenen Tankstellen in Erfurt und Meiningen lediglich zu modernisieren sind, etwa um reine Biokraftstoffe oder synthetische Kraftstoffe einsetzen zu können. Für HEMU wurde angenommen, dass sich an denselben Standorten auch Wasserstofftankstellen errichten lassen. Für EMU wurde die Möglichkeit der durchgehenden Elektrifizierung des Südthüringennetzes unterstellt. Für BEMU schließlich wurde die Möglichkeit der Installation von 13 Schnellladestationen an den genannten Standorten vorausgesetzt, auch wenn dafür objektiv noch die technische Machbarkeit zu klären ist. Im Sinne einer kostenmäßigen Worst-Case-Situation ging der VDE davon aus, dass ein Teil der Ladestationen als teure Oberleitungsinselanlagen zu realisieren sind: Gewählt wurde das Verhältnis von am Markt verfügbaren 11 VOLTAP®-Anlagen zu 2 OLIA-Anlagen.

Für den Wirtschaftlichkeitsvergleich wurden verschiedene Perspektiven eingenommen:

Perspektive 1a: Berücksichtigung nur der in Thüringen erbrachten Betriebsleistung der Linien des Südthüringennetzes (→ rein betriebswirtschaftliche Perspektive).

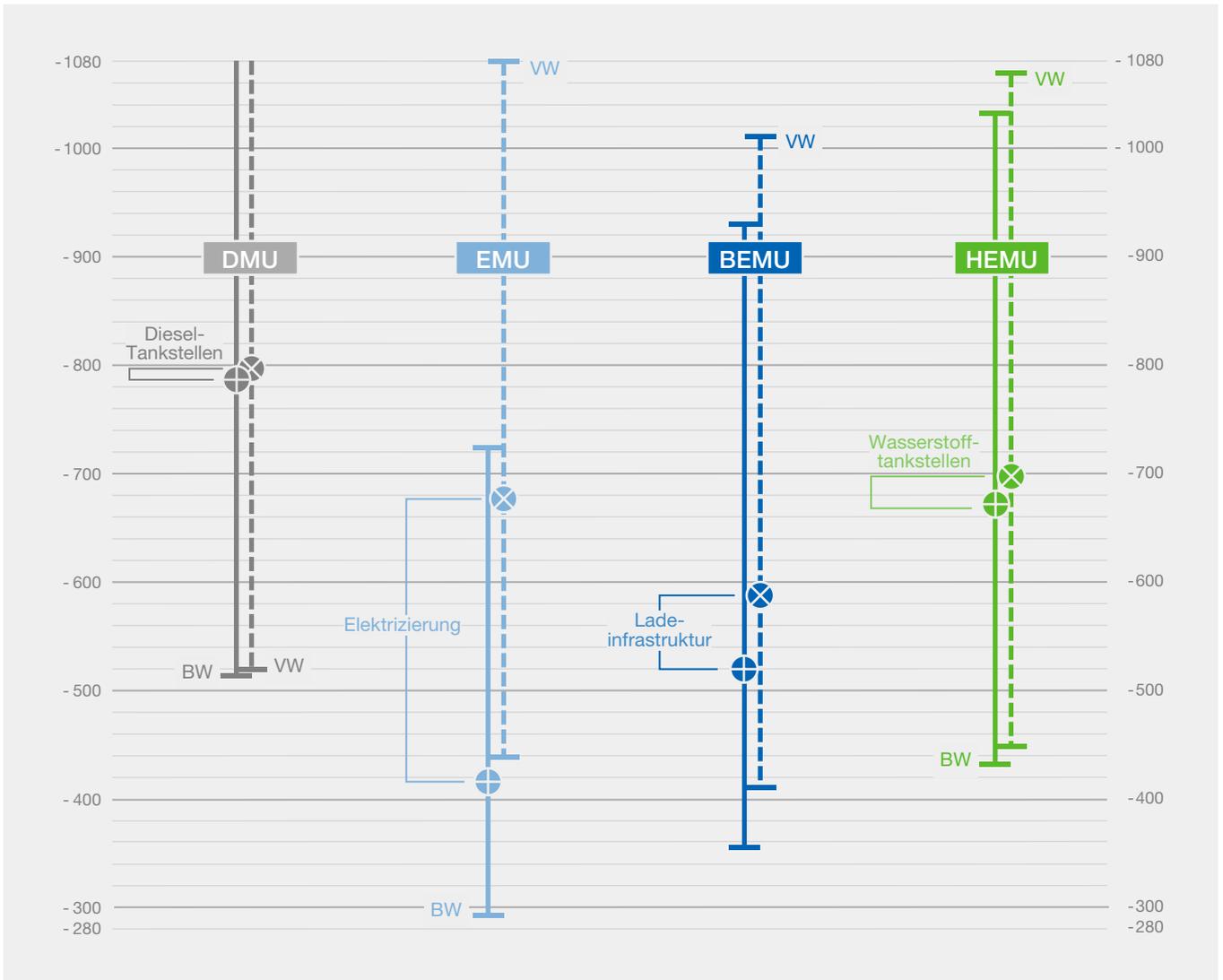
Perspektive 1b: wie Perspektive 1a, mit dem Unterschied, dass auf der RB 41 im BEMU-Fall zwei zusätzliche Fahrzeuge, d. h. 30 statt 28, angenommen werden, um dem Betriebsprogramm zu genügen (→ erweiterte betriebswirtschaftliche Perspektive).

Perspektive 2: Berücksichtigung der Kosten für die Investition in Infrastruktur und deren Instandhaltung. Zudem Berücksichtigung der in Thüringen und Bayern erbrachten Betriebsleistung der Linien des Südthüringennetzes (→ volkswirtschaftliche Perspektive).

Die resultierenden Kapitalwerte für HEMU und BEMU (sowie DMU und EMU als Referenzen) wurden über alle Bahnlinien des Südthüringennetzes aufsummiert und nach relevanten fahrzeug- und infrastrukturbezogenen Kostenpositionen → Tabelle 4 zusammengestellt. Die Visualisierungen finden sich auszugsweise → Abbildung 43.

Tabelle 4: Südthüringennetz – Resultierende Kapitalwerte für DMU, EMU, BEMU und HEMU für Perspektiven 1a, 1b und 2

| Kapitalwerte Perspektive 1a | DMU | EMU | BEMU | HEMU |
|-----------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| ∑ betriebswirtschaftlich | -790,5 Mio. € | -415,9 Mio. € | -518,8 Mio. € | -668,6 Mio. € |
| ∑ volkswirtschaftlich | -795,0 Mio. € | -675,8 Mio. € | -587,9 Mio. € | -695,1 Mio. € |
| ∑ Stationen und Trassen | -1.004,1 Mio. € | -1.004,1 Mio. € | -1.004,1 Mio. € | -1.004,1 Mio. € |
| Kapitalwerte Perspektive 1b | DMU | EMU | BEMU | HEMU |
| ∑ betriebswirtschaftlich | -790,5 Mio. € | -415,9 Mio. € | -532,7 Mio. € | -668,6 Mio. € |
| ∑ volkswirtschaftlich | -795,0 Mio. € | -675,8 Mio. € | -601,8 Mio. € | -695,1 Mio. € |
| ∑ Stationen und Trassen | -1.004,1 Mio. € | -1.004,1 Mio. € | -1.004,1 Mio. € | -1.004,1 Mio. € |
| Kapitalwerte Perspektive 2 | DMU | EMU | BEMU | HEMU |
| ∑ betriebswirtschaftlich | -941,1 Mio. € | -483,8 Mio. € | -595,7 Mio. € | -777,4 Mio. € |
| ∑ volkswirtschaftlich | -946,2 Mio. € | -792,2 Mio. € | -675,7 Mio. € | -807,9 Mio. € |
| ∑ Stationen und Trassen | -1.105,3 Mio. € | -1.105,3 Mio. € | -1.105,3 Mio. € | -1.105,3 Mio. € |



Perspektiven 1a und 2

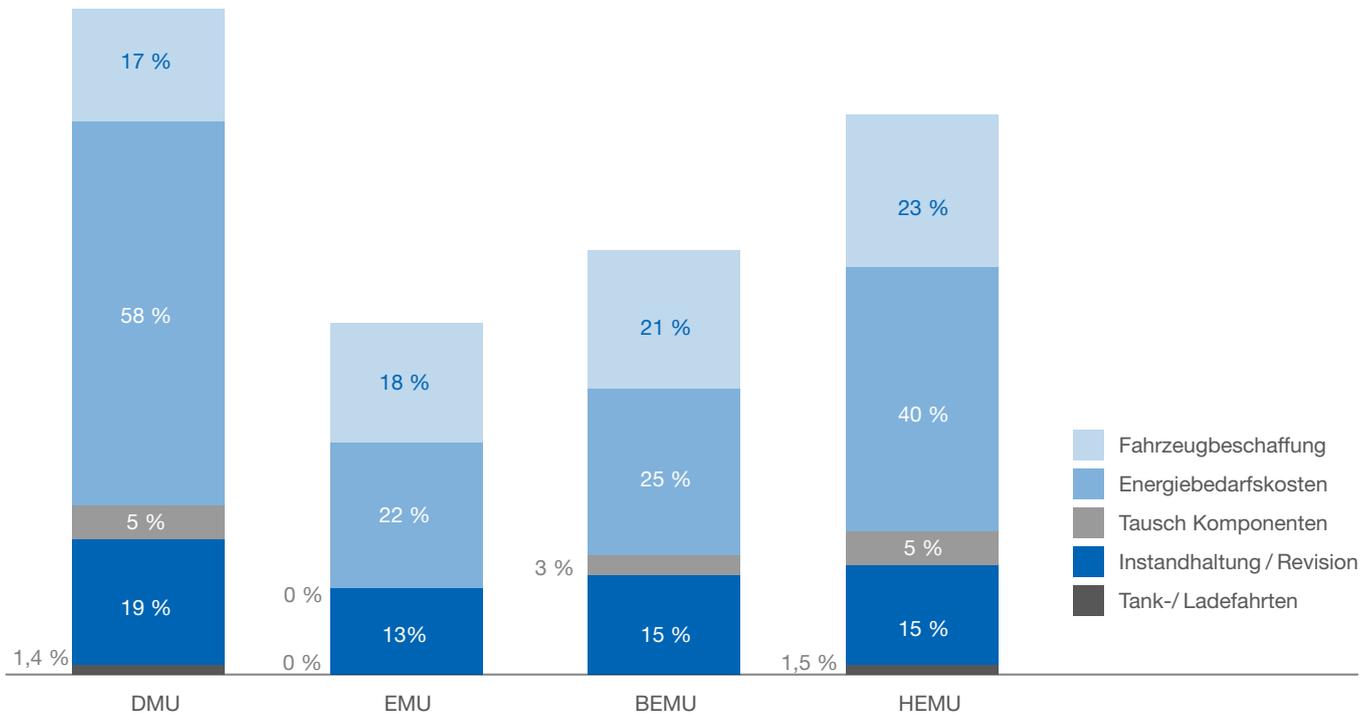
- Berücksichtigung der nur in Thüringen erbrachten Betriebsleistung
- Berücksichtigung der Infrastrukturkosten
- Fokus: Unterschied zwischen betriebs- und volkswirtschaftlicher Betrachtung

- ⊗ Kapitalwert betriebswirtschaftlich (BW)
- ⊕ Kapitalwert volkswirtschaftlich (VW)
- I max./min. bw-Kapitalwert-Bandbreite
- I max./min. vw-Kapitalwert-Bandbreite

Auf die Schwarzatalbahn bezogen führte der VDE die Wirtschaftlichkeitsvergleichsrechnung separat durch. Die resultierenden Kapitalwerte wurden ebenfalls nach Kostenpositionen differenziert zusammengestellt und visualisiert.

In → Abbildung 43 sind die resultierenden Kapitalwerte grafisch dargestellt: Punkte mit Pluszeichen stellen die betriebswirtschaftlich (BW) relevanten Kapitalwerte dar, die Punkte mit Kreuz die volkswirtschaftlich (VW) relevanten. Die durchgezogenen bzw. gestrichelten Linien repräsentieren die Bandbreite der Kapitalweltergebnisse bei Variation der Eingangsparameter.

Abbildung 43: Resultierende Kapitalwerte der Fahrzeugsysteme mit Schwankungsbreiten für die Perspektiven 1a und 2



Deutlich erkennbar ist, dass betriebswirtschaftlich gesehen der EMU am vorteilhaftesten ist (betraglich niedrigster Wert), gefolgt von den Konzepten BEMU und HEMU. Auffällig ist, dass DMU weit abgeschlagen ist, und sich damit auch wirtschaftlich als am wenigsten vorteilhaft erweist. Dies gilt selbst dann, wenn man die großen Schwankungsbreiten der Parameter berücksichtigt.

Abbildung 44: Südthüringennetz – Kapitalwerte in Relativedarstellung bezogen auf DMU (Perspektive 1a)

Nicht jeder Parameter hat den gleichen Einfluss auf die resultierenden Kapitalwerte, wie die Grafik in → Abbildung 44 zu Perspektive 1a zeigt. Es handelt sich hier um ein Stapeldiagramm in Relativedarstellung. Als Referenz dient der entsprechende Kapitalwert der DMU-Lösung.

Beim DMU wird deutlich, dass der resultierende Kapitalwert maßgeblich durch die Energiebedarfskosten (zu 58%) bestimmt wird. Auch bei den anderen Systemen tragen diese Kosten erheblich bis dominant zum Kapitalwert bei (zu 22% – 40%). Hintergrund dieser überraschend eindeutigen Feststellung ist, dass die im Südthüringennetz eingesetzte Fahrzeugflotte heute und in Zukunft mit 5,1 Mio. Zkm eine relativ hohe Betriebsleistung aufweist und der resultierende Energiebedarf entsprechend hoch ist, etwa im Vergleich zur Verkehrsleistung in Personenkilometer. Die den Energiebedarfskosten zugrunde liegende Bestimmungsgleichung lautet

$$\text{Energiebedarfskosten [€]} = \text{Betriebsleistung [Zkm} \times \text{Energiebedarf [kWh/Zkm]} \times \text{Energiepreis [€/kWh]}$$

Die Wirtschaftlichkeit der Antriebskonzepte BEMU, HEMU wie auch von DMU und EMU wird im Falle des Südthüringennetzes also wesentlich durch die Energiebedarfskosten bestimmt. Das heißt, der Kapitalwert eines Fahrzeugkonzeptes hängt von der Höhe des Energieverbrauchs und vom geltenden Energiepreis ab. Nachteile bei der Energieeffizienz des Antriebes oder bei der Erzeugung des Energieträgers beeinträchtigen die Wirtschaftlichkeit des Zugsystems.

Es lohnt sich, die Auswirkungen von Schwankungen des Energieverbrauchs und des Energiepreises zu betrachten, beeinflussen sie den Kapitalwert doch beträchtlich. Der Kapitalwert ändert sich einerseits, wenn man den Energiebedarf bei konstantem Energiepreis variiert. Als „Normalwerte“ wurden hier 2 €/l-Diesel, 25 ct/kWh bzw. 8 €/kg-H₂ angenommen. Der Kapitalwert ändert sich ebenfalls, wenn sich bei gleichbleibendem Energiebedarf der Energiepreis ändert. Als „Normalwerte“ wurden hier 1,5 l-Diesel/km (DMU), 4,4 kWh/km (EMU), 5,1 kWh/km (BEMU) und 250 g-H₂/km (HEMU) angenommen. Hiernach machen sich (realistische) Schwankungen des Energiepreises noch deutlicher bemerkbar als (ebenfalls realistische) Schwankungen des Verbrauchs.

Ein Vergleich mit den Auswirkungen der Variation anderer Kostenpositionen veranschaulicht, wie dominant der Einfluss der Energiebedarfskosten ist.

Auf der volkswirtschaftlichen Seite wird die Wirtschaftlichkeit insbesondere im Falle einer gegebenenfalls anstehenden durchgehenden Elektrifizierung zusätzlich durch die hohen Kosten für die Investition in Oberleitungen und deren Instandhaltung beeinflusst: Die Wirtschaftlichkeit des EMU relativiert sich durch die hohen Kosten der Anfangsinvestition, auch hier stellen sich die Energiebedarfskosten in ihrer Auswirkung als dominant dar.

Für jede Bahnlinie des Südthüringen wurden eigene Vergleichsrechnungen durchgeführt.

Wie oben erwähnt, wurden für die einzelnen Bahnlinien des Südthüringennetzes die ermittelten Kapitalwerte für DMU, EMU, BEMU und HEMU tabellarisch zusammengestellt und in Form von Stapelsäulendiagrammen visualisiert. Auch hier wurde jeweils differenziert nach betriebswirtschaftlicher Darstellung (d. h. ohne Infrastrukturkosten) und volkswirtschaftlicher Darstellung (d. h. inklusive Infrastrukturkosten) analysiert. Die Aufteilung gemeinschaftlicher Investitionskosten z. B. für die Infrastruktur bei der Berechnung der Kapitalwerte erfolgte entsprechend der auf den verschiedenen Linien erbrachten Betriebsleistungen.

Bei **RE 7** Erfurt–Würzburg wurde berücksichtigt, dass etwa die Hälfte der Strecke in Bayern liegt und damit auch etwa die Hälfte der Betriebsleistung dort erbracht wird. Dargestellt wurden gegenüber dem TMUEN die Ergebnisse für Thüringen plus Bayern.

Im Falle der **RB 40** Meiningen–Schweinfurt werden sogar Dreiviertel der Betriebsleistung in Bayern erbracht. Auch hierfür wurden die Ergebnisse für Thüringen plus Bayern dargestellt.

Die Linie **RB 41** wurde für die Betrachtung in drei Teillinien aufgeteilt: **RB 41(A)** Eisenach–Meiningen, **RB 41(B)** Meiningen–Sonneberg und **RB 41(C)** Sonneberg–Neuhaus am Rennweg. Für **RB 41(B)** wurde berücksichtigt, dass zwei zusätzliche BEMU-Fahrzeuge benötigt werden.

Bei **RB 43** Wernshausen–Zella-Mehlis wurde berücksichtigt, dass im Falle von DMU und HEMU längere Tankfahrten nötig sind, da weder am Anfang noch am Ende dieser Strecke sinnvoll eine Tankstelle (Diesel oder Wasserstoff) vorgesehen wäre. Stattdessen wurde angenommen, dass die Fahrzeuge in Meiningen betankt werden.

Schwarzatalbahn – als Einzellinie teilt sie die Infrastrukturkosten nicht mit anderen Linien.

Das Verfahren des Wirtschaftlichkeitsvergleichs lässt sich auch auf die Schwarzatalbahn (RB 60) anwenden: Die zugrunde liegenden Parameter, deren Werte und Schwankungsbreiten gelten gleichermaßen. Folgende wichtige Annahmen waren ergänzend zu beachten:

- Die OBS stellt eine Geschäftseinheit dar, die sowohl für die Schwarzatalbahn als auch für die Standseil- und Flachstreckenbahn zuständig ist.
- Die OBS ist für den Fahrbetrieb wie auch für die Infrastruktur verantwortlich.
- Die OBS trägt die Investitionskosten für Fahrzeuge und Infrastruktur sowie deren Instandhaltungs- und regelmäßigen Tausch-/Retrofit-Kosten.

Die besondere Rolle der OBS legt nahe, für den Wirtschaftlichkeitsvergleich die volkswirtschaftliche Perspektive einzunehmen. Die ermittelten Kapitalwerte für DMU, EMU, BEMU und HEMU wurden in → Tabelle 5 zusammengestellt und gegenüber dem TMUEN als Auftraggeber in Form eines Stapelsäulendiagramm visualisiert. Hiernach wäre das HEMU-Konzept vorteilhafter als eine Neuauflage mit Dieselfahrzeugen (z. B. LINT 41), obwohl HEMU-Fahrzeuge wesentlich teurer sind. Ein Grund sind die hohen Energiebedarfskosten der DMU-Lösung, zum einen wegen der schlechteren Energieeffizienz, zum anderen wegen der zu erwartenden steigenden Dieselpreise.

Die wesentlich bessere Energieeffizienz von EMU- und BEMU-Fahrzeugen ist der Grund, warum diese Konzepte wirtschaftlich gesehen vorteilhafter sind als HEMU, wobei der Abstand zwischen HEMU und EMU im Vergleich zu den Linien des Südthüringennetzes relativ gering ist, da eine durchgehende Elektrifizierung der Strecke zwischen Rottenbach und Katzhütte nur der Schwarzatalbahn zugute käme und die Investitionskostenbelastung entsprechend hoch wäre.

Tabelle 5: OBS-Schwarzatalbahn (RB 60) – resultierende Kapitalwerte für DMU, EMU, BEMU und HEMU

| Kapitalwerte RB 60 | DMU | EMU | BEMU | HEMU |
|--------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| ∑ betriebswirtschaftlich | -57,8 Mio. € | -30,1 Mio. € | -37,8 Mio. € | -52,7 Mio. € |
| ∑ volkswirtschaftlich | -58,0 Mio. € | -43,8 Mio. € | -39,1 Mio. € | -54,2 Mio. € |
| ∑ Stationen und Trassen | -44,3 Mio. € | -44,3 Mio. € | -44,3 Mio. € | -44,3 Mio. € |

5.3 FAZIT zur Wirtschaftlichkeit

Auf der betriebswirtschaftlichen Seite dominieren die Energiebedarfskosten, da diese sowohl vom Verbrauch als auch vom Energiepreis abhängen, und in beiden Fällen sind Variationen/Änderungen über einen großen Wertebereich möglich. Der Einfluss der übrigen Parameter ist bei weitem nicht so stark.

Die hohe Energieeffizienz des BEMU hält die Energiekosten selbst im Falle stark steigender Strompreise in Grenzen – im Vergleich zum Konzept HEMU. Hier sind die mangelhafte Energieeffizienz wie auch die hohen Gestehungskosten von grünem Wasserstoff ein Grund für deutlich höhere Energiekosten, die allerdings im Vergleich zum DMU-Konzept geringer sind.

BEMU und HEMU sind zwei Systemkonzepte, die grundsätzlich für den Ersatz der heutigen Dieseltriebzüge geeignet sind. Aus Gründen der Energieeffizienz und der Wirtschaftlichkeit empfiehlt es sich, auf das BEMU-Konzept zu setzen, sofern dies technisch umsetzbar ist. Aus heutiger Sicht ist dies im Falle der Linien RB 23, RB 40, RB 43, RB 44 und RB 46¹⁸⁾ sowie der Schwarzatal RB 60 möglich. In den Fällen RE 7 und RB 41 empfiehlt es sich, die Möglichkeit des Einsatzes von HEMU-Fahrzeugen in Betracht zu ziehen, da diese sich mit den engen Vorgaben des Betriebsprogramms vereinbar darstellen.

¹⁸ Bitte Fußnote 3 im Abschnitt Executive Summary beachten!

6. Ökobilanzen

Der Ersatz der Dieseltriebzüge im Südthüringennetz bzw. auf der Schwarzatalbahn durch Fahrzeuge, die lokal emissionsfrei sind und klimaneutralen Betrieb ermöglichen, ist ein wichtiger Schritt in Richtung Dekarbonisierung des Nahverkehrs. Bei der Entscheidungsfindung zugunsten einer Alternative sind betriebliche und technische Anforderungen, wie in Kapitel 4 erläutert, ebenso zu erfüllen, wie die in Kapitel 5 beschriebenen Erwartungen an die Wirtschaftlichkeit.

Neben der technischen Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit alternativer Antriebskonzepte repräsentiert deren Ökobilanz eine dritte Dimension der Entscheidungsfindung zugunsten der Batterie- oder der Wasserstofflösung. Die Durchführung von Lifecycle-Assessments (LCA) war ein weiteres Anliegen des Beratungsprojektes, für das die Autoren und Autorinnen dieser Studie auf die Expertise des VDE Prüf- und Zertifizierungsinstituts¹⁹ zurückgreifen konnten.

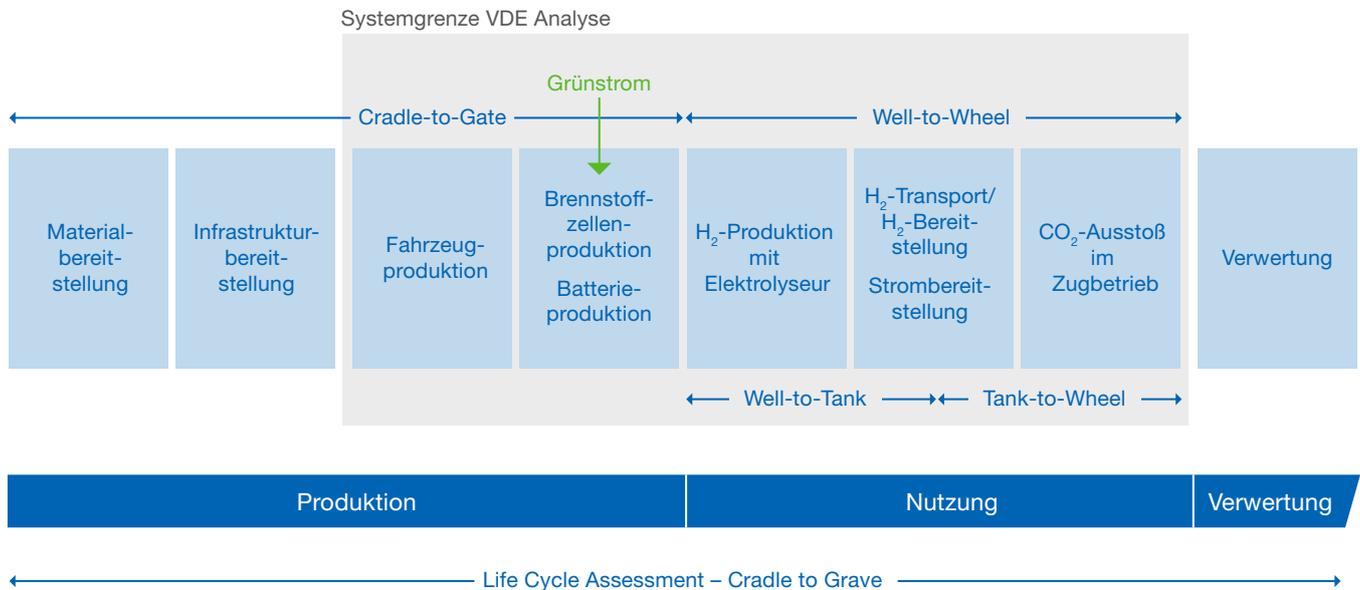
6.1 Definition der Systemgrenzen für die Ökobilanzierung

Klimaneutraler Betrieb ist eine Anforderung, die sich auf den Fahrzeugantrieb wie auch auf den Strom- bzw. den Kraftstoffeinsatz bezieht. Ein Systemwechsel von Diesel auf alternative Antriebe berührt aber auch eine Vielzahl weiterer Vorgänge und Bereiche, die direkt oder indirekt mit dem Ausstoß von Treibhausgasen verbunden sein können. Bei der Ökobilanzierung eines Zugsystems besteht somit die größte Herausforderung darin, die Systemgrenze so zu wählen, dass sie mit vertretbarem Aufwand verwertbare Ergebnisse liefert. Zu eng gefasst wäre sie beispielsweise, wenn das Augenmerk lediglich auf der Klimaneutralität des Fahrzeugantriebs läge. In diesem Fall würde eine Lebenszyklusanalyse z. B. über 30 Jahre (engl. *life cycle assessment*, LCA) im Falle von Batterietriebzügen (BEMU) und Wasserstofftriebzügen (HEMU) bei Verwendung von Grünstrom bzw. grünem Wasserstoff als Antriebsenergieträger in der Bilanz die Emission von Null Tonnen CO₂ konstatieren.

Eine solche Begrenzung würde also zu kurz greifen, denn die vorhandenen Unterschiede in der Energieeffizienz blieben unberücksichtigt. Die Systemgrenzen sind somit weiter zu fassen, z. B. sinnvollerweise bis dahin, wo die für den Antrieb benötigte Energie gespeichert bzw. entnommen wird. Das sind die Dieseltankstelle, die Oberleitung, der Ladepunkt oder die Wasserstofftankstelle. Die entsprechende Energiewirkkette heißt „Tank-to-Wheel“ (*von der Entnahmestelle bis zum Antriebsrad*). Die Grenze wäre auch in diesem Fall noch zu eng gezogen, da die Erzeugung des Energieträgers, also die Wirkkette „Well-to-Tank“ (*von der Energiequelle bis zur Entnahmestelle*), bei dieser Betrachtung außen vor bliebe, also z. B. die Verluste bei der elektrolytischen Erzeugung des Wasserstoffs ignoriert würden. In der Kombination beider Wirkketten zu „Well-to-Wheel“ (*von der Energiequelle bis zum Antriebsrad*) wäre der Untersuchungsraum so umgrenzt, wie es die meisten Betrachter zufriedenstellen würde. Diese Wirkkette entspricht bei einer LCA der Nutzungsphase des Zugsystems, → Abbildung 45.

Dennoch zeigt sich, dass eine reine „Well-to-Wheel“-Betrachtung für den ökologischen Vergleich von Zugsystemen nicht hinreicht. Denn die Technologiekomponenten von BEMU und HEMU, beispielsweise, also Batterien und Brennstoffzellen, setzen sich aus sehr unterschiedlichen Teilkomponenten und Materialien zusammen. Zudem ist die Traktionsbatterie des BEMU um zwei- bis dreimal größer als die Dynamikbatterie des HEMU. Selbst wenn die „Basis“-Fahrzeuge baugleich und mit identischen nicht-technologiespezifischen Komponenten ausgestattet sind, verursachen ihre Batterien

¹⁹ <https://www.vde.com/tic-de>



bzw. Brennstoffzellen signifikante Unterschiede bei den Ökobilanzen der Zugsysteme. Die Herstellung der Fahrzeuge einschließlich ihrer Technologiekomponenten sind in der Lebenszyklusanalyse Teil der Produktionsphase, → Abbildung 45.

Abbildung 45: Systemgrenzen der Ökobilanzierung für Züge mit alternativen Antrieben

Eine vollständige Lebenszyklusanalyse berücksichtigt auch die erforderlichen Infrastrukturkomponenten, also Oberleitung, Ladepunkte, Wasserstofftankstellen, sowie die Entsorgung der Fahrzeuge und der Infrastruktur am Betriebslebensende wie auch die Wiederverwendung ihrer Materialien. Die Energieträger-Logistik ist ein weiterer für eine vollständige LCA relevanter Aspekt. Das alles zu berücksichtigen, kann erheblichen zusätzlichen Aufwand bedeuten. Mangels geeigneter Datensätze ist eine vollständige LCA heute noch nicht durchführbar.

Die Lebenszyklusanalyse des VDE beschränkt sich auf Elemente der Nutzungsphase wie auch der Produktionsphase, grauer Bereich in → Abbildung 45. Für den Einsatz einer Fahrzeugflotte ist die Betriebsleistung ein wichtiges Maß für den Vergleich von Bahnliniennetzen. Entsprechend ist es sinnvoll, den Ausstoß der Flotte an Treibhausgasen auf die Einheit Zugkilometer zu beziehen, also die Ökobilanz in $[\text{kg-CO}_2\text{e/Zkm}]$ anzugeben. Das „e“ steht hier für Äquivalente (engl. *equivalents*) und signalisiert, dass bei der Verbrennung fossiler Kraftstoffe nicht nur Kohlendioxid, sondern auch andere klimaaktive Gase entstehen können. Ergebnisse, die sich auf das CO_2 -Äquivalent beziehen, werden auch als Global Warming Potential²⁰ (GWP) bezeichnet. Der Anteil, den die Fahrzeuge, ihre Infrastruktur sowie Energieinfrastrukturanlagen am GWP eines Zugsystems haben, hängt auch davon ab, welchen Zeitraum man bei der Lebenszyklusanalyse überschauen möchte. Sinnvoll ist es, sich an der Nutzungsdauer der Fahrzeuge zu orientieren, die für Nahverkehrstriebzüge mit 30 Jahren angegeben wird. In diesem Zeitraum müssen deren Technologiekomponenten Batterie- bzw. Brennstoffzellen ein- bis mehrfach ausgetauscht werden, das heißt, deren „ CO_2 -Rucksäcke“ sind bei der Durchführung einer LCA mehrfach zu berücksichtigen.

²⁰ Das Global Warming Potential GWP berücksichtigt die Tatsache, dass beispielsweise bei der Verbrennung fossiler Kraftstoffe nicht nur Kohlendioxid, sondern auch andere Treibhausgase (THG) entstehen, die oft sogar um ein Vielfaches klimaschädlicher sind.

6.2 Berechnung der Ökobilanzen für Diesel-, Batterie- und Wasserstoffzug

Das VDE Prüfinstitut verwendet für seine Ökobilanzierungen ein LCA-Tool mit neuesten Updates und nutzt eine umfangreiche Datenbank mit kontinuierlichen Ergänzungen des Weltklimarats (IPCC). Die für den Vergleich der alternativen Zugsysteme BEMU und HEMU durchgeführte Lebenszyklusanalyse (engl. *life cycle assessment*, LCA) fokussiert sich auf alle Phasen, die innerhalb der in → Abbildung 45 grau hinterlegten Systemgrenzen liegen.

Somit wird die Phase der Produktion der Fahrzeuge und ihrer Technologiekomponenten abgedeckt, nicht jedoch die Herstellung von Infrastrukturkomponenten wie Ladestationen oder Wasserstofftankstellen, weil dafür vollständige Datensätze ausstehen. Auch die Rohstoffgewinnung und Materialbereitstellung sowie das Recycling bleiben mangels Datensätzen unberücksichtigt.

Die Nutzungsphase hingegen wird fast vollständig erfasst – von der elektrolytischen Erzeugung von grünem Wasserstoff und dessen Bereitstellung als Energieträger für HEMU bzw. der Strombereitstellung und -speicherung im Falle des BEMU, bis hin zur Nutzung der Energie mit der technologiespezifischen Effizienz im Zugbetrieb. Einrichtungen zur Handhabung und Verteilung des Wasserstoffs bleiben unberücksichtigt, weil auch hierzu vollständige Datensätze fehlen.

Die Eingangsdaten sowie ihre typischen Werte und weiterführende Hinweise zu ihnen, welche das VDE Prüfinstitut für die Durchführung der Lebenszyklusanalyse verwendet hat, liegen dem Auftraggeber vor.

In → Tabelle 6 ist oben die bei der Herstellung (Produktionsphase) von BEMU- und HEMU-Fahrzeugen und deren Technologiekomponenten Traktionsbatterie, Brennstoffzellenstacks und Dynamikbatterie freigesetzte Menge an Treibhausgasen in [t-CO₂] bzw. das sogenannte Global Warming Potential²¹ (GWP) in [t-CO₂e] angegeben.

Tabelle 6: Bei Fahrzeug- und Komponenten-Produktion freigesetzte CO₂-Mengen (Quelle: VDE Prüfinstitut)

| Summe Produktion und Tausch der Komponenten | BEMU | | HEMU | | Vergleich: DMU | |
|---|----------------------|---------------------------|----------------------|---------------------------|----------------------|---------------------------|
| | [t-CO ₂] | GWP [t-CO ₂ e] | [t-CO ₂] | GWP [t-CO ₂ e] | [t-CO ₂] | GWP [t-CO ₂ e] |
| Basiszug | 220,0 | 226,0 | 220,0 | 226,0 | 220,0 | 226,0 |
| Summe Produktion und Tausch (ohne Basiszug) | 122,5 | 133,3 | 91,3 | 99,0 | 5,1 | 5,3 |
| Summe Produktion und Tausch (mit Basiszug) | 342,5 | 359,3 | 311,3 | 325,0 | 225,1 | 231,3 |

| Summe Produktion und Tausch umgerechnet auf Zugkilometer | BEMU | | HEMU | | Vergleich: DMU | |
|--|---------------------------|-------------------------------|---------------------------|-------------------------------|---------------------------|-------------------------------|
| | [kg-CO ₂ /Zkm] | GWP [kg-CO ₂ /Zkm] | [kg-CO ₂ /Zkm] | GWP [kg-CO ₂ /Zkm] | [kg-CO ₂ /Zkm] | GWP [kg-CO ₂ /Zkm] |
| Basiszug | 1,294 | 1,330 | 1,294 | 1,330 | 1,294 | 1,330 |
| Summe Produktion und Tausch (ohne Basiszug) | 0,721 | 0,784 | 0,537 | 0,583 | 0,030 | 0,031 |
| Summe Produktion und Tausch (mit Basiszug) | 2,015 | 2,114 | 1,831 | 1,913 | 1,324 | 1,361 |

²¹ Das Global Warming Potential GWP berücksichtigt die Tatsache, dass z. B. bei der Verbrennung fossiler Kraftstoffe nicht nur Kohlendioxid, sondern auch andere Treibhausgase (THG) entstehen, die oft sogar um ein Vielfaches klimaschädlicher sind

| Simulation Energemix-Szenarien | BEMU | | HEMU | |
|---|---------------------------|-------------------------------|---------------------------|-------------------------------|
| | [kg-CO ₂ /Zkm] | GWP [kg-CO ₂ /Zkm] | [kg-CO ₂ /Zkm] | GWP [kg-CO ₂ /Zkm] |
| DMU „Transportmodell“ | n. a. | n. a. | n. a. | n. a. |
| Strom aus 100 % Erdgas | 3,450 | 3,690 | 10,400 | 11,100 |
| Öffentlicher Strom in 2020 | 2,280 | 2,400 | 6,860 | 7,220 |
| Bahnstrommix in 2024 | 1,610 | 1,750 | 4,840 | 5,260 |
| Grünstrom in 2019 | 0,256 | 0,385 | 0,770 | 1,160 |
| <ul style="list-style-type: none"> ▪ Biomasse 4,5 % ▪ Biogas 14,0 % ▪ Abfallverwertung 2,3 % ▪ Wasserkraft 7,7 % ▪ Windkraft 52,1 % ▪ Photovoltaik 19,2 % ▪ Geothermie 0,1 % | | | | |
| falls EE = 70 % Wind + 30 % PV | 0,092 | 0,099 | 0,278 | 0,297 |
| falls EE = 100 % Wind | 0,061 | 0,065 | 0,184 | 0,196 |

Der DMU dient hier als Referenzsystem²², für das angenommen wird, dass die Fahrzeuge bis auf technologiespezifische Unterschiede baugleich sind mit den entsprechenden BEMU- und HEMU-Fahrzeugen.

Tabelle 7: In Nutzungsphase freigesetzte CO₂-Mengen pro Zkm und Grünstrom-Anteile (Quelle: VDE Prüfinstitut)

Berücksichtigt wird in der Analyse zudem, dass in dem Betrachtungszeitraum von 30 Jahren die Technologiekomponenten entsprechend ihren jeweiligen Lebensdauern regelmäßig auszutauschen sind: Die Traktionsbatterie des BEMU und Dynamikbatterie des HEMU alle 15 Jahre (mit LTO-Technologie) und die Brennstoffzellenstacks (mit PEMFC-Technologie) effektiv etwa alle 6 Jahre.

→ Tabelle 6 gibt unten die Werte bezogen auf die Betriebsleistung, also in [kg-CO₂(e)/Zkm] an.

Hiernach ist das GWP des BEMU bezogen auf die Herstellung der Fahrzeuge und ihrer Technologiekomponenten mit 1,33 + 0,78 = 2,11 kg-CO₂/Zkm um 10 % höher als das GWP des HEMU, welches in Summe nur 1,91 kg-CO₂/Zkm beträgt.

→ Tabelle 7 gibt Auskunft über die Menge des im Fahrzeugbetrieb (Nutzungsphase) pro Zkm freigesetzten CO₂ bzw. über das jeweilige GWP. Hiernach ist der Unterschied zwischen BEMU und HEMU signifikant: Wird der BEMU mit Grünstrom betrieben, dessen Anteile sich wie in der Tabelle rechts angegeben zusammensetzen, und der HEMU mit grünem Wasserstoff, liegt der GWP-Wert des BEMU mit 0,39 kg-CO₂/Zkm um 67 % unter dem des HEMU, der 1,16 kg-CO₂/Zkm aufweist. Bei dem bis 2024 geltenden Bahnstrommix von heute (mit EE-Anteil von ca. 60 %) liegen die BEMU-Werte gemäß → Tabelle 7 jedoch deutlich höher. Wenn man bedenkt, dass der HEMU quasi per Definition mit grünem Wasserstoff zu betreiben ist, während der BEMU unter der Oberleitung nichts anderes laden kann als den aktuellen Bahnstrommix, dreht sich der Unterschied um: Der GWP des BEMU ist in diesem Fall mit 1,75 deutlich höher als der des HEMU. Wird der BEMU regelmäßig an Schnellladepunkten nachgeladen, die aus dem öffentlichen Stromnetz gespeist werden und für die keine spezifischen Grünstrom-Verträge abgeschlossen werden, liegt dessen GWP sogar noch höher.

²² Der Dieseltriebzug eignet sich gut als Referenz für den Vergleich von Zugsystemen, weil es dazu einen als Transportmodell bezeichneten vollständigen Datensatz gibt, auf welchen die weiterführende Analyse zurückgreifen kann.

| Simulation Produktions- und Nutzungsphase | BEMU | | HEMU | | Vergleich DMU | |
|---|---------------------------|--------------------------------|---------------------------|--------------------------------|---------------------------|--------------------------------|
| | [kg CO ₂ /Zkm] | GWP [kg CO ₂ e/Zkm] | [kg CO ₂ /Zkm] | GWP [kg CO ₂ e/Zkm] | [kg CO ₂ /Zkm] | GWP [kg CO ₂ e/Zkm] |
| Summe diff. LCA (ideal) | 0,977 | 1,169 | 1,307 | 1,743 | Szenario 1 | |
| Summe LCA (inkl. Basiszug) | 2,271 | 2,499 | 2,601 | 3,072 | 10,230 | 10,631 |
| Summe diff. LCA (realistisch) | 2,331 | 2,534 | 1,307 | 1,743 | Szenario 2 | |
| Summe LCA (inkl. Basiszug) | 3,625 | 3,864 | 2,601 | 3,072 | 10,230 | 10,631 |
| Summe diff. LCA (70 % / 30 %) | 0,813 | 0,883 | 0,815 | 0,880 | Szenario 3 | |
| Summe LCA (inkl. Basiszug) | 2,107 | 2,213 | 2,109 | 2,209 | 10,230 | 10,631 |
| Summe diff. LCA (100 % Wind) | 0,782 | 0,849 | 0,721 | 0,779 | Szenario 4 | |
| Summe LCA (inkl. Basiszug) | 2,076 | 2,179 | 2,015 | 2,108 | 10,230 | 10,631 |

Die Deutsche Bahn AG hat bereits angekündigt, dass der Bahnstrommix bis 2030 auf 80 % und bis 2038 auf 100 % Erneuerbare Energien ansteigen wird. Das heißt, über einen Zeitraum von 30 Jahren gemittelt könnten BEMU und HEMU mit ihren auf den Fahrbetrieb bezogenen GWP-Werten deutlich enger zusammenliegen. Anzumerken ist, dass für den Fall, dass der Grünstrom zu 70 % aus Windkraft- und zu 30 % aus PV-Anlagen stammt oder sogar zu 100 % aus Windkraftanlagen, die GWP-Werte erheblich niedriger ausfallen.

Tabelle 8: In Produktions- und Nutzungsphase freigesetzte CO₂-Mengen (szenarisch)

In → Tabelle 8 sind die Ergebnisse der Analyse der Produktions- und Nutzungsphase summarisch dargestellt: Die Werte auf hellblauem Untergrund berücksichtigen auch die Bestandteile des Basiszugs. Auf grauem Untergrund sind nur solche Werte einbezogen, die ausschließlich technologiespezifische Materialien betreffen. Unterschieden werden folgende vier Szenarien:

Szenario 1: BEMU wird mit Grünstrom, HEMU mit Grünem Wasserstoff betrieben.

Szenario 2: BEMU wird mit Bahnstrom-Mix (2024), HEMU mit Grünem Wasserstoff betrieben.

Szenario 3: Erneuerbare Energie stammt zu 70 % aus Windkraft und zu 30 % aus Photovoltaik.

Szenario 4: Erneuerbare Energie stammt zu 100 % aus Windkraft.

Hiernach ist das über einen Zeitraum von 30 Jahren resultierende GWP des BEMU-Konzeptes im Idealfall, also falls er über die gesamte Zeit mit reinem Grünstrom betrieben wird (**Szenario 1**), um 17 % niedriger als das des HEMU-Konzeptes. Unter den heutigen Bedingungen läge das GWP des BEMU um 17 % über dem des HEMU (**Szenario 2**).

Bei einem EE-Verhältnis von Windkraft/PV = 70 % / 30 % (**Szenario 3**) rücken die GWP-Werte beider Systeme nah zusammen, weil sich in diesem Fall der Unterschied aus der Produktionsphase durchsetzt. Stammt der Grünstrom zu 100 % aus Windkraftanlagen (**Szenario 4**) liegen beide GWP-Werte bei 2,1 kg-CO₂/Zkm.

6.3 FAZIT zur Ökobilanz

Es zeigt sich, dass es wichtig ist, das GWP von BEMU und HEMU als alternative Antriebstechnologien mittels einer erweiterten Lebenszyklusanalyse (LCA) zu ermitteln. Erst in der Gesamtschau wird deutlich, dass die Energieeffizienz des HEMU zwar schlechter ist als die des BEMU. Dafür sorgt jedoch die große Traktionsbatterie des BEMU wegen ihrer aufwendigen Herstellung und der Vielzahl kritischer Inhaltsstoffe für einen deutlich umfangreicheren „CO₂-Rucksack“ als es beim HEMU mit der kleineren Dynamikbatterie und den Brennstoffzellenstacks der Fall ist.

Wichtig ist auch zu beachten, dass der BEMU in der Regel über eine vorhandene Oberleitung geladen wird, die Strom bereitstellt, der heute „nur“ zu 60 % aus erneuerbaren Energiequellen stammt. Auf der anderen Seite wird für den Betrieb eines HEMU stets vorausgesetzt, dass er mit grünem Wasserstoff betrieben wird, für dessen elektrolytische Produktion ausschließlich Grünstrom zu verwenden ist. Allerdings muss dieser Grünstrom auch zur Elektrolyse zur Verfügung stehen. HEMUs in aktuellen (Pilot-)Projekten nutzen grauen Wasserstoff für den Betrieb. Entsprechend negativ ist deren Umweltbilanz, da ein CO₂-Ausstoß bei der Elektrolyse erfolgt und der HEMU so nur lokal emissionsfrei fahren kann.

Gesamtheitlich betrachtet und unter Berücksichtigung der gesetzten Systemgrenzen ist der Unterschied zwischen den beiden Antriebskonzepten BEMU und HEMU bei nachhaltig-idealem Betrieb ökobilanziell gesehen geringer als es die Unterschiede in ihrer Energieeffizienz eigentlich nahelegen würden.

7. Allgemeines Fazit und Empfehlungen

Auf der Grundlage der in dieser Studie vorgestellten Machbarkeitsuntersuchung und des Wirtschaftlichkeitsvergleichs für die Systeme empfehlen sich folgende Arbeitsschritte für die Vorbereitung der anstehenden Verkehrsausschreibung für den Betrieb mit klimaneutral betriebenen Fahrzeugen ab dem Jahr 2029:

Weitere Untersuchungen zum Einsatz von BEMU- und HEMU im Südthüringennetz:

- Verbindliche Rückmeldungen der Fahrzeughersteller zu Reichweite, Batteriegröße, Ladegeschwindigkeit, Ladeleistung und Verbrauch einholen und die technische Machbarkeit auf den Linien des Südthüringennetzes und auf der Schwarzatalbahn verifizieren.

Einbeziehung der Anbieter von Schnelllade-Anlagen:

- Prüfung der Realisierbarkeit von Schnelllade-Anlagen (z. B. VOLTAP®) an den vorgeschlagenen Standorten.
- Einholung eines verbindlichen Angebots für die Realisierung im Südthüringennetz

Verbindliche Gespräche mit DB Energie GmbH und DB Netze AG zu:

- Akzeptanz von Schnelllade-Anlagen von Drittherstellern
- Option: Schnellladesäulen, die von der Deutschen Bahn selbst entwickelt wurden
- Option: Oberleitungsinselanlagen für das Südthüringennetz
- Machbarkeit von Wasserstofftankstellen in Erfurt und Meiningen und verbindliche Zusagen der Hersteller bzgl. Lieferterminen und Preisen

Kritische Betrachtung des heutigen Zuschnittes des Südthüringennetzes:

- Klärung, inwieweit eine an den Ergebnissen der Untersuchungen zur technischen Machbarkeit orientierte Neuaufteilung des Netzes möglich ist.

Abhängig von den Ergebnissen der noch anstehenden weitergehenden technischen Klärungen für den Einsatz von HEMU- oder BEMU-Fahrzeugen im Südthüringennetz empfiehlt der VDE insbesondere im Hinblick auf Machbarkeit, den heutigen Zuschnitt des Netzes zu prüfen. RB 23, RB 40, RB 43, RB 44 und RB 46 eignen sich grundsätzlich für den Einsatz von Batterietriebzügen, RB 7 und RB 41 wahrscheinlich nicht. RB 23 und RB 60 weisen fahrplanseitig eine Umsteigeverknüpfung in Rottenbach auf. Denkbar wäre es, das bestehende Flügelkonzept von RB 23 und RB 46 aufzubrechen und eine fahrzeugseitige Gleichstellung von RB 23 und RB 60 (Schwarzatalbahn) herzustellen, z. B. für folgenden Zuschnitt:

- RB 40, RB 43, RB 44 und RB 46 als BEMU-Liniennetz
- RE 7, RB 41, RB 23 und RB 60 als HEMU-Liniennetz.

Eine andere Möglichkeit wäre, die Linie RB 60 in das Flügelkonzept von RB 23 und RB 46 zu integrieren und in das BEMU-Netz aufzunehmen, so dass HEMU-Fahrzeuge nur auf den Linien RE 7 und RB 41 zum Einsatz kämen. Umgekehrt könnten RB 23, RB 46 und RB 60 auch Teil des HEMU-Liniennetzes werden, so dass nur RB 40, RB 43 und RB 44 im BEMU-Liniennetz verblieben.

Nach eingehender Analyse verschiedener technischer, wirtschaftlicher und ökologischer Parameter ließe sich mittels eines Neuzuschnitts wie oben skizziert möglicherweise eine für alle Beteiligten befriedigende und damit optimale Lösung für das Südthüringennetz, einschließlich der RB 60, finden.

Eine Voraussetzung für die Einsatzbarkeit von BEMU-Fahrzeugen auf der Linie RB 46 entlang der Teilstrecke Plaue-Ilmenau, die heute in die Streckenklasse B2 fällt, ist die Prüfung der Möglichkeit, durch eine gezielte Auflastung der Streckenabschnitte, welche die Radsatzlast heute auf 18 t begrenzen, eine Ertüchtigung für BEMU-Fahrzeuge mit höheren Radsatzlasten zu erreichen.

Anhang

Die vom TMUEN beauftragte Machbarkeitsuntersuchung umfasste mehr als die im Haupttext dieser Studie wiedergegebenen Themen. Dazu zählten eine Nutzwertanalyse, eine Betrachtung zu energierechtlichen Themen sowie eine Zusammenstellung für die Optionen der Förderung von Investitionen in Zugsysteme mit alternativen Antriebstechnologien. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in separaten Papieren zusammengefasst und liegen dem Auftraggeber vor. Der Vollständigkeit halber sind diese in gekürzter Form in diesem Anhang zusammengefasst.

Nutzwertanalyse

Bei der Suche nach klimaschonenden und umweltverträglichen Antriebskonzepten für Nahverkehrszüge im Südthüringennetz steht der Freistaat Thüringen vor einer komplexen Entscheidungsaufgabe, denn die Unterschiede zwischen den in Frage kommenden Alternativen sind groß – sowohl im Hinblick auf die Fahrzeuge und deren Betrieb als auch auf die dafür erforderliche spezifische Infrastruktur. Der VDE bedient sich der Nutzwertanalyse als wissenschaftlich fundierte Methodik der Entscheidungstheorie, um auf der Grundlage geeigneter Kriterien eine objektiv begründete Entscheidungsempfehlung ableiten zu können. Verglichen wurden folgende Technologievarianten (Definitionen: siehe Kapitel 3):

1. Dieselhybrid (kurz DHYB)
2. Oberleitungselektrotriebzug (kurz EMU)
3. Batterietriebszug (kurz: BEMU)
4. Wasserstofftriebszug (kurz: HEMU)

Diese Konzepte unterscheiden sich nicht nur im Antrieb der Fahrzeuge, sondern auch in ihren Anforderungen an die Infrastruktur. So braucht der EMU stets eine durchgehende Oberleitung, da er grundsätzlich keine Energie mit sich führt.

Der BEMU ist ein EMU, der mit Hilfe seiner Traktionsbatterie vorhandene Oberleitungslücken überwinden kann, sofern diese nicht länger sind, als es die Batteriereichweite erlaubt. Damit zählen zu den BEMU-spezifischen Infrastrukturanforderungen die folgenden:

1. Der BEMU braucht entlang der Fahrstrecke ein Oberleitungsstück, um seine Batterie über den Stromabnehmer zu laden.
2. Bei größeren Oberleitungslücken ist eine zusätzliche Lademöglichkeit vorzusehen. In Frage kommen dafür die Verlängerung einer Oberleitung, Nutzung von Elektranten oder Zugvorheizanlagen, Installation einer Oberleitungsinselanlage oder einer Stromtankstelle.

Der HEMU ist ein elektromotorisch betriebenes Fahrzeugkonzept, bei dem der Antriebsstrom über eine Brennstoffzelle erzeugt wird, die den mitgeführten Wasserstoff umwandelt. Für die Betankung mit Wasserstoff sind an geeigneten Standorten Wasserstofftankstellen vorzusehen. Für den klimaneutralen Betrieb braucht der HEMU grünen Wasserstoff, der mittels Grünstrom elektrolytisch erzeugt wird. Dafür sind lokale Elektrolyse-Anlagen und gegebenenfalls zusätzlich lokale Windkraft- oder Photovoltaik-Anlagen vorzusehen.

Eine Nutzwertanalyse dient der Objektivierung einer komplexen Entscheidungsfindung.

Eine Nutzwertanalyse ist immer dann sinnvoll anwendbar, wenn eine Systementscheidung ansteht und dafür verschiedene komplexe Alternativen zur Wahl stehen. Einer Entscheidung zugunsten einer Alternative liegen in der Regel eine Reihe von Kriterien zugrunde, deren Nicht-Erfüllung zum Ausschluss der betreffenden Option führen würde. Das heißt, es kommen grundsätzlich nur solche Alternativen in Betracht, die allen Muss-Kriterien entsprechen. Die Alternativen erfüllen die verschiedenen Muss-Kriterien jedoch in unterschiedlichem Maße, so dass es möglich ist, sie miteinander zu vergleichen und qualitativ zu bewerten.

Für die Bewertung von Triebzügen mit alternativen Antrieben eignen sich insbesondere folgende Kriterien für den Vergleich und die Entscheidungsfindung:

1. Ressourcenverfügbarkeit
2. Infrastrukturfreundlichkeit
3. Betriebsfreundlichkeit
4. Klima- und Umweltverträglichkeit
5. Systemdienlichkeit

Vorteil dieser Auswahl ist, dass sich die Muss-Kriterien in ihrer Bedeutung wenig überlappen. Jedes für sich erweist sich als vielschichtig komplex, und es empfiehlt sich, sie in einfach handzuhabende Unterkriterien zu zerlegen. Der VDE wählte eine Differenzierung nach Haupt-, Mittel- und Basiskriterien.

Die insgesamt 26 Basiskriterien sind so formuliert, dass sie sich qualitativ benoten lassen. Nicht jedes Basiskriterium ist jedoch gleich wichtig. Aus diesem Grunde nutzt der VDE Gewichtungen für die Basis- und Mittelkriterien, die er 2017 gemeinsam mit 20 Branchen-Experten festgelegt hat.

Die Punktwertvergabe entspricht einer subjektiven, aber qualifizierten Einschätzung.

Im Rahmen der Nutzwertanalyse wurden für die vier betrachteten Antriebskonzepte zu jedem der 26 Basiskriterien Punktwerte zwischen 0 und 10 vergeben, wobei 0 für *nicht erfüllt* und 10 für *maximal erfüllt* steht. Dabei entsprechen die vergebenen Punktwerte einer subjektiven, aber qualifizierten Einschätzung des VDE-Teams und des Auftraggebers. Die Details der Vorgehens finden sich in dem separat verfassten Papier zur Nutzwertanalyse [12].

In → Tabelle 9 sind die Ergebnisse der individuellen Bepunktungen der 26 Basiskriterien und die resultierenden „Noten“ zusammengestellt. Die Notenwerte sind wie folgt zu verstehen:

- 0 – < 1 = **durchgefallen**
- 1 – < 2 = **mangelhaft**
- 2 – < 4 = **ausreichend**
- 4 – < 6 = **befriedigend**
- 6 – < 8 = **gut**
- 8 – < 9 = **sehr gut**
- 9 – 10 = **überragend**

Bezogen auf die Muss-(= Haupt-)Kriterien sind die jeweils besten bzw. schlechtesten Noten im Farbton der Bewertungsskala hinterlegt. Auffällig ist, dass die Alternativen über die Hauptkriterien hinweg sehr unterschiedliche Noten aufweisen, die zwischen mangelhaft und überragend liegen.

Die Alternativen schneiden in ihren resultierenden Noten sehr unterschiedlich ab.

Die Auswertung der Notenergebnisse ist in → Tabelle 10 plakativ wiedergegeben. Hiernach erreicht der EMU gleich dreimal Bestnoten: er ist *überragend* bei der Ressourcenverfügbarkeit und der Klima- und Umweltverträglichkeit sowie *sehr gut* in seiner Betriebsfreundlichkeit; dafür ist er im vorliegenden Fall *mangelhaft* bei der Infrastrukturfreundlichkeit, da das Südhüningennetz weitgehend oberleitungsfrei ist. Der erheblich geringere Infrastrukturaufwand im Falle des BEMU spiegelt sich in der Note *befriedigend* wider. Die mit *sehr gut* eingestuften Kriterien Ressourcenverfügbarkeit und Klima- und Umweltverträglichkeit setzen den BEMU deutlich ab von den Alternativen HEMU und DHYB. Die Note *befriedigend* für die Betriebsfreundlichkeit signalisiert hingegen, dass die Realisierung des Betriebsprogramms Südhüningen mit BEMU-Fahrzeugen wegen der regelmäßig anfallenden Nachladevorgänge komplex werden kann.

| Hauptkriterium | Punkte | | | |
|-------------------------------|--------|------|------|------|
| | DHYB | EMU | BEMU | HEMU |
| Ressourcenverfügbarkeit | 5,62 | 9,10 | 8,00 | 5,64 |
| Infrastrukturfreundlichkeit | 9,91 | 1,94 | 4,50 | 6,54 |
| Betriebsfreundlichkeit | 6,67 | 8,21 | 5,12 | 6,42 |
| Klima- /Umweltverträglichkeit | 2,99 | 9,03 | 8,88 | 7,11 |
| Systemdienlichkeit | 1,80 | 5,06 | 6,85 | 9,08 |

Tabelle 9: Bepunktung der Basiskriterien und resultierende Benotungen der Hauptkriterien

Der HEMU schneidet über die fünf Kriterien gemittelt mit *gut(+)* ab, also etwas besser als der BEMU (*gut*). Dieses Ergebnis setzt allerdings voraus, dass alle Hauptkriterien als gleich wichtig angesehen werden. Geht man davon aus, dass Systemdienlichkeit aus der Sicht des Aufgabenträgers kaum Einfluss auf die Entscheidungsfindung hat, dreht sich die Gesamteinschätzung um: Der HEMU schneidet mit *gut(-)* ab, also etwas schlechter als BEMU.

Der entscheidende Vorteil von Dieselhybriden ist – auf das Südhüningennetz bezogen – ihre überragende Gefälligkeit in Bezug auf die (nicht) bestehende Infrastruktur. Hinsichtlich ihrer Systemdienlichkeit und Klima- und Umweltverträglichkeit rangieren sie jedoch weit hinter den anderen Alternativen. Die mit *befriedigend* benotete Ressourcenverfügbarkeit ist der Besonderheit geschuldet, dass die für den Bau von Hybriden benötigten Bauteile auch in Zukunft sicher verfügbar sind und keine spezifischen Angaben zu Dieselhybrid-Typen gemacht wurden.

| | DHYB | EMU | BEMU | HEMU |
|------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Ressourcenverfügbarkeit | befriedigend | überragend | sehr gut | befriedigend |
| Infrastrukturfreundlichkeit | überragend | mangelhaft | befriedigend | gut |
| Betriebsfreundlichkeit | gut | sehr gut | befriedigend | gut |
| Klima- /Umweltfreundlichkeit | ausreichend | überragend | sehr gut | gut |
| Systemdienlichkeit | mangelhaft | befriedigend | gut | überragend |

Tabelle 10: Auswertung der in der Nutzwertanalyse ermittelten Noten

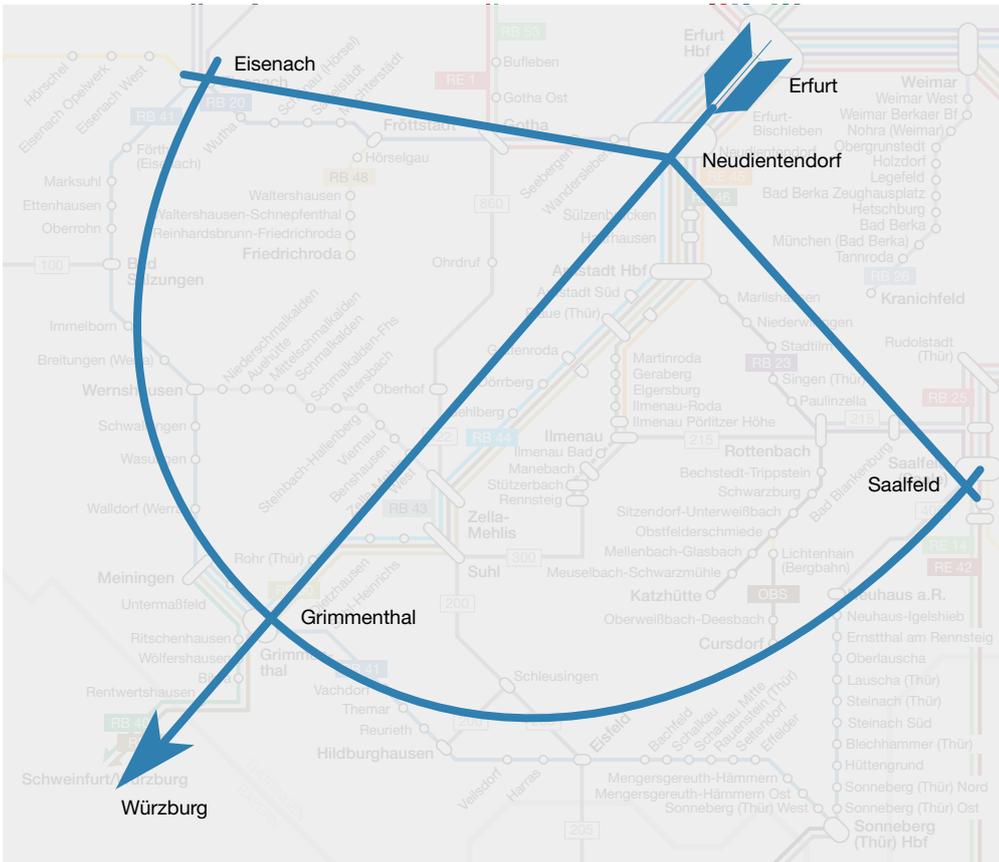


Abbildung 46: Linien des Südthüringennetzes

Eine Besonderheit des Südthüringennetzes ist die „Inhomogenität“ seiner Linien.

Das Südthüringennetz stellt sich im Vergleich zu anderen Netzen inhomogen dar. In ihrer räumlichen Ausrichtung erinnern dessen Bahnlinien an das Bild von Pfeil und Bogen, → Abbildung 46.

Der „Pfeil“ weist von Erfurt über Grimmenthal Richtung Würzburg. Auf diesem liegen die meisten der zu untersuchenden Bahnlinien: Sie starten in Erfurt und zweigen an verschiedenen Stellen in die umliegende Landschaft ab. Die Bogensehne reicht von Eisenach über Neudietendorf bis nach Saalfeld: die linke Hälfte ist voll elektrifiziert (und nicht Teil der Untersuchung), die zweite Hälfte ist nicht elektrifiziert. Den Bogen bildet die 170 km lange oberleitungsfreie Linie RB 41, die von Eisenach über Sonneberg bis Neuhaus am Rennweg führt. Die Strecke von Erfurt nach Neudietendorf (also der hintere Teil des Pfeils) ist durchgehend elektrifiziert.

In der nach einzelnen Bahnlinien differenzierten Betrachtung ergäbe die Nutzwertanalyse mit Blick auf die Infrastrukturfreundlichkeit sehr unterschiedliche Ergebnisse:

Die vollständige Elektrifizierung von RB 41 (der Bogen) kann angesichts der Länge als zu aufwendig – zeitlich wie kostenmäßig – praktisch ausgeschlossen werden, das heißt, das Kriterium Infrastrukturfreundlichkeit wäre für EMU die Note *mangelhaft* oder *durchgefallen* wahrscheinlich. Anders die Situation für Bahnlinien zwischen Erfurt und Arnstadt oder Plaue: Hier tendiert die Note im Falle von EMU oder BEMU für Infrastrukturfreundlichkeit eher Richtung *befriedigend*.

Energierrechtlicher Rahmen

Der Energiepreis wird maßgeblich beeinflusst durch energierechtlich und energiewirtschaftlich vorgegebene Rahmenbedingungen. Im Falle fossiler Kraftstoffe wie Benzin oder Diesel wird eine deutlich über dem Warenwert liegende Energiesteuer (ehemals Mineralölsteuer) erhoben. Diese beträgt bei Benzin 65,45 ct/Liter; bei Diesel sind es 47,04 ct/Liter.²³ Hinzu kommt seit 2021 eine CO₂-Abgabe, deren Höhe durch das Brennstoff-Emissionshandels-Gesetz (BEHG) bestimmt ist. Hiernach wurde der von Brennstoffen verursachte Ausstoß von einer Tonne Kohlendioxid-Äquivalent (abgekürzt t-CO₂-Äq oder t-CO₂e) im Jahr 2021 mit 25 € bepreist. Dieser Wert wird bis 2025 sukzessive auf 55 €/t-CO₂e angehoben.²⁴ Ab 2026 beginnt der Emissionshandel in einem Preiskorridor zwischen 55 und 65 €/t-CO₂e (nationales Emissionshandels-system, EHS).

Beim Verbrennen eines Liters Dieselkraftstoff werden 2,63 kg Kohlendioxid (CO₂) freigesetzt. Im Jahr 2022 erhielt Diesel einen Aufschlag von $25 \text{ €} \cdot 2,63 / 1.000 = 6,58 \text{ ct/Liter}$. Dieser wird sich bis 2025 auf $55 \text{ €} \cdot 2,63 / 1.000 = 14,47 \text{ ct/Liter}$ erhöhen. Das entspricht einem Aufschlag von ~10%.

Der durchschnittliche Strompreis in Deutschland lag in 01/2022 bei 32,16 ct/kWh. Für jeden Stromkunden, egal ob Industrie, Gewerbe oder privater Haushalt, gilt, dass die Stromrechnung eine Reihe von gesetzlichen Abgaben und Steuern umfasst: Diese betragen in 01/2022:

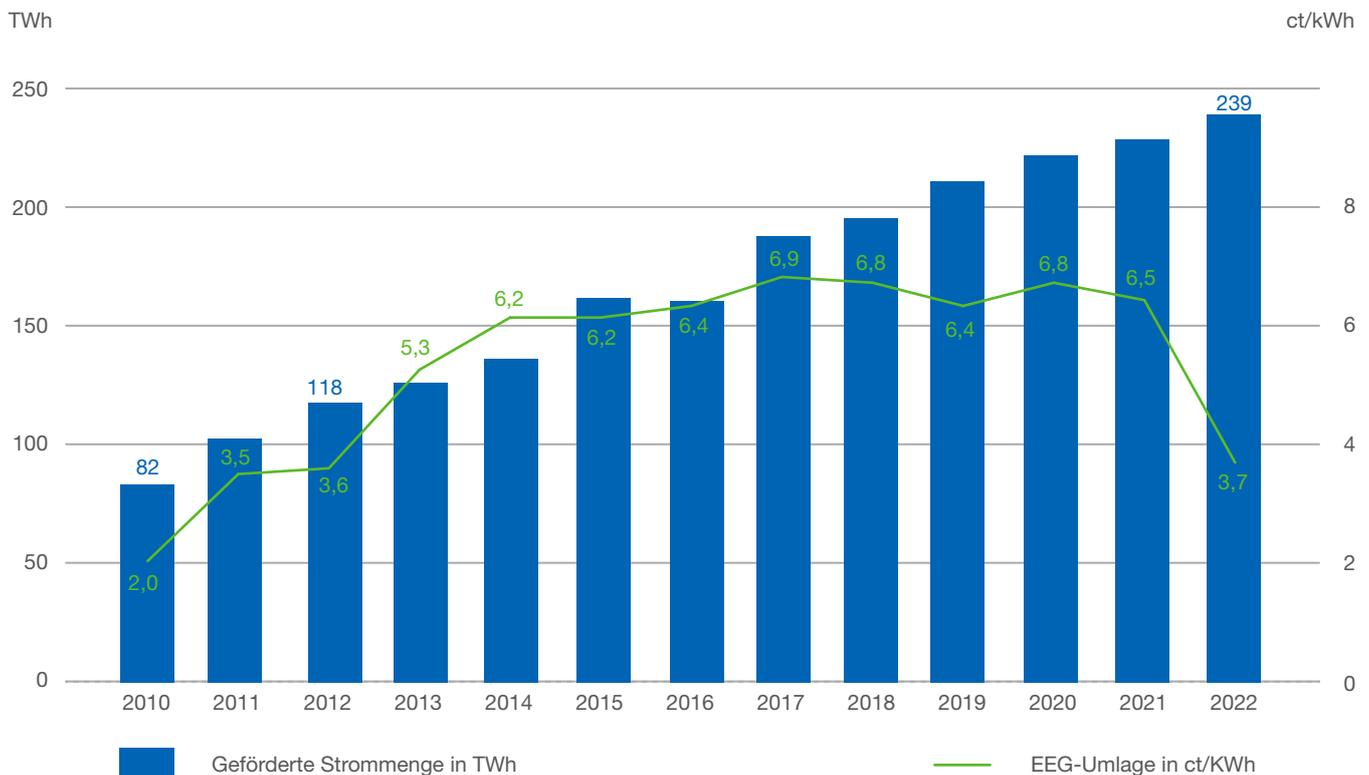
| Abgaben und Steuern für Stromkunden 01/2022 | |
|---|-----------------|
| Stromsteuer gemäß Stromsteuergesetz (StromStG) | 2,05 ct/kWh |
| EEG-Umlage gemäß Erneuerbare Energien Gesetz (EEG) | 3,723 ct/kWh |
| KWK-G-Umlage gemäß Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz (KWK-G) | 0,378 ct/kWh |
| §19 StromNEV-Umlage gemäß Stromnetzentgeltverordnung | 0,437 ct/kWh |
| Offshore-Netzumlage nach §17f Abs. 7 EnWG | 0,419 ct/kWh |
| AbLaV-Umlage gemäß §18 Verordnung über Vereinbarungen zu abschaltbaren Lasten (AbLaV) | 0,003 ct/kWh |
| Netznutzungsentgelt und Messstellen-Entgelt (regional) | ca. 8 ct/kWh |
| Konzessionsabgabe gemäß §2 Konzessionsabgabenverordnung | max. 2,4 ct/kWh |

Tabelle 11: In der Stromrechnung enthaltene gesetzliche Abgaben und Steuern (Stand 01/2022)

Hinzu kommen die Kosten für die Stromerzeugung und -verteilung, der Gewinnaufschlag des Stromanbieters sowie die Mehrwertsteuer. Die wichtigsten Änderungen betreffen die EEG-Umlage. Diese wurde im Jahr 2000 eingeführt, um den Erzeugern von Erneuerbaren Energien mit Hilfe fester Einspeisevergütungen einen wirtschaftlichen Betrieb zu sichern. Die Höhe der EEG-Umlage ergibt sich rechnerisch aus der Differenz zwischen dem Marktwert von Strom aus Erneuerbaren Energien und den Zahlungen der Einspeisevergütungen für Solar, Wind, Biogas und Wasserkraft. Der genannte Marktwert entspricht dem Prognosewert des künftigen Stromeinkaufspreises, der von der Strombörse European Energy Exchange (EEX) in Leipzig kommt.

²³ Für Zeitraum 1.6. bis 31.8. krisenbedingt vorübergehend reduziert um 30ct/l (bei Benzin) und 16,5ct/l (bei Diesel)

²⁴ Bei 55 € lag Mitte 2021 der Preis einer „Berechtigung“ im Europäischen Emissionshandelssystem (EU-ETS) für den Ausstoß von 1 t-CO₂e.



In den vergangenen acht Jahren lag die EEG-Umlage zwischen 6,2 und 6,8 ct/kWh, siehe → Abbildung 47. Im Jahr 2021 hätte sie wegen des Corona-bedingten Überangebots an Wind- und Solarstrom eigentlich auf 9,65 ct/kWh angehoben werden müssen („EEG-Paradoxon“). Durch Quersubventionierung im Konjunkturpaket 2020 konnte der Anstieg verhindert werden, d. h. die Umlage blieb bei 6,5 ct/kWh. Für das Jahr 2022 hat sich eine signifikante Senkung auf 3,723 ct/kWh ergeben. Ein Grund hierfür war ein hoher Strombörsenpreis, mit dem sich der Abstand zur Einspeisevergütung reduzierte. Zudem führte die CO₂-Bepreisung zu einem erhöhten Bundeszuschuss.

Abbildung 47: Entwicklung der EEG-Umlage seit 2010 (Quelle: BMWi 2021)

Die Bundesregierung hat im Koalitionsvertrag [13] vereinbart, dass die EEG-Umlage ab 2023 entfallen soll, die Subventionierung von Anlagen zur EE-Erzeugung also nicht mehr auf den Strompreis umgelegt wird. Stattdessen soll die Finanzierung künftig über den Energie- und Klimafonds (EKF) erfolgen, der aus den Einnahmen der Emissionshandelssysteme BEHG und EU-ETS und einem Zuschuss aus dem Bundeshaushalt gespeist wird. Strom aus Erneuerbaren Energien, der für die Erzeugung von grünem Wasserstoff verwendet wird, ist seit dem entsprechenden Bundestagsbeschluss von Juni 2021 bereits von der EEG-Umlage befreit. Zur Kompensation dient eine ab 2023 geltende Wasserstoffumlage nach §118 Abs. 6 EnWG auf dem Strompreis.²⁵

Die Energieversorgung von elektrisch betriebenen Zügen erfolgt über Bahnstrom, der über die Oberleitungen einphasig mit 15 kV und 16,7 Hz bereitgestellt wird. Erzeugung, Beschaffung und Bereitstellung des Bahnstroms erfolgt durch die DB Energie GmbH. Der Bahnstrompreis setzt sich ähnlich zusammen wie der Preis für öffentlichen Strom:

- Arbeitspreis Energie
- Netzentgelte für die Nutzung des 16,7-Hz-Bahnstromnetzes
- Vergütung für zurückgespeisten Bahnstrom (gemessen plus §18 StromNEV).

²⁵ Mit Beschluss der Bundesregierung vom 23.2.2022 entfiel die EEG-Umlage bereits zum Stichtag 1. Juli 2022.

Dazu kommen:

- Stromsteuer nach Stromsteuergesetz (StromStG)
- EEG-Umlage nach Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)
- KWKG-Umlage nach Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG)
- §19 Abs. 2 StromNEV-Umlage
- Offshore-Netzumlage nach §17f Energiewirtschaftsgesetz (EnWG)
- Abschaltbare Lasten-Umlage nach §18 AbLaV
- Umsatzsteuer.

Der Bahnstrom-Arbeitspreis hat sich in den vergangenen fünf Jahren zunächst moderat kontinuierlich und zuletzt sprunghaft sehr deutlich nach oben entwickelt, siehe → Tabelle 12. Das Netzentgelt ist relativ unverändert geblieben mit ca. 5 bis 7 ct/kWh.

| Arbeitspreis | Hochtarif (HT) [ct/kWh] | Niedrigtarif (NT) [ct/kWh] |
|--------------|----------------------------|-------------------------------|
| 2017 | 5,05 | 5,05 |
| 2018 | 5,91 | 4,86 |
| 2019 | 6,90 | 5,80 |
| 2020 | 7,46 | 6,50 |
| 2021 | 7,46 | 6,50 |
| 01/2022 | 21,70 | 18,87 |
| ab 02/2022 | 27,18 | 22,84 |

Tabelle 12: Entwicklung des Bahnstrom-Arbeitspreises seit 2017

Förderoptionen

Angesichts der Größenordnung der über einen Zeitraum von 30 Jahren anfallenden Kosten und der beachtlichen Unterschiede zwischen den alternativen Antriebskonzepten wird deutlich, dass für den Kostenausgleich Fördermittel in 8-stelliger Größenordnung benötigt würden.

In den verschiedenen Bundesländern gibt es für benachteiligte oder belastete Regionen Ausgleichsfördertöpfe, die mit Blick auf die Entwicklung von Arbeitsplätzen in neuen Industriezweigen Hilfe leisten – insbesondere, wenn diese Industrien mit Nachhaltigkeitszielen harmonisieren. Ein Beispiel ist das Investitionsgesetz Kohleregionen (InvKR), das gemäß den in §4 Abs. 2+3 beschriebenen Kriterien zur „Verwirklichung von Nachhaltigkeitszielen im Rahmen der Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie“ Finanzhilfen in Aussicht stellt. Diese Option nutzt z. B. der Kreis Düren für das „Netz Düren“, das in der Verantwortung des Nahverkehr Rheinland (NVR) liegt. Hier sollen die Mehrkosten für die Anschaffung von HEMU-Fahrzeugen in der Größenordnung von 57 Mio. € über Fördermittel aus dem InvKR finanziert werden. Weitere 7,6 Mio. € wurden für die Installation einer Wasserstofftankstelle und der benötigten Transportlogistik beantragt.



Richtlinie zur Förderung alternativer Antriebe im Schienenverkehr

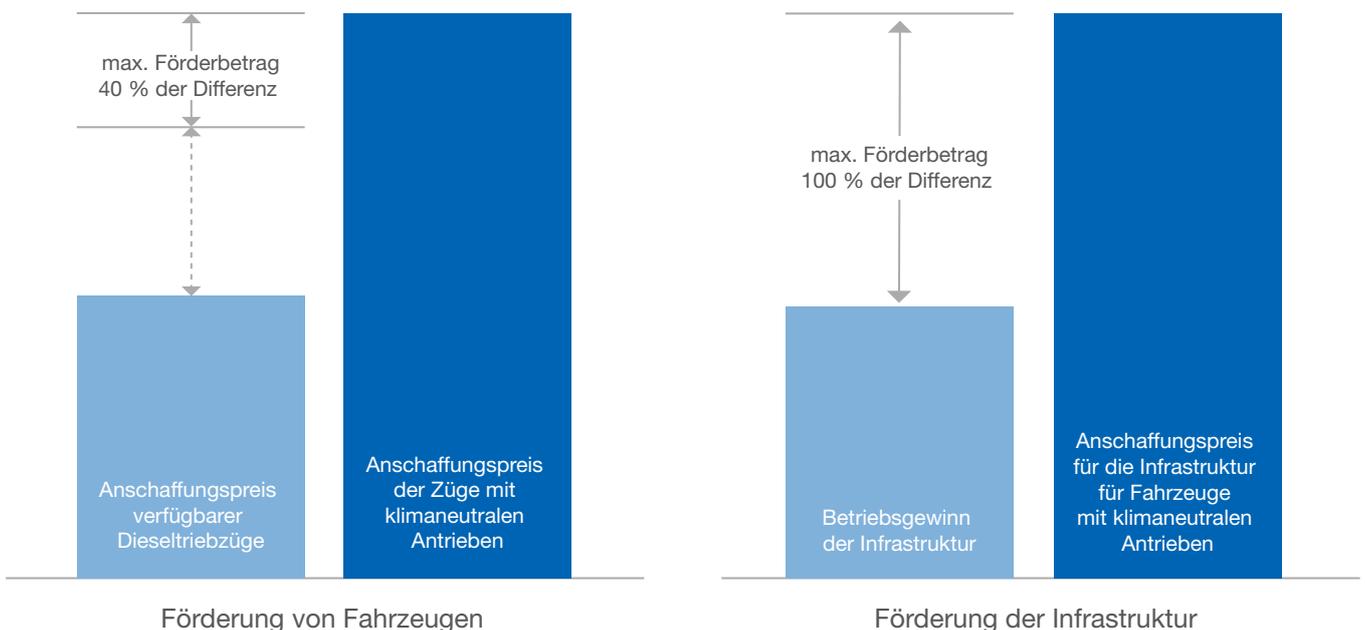
Darüber hinaus hat sich der Kreis Düren im Rahmen des „HyLand“-Wettbewerbs in der 2. Runde (HyLand II) erfolgreich als Wasserstoff-Region beworben und den Status „HyExpert“ gewonnen. Damit lässt sich der Kreis Düren die Erstellung eines umsetzungsfähigen Gesamtkonzeptes finanzieren. Ähnliche Fördermöglichkeiten bieten sich grundsätzlich auch in anderen Bundesländern an. Im Fall des Freistaats Thüringen stellen sich solche Möglichkeiten aktuell noch nicht dar.

Abbildung 48: BMVI (BMDV)-Richtlinie zur Förderung alternativer Antriebe im Schienenverkehr

Von bundesweiter Bedeutung ist die vom Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur (BMVI; jetzt BMDV) am 3. Februar 2021 veröffentlichte Förderrichtlinie, die sich an Unternehmen und Aufgabenträger richtet. Sie unterstützt nach deren Aussage bei der Beschaffung von Schienenfahrzeugen mit innovativen emissionsarmen Antrieben und der Errichtung der Betankungs- bzw. Ladeinfrastruktur. Die Anmelde-schwelle liegt bei 10 Mio. € für Investitionsbeihilfen oder bei über 20 Mio. € für die Gesamtkosten der benötigten Infrastruktur. Auf der Grundlage dieser Richtlinie werden im Zeitraum zwischen dem 3.2.2021 und dem 30.6.2024 regelmäßig neue Aufrufe zur Einreichung von Förderanträgen veröffentlicht, siehe → Abbildung 48. Der erste Förderaufruf, bei dem ein Gesamtbetrag von maximal 227 Mio. € zur Verfügung gestellt wurde, erfolgte im Sommer 2021.

Die Förderungsbeträge für die Anschaffung von Zügen mit alternativen Antrieben orientieren sich am Anschaffungspreis verfügbarer Dieseltreibzüge, für die Anschaffung der erforderlichen Infrastruktur hingegen an dem zu erwartenden Betriebsgewinn der Infrastruktur z. B. mit dem Verkauf von grünem Wasserstoff, siehe → Abbildung 49.

Abbildung 49: Ermittlung der maximalen Förderbeträge für Fahrzeug- und Infrastrukturbeschaffung



Der zweite Förderaufruf des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr wurde am 1. Juli 2022 veröffentlicht, mit einem Fördervolumen von 141 Mio. €, wobei je Vorhaben und Unternehmen die Anschaffung von Fahrzeugen auf 15 Mio. €, für Infrastruktur auf 10 Mio. € und für Studien auf 150 T€ begrenzt werden.²⁶ Die Antragsfrist war der 31. August 2022.

Inwieweit sich dieser oder ein gleichlautender Förderaufruf auf das Südthüringennetz mit seiner Umstellung auf alternative Fahrzeugkonzepte ab dem Fahrplanjahr 2029 übertragen lässt, wäre in einem Gespräch mit dem Projektträger Jülich spezifisch zu klären.

²⁶ <https://bmdv.bund.de/goto?id=514156>

Literaturverzeichnis

- [1] J. Ihme, Schienenfahrzeugtechnik (2. Auflage), Wiesbaden: Springer Vieweg, 2019.
- [2] Deutsche Bahn AG, „Das System Bahn – der ICE – DB Systemtechnik,“ Juni 2013. [Online]. Available: https://www.db-systemtechnik.de/resource/blob/1665152/b1e975afc4621103696b63e8247d37ce/Aktuell_D_Schulbro-schuere-Regensburg_Das-System-Bahn-der-ICE-data.pdf. [Zugriff am 12. Mai 2021].
- [3] A. Müller, „Technische und wirtschaftliche Bewertung alternativer Antriebskonzepte (Kurztitel),“ Technischen Universität Dresden, Dresden, 2017.
- [4] W. Klebsch, P. Heininger, J. Geder und A. Hauser, VDE-Studie: Batteriesysteme für Schienentriebzüge – Emissionsfreier Antrieb mit Lithium-Ionen-Zellen, Frankfurt am Main: VDE e. V., 21. August 2018.
- [5] J. Pagenkopf und et.al., „Analysis of German diesel operated regional railway lines,“ Railways Conference 2018, Sitges, 2018.
- [6] „Forscher aus Sachsen entwickeln transportable Ladestation für Akku-Züge,“ 20.02.2023. [Online]. Available: <https://www.saechsische.de/wissenschaft/forscher-aus-sachsen-entwickeln-transportable-ladestation-fuer-akku-zu-ege-5823283.html>. [Zugriff am 10. Juli 2023].
- [7] S. El-Barudi, M. Kliefoth und F. Baentsch, „Stromversorgung von Batteriezügen mittels Oberleitung. Modell für eine kundenfreundliche regulatorische Einordnung der elektrischen Energieversorgungsanlagen für Batterietriebzüge,“ Journal für Mobilität und Verkehr, Ausgabe 3, p. 8, 2019.
- [8] U. Plank-Wiedenbeck, M. Jentsch, F. Lademann, S. Büttner, N. Meyer und A. Ivanov, „Pilotprojekt Einsatz von H₂BZ-Triebwagen in Thüringen (Schlussbericht Machbarkeitsstudie),“ Bauhaus-Universität Weimar, Weimar, Januar 2019.
- [9] DB Energie GmbH, „Umweltstudie über den Bau, den Betrieb und die Bewertung der daraus resultierenden Umwelteinflüsse einer Schienen-Wasserstofftankstelle am Standort Rottenbach,“ DB Netze, Frankfurt am Main, Januar 2020.
- [10] J. Wöltje, „Dynamische Investitionsrechenverfahren,“ in Betriebswirtschaftliche Formelsammlung, Haufe-Lexware GmbH & Co. KG, 2012, p. Abschnitt 7.4.
- [11] W. Klebsch, N. Guckes und H. Patrick, VDE-Studie: Bewertung klimaneutraler Alternativen zu Dieseltriebzügen – Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen am Praxis-Beispiel Netz Düren, Frankfurt am Main: VDE e. V., Juni 2020.
- [12] W. Klebsch und N. Guckes, „AP 2 Nutzwertanalyse,“ VDE e. V., Offenbach am Main, 2022.
- [13] SPD, Bündnis 90/Die Grünen und FDP, „Mehr Fortschritt wagen – Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit,“ Bund, Berlin, 2021.

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|---------------|---|----|
| Abbildung 1: | Betriebsprogramm Südthüringennetz 2029 | 14 |
| Abbildung 2: | Nahverkehrslinien im südlichen Thüringen (Stand 2021) | 15 |
| Abbildung 3: | RE 7 Erfurt–Würzburg: Streckenverlauf und Betriebskonzept | 16 |
| Abbildung 4: | RB 23 Erfurt–Saalfeld: Streckenverlauf | 17 |
| Abbildung 5: | RB 40 Meiningen–Schweinfurt: Streckenverlauf | 18 |
| Abbildung 6: | RB 41 Eisenach–Neuhaus: Streckenverlauf | 19 |
| Abbildung 7: | RB 43 Wernshausen–Zella-Mehlis: Streckenverlauf | 20 |
| Abbildung 8: | RB 44 Erfurt–Meiningen: Streckenverlauf | 21 |
| Abbildung 9: | RB 46 Erfurt–Ilmenau: Streckenverlauf | 22 |
| Abbildung 10: | RB 60 Rottenbach–Katzhütte (OBS Schwarzatalbahn): Streckenverlauf | 23 |
| Abbildung 11: | Oberweißbacher Bergbahn: Talstation, Güterbühne mit geschlossenem Aufsatzwagen und Personenwagen | 24 |
| Abbildung 12: | RegioSwinger in Doppeltraktion | 25 |
| Abbildung 13: | RegioShuttle RS1 | 26 |
| Abbildung 14: | EcoTrain – nicht zugelassener Prototyp | 26 |
| Abbildung 15: | EcoTrain Dieselhybrid-Konzept | 27 |
| Abbildung 16: | EMU-Konzept | 27 |
| Abbildung 17: | Bahnstrom-Einspeisungswege | 28 |
| Abbildung 18: | OL-Elektrotriebzug | 28 |
| Abbildung 19: | BEMU-Konzept | 29 |
| Abbildung 20: | BEMU-Modelle von Stadler, Siemens, CAF und Alstom | 30 |
| Abbildung 21: | Statistische Verteilung der Länge von Oberleitungslücken in Deutschland | 32 |
| Abbildung 22: | FLIRT-Akku an der VOLTAP®-Demo-Anlage beim Haltepunkt Pfäffingen | 33 |
| Abbildung 23: | Oberleitungsinselanlage | 33 |
| Abbildung 24: | Stromversorgung für BEMU-Fahrzeuge an Oberleitungsinselanlage | 34 |
| Abbildung 25: | HEMU-Konzept | 35 |
| Abbildung 26: | Brennstoffzellen-Stack (Ballard Power) und Elektrolyseur (Siemens Silyzer 300) | 35 |
| Abbildung 27: | HEMU-Modelle iLINT 54 und Mireo-plus-H | 36 |
| Abbildung 28: | Konzept einer Wasserstoff-Tankstelle | 37 |
| Abbildung 29: | DMU Coradia LINT 41 | 38 |
| Abbildung 30: | HEMU Mireo-plus-H | 38 |
| Abbildung 31: | Oberleitungslücken der untersuchten Bahnlinien | 39 |
| Abbildung 32: | Nahverkehrslinien in Südthüringen (inkl. einiger Bushauptlinien) und mögliche Standorte für Schnellladestationen gemäß VDE-Analyse | 40 |
| Abbildung 33: | Nahverkehrslinien in Südthüringen (inkl. einiger Bushauptlinien) und Schnellladestandorte gemäß TLBV, inkl. möglicher Ladestandorte des RB 60 | 41 |
| Abbildung 34: | RE 7 Erfurt–Würzburg: Streckenverlauf und Schnellladestandorte sowie Lade- und Entladekurven | 42 |

| | | |
|---------------|--|----|
| Abbildung 35: | RB 41 Erfurt–Neuhaus a. R.: Streckenverlauf und Schnellladestandorte | 43 |
| Abbildung 36: | RB 40 Meiningen–Schweinfurt: Streckenverlauf und Schnellladestandorte | 44 |
| Abbildung 37: | RB 23 Erfurt–Saalfeld, RB 43 Wernshausen–Zella-Mehlis, RB 44 Erfurt–Meiningen, RB 46 Erfurt–Ilmenau: Strecken- verläufe und Schnellladestandorte | 45 |
| Abbildung 38: | RB 60 Rottenbach-Katzhütte: Streckenverlauf mit Lade- und Entladekurve für Schnellladestationen an End- und Anfangsbahnhof | 46 |
| Abbildung 39: | OBS Schwarzatalbahn (RB 60) mit einer Wasserstofftankstelle in Rottenbach und deren mögliche Lage nahe dem Bahnhof Rottenbach | 48 |
| Abbildung 40: | Layout einer möglichen Wasserstofftankstelle in Rottenbach | 49 |
| Abbildung 41: | Wasserstofftankstellen für den HEMU-Einsatz im Südthüringen- netz (inkl. Schwarzatalbahn) | 50 |
| Abbildung 42: | Technologie-spezifische Kostenpositionen bei volks- und be- triebswirtschaftlicher Betrachtung | 53 |
| Abbildung 43: | Resultierende Kapitalwerte der Fahrzeugsysteme mit Schwankungsbreiten für die Perspektiven 1a und 2 | 56 |
| Abbildung 44: | Südthüringennetz – Kapitalwerte in Relativdarstellung bezogen auf DMU (Perspektive 1a) | 57 |
| Abbildung 45: | Systemgrenzen der Ökobilanzierung für Züge mit alternativen Antrieben | 62 |
| Abbildung 46: | Linien des Südthüringennetzes | 72 |
| Abbildung 47: | Entwicklung der EEG-Umlage seit 2010 | 74 |
| Abbildung 48: | BMVI (BMDV)-Richtlinie zur Förderung alternativer Antriebe im Schienenverkehr | 76 |
| Abbildung 49: | Ermittlung der maximalen Förderbeträge für Fahrzeug- und Infra- strukturbeschaffung | 76 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-------------|---|----|
| Tabelle 1: | Übersicht der Bahnlinien im Untersuchungsraum | 12 |
| Tabelle 2: | Technische Daten zu BEMU-Fahrzeugen | 31 |
| Tabelle 3: | Technische Daten zu HEMU-Fahrzeugen | 36 |
| Tabelle 4: | Südthüringennetz – Resultierende Kapitalwerte im für DMU, EMU, BEMU und HEMU für Perspektiven 1a, 1b und 2 | 55 |
| Tabelle 5: | OBS-Schwarzatalbahn (RB 60) – resultierende Kapitalwerte für DMU, EMU, BEMU und HEMU | 59 |
| Tabelle 6: | Bei Fahrzeug- und Komponenten-Produktion freigesetzte CO ₂ -Mengen | 63 |
| Tabelle 7: | In Nutzungsphase freigesetzte CO ₂ -Mengen pro Zkm und Grünstrom-Anteile | 64 |
| Tabelle 8: | In Produktions- und Nutzungsphase freigesetzte CO ₂ -Mengen (szenarisch) | 65 |
| Tabelle 9: | Bepunktung der Basiskriterien und resultierende Benotungen der Hauptkriterien | 71 |
| Tabelle 10: | Auswertung der in der Nutzwertanalyse ermittelten Noten | 71 |
| Tabelle 11: | In der Stromrechnung enthaltene gesetzliche Abgaben und Steuern (Stand 01/2022) | 73 |
| Tabelle 12: | Entwicklung des Bahnstrom-Arbeitspreises seit 2017 | 75 |

VDE Verband der Elektrotechnik
Elektronik Informationstechnik e.V.

Merianstraße 28
63069 Offenbach am Main
Tel. +49 69 6308-0
service@vde.com
www.vde.com

VDE