

Katja Beckebans

Peter Gaffga

Steve Großer

Christian Voigt

Anke Zahn



**Strategien zur Elektrifizierung des
Schienenpersonennahverkehrsnetzes
in Thüringen**



**INSTITUT VERKEHR
UND RAUM**
der Fachhochschule Erfurt

Strategien zur Elektrifizierung des Schienenpersonennahverkehrsnetzes in Thüringen

Die vorliegende Arbeit ist als Projektbericht im Bachelor-Studiengang
Wirtschaftsingenieur/in Eisenbahnwesen entstanden und lediglich redaktionell
überarbeitet worden.

Bearbeitung: Katja Beckebans
 Peter Gaffga
 Steve Großer
 Christian Voigt
 Anke Zahn

Betreuung: Prof. Dr. Matthias Gather

September 2019

Institut Verkehr und Raum
Fachhochschule Erfurt
Altonaer Straße 25
D - 99085 Erfurt

Telefon: +49 (361) 6700 758
Fax: +49 (361) 6700 757
E-Mail: info@verkehr-und-raum.de
Internet: www.verkehr-und-raum.de

ISSN 1868-8586

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	II
Tabellenverzeichnis.....	III
Abkürzungsverzeichnis.....	IV
1 Einleitung.....	1
2 Analyse des bestehenden Eisenbahnnetzes in Thüringen.....	2
2.1 Die Organisation des Nahverkehrs in Thüringen.....	2
2.2 Beschreibung der vorhandenen Infrastruktur.....	2
2.3 Benennung der Umleiterstrecken.....	6
2.4 Bevorstehende Ausschreibungen.....	7
3 Mögliche Lösungen als Ersatz für ein Dieselnetz.....	8
3.1 Infrastrukturelle Lösungen.....	8
3.1.1 Konventionelle Elektrifizierung.....	9
3.1.2 Teilelektrifizierung.....	10
3.1.3 Stromschiene.....	11
3.1.4 Induktion.....	15
3.1.5 Magnetschwebbahn.....	16
3.2 Fahrzeuglösungen.....	17
3.2.1 Emissionsarme Fahrzeuglösungen.....	17
3.2.2 Emissionsfreie Fahrzeugkonzepte.....	19
4 Entscheidungsprämissen/Bewertungsverfahren.....	22
4.1 Infrastruktur.....	22
4.2 Fahrzeuge.....	22
4.3 Bewertung nach Strecken.....	23
4.4 Auswertung Energieverbräuche.....	24
4.4.1 CO ₂ -Emissionen und Strommix DB Energie.....	25
4.4.2 Grundannahmen Energieverbrauch/Schadstoffemissionen.....	26
4.4.3 CO ₂ -Emissionen im SPNV Thüringen im Jahr 2019.....	28
5 Meilensteinplan.....	30
5.1 Umsetzungsstrategie.....	30
5.2 Entwicklung der CO ₂ -Emissionen in Thüringen auf Basis des Bewertungsverfahrens.....	32
5.3 Betrachtung der Kosten je kg CO ₂ -Reduzierung.....	35
6 Zusammenfassung, Fazit und Ausblick.....	37
Literatur- und Quellenverzeichnis.....	38
Anhang.....	i
Anhangsverzeichnis.....	i

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Elektrifizierte Strecken in Thüringen.....	3
Abbildung 2: EVU auf dem Nahverkehrsstreckennetz in Thüringen.....	4
Abbildung 3: Darstellung der elektrifizierten Strecken mit Umleitungsfunktion	6
Abbildung 4: Infrastrukturelle Alternativen zum Dieselnetz	8
Abbildung 5: Oberleitungsanlage (mechanisch getrennte Bauweise)	9
Abbildung 6: Antriebskonzept EcoTrain eMode	10
Abbildung 7: Offenliegende Mittelschiene.....	12
Abbildung 8: Deckenstromschiene	13
Abbildung 9: Seitliche Stromschiene	14
Abbildung 10: Ladekonzept Induktion.....	15
Abbildung 11: Magnetschwebbahn System Bögl auf der Teststrecke.....	16
Abbildung 12: Fahrzeugseitige Lösungen.....	17
Abbildung 13: Stadler Citylink der Citybahn Chemnitz.....	19
Abbildung 14: Siemens Desiro Mainline als ÖBB Cityjet ECO	20
Abbildung 15: Alstom Coradia iLint.....	21
Abbildung 16: Darstellung des Zielzustands Thüringen 2050	24
Abbildung 17: DB Bahnstrommix 2018	25
Abbildung 18: CO ₂ -Emissionen im Jahr 2019 nach Linien	29
Abbildung 19: Meilensteinplan.....	30
Abbildung 20: Entwicklung des CO ₂ -Jahresausstoßes SPNV Thüringen.....	33
Abbildung 21: Entwicklung des CO ₂ -Jahresausstoßes SPNV Thüringen.....	34
Abbildung 22: Vergleich der Kosten pro kg CO ₂ -Einsparung	36
Abbildung 23: Darstellung der Ausschreibungen in Thüringen.....	ii
Abbildung 24: Kosten Neubau Oberleitungsanlage	iii
Abbildung 25: Variantenentscheidung	iv
Abbildung 26: Tabellarischer Meilensteinplan.....	v
Abbildung 27: Entwicklung CO ₂ -Emissionen 2019 bis 2050 in t – Los 2024	xi
Abbildung 28: Entwicklung CO ₂ -Emissionen 2019 bis 2050 in t – Los 2028a	xii
Abbildung 29: Entwicklung CO ₂ -Emissionen 2019 bis 2050 in t – Los 2028b	xiii
Abbildung 30: Entwicklung CO ₂ -Emissionen 2019 bis 2050 in t – Los 2030	xiv
Abbildung 31: Entwicklung CO ₂ -Emissionen 2019 bis 2050 in t – Los 2035	xv
Abbildung 32: Entwicklung CO ₂ -Emissionen 2019 bis 2050 in t – Los 2035b	xvi
Abbildung 33: Entwicklung CO ₂ -Emissionen 2019 bis 2050 in t – Los 2040	xvii
Abbildung 34: Entwicklung CO ₂ -Emissionen 2019 bis 2050 in t – E-Netz	xviii
Abbildung 35: Entwicklung CO ₂ -Emissionen 2019 bis 2050 in t – Rest.....	xix

Foto auf dem Deckblatt: Julius Uhlmann (2019)

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ausschreibungsnetze Schienenpersonennahverkehr nach Laufzeiten	7
Tabelle 2: Vorteile und Nachteile der konventionellen Elektrifizierung	9
Tabelle 3: Vorteile und Nachteile der Teilelektrifizierung	11
Tabelle 4: Vorteile und Nachteile der Stromschiene	14
Tabelle 5: Vorteile und Nachteile der Induktion	15
Tabelle 6: Vorteile und Nachteile der Magnetschwebebahn	16
Tabelle 7: Veränderung Anteil erneuerbare Energien am DB Bahnstrom	26
Tabelle 8: SPNV Linien Thüringen	vi
Tabelle 9: Auswertung und Berechnung CO ₂ -Ausstoß nach Linien	viii
Tabelle 10: Entwicklung CO ₂ -Emissionen 2019 bis 2050 in Tonnen	x
Tabelle 11: Aufstellung Kosten in € pro kg CO ₂ -Reduzierung	xx

Abkürzungsverzeichnis

Akku	Akkumulatoren
DSS	Deckenstromschiene
EVU	Eisenbahnverkehrsunternehmen
IH	Instandhaltung
Mio.	Million
NV	Nahverkehr
NVS	Nahverkehrservicegesellschaft Thüringen mbH
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
OL	Oberleitung
OLA	Oberleitungsanlage
S-Bahn	Stadtschnellbahn
SPNV	Schienenpersonennahverkehr
U-Bahn	Untergrundbahn

1 Einleitung

Auf der internationalen Klimakonferenz in Kyoto im Jahr 1997 wurden erstmals Klimaschutzziele festgelegt. Diese wurden im sogenannten Kyoto-Protokoll festgehalten. Das Protokoll sollte in Kraft treten, wenn mindestens 55 Staaten, die für 55 % der Treibhausgasemission verantwortlich sind, dieses für rechtskräftig befunden haben. Dies gelang erst im Jahr 2005. Das Ziel, die Abgaswerte im Vergleich zum Wert von 1990 im Zeitraum von 2008 bis 2012 um durchschnittlich 5 % weltweit zu reduzieren, wurde erfüllt.¹ Da das Kyoto-Protokoll 2020 ausläuft, wurde 2015 das Pariser Abkommen beschlossen.² Über 150 Staaten verpflichteten sich „die Weltwirtschaft auf klimafreundliche Weise zu verändern“.³ Im Pariser Abkommen wurden keine Zielwerte für die einzelnen Nationen festgelegt. Die im Abkommen geforderte Klimaschutzlangfriststrategie hat die Bundesrepublik Deutschland Ende 2016 im Klimaschutzplan 2050 präzisiert. Im Verkehrsbereich sollen in einem ersten Schritt die Treibhausgasemissionen bis 2030 um mindestens 40 % gegenüber 1990 reduziert werden.⁴

Vor diesem Hintergrund beschäftigt sich diese Arbeit mit der Variantenuntersuchung für einen vollständig CO₂-emissionsfreien Schienenpersonennahverkehr (SPNV) in Thüringen bis zum Jahr 2050. Dabei wird das gesamte Nahverkehrsnetz im Bundesland Thüringen betrachtet. Es werden Lösungen vorgestellt vor dem Hintergrund, dass einige Nahverkehrsstrecken ebenso als Umleiterstrecken für den Fern- oder Güterverkehr in Betracht kommen. In Bezug auf die Ausführungszeitpunkte der Umsetzung werden auch die anstehenden Ausschreibungen berücksichtigt. Es werden infrastrukturelle Lösungen und alternative Antriebstechnologien beschrieben und analysiert, auf welchen Strecken diese sinnvoll eingesetzt werden können. Dazu wurde ein Bewertungsverfahren entwickelt und die Energieverbräuche ermittelt. Der Meilensteinplan zeigt, in welchen Stufen der emissionsfreie SPNV bis 2050 in Thüringen gelingen kann.

¹ Vgl. BMU (2017a).

² Vgl. BMU (2017b).

³ Vgl. Ebenda.

⁴ Vgl. BMU (2017c).

2 Analyse des bestehenden Eisenbahnnetzes in Thüringen

In diesem Kapitel wird zunächst beschrieben, wie der Nahverkehr (NV) in Thüringen organisiert ist. Danach werden die vorhandene Infrastruktur mit Nennung der Umleiterstrecken beschrieben und die bevorstehenden Ausschreibungen in Thüringen betrachtet.

2.1 Die Organisation des Nahverkehrs in Thüringen

Nach dem Thüringer Gesetz über den öffentlichen Personennahverkehr ist der öffentliche Personennahverkehr (ÖPNV) eine Aufgabe der Daseinsvorsorge.⁵ In Thüringen fungieren die Landkreise und kreisfreien Städte als Aufgabenträger für den Straßenpersonennahverkehr und das Land als Aufgabenträger für den SPNV.⁶ Das Land Thüringen hat dazu die Nahverkehrsgesellschaft Thüringen mbH (NVS) gegründet. Sie hat eine übergreifende, ganzheitliche Funktion für die Koordinierung der ÖPNV-Angebote und für das Marketing des SPNV. Ebenso hat sie eine beratende Funktion für Kommunen, Ministerien und Nachbarländer. Die Aufgaben der NVS sind unter anderen die Planung und Weiterentwicklung des SPNV, die Infrastrukturplanung und die Durchführung von Ausschreibungen der Verkehrsleistungen. Die NVS verfolgt dabei das Ziel, eine „zeitgemäße Mobilität“⁷ zu gestalten und den „ÖPNV als attraktive Alternative zum Auto“⁸ zu festigen.⁹

2.2 Beschreibung der vorhandenen Infrastruktur

Das Streckennetz in der Bundesrepublik Deutschland im Bereich der Eisenbahn Bau- und Betriebsordnung umfasst insgesamt 38.466 km. Davon sind 20.726 km elektrifiziert, was in etwa einer Elektrifizierung von 54 % entspricht. Das Streckennetz des im Freistaat Thüringen umfasst 1.521 km, hiervon sind 452 km elektrifiziert.¹⁰ Neben der ICE-Neubau-Schnellfahrstrecke des „Verkehrsprojekts Deutsche Einheit 8“ von/nach (Berlin) Halle/Leipzig über Erfurt nach/von Nürnberg (München) findet noch auf wenigen ausgewählten Güterzugstrecken kein NV statt. Damit ergibt sich eine für den NV relevante Streckennetzlänge von rund 1.360 km. Diese teilt sich in 947 km Strecke ohne Oberleitung (OL) und 414 km mit OL auf. Damit sind in Thüringen lediglich 30 % der Strecken elektrifiziert, was damit deutlich unter der gesamtdeutschen Streckenelektrifizierung liegt.¹¹ Die Streckenkarte in der Abbildung 1 zeigt in Rot alle elektrifizierten Strecken und in Schwarz alle Strecken, die für den NV in

⁵ Vgl. ÖPNVG §2 (1).

⁶ Vgl. Ebenda §3 (1) 1. und 2.

⁷ Vgl. NVS (2019).

⁸ Vgl. Ebenda.

⁹ Vgl. Ebenda.

¹⁰ Vgl. STATISTISCHES BUNDESAMT (2018), S. 4.

¹¹ Vgl. DB NETZ AG (2018).

Thüringen von Bedeutung sind. Einzige Ausnahme ist die im dünnen rot dargestellte Neubau-Schnellfahrstrecke, auf der derzeit kein NV stattfindet. Die im dickeren Rot dargestellten Strecken haben neben dem NV auch Relevanz für den Schienenpersonenfern- und Schienengüterverkehr. Dazu zählen die folgenden aufgelisteten Strecken:

- Ost-West: Halle (S) – Großheringen – Erfurt – Gotha – Eisenach – Bebra
- Nord-Süd: Großheringen – Jena-Saalfeld – Saalfeld – Nürnberg sowie Sonneberg – Coburg
- Ost-West: Halle (S) – Nordhausen – Leinefelde – Arenshausen
- Nord-Süd: Magdeburg – Sangerhausen – Sömmerda – Erfurt sowie Leipzig – Altenburg – Gößnitz – Zwickau/Chemnitz.

Einzige elektrische Strecke ohne Fern- und Güterverkehrsrelevanz ist die Strecke Obstdfelderschmiede – Cursdorf.

Strecken, die ausschließlich dem Güterverkehr dienen, sind in Thüringen nicht elektrifiziert, werden in dieser Untersuchung nicht weiter betrachtet und sind deshalb in der Abbildung 1 nicht dargestellt.

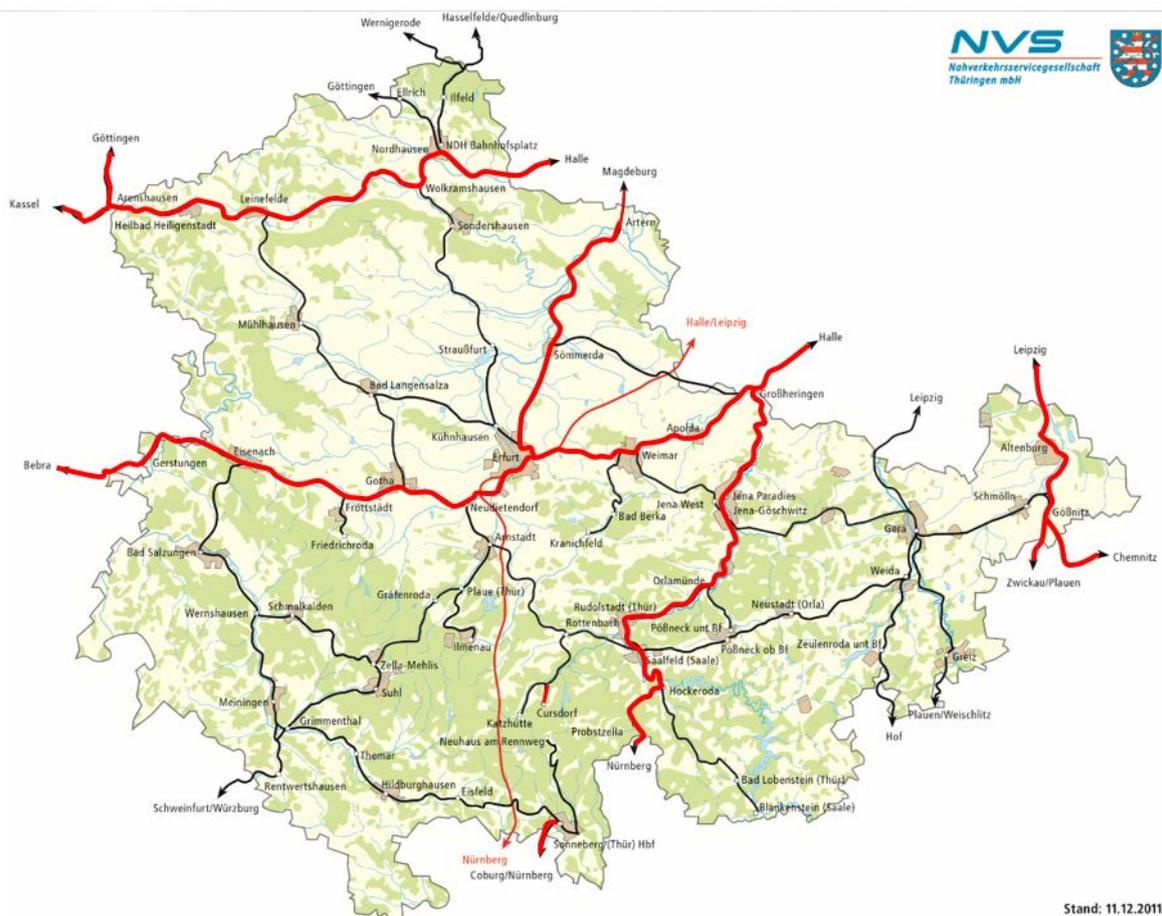


Abbildung 1: Elektrifizierte Strecken in Thüringen
Verändert nach: NVS (2011).

Weiterhin sind einige Strecken in Thüringen mit Neigetechnik für bogenschnelles Fahren ausgerüstet. Hier sind für den NV besonders die Strecken der Regionalexpressrelationen Glauchau – Gera – Erfurt – Gotha – Leinefelde – Göttingen und Erfurt – Arnstadt – Grimmenthal – Würzburg von großer Bedeutung, da diese schnellen Regionalexpresslinien mit ihren kurzen Fahrzeiten maßgebend für die betroffenen Nahverkehrskonzepte sind.¹² Dessen Bedeutung wird auch ersichtlich, da bereits im Bundesverkehrswegeplan 2030 die Strecken bzw. Streckenabschnitte 6307 Weimar – Gera-Tinz, 6383 Gera – Gera-Debschwitz, 6268 Gera-Debschwitz – Gößnitz und 6266 Abzweig Saara – Lehdorf für die Elektrifizierung bis 2030 vorgesehen sind. Weiterhin ist die Elektrifizierung der Strecke 6296 Gotha – Leinefelde im vordringlichen Bedarf angemeldet.¹³ Die nicht elektrifizierten Nahverkehrsstrecken in Thüringen sind hauptsächlich eingleisige Haupt- oder Nebenbahnen, die an elektrifizierte Hauptstrecken anschließen und im SPNV als Zubringerfunktion zu größeren Knoten dienen sowie für den Güterverkehr nur von geringer, beziehungsweise keiner Bedeutung sind.



Abbildung 2: EVU auf dem Nahverkehrsstreckennetz in Thüringen

Aus: THÜRINGER MINISTERIUM FÜR INFRASTRUKTUR UND LANDWIRTSCHAFT (2017).

¹² Vgl. DB NETZ AG (2019).

¹³ Vgl. BMVI (2019).

Wie die Abbildung 2 zeigt, verkehren in Thüringen im Fahrplanjahr 2019 acht verschiedene Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) auf dem gesamten Nahverkehrsstreckennetz. Dabei werden die elektrischen Linien ausschließlich von Abellio, DB Regio AG und Cantus betrieben, während die Verkehrsleistung der Diesel-Linien durch DB Regio AG, Südthüringenbahn, Erfurter Bahn und im geringen Maße durch die Vogtlandbahn, die Erzgebirgsbahn sowie die Schwarzatalbahn erbracht werden. Hier erfolgte teilweise eine Spezialisierung der Unternehmen auf eine Traktionsart. Darüber hinaus ist in Thüringen der Einsatz der leichten und vergleichsweise spurtstarken Regioshuttle weit verbreitet, so dass bei der Auswahl von alternativen Fahrzeugen die Durchführbarkeit der aktuellen Fahrplankonzepte berücksichtigt werden sollte. Im Vergleich zur Abbildung 1 wird deutlich, dass vier Streckenabschnitte der bereits elektrifizierten Strecken von unterschiedlichen EVU auch bei der Traktionsart im Mischverkehr befahren werden. So kommt es, dass alleine in Thüringen knapp 16 % der Laufwege dieselbetriebener Linien unter Oberleitung stattfinden.¹⁴ In diesem Bereich liegt zum Teil großes Potenzial zur Schadstoffausstoßverringering vor, welches im Kapitel 5.2 näher beleuchtet wird.

¹⁴ Vgl. DB NETZ AG (2019).

2.3 Benennung der Umleiterstrecken

In der folgenden Abbildung 3 sind die Umleiterstrecken grafisch dargestellt.

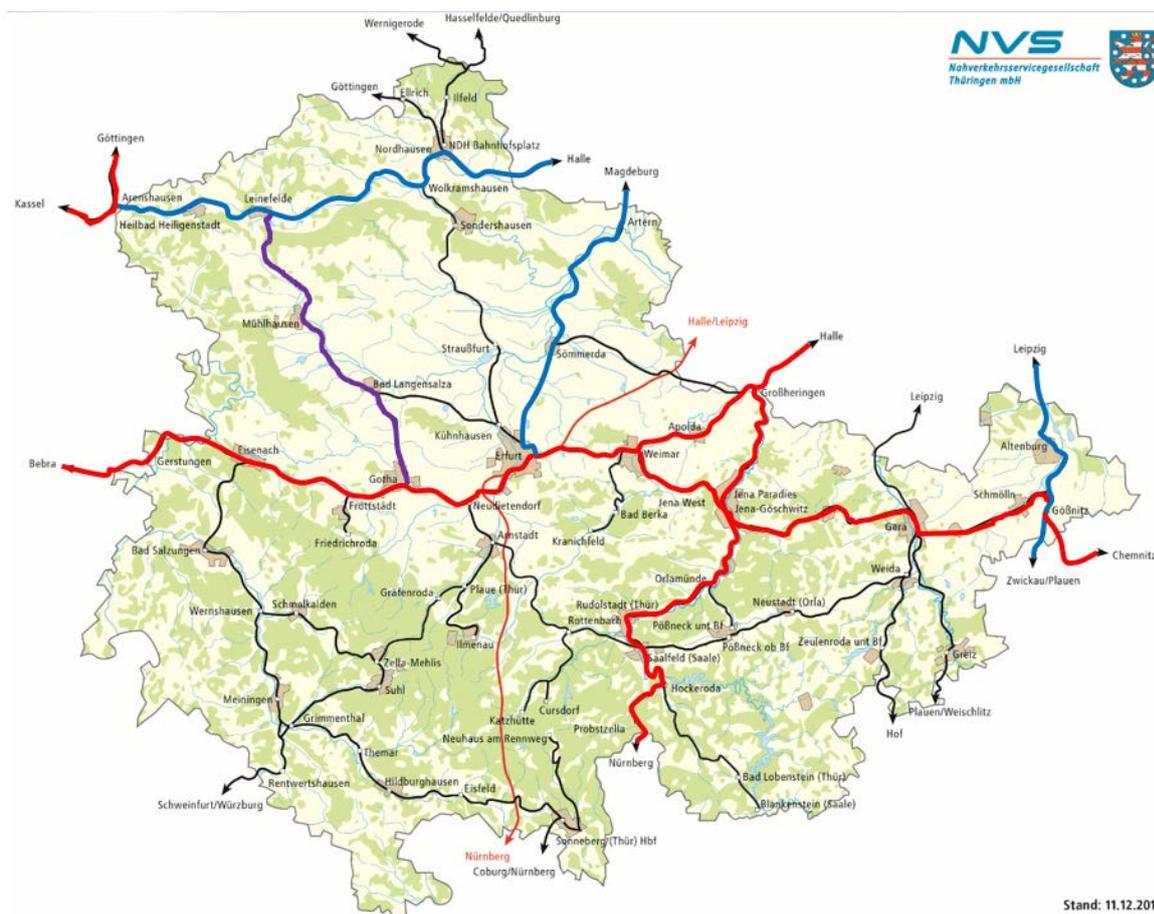


Abbildung 3: Darstellung der elektrifizierten Strecken mit Umleitungsfunktion
Verändert nach: NVS (2011).

In Rot sind die Strecken markiert, auf denen planmäßig Fernverkehr stattfindet bzw. mit der Fernverkehrsoffensive stattfinden wird. Die Schnellfahrstrecke ist wieder mit der dünnen roten Linie markiert. Die in blau dargestellten Strecken dienen derzeit als Umleiterstrecken für den Schienenpersonenfernverkehr bzw. Schienengüterverkehr. Nach den Elektrifizierungsmaßnahmen des Bundes aus dem vordringlichen Bedarf steht die Strecke Gotha – Leinefelde als Umleiterstrecke vor allem für den Schienengüterverkehr neu zur Verfügung. Außerdem wird nach der Elektrifizierung der Mitte-Deutschland-Verbindung der derzeit dieselbetriebene Fernverkehr der Relation Kassel – Erfurt – Gera im Abschnitt Gotha – Gera durchgängig bis Chemnitz elektrisch betrieben, verlängert und verdichtet¹⁵.

¹⁵ Vgl. DB AG (2015).

2.4 Bevorstehende Ausschreibungen

Der thüringische SPNV mit seinen vielzähligen Linien ist in verschiedenen Ausschreibungsnetzen organisiert. Dabei besitzen die jeweiligen Ausschreibungsnetze unterschiedliche Geltungszeiträume. Damit wird zum einen der Aufwand zur Erstellung der Ausschreibungskonzepte und -unterlagen verringert, zum anderen bekommen auch kleinere EVU die Möglichkeit sich auf die einzelnen Ausschreibungen zu bewerben. In der Tabelle 1 sind die Ausschreibungsnetze nach dem Laufzeitende chronologisch und in der Abbildung 22 (Anhang 1) grafisch dargestellt. In den kommenden Jahren stehen vor allem die Ausschreibungen im Bereich der Mitte-Deutschland-Verbindung an. Besonders beim Neigetech-Netz Thüringen lohnt eine Neuausschreibung für eine Dauer von in der Regel 15 Jahren bei der bevorstehenden Elektrifizierungsmaßnahme nicht. Hier sind Direktvergaben der Verkehrsleistung bis zur Fertigstellung der Elektrifizierung angedacht.¹⁶

Auch sind durch die Umsetzung der im Kapitel 4.3 vorgeschlagenen Lösungsmöglichkeiten, die Ausschreibungsnetze teilweise neu zu organisieren und zusammenzustellen. Dennoch wurden bei der Betrachtung der Lösungsmöglichkeiten zum elektrischen Betrieb des NV auch die Laufzeiten und Ausschreibungstermine der einzelnen Ausschreibungsnetze mitberücksichtigt.

Tabelle 1: Ausschreibungsnetze Schienenpersonennahverkehr nach Laufzeiten

Ausschreibungsnetz	Linien	Ausschreibungszeitraum	
		von	bis
Oberweißbacher Bergbahn und Schwarzatalbahn		2002	2031
Saale-Thüringen-Südharz (STS)	RE 16, RE 9, RE 19, RB 59, RB 51, RB 20, RB 50, RB 25, RE 15	2015	2030
Dieselnetz Südthüringen	STB 41, STB 44, STB 48, STx 45, STx 50,	2017	2028
Vogtlandnetz	RB 4	2012	2027
Kissinger Stern	EB 40	2014	2026
Dieselnetz Nordthüringen	RE 2, RB 52, RB 53, RB 55/56	2013	2025
MDSB 1	S5, S5x	2013	2025
Dieselnetz Ostthüringen	Ebx 12, EB 22, Ebx 13, EB 13, EB 32, EB 28, EB 23, EB 21, EB 26, EB 46	2012	2024
Sommerda-Buttstädt	EB 80	2017	2024
IC Zugpaare MDV	IC 51 als Ersatz für RE 3	2019	2023
Halle - Jena	RE 18	2018	2023
E-Netz Franken	RE 42, RB 42,	2011	2023
Neitech-Netz Thüringen	RE 1, RE 3, RE 7	2016	2021
Glauchau - Gößnitz	RB 37a	2018	2021

In Anlehnung an: DB NETZ AG (2016a).

¹⁶ Vgl. EURAILPRESS (2019).

3 Mögliche Lösungen als Ersatz für ein Dieselnetz

Dieses Kapitel soll einen Überblick über die möglichen Alternativen zu einem dieselbetriebenen Streckennetz geben. Hierzu wird das Augenmerk auf infrastrukturelle und fahrzeugtechnische Lösungen gelegt. Es zeigt deren Potentiale, aber auch Schwächen. Diese bilden eine Entscheidungsgrundlage für den zukünftigen Investitionseinsatz auf Thüringens Nahverkehrsstrecken.

3.1 Infrastrukturelle Lösungen

Im Folgenden werden infrastrukturelle Maßnahmen dargestellt, die einen Ersatz des Dieselbetriebes darstellen und zur Minderung von Emissionen führen. Abbildung 4 gibt eine Übersicht, welche denkbar wären, und erläutert diese im Rahmen des Kapitels.

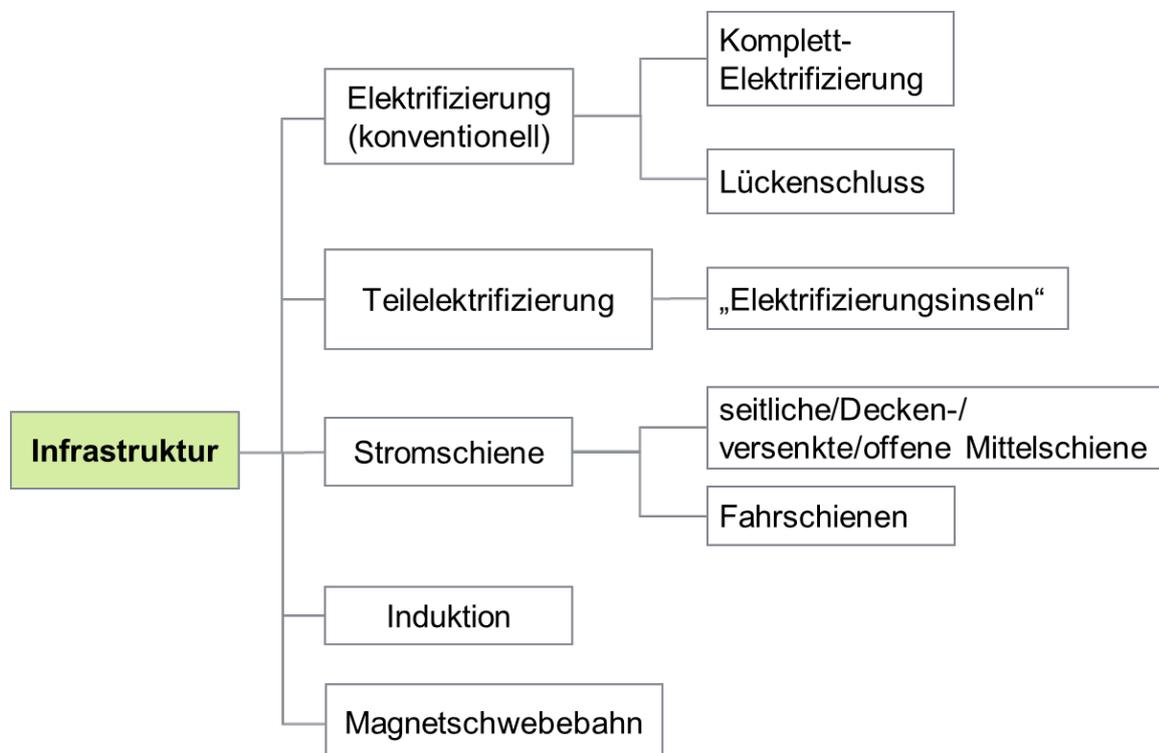


Abbildung 4: Infrastrukturelle Alternativen zum Dieselnetz

Eigene Darstellung.

3.1.1 Konventionelle Elektrifizierung

Unter diesem Begriff versteht man die Ausrüstung von Strecken mit Oberleitungsanlagen (OLA) für elektrische Bahnen. Abbildung 5 stellt einen groben Aufbau einer solchen OLA dar.

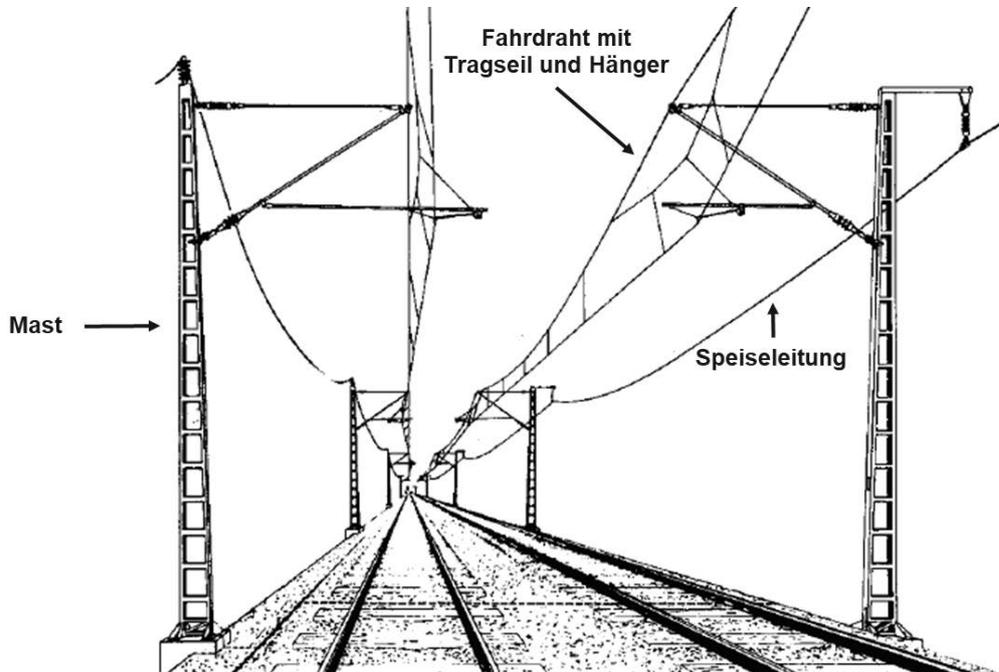


Abbildung 5: Oberleitungsanlage (mechanisch getrennte Bauweise)

Verändert nach: DB NETZ AG (2001), S. 4.

Weitere Anlagen, die im Zuge einer Elektrifizierung benötigt werden, sind Kraftwerke, Umformer-/Umrichterwerke und Unterwerke. Dabei kommt in Deutschland das elektrische Bahnsystem 15 kV Wechselstrom; 16,7 Hz zur Anwendung. Je nach gegebenen Rahmenbedingungen können Strecken vollständig elektrifiziert oder Lückenschlüsse realisiert werden.

Tabelle 2: Vorteile und Nachteile der konventionellen Elektrifizierung

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Umweltvorteil (emissionsfreies Fahren, Lärmreduzierung) ➤ Effizienzsteigerung (Reduzierung Transportkosten und Lokwechsel, Fahrzeitverkürzung) ➤ Kapazitätserhöhung durch Fahrzeitvorteile ➤ erhöhte Flexibilität (Umleitungs- und Ausweichstrecken) ➤ Energierückgewinnung ➤ Sicherheit gegen versehentliches Berühren 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Störanfälligkeit der OL infolge Naturgewalten ➤ hohe Erstellungskosten (OLA, Infrastruktur zur Energieerzeugung und -verteilung) ➤ Instandhaltungskosten (IH-kosten) OLA und weitere Anlagen ➤ Übertragungsverluste

Eigene Darstellung.

Kosten:

Die Kosten für den Neubau einer OLA (bis Bauform Re 200) beträgt laut Kostenkennwertekatalog der Deutschen Bahn AG bei 1 km Strecke 225.000 € und bei einem Bahnhof zusätzlich 50.000 €¹⁷, exklusive weiterer Kosten, wie z. B. Mastgründungen etc. Die Kosten zur Erstellung der Infrastruktur wie Umformer- bzw. Umrichterwerke und Unterwerke können nicht allgemein ermittelt werden. Jedoch aus bereits erstellten Referenzprojekten¹⁸ lassen sich diese zumindest millionenscharf beziffern. Können an eine bereits vorhandene Infrastruktur weitere Anlagen angeschlossen werden, lassen sich die Kosten reduzieren. Erfahrungswerte bei der DB AG errechnen einen Kilometer neu erstellte OL mit ca. 1.000.000 €

3.1.2 Teilelektrifizierung

Ein weiterer Ansatz bei Dieselstrecken zur Reduzierung der Emissionen ist die Teilelektrifizierung, die Schaffung sogenannter „Elektrifizierunginseln“. An dieser Stelle werden OL mit hybriden Triebfahrzeugen, wie in Abbildung 6 dargestellt, kombiniert. Das hierbei aufgezeigte Modell ist die umweltfreundlichste Variante.

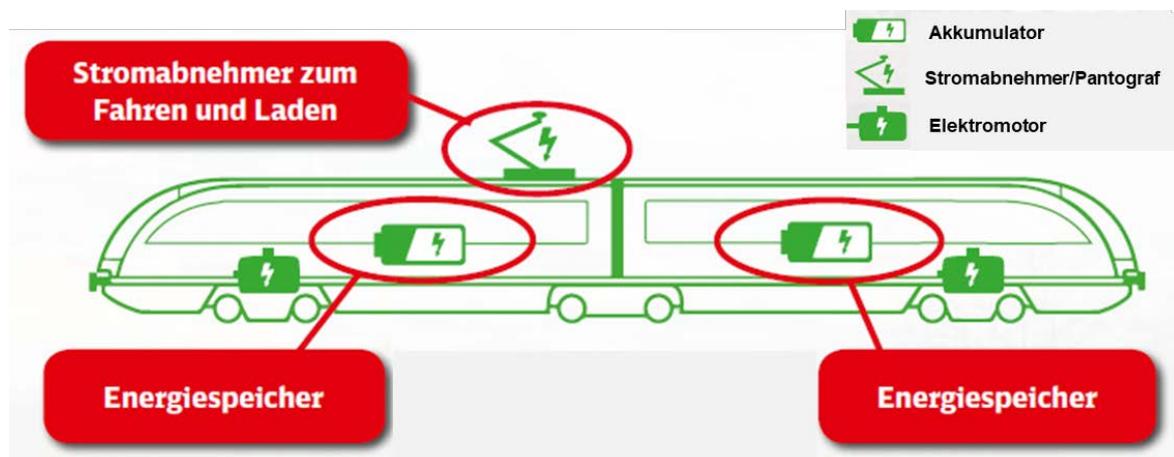


Abbildung 6: Antriebskonzept EcoTrain eMode

Verändert nach: DB REGIO AG (2018), S. 11.

Das Prinzip der hybriden Fahrzeuge mit Akkumulatoren (Akku) besteht darin, dass die Energiespeicher entweder im Bahnhof mit OL oder durch anteiliges Fahren unter OL aufgeladen werden.¹⁹ Derzeit erreichen die Akkus eine Reichweite von durchschnittlich 40 km²⁰, jedoch werden Bestrebungen seitens der Industrie unternommen 60-80 km²¹ und sogar

¹⁷ Vgl. Anhang 2.

¹⁸ Vgl. GTB-BERLIN (2019).

¹⁹ Vgl. DB REGIO AG (2018), S. 12.

²⁰ Vgl. WEKA FACHMEDIEN (2018).

²¹ Vgl. DB REGIO AG (2018), S. 11.

100 km²² zu erzielen. Fahrzeuge wie der Elektro-Diesel-Hybrid nutzen das Fahren unter OL einzig zur Kraftstoffersparnis und Lärmreduzierung (vgl. Kap. 3.2.1.3)

Tabelle 3: Vorteile und Nachteile der Teilelektrifizierung

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Umweltvorteil (emissionsreduzierendes bis emissionsfreies Fahren, Lärmreduzierung) ➤ Effizienzsteigerung (Reduzierung Transportkosten und Lokwechsel, Fahrzeitverkürzung) ➤ Kapazitätserhöhung durch Fahrzeuvorteile ➤ Energierückgewinnung 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ eingeschränkte Flexibilität (keine Elektrofahrzeuge ohne internen Energiespeicher, als Umleitungs- und Ausweichstrecken) ➤ hohe Erstellungskosten (OLA, Infrastruktur zur Energieerzeugung und -verteilung) ➤ Störanfälligkeit der OL infolge Naturgewalten ➤ IH-kosten OLA und weitere Anlagen

Eigene Darstellung.

Kosten:

Wie in Kapitel 3.1.1 bereits erläutert, fallen auch bei einer Teilelektrifizierung die gleichen km-Kosten für den Neubau eine OLA und deren Infrastruktur zur Energieerzeugung und Energieverteilung an.

3.1.3 Stromschiene

Neben der OL gibt es noch ein zweites Bahnsystem, die Stromschiene. Diese kann in seitliche Stromschiene, versenkte und offenliegende Mittelschiene und Deckenstromschiene unterteilt werden. Auch die Nutzung der paarigen Fahrschienen ist eine Variante der Stromschiene.

- Nutzung der paarigen Fahrschiene

Aufgrund von einer Vielzahl von Nachteilen, wie Probleme an Überwegen beim Betreten beider Schienen gleichzeitig oder Probleme bei Ableitungen ins Erdreich, kommt dieses System im Bahnbetrieb nicht mehr zum Einsatz.²³

- versenkte und offenliegende Mittelschiene

Das System der versenkt liegenden Stromschiene wird lediglich von der Wuppertaler Schwebbahn genutzt. Die versenkte Mittelschiene fand Anwendung bei Straßenbahnen, jedoch nie bei den Eisenbahnen des Bundes. Angesichts der Komplexität, dem hohen Wartungsaufwand und den Problemen bei Eis und Schnee wurde die Technik aufgegeben.²⁴

²² Vgl. WEKA FACHMEDIEN (2018).

²³ Vgl. WIKIMEDIA FOUNDATION INC. (2019).

²⁴ Vgl. Ebenda.

Die offenliegende Mittelschiene wird hauptsächlich bei Straßen- und Untergrundbahnen (U-Bahn) genutzt. Beispielhaft für das System zeigt Abbildung 7 ein Foto der London Underground.



Abbildung 7: Offenliegende Mittelschiene
Aus: WIKIMEDIA FOUNDATION INC. (2014).

Deren System besteht aus zwei Stromschienen, die mit Gleichstrom betrieben werden.²⁵ Dieses System hat sich in Deutschland nicht durchgesetzt.

²⁵ Vgl. WIKIMEDIA FOUNDATION INC. (2019).

- Deckenstromschiene (DSS)

Die DSS ist ein Teilstück der OL. Sie wird bei Tunnelbauwerken mit beengten räumlichen Verhältnissen und zwischen Tunnelabschnitten zur Vermeidung mehrfachen Wechsels der Fahrleitungsbauart verwendet.²⁶



Abbildung 8: Deckenstromschiene
Aus: FURRER+FREY AG (2012), S. 4.

- seitliche Stromschiene

„Die Stromschiene verläuft [...] [seitlich] außerhalb des Gleises und oberhalb der Schienenoberkante, parallel zu den Fahrschienen.“²⁷

Diese Art Stromschiene ist bei U-Bahnen weit verbreitet und lässt sich, wie die folgende Abbildung 9 zeigt, auch bei Stadtschnellbahnen (S-Bahn) anwenden. In Deutschland wird die S-Bahn Berlin und S-Bahn Hamburg unter Einsatz eigens dafür konstruierter Fahrzeuge mit diesem Stromschiensystem geführt. Seitliche Stromschienen werden mit Gleichstrom

²⁶ Vgl. RAIL POWER SYSTEMS (2016), S. 2.

²⁷ FENDRICH (2007), S. 438.

unterschiedlicher niedriger Spannungen betrieben.²⁸ Die zulässige Höchstgeschwindigkeit der S-Bahn Berlin und Hamburg beträgt 100 km/h.^{29 30}



Abbildung 9: Seitliche Stromschiene
Aus: STÖCKMANN (2017).

Tabelle 4: Vorteile und Nachteile der Stromschiene

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Umweltvorteil (emissionsfreies Fahren, Lärmreduzierung) ➤ Konstruktion bedarf geringen Platzbedarf; keine Lichtraumprofilerweiterung nach oben ➤ geringe Übertragungsverluste 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ hohe Erstellungskosten (Stromschieneanlage, Infrastruktur zur Energieerzeugung und -verteilung) ➤ gesonderte Schwellen (Bockschwellen) ➤ IH-kosten Stromschiene- und weitere Anlagen ➤ Inflexibilität (kein Mischbetrieb, keine Ausweich- und Umleiterstrecken) ➤ Gefahr versehentlicher Berührungen

Eigene Darstellung.

Kosten:

Die Kosten für eine Stromschieneanlage inkl. spezieller Schwellen werden mit 850.000 € pro km bemessen und entsprechen somit in ihrer Erstellung annähernd den Kosten pro km einer OLA. Wie bei der Teil- und Komplett-Elektrifizierung müssen ebenso bei der seitlichen Stromschiene die Anlagen zur Energieerzeugung und -verteilung erstellt werden.

²⁸ Vgl. Ebenda, S. 439.

²⁹ Vgl. DB NETZ AG (2009), S. 1.

³⁰ Vgl. S-BAHN HAMBURG (2017).

3.1.4 Induktion

Das Konzept des emissionsfreien Fahrens durch Induktionsladung ist der Teilelektrifizierung ähnlich. Hierbei werden punktuell oder partiell ausgelegte Induktionsschleifen im Fahrweg mit fahrzeugseitig verbauten Energiespeichern kombiniert. Durch induktive Energieübertragung kann je nach Auslegung in Bahnhöfen, Endbahnhöfen oder auf Streckenabschnitten die Akkus geladen werden. Derzeit befindet sich das Antriebskonzept in der Forschung.³¹



Abbildung 10: Ladekonzept Induktion

Aus: DLR (2019).

Tabelle 5: Vorteile und Nachteile der Induktion

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Umweltvorteil (emissionsfreies Fahren, Lärmreduzierung) ➤ Konstruktion bedarf geringen Platzbedarf 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Punktuell hohe Erstellungskosten (Induktionsschleifen, Infrastruktur zur Energieerzeugung und -verteilung) ➤ IH-kosten Induktionsschleifen und weitere Anlagen ➤ eingeschränkte Flexibilität (keine Elektrofahrzeuge, als Ausweich- und Umleiterstrecken) ➤ nicht ausreichend erprobt

Eigene Darstellung.

Kosten:

Da sich das Antriebskonzept erst in Forschung befindet, können zum heutigen Zeitpunkt über die zukünftigen Kosten keine Aussagen getroffen werden.

³¹ Vgl. DLR (2019).

3.1.5 Magnetschwebebahn

Eine weitere infrastrukturelle Lösungsmöglichkeit ist die Technologie der Magnetschwebebahn. Durch magnetische Kräfte wird das Fahrzeug angetrieben, verzögert und in der Schwebelage gehalten. Aktuelle Entwicklungen der Firma Bögl im Bereich Fahrwegsegmente, Fahrzeuge und Betriebstechnik realisierten ein neues Gesamtsystem für den NV, ausgelegt für eine max. Geschwindigkeit von 150 km/h und einer Streckenlänge von 5-30 km. Gegenwärtig befindet sich die Technologie in der Testphase.³²



Abbildung 11: Magnetschwebebahn System Bögl auf der Teststrecke
Aus: DLR (2019).

Tabelle 6: Vorteile und Nachteile der Magnetschwebebahn

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Umweltvorteil (emissionsfreies Fahren, Lärmreduzierung) ➤ Konstruktion bedarf geringen Platzbedarf 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Erstellungskosten (gesonderte Infrastruktur, Infrastruktur zur Energieerzeugung und -verteilung) ➤ IH-kosten für Energieanlagen ➤ Inflexibilität (kein Mischbetrieb, keine Ausweich- und Umleiterstrecken)

Eigene Darstellung.

Kosten:

Die Technik befindet sich in der ersten Testphase auf dem Firmengelände, eine zweite Testphase auf einer eigens angelegten Teststrecke in China soll folgen. Derzeitig können über jegliche Kosten keine Aussagen getroffen werden.

³² Vgl. VDI Verlag (2018).

3.2 Fahrzeuglösungen

Neben den infrastrukturellen Möglichkeiten gibt es auch fahrzeugseitige Lösungen, um jenseits der Stromversorgung unter einem Fahrdrabt einen CO₂-armen beziehungsweise CO₂-freien SPNV umzusetzen.

In der nachfolgenden Übersicht werden die neben den derzeitigen vollelektrischen Fahrzeugen bestehenden Fahrzeugtypen in diese zwei Varianten unterschieden.

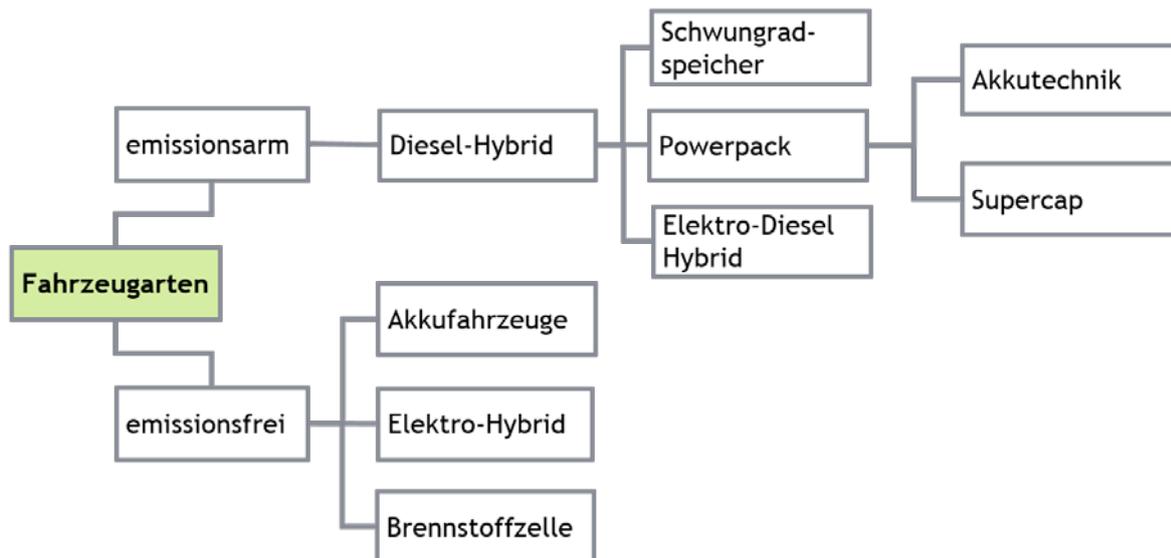


Abbildung 12: Fahrzeugseitige Lösungen
Eigene Darstellung.

In den folgenden Kapiteln werden die einzelnen Fahrzeugkonzepte näher dargestellt.

3.2.1 Emissionsarme Fahrzeuglösungen

Aktuell sind nur wenige emissionsfreie Fahrzeuge am Markt verfügbar. Um zeitnah eine wirksame Reduzierung der CO₂-Emissionen zu erreichen, können bestehende Dieselfahrzeuge genutzt und durch Hybridisierung eine Schadstoffreduzierung erreicht werden. Hybridisierung ist die Kombination zweier Antriebskonzepte, wie z. B. Diesel- und Elektroantrieb und bedeutet im vorliegenden Fall die Ergänzung der bestehenden Verbrennungsfahrzeuge durch Elektroantriebe bzw. Energiespeicher. In den nachfolgenden Abschnitten werden diese Fahrzeugkonzepte näher erläutert.

3.2.1.1 Diesel-Hybrid mit Schwungradspeicher

Im Jahr 2000 wurde durch den Hersteller Alstom der Coradia LIREX präsentiert. Dieses innovative Fahrzeug konnte je nach Einsatzzweck mit verschiedenen Antriebsvarianten bestückt werden. Unter anderem sollte auch eine Diesel-Hybrid-Variante mit

Schwungradspeicher zum Einsatz kommen. Weiterhin konnte schon beim Bau des Fahrzeugs in erheblichem Maße CO₂ eingespart werden, da sämtliche Innenverkleidungen aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt wurden. Allerdings kam dieses Fahrzeug nicht über den Status eines Versuchsträgers hinaus und wurde 2006 abgestellt.³³

3.2.1.2 Diesel-Hybrid mit Powerpack

Bei diesen Fahrzeugen wird der Dieselmotor durch einen Elektromotor unterstützt, um über diesen Weg CO₂-Emissionen zu minimieren. Die Energie für den Elektromotor wird über einen Akku bzw. durch einen sogenannten Supercap bereitgestellt. Bei dem Supercap handelt es sich um einen Kondensator mit sehr hoher Kapazität. In diesem Kondensator kann z. B. zurückgewonnene Bremsenergie gespeichert und beim Anfahren wieder zugeführt werden. Der Vorteil ist eine schnelle Energieaufnahme und damit kurze Ladezeiten. Der Nachteil ist die im Vergleich zur Akku-Technik deutlich geringere Speicherkapazität.³⁴ Im Jahr 2012 wurde auf der Eisenbahn-Messe „Innotrans“ in Berlin ein erster Prototyp auf Basis der Baureihe 642, eines Desiro Classic von Siemens, vorgestellt. Bei diesem Fahrzeug handelte es sich nicht um ein Neufahrzeug, sondern um den Umbau eines vorhandenen Desiro im DB Werk Nürnberg.³⁵ Das Fahrzeug sollte nach der Messe auf der Westfrankenbahn zwischen Aschaffenburg und Miltenberg getestet werden, was aber an der fehlenden Zulassung scheiterte. Letztlich übernahm die Erzgebirgsbahn den Prototypen und baute die Hybridtechnik wieder zurück.³⁶ Allerdings wurde auf Basis dieses Fahrzeuges das Ecotrain-Konzept der Erzgebirgsbahn entwickelt, welches eine Weiterentwicklung des 2012 vorgestellten Hybridkonzeptes darstellt. Aktuell befinden sich Fahrzeuge aus diesem Projekt im Aufbau. Allerdings verzögert sich die Einführung der Fahrzeuge auf Grund von Softwareproblemen voraussichtlich bis 2020.³⁷

3.2.1.3 Elektro-Diesel-Hybrid

Bei dieser Fahrzeugart handelt es sich um einen Elektrotriebwagen, der aber zusätzlich mit einem Dieselmotor ausgestattet ist. So kann das Fahrzeug sowohl unter der OL verkehren als auch Strecken ohne OL befahren. Ein Beispielfahrzeug aus diesem Segment ist der Stadler Citylink, welcher unter anderem von der Citybahn Chemnitz seit 2016 erfolgreich eingesetzt wird.³⁸

³³ Vgl. TU DRESDEN (2014).

³⁴ Vgl. WIRTSCHAFTSWOCHE (2015).

³⁵ Vgl. BAHN EXTRA (2019).

³⁶ Vgl. FREIE PRESSE (2015).

³⁷ Vgl. LAUSITZER RUNDSCHAU ONLINE (2018).

³⁸ Vgl. CHEMNITZER MODELL (2016).



Abbildung 13: Stadler Citylink der Citybahn Chemnitz
Aus: CHEMNITZER MODELL (2019).

3.2.2 Emissionsfreie Fahrzeugkonzepte

Neben den vorgestellten emissionsarmen Fahrzeugkonzepten drängen immer mehr Hersteller auch mit komplett emissionsfreien Fahrzeugen auf den Markt, wobei sich das Thema Emissionsfreiheit hier auf die lokale Emissionsfreiheit bezieht. Da alle vorgestellten Fahrzeuge mit Elektroenergie betrieben werden, ist letztlich ausschlaggebend, wie die Traktionsenergie erzeugt wird.

3.2.2.1 Akkufahrzeuge

Akku-Fahrzeuge sind keine neue Erfindung. Bereits in den Jahren um 1900 wurden die ersten Fahrzeuge mit dieser Antriebstechnik vorgestellt. In den Jahren um 1950 wurden dann die Fahrzeuge der Baureihe 515 vorgestellt, die durch die Bundesbahn mit einer Stückzahl von 232 Triebwagen in der Zeit von 1954 bis 1965 beschafft und auf verschiedenen Strecken in ganz Westdeutschland bis zur Ausmusterung des letzten Fahrzeuges 1996 eingesetzt wurden. Die Vorteile dieses Fahrzeugkonzeptes sind die Unabhängigkeit von der OL und die im Vergleich zu Dieselfahrzeugen deutlich geringere Lärmemission. Nachteile sind die begrenzte Reichweite (ca. 300 km bei der Baureihe 515) und die Pausen zur Wiederaufladung der Fahrzeuge.³⁹

³⁹ Vgl. SCHIENENFAHRZEUGTAGUNG (2014).

3.2.2.2 Elektro-Hybrid Fahrzeuge

Da in vielen Regionen Strecken existieren, die nur teilweise elektrifiziert sind, wurde der Ruf nach neuen Fahrzeugen für diese Einsatzbedingungen immer lauter. Zurzeit werden diese Strecken mit Dieselfahrzeugen befahren, auch wenn diese dann zu großen Teilen unter der bestehenden OL verkehren.

Die Lösung für diese Strecken heißt Elektro-Hybrid. Dabei handelt es sich um Fahrzeuge, die unter der OL als elektrisches Triebfahrzeug verkehren. Ist keine OL vorhanden, nutzen diese Fahrzeuge einen eingebauten Akku, um diese Strecken zu bewältigen. Ist dann wieder OL vorhanden, wird diese auch genutzt, um den Akku wieder aufzuladen.⁴⁰ Zurzeit sind drei große Hersteller auf diesem Markt aktiv und versuchen die Kunden mit ihren Fahrzeugkonzepten zu überzeugen. Die Firma Bombardier bietet den Talent 3 an, die Firma Siemens den Desiro Mainline und die Firma Stadler den FLIRT Akku. Alle Fahrzeuge befinden sich aktuell im Probetrieb bzw. haben bereits eine Zulassung für den Betrieb in Deutschland. Was die Reichweite ohne OL angeht, sprechen die Hersteller aktuell von 40 km (Talent 3)⁴¹ bis 80 km (FLIRT Akku). Eine Reichweite von 100 km wird allerdings angestrebt. Somit kann ein solches Fahrzeug rund 80 % des deutschlandweiten Streckennetzes abdecken.⁴²



Abbildung 14: Siemens Desiro Mainline als ÖBB Cityjet ECO

Aus: SIEMENS AG (2019).

⁴⁰ Vgl. ALLIANZ PRO SCHIENE (2018).

⁴¹ Vgl. WIRTSCHAFTSWOCHE (2018).

⁴² Vgl. LOK-REPORT (2018).

3.2.2.3 Brennstoffzellen-Fahrzeuge

Eine dritte Variante des emissionsfreien Verkehrs kann der Antrieb mit einer Brennstoffzelle darstellen. Aktuell gibt es hier ein Fahrzeug auf dem Markt, das die Zulassung des Eisenbahn-Bundesamts hat und sich im Probetrieb befindet. Es handelt sich hierbei um den Coradia iLint des Herstellers Alstom. Bei diesem Zug wird die Traktionsenergie durch zwei Brennstoffzellen erzeugt. Durch die Reaktion von Wasserstoff mit dem Luftsauerstoff entsteht elektrische Energie. Als Abfallprodukt dieser Reaktion entsteht lediglich Wasserdampf. Da die Brennstoffzellen jeweils nur eine Leistung von 200 kW haben, die Motoren aber 800 kW Leistung abgeben, braucht das Fahrzeug zusätzlich Lithium-Ionen-Akkus, welche bei Bremsungen bzw. konstanter Fahrt geladen werden. Diese unterstützen die Brennstoffzellen bei der Beschleunigung des Fahrzeugs, indem sie zusätzliche elektrische Energie bereitstellen.⁴³

Neben dem Betrieb des eigentlichen Fahrzeugs muss auch auf Seiten der Infrastruktur angepasst werden. Es wird ein spezielles Tankstellennetz benötigt, welches extra für den Betrieb des Zuges aufgebaut werden muss. Alstom hat hier die Firma Linde als Partner für die Herstellung und Bereitstellung des benötigten Wasserstoffs sowie der Tankinfrastruktur gewinnen können.⁴⁴



Abbildung 15: Alstom Coradia iLint
Aus: ALSTOM (2019).

⁴³ Vgl. GOLEM.DE (2018).

⁴⁴ Vgl. UMWELTMAGAZIN (2018).

4 Entscheidungsprämissen/Bewertungsverfahren

Verkehrspolitische Ziele der Bundesregierung und des Freistaates Thüringen gilt es umzusetzen. Dabei wurden Zielvorgaben bis 2030 und bis 2050 definiert. Auf Basis eines Bewertungsverfahrens werden im ersten Schritt die infrastrukturellen Lösungen und die Fahrzeuglösungen beurteilt. Im zweiten Schritt erfolgt eine separate Betrachtung jeder NV-Dieselnetzstrecke in Thüringen.

4.1 Infrastruktur

Die Betrachtung der infrastrukturellen Möglichkeiten ergibt folgendes:

- Magnetschwebebahn und Induktionsladung werden als mögliche Alternative nicht berücksichtigt. Diese Bahnsysteme befinden sich erst in Forschung bzw. im Testbetrieb. Somit können auch keine Aussagen zur Einsatzfähigkeit bis 2030/2050 getroffen werden.
- Seitliche Stromschiene, verdeckte und offenliegende Mittelschiene und die Nutzung der Fahrschienen finden ebenfalls keine Berücksichtigung im Bewertungsverfahren. Diese haben sich je nach Art in Deutschland nicht durchgesetzt bzw. existieren als Einzelfälle und ergeben aus verkehrlicher Sicht keine Flexibilität. Des Weiteren ist die zulässige Geschwindigkeit auf 100 km/h begrenzt.
- Die DSS wird nur in Tunnelbereichen eingesetzt und findet somit nur Anwendung in Kombination einer herkömmlichen Elektrifizierung.
- Konventionelle Elektrifizierung und Teilelektrifizierung sind reale Optionen im Bewertungsverfahren. Der Ausschluss eines Systems kann sich aus den zugrunde gelegten Kriterien ergeben. Auf Grund der hohen Kosten bei der Umsetzung einer Elektrifizierung wurden diese Maßnahmen nur auf Strecken mit Synergieeffekten durch andere Verkehrsarten angewandt und auf ein mögliches Minimum begrenzt.

4.2 Fahrzeuge

Bei der Auswahl der Fahrzeuge wurden die zu befahrenden Strecken in Thüringen betrachtet und inwieweit die unter Punkt 3.2 vorgestellten Fahrzeuge auf diesen Strecken sinnvoll eingesetzt werden können, um das Ziel des emissionsfreien Schienenpersonennahverkehrs in Thüringen möglichst gewinnbringend umzusetzen.

Als erstes wurden die emissionsarmen Fahrzeuge betrachtet. Dabei kommt der Diesel-Hybrid mit Schwungradspeicher nicht in Frage, da das Prototypenfahrzeug seit 2006 abgestellt ist und seitens der Hersteller von Schienenfahrzeugen keine neuen Fahrzeuge am Markt

angeboten werden. Auch Diesel-Hybrid Fahrzeuge mit Powerpack sind aktuell nicht am Markt verfügbar und wurden in die Betrachtung nicht mit einbezogen. Einzig der Elektro-Diesel-Hybrid ist aktuell am Markt verfügbar und erfolgreich im Einsatz. Trotzdem kommt er für die Betrachtung des SPNV in Thüringen nicht in Frage. Auf den dafür vorgesehenen Strecken (z. B. Erfurt – Weimar – Gera) ist von staatlicher Seite eine Elektrifizierung geplant⁴⁵, die den Einsatz dieser Fahrzeuge als Zwischenlösung über einen Zeitraum von maximal vier bis fünf Jahren unattraktiv machen würde.

Auf Seiten der emissionsfreien Fahrzeuge wurden die reinen Akku-Fahrzeuge nicht betrachtet, da sie aktuell auf dem Markt nicht verfügbar sind. Für die übrigen beiden Fahrzeugkonzepte gibt es allerdings vielversprechende Einsatzgebiete. So könnte man z. B. den iLint mit Brennstoffzelle im Südthüringer Dieselnetz erfolgreich einsetzen. Auch für die Elektro-Hybrid Züge würden sich einige Strecken hervorragend eignen, so dass diese zwei Fahrzeugvarianten für die weitere Betrachtung in Frage kommen, um das Ziel eines CO₂-freien SPNV in Thüringen zu erreichen.

4.3 Bewertung nach Strecken

Während in den vorhergegangenen Kapiteln die infrastrukturellen und fahrzeugseitigen Umsetzungsmöglichkeiten näher beleuchtet wurden, werden nun für jede einzelne Linie die Vorzugslösungen erarbeitet. Dabei wurden zuerst der Laufweg und die Länge jedes Streckenabschnittes betrachtet. Untersucht wurden dabei der Linienverlauf in Unterteilung elektrischer Streckenabschnitt und Abschnitt ohne OL. Somit konnten erste Erkenntnisse zum Ausschluss von Lösungsvarianten getroffen werden. Dabei führen Streckenabschnitte mit einer zusammenhängenden Länge von mehr als 80 km, bzw. Stichstrecken ohne ausreichende Wendezeit mit mehr als 40 km ohne OL vorerst zum Ausschluss der Lösungsvariante Elektro-Akku-Hybrid. Für Linien, die zu 95 % Strecken ohne OL befahren, stellt die Lösungsvariante Elektro-Diesel-Hybrid keine Lösung dar. Auch wurde darauf geachtet, dass durch sinnvolle Teilelektrifizierungen die Lösungsvariante Elektro-Akku-Hybrid verwendet werden kann. Lösungen mit einem schnellen Umsetzungsgrad sind entweder die Elektro-Akku-Hybrid Variante, die einen vollständigen elektrischen Betrieb ermöglicht, oder die Elektro-Diesel-Hybrid Variante, die in Abhängigkeit des Laufweganteils unter OL zur Einsparung von Schadstoffausstoß führt. Dabei stellt die Elektro-Diesel-Hybrid Variante jedoch nur eine Übergangslösung bis zu einer Elektrifizierungsmaßnahme oder der Umsetzung der Brennstoffzellenvariante dar. In der Abbildung 16 sind die im Rahmen der

⁴⁵ Vgl. BVWP-PROJEKTE (2019).

Bewertung festgelegten Vorzugsvarianten je Linie dargestellt, die nach den oben genannten Prämissen ausgewählt wurden. Weitere Informationen können hierbei der Abbildung 25 (Anhang 3) entnommen werden.

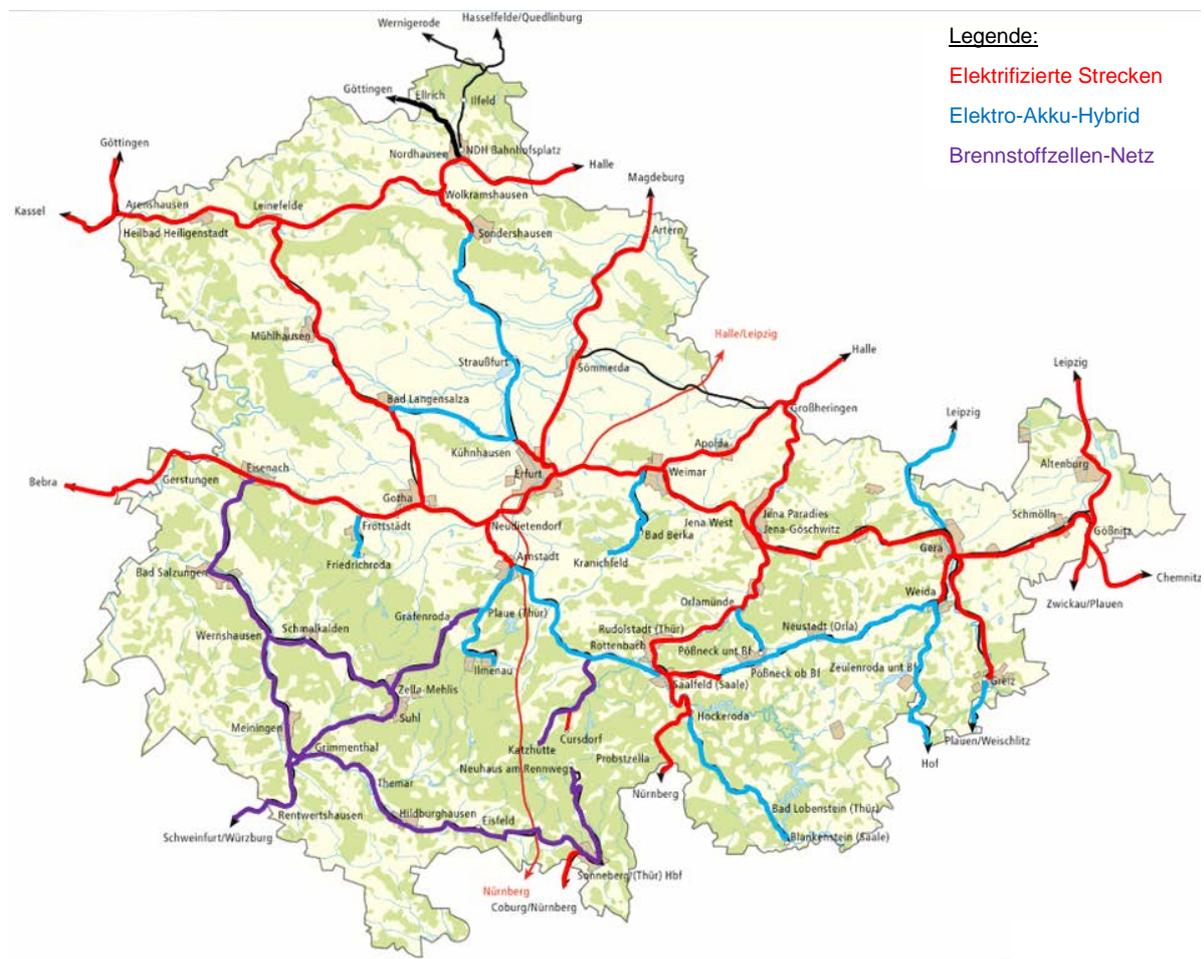


Abbildung 16: Darstellung des Zielzustands Thüringen 2050
 Verändert nach: NVS (2011).

4.4 Auswertung Energieverbräuche

Zur Durchführung eines Bewertungsverfahrens und der Analyse von Umsetzungsvarianten je untersuchtem Streckenabschnitt sind unter anderem auch Angaben zu Energieverbrauch und Schadstoffausstoß erforderlich. Hierbei sind sowohl die aktuellen Ist-Daten basierend auf dem aktuellen Betriebsprogramm und Fahrzeugeinsatz relevant, wie auch die Entwicklung der Verbräuche und Schadstoffemissionen bis zur Erreichung des Endzustandes von 0 g CO₂-Emissionen bis zum Jahr 2050 von Interesse. In den folgenden Abschnitten werden u.a. die Energieverbräuche und die darauf basierenden Emissionen für den SPNV in Thüringen hergeleitet und die hierbei zu Grunde gelegten Prämissen erläutert. Darüber hinaus werden der Strommix und die CO₂-Emissionen im Bahnstrom von DB Energie analysiert.

4.4.1 CO₂-Emissionen und Strommix DB Energie

Im Vergleich der Verkehrsmittel gehört die Schiene zu den umweltfreundlichsten Verkehrsmitteln. Während der Flugverkehr beispielweise auf eine CO₂-Emission von 214 g pro Personenkilometer (Pkm) kommt, beträgt der CO₂-Ausstoß auf der Straße zwischen 140 g/Pkm (Personenkraftwagen) und 32 g/Pkm (Reisebus). Der NV auf der Schiene kommt im Durchschnitt auf einen Ausstoß von 56 g/Pkm. Der Schienenpersonenfernverkehr lässt mit einem CO₂-Ausstoß von weniger als 1 g/Pkm die anderen Verkehrsmittel weit hinter sich. Dies liegt zum einen an der Tatsache, dass der Fernverkehr der Deutschen Bahn AG aktuell zu 100 % mit Ökostrom, das heißt Strom aus erneuerbaren Energien betrieben wird, zum anderen wird der DB Fernverkehr nahezu vollumfänglich mit E-Traktion betrieben, alternative Antriebsformen wie Diesel kommen nur vereinzelt zum Einsatz.⁴⁶ Neben DB Fernverkehr werden beispielsweise auch die S-Bahn Hamburg emissionsfrei, d. h. zu 100 % mit Ökostrom betrieben. Stromlieferant für alle bundeseigenen elektrifizierten Strecken in Deutschland ist mit DB Energie ein Tochterunternehmen der Deutschen Bahn AG. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass der für die Speisung des Oberleitungsnetzes genutzte Strommix gesamthaft betrachtet nicht zu 100 % aus Ökostrom besteht. Im Jahr 2018 bestanden 57 % des für die Traktion eingesetzten Bahnstroms aus erneuerbaren Energien. Im Jahr 2017 betrug der Anteil erneuerbarer Energien im Bahnstrom noch 44 %, während der Anteil erneuerbarer Energien im Haushaltsstrom im Jahr 2018 ca. 41 % betrug.⁴⁷ Der Abbildung 17 kann die Aufteilung des Bahnstromes auf die jeweiligen Energieträger im Jahr 2018 entnommen werden.

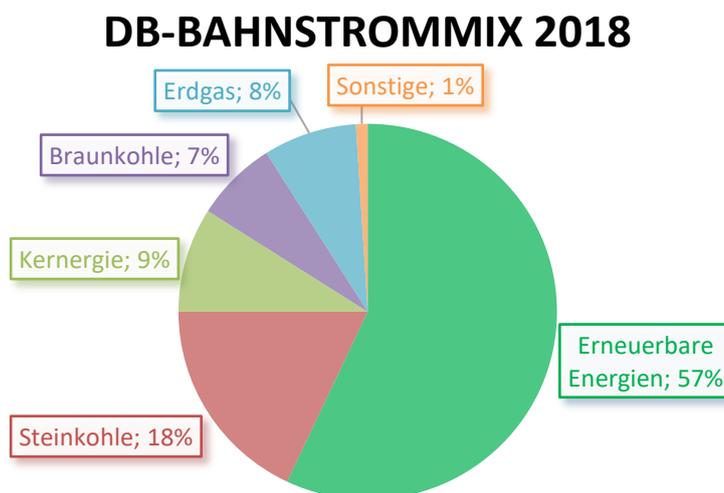


Abbildung 17: DB Bahnstrommix 2018
Verändert nach: DB ENERGIE (2019b).

⁴⁶ Vgl. DB ENERGIE (2019a).

⁴⁷ Vgl. DB ENERGIE (2019a).

Bis zum Jahr 2050 soll sich der komplette Bahnstrom zu 100 % aus Ökostrom generieren und damit emissionsfrei produziert werden. Auf Strecken ohne OL soll die emissionsfreie Stromversorgung unter Einbeziehung neuer Antriebsformen wie Brennstoffzellen- und Batterielösungen genutzt werden. Als Zwischentappe soll der Ökostromanteil bis zum Jahr 2030 auf 80 % ausgebaut werden.⁴⁸ In Tabelle 7 sind die seitens DB Energie prognostizierten Wachstumsraten des Anteils erneuerbarer Energien am Bahnstrommix und die Auswirkungen auf CO₂-Emissionen dargestellt. DB Energie geht bis 2030 von einem Anstieg des Anteils erneuerbarer Energien von 2 % pro Jahr aus, welcher zwischen 2030 und 2050 auf 1 % pro Jahr absinken wird.⁴⁹

Tabelle 7: Veränderung Anteil erneuerbare Energien am DB Bahnstrom

Jahr	2017	2018	2019	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Anteil EE am Strommix	44 %	57 %	58 %	60 %	70 %	80 %	85 %	90 %	95 %	100 %
CO ₂ in g/kWh	350	269	263	250	188	125	94	63	31	0

Verändert nach: DB ENERGIE (2019a).

4.4.2 Grundannahmen Energieverbrauch/Schadstoffemissionen

Zur Analyse des aktuellen Schadstoffausstoßes im SPNV in Thüringen werden insbesondere die nachfolgenden Informationen benötigt:

- Traktionsart (Diesel oder Elektro)
- Betriebsprogramm (Anzahl an Fahrten pro Tag)
- Streckenlänge der jeweiligen Linie
- Energieverbrauch je km (in Liter bzw. Kilowattstunden)
- Schadstoffausstoß je Energieeinheit

Bei den Punkten Traktionsart, Betriebsprogramm und Streckenlängen der jeweiligen Linien handelt es sich um feststehende Größen, die den aktuellen Ausschreibungsdaten entnommen werden können. Auch beim Schadstoffausstoß je Energieeinheit handelt es sich entweder um eine feststehende Größe (1 Liter Diesel entspricht 2.650 g CO₂⁵⁰) oder um einen auf Basis des Energieträgermix errechenbaren CO₂-Ausstoß je Stromeinheit (Bei Nutzung des Bahnstromes von DB Energie entspricht dieser 263 g CO₂ pro Kilowattstunde (Stand: 2019)).⁵¹

Problematisch ist der Energieverbrauch pro km der eingesetzten Schienenfahrzeuge, um hieraus entsprechend den jeweiligen CO₂-Ausstoß berechnen zu können. Anders als im Straßenverkehr, werden bei Schienenfahrzeugen seitens der Hersteller im Regelfall keine

⁴⁸ Vgl. Ebenda.

⁴⁹ Vgl. DEUTSCHE BAHN (2019).

⁵⁰ Vgl. DEKRA (2019).

⁵¹ Vgl. DB ENERGIE (2019a).

durchschnittlichen Verbrauchsangaben angegeben. Auch die betreibenden EVU halten sich hinsichtlich der Verbrauchsangaben äußerst bedeckt, da diese Angaben, wie auch die Angabe der tatsächlichen Schadstoffemissionen, möglicherweise wettbewerbsrelevante Sachverhalte darstellen. Darüber hinaus muss berücksichtigt werden, dass der durchschnittliche Energieverbrauch eines Schienenfahrzeuges insbesondere vom Betriebsprogramm und der örtlichen Infrastruktur (Steigungen/Gefälle, Halteabstände) abhängt. Da Schienenfahrzeuge im NV größtenteils im Inselbetrieb, d. h. nur auf bestimmten Linien bzw. Streckenabschnitten eingesetzt werden, lässt sich ein Durchschnittsverbrauch je Kilometer nur eingeschränkt bestimmen und hat für die hier zu untersuchenden Streckenabschnitte nur eine ungefähre Aussagekraft. Da eine rechnerische Herleitung der spezifischen Energieverbräuche der einzelnen Linien basierend auf der jeweiligen Topographie, dem Betriebsprogramm und der spezifischen Leistungsdaten der eingesetzten Schienenfahrzeuge den Umfang dieser Projektarbeit sprengen würde, wurde zur Schaffung einer validen Datengrundlage ein vereinfachtes Verfahren angewendet.

Zu Berechnung der spezifischen Energieverbräuche wurde das frei zugängliche Programm „Trassenfinder“ der Deutschen Bahn AG eingesetzt.⁵² Der Trassenfinder ist ein interaktives Programm, mit dem Trassenverläufe auf der Infrastruktur der DB Netz AG berechnet werden können.⁵³ Als Nebenprodukt neben dem tatsächlichen Routenverlauf, der Routenlänge und der benötigten Fahrzeit werden u.a. auch die jeweiligen Trassenkosten, der Energiebedarf auf Basis der betrachteten Schienenfahrzeuge und die sich ergebenden Gesamtkosten ausgewiesen. Zwar stellt der Trassenfinder hinsichtlich des Energiebedarfs nur eine theoretische Betrachtung und unverbindliche Auskunft dar, da aber Faktoren wie z. B. Topographie, Anzahl an Halten, die eingesetzte Baureihe und Energierückgewinnung (Rekuperation) berücksichtigt werden, dienen die ausgeworfenen Werte für den Zweck dieses Projektberichtes als geeignete Ausgangsbasis.⁵⁴

Für die Ermittlung der Energieverbräuche wurden die jeweiligen Linien als Routen auf Basis der eingesetzten Schienenfahrzeuge und unter Berücksichtigung der vorgesehenen Halte in beiden Richtungen berechnet und die sich hierbei ergebenden Energieverbräuche gemittelt und auf einen Kilometer heruntergerechnet. Für Linien, welche die Landesgrenzen des Freistaates Thüringen überschreiten, wurde nur der für Thüringen relevante Streckenanteil berücksichtigt. Bei Linien mit Elektrotraktion konnten die CO₂-Emissionen je Kilometer direkt anhand des CO₂-Anteils im Bahnstrom für das Jahr 2019 (263 g/kWh) berechnet werden. Bei Strecken mit Dieseltraktion wurden die durch den Trassenfinder ausgewiesenen Energieverbräuche von kWh in den Dieselverbrauch (Liter pro Kilometer → 1 kWh = 0,102 l Diesel)⁵⁵ umgerechnet.

⁵² Vgl. TRASSENFINDER (2019).

⁵³ Vgl. HANDBUCH (2019), S. 2.

⁵⁴ Vgl. Ebenda, S. 36.

⁵⁵ Vgl. ENERGIE GEDANKEN (2019).

Anschließend konnten die CO₂-Ausstöße je Kilometer auch für Dieselfahrzeuge berechnet werden. Auf Basis der jeweiligen CO₂-Emissionen je Kilometer und der Zugkilometer pro Jahr je Linie können die jeweiligen CO₂-Jahresausstöße berechnet werden, welche dann addiert die CO₂-Gesamtjahremissionen für den SPNV in Thüringen ergeben. Da im Rahmen einer Plausibilisierung der auf Basis des Trassenfinders errechneten Energieverbräuche festgestellt wurde, dass die sich ergebenden Energieverbräuche je Kilometer im Vergleich mit im Internet und in der Presse veröffentlichten einzelnen Vergleichswerten um ca. 50 % zu niedrig ausfallen, wurde im Rahmen der Ausarbeitung ein Korrekturfaktor von 2,0 in Anwendung gebracht.

4.4.3 CO₂-Emissionen im SPNV Thüringen im Jahr 2019

Den Tabellen 8 (Anhang 5) und 9 (Anhang 6) können die Energieverbräuche und CO₂-Emissionen im SPNV in Thüringen für das Jahr 2019 entnommen werden. Basis sind hierbei die in Kapitel 4.1.2 dargelegten Berechnungsgrundlagen. In Abbildung 18 ist der CO₂-Ausstoß im Jahr 2019 grafisch dargestellt. Gesamthaft kam der SPNV in Thüringen im Jahr 2019 auf einen CO₂-Ausstoß von 53.357.315,47 kg (= 53.357 Tonnen).

CO₂-Jahresemissionen SPNV Thüringen 2019

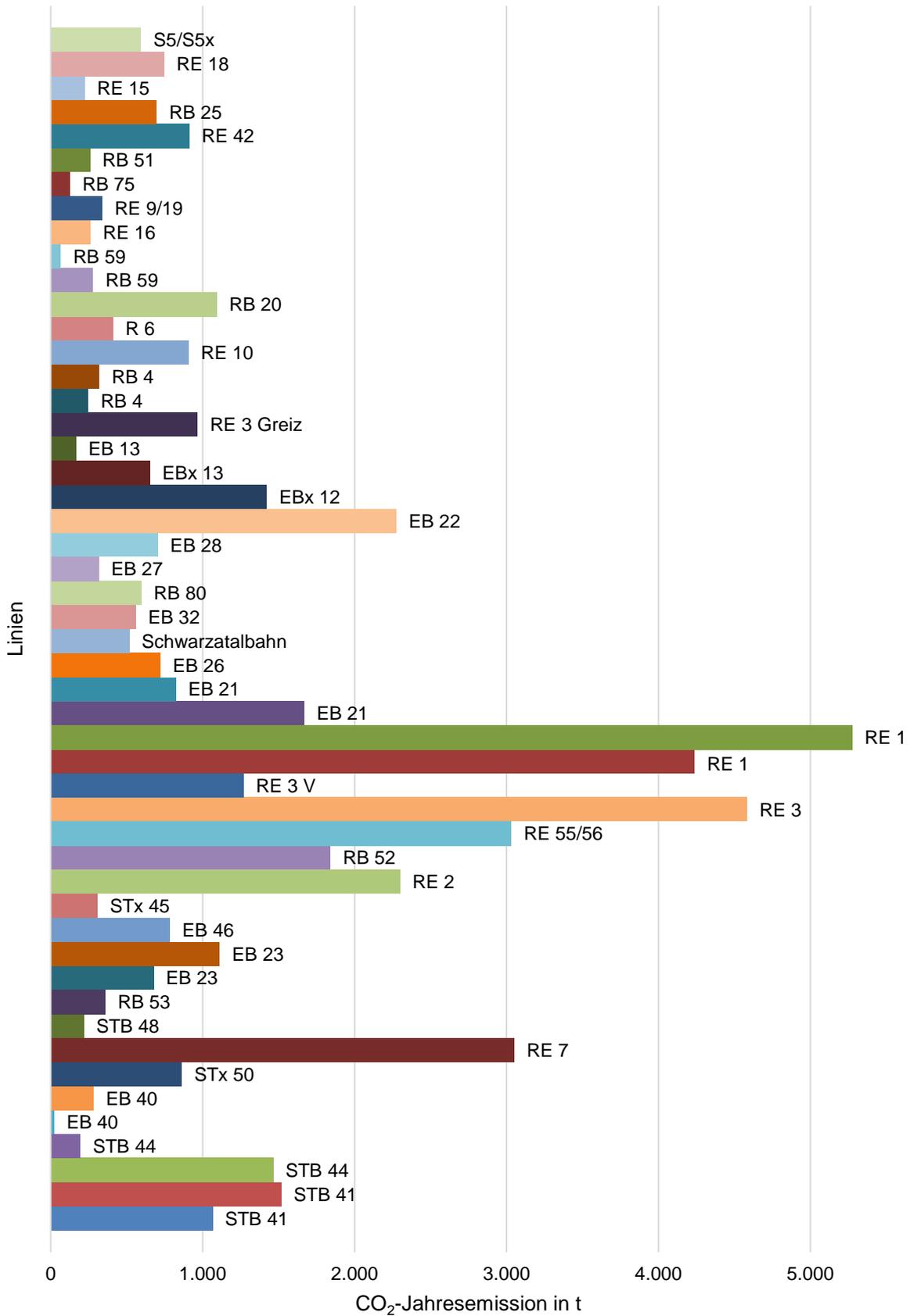


Abbildung 18: CO₂-Emissionen im Jahr 2019 nach Linien
Eigene Darstellung auf Basis: TRASSENFINDER (2019).

5 Meilensteinplan

Im nachfolgenden Abschnitt wird die Umsetzungsstrategie der Elektrifizierung des SPNV-Netzes in Thüringen, basierend auf den Ergebnissen des Bewertungsverfahrens, dargestellt. Ziel ist es den CO₂-Ausstoß kontinuierlich zu senken und 2050 CO₂-neutral zu verkehren. Ausgehend vom Jahr 2019 werden das Jahr 2030 und 2050 als Meilensteine definiert. Meilensteine sind entscheidende Eckpunkte, die wichtige Ereignisse darstellen und zu Informationszwecken dienen. Deren Erreichen wird durch Prüfung und Bewertung der Arbeitsergebnisse bestätigt.⁵⁶

5.1 Umsetzungsstrategie

In der Abbildung 19 ist der Meilensteinplan für die Umsetzungsstrategie der Elektrifizierung des SPNV-Netzes in Thüringen dargestellt. Eine detaillierte, tabellarische Darstellung mit der Nennung aller Linien befindet sich in der Anlage 3.

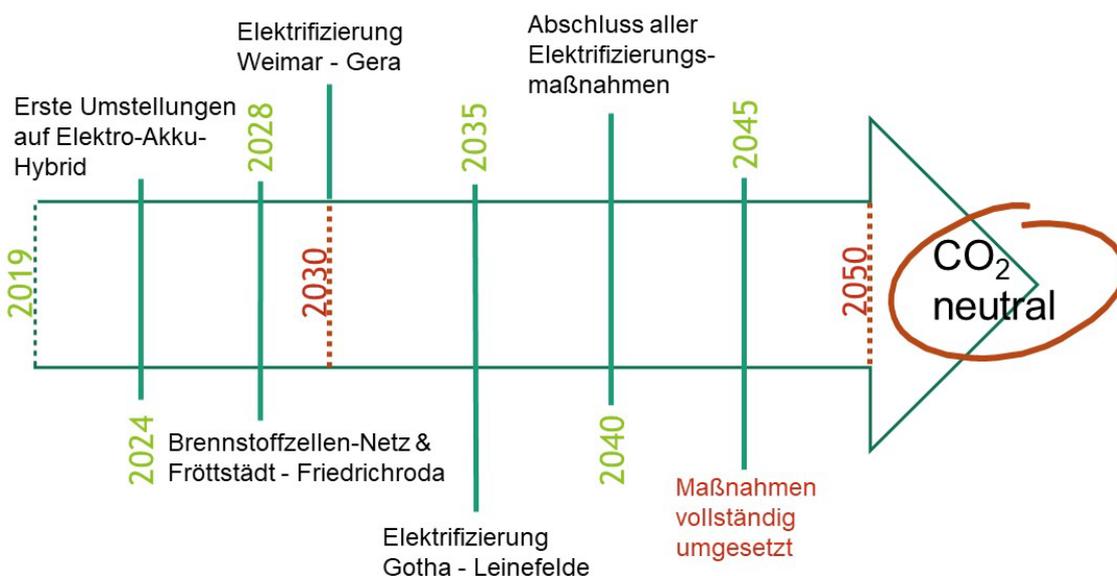


Abbildung 19: Meilensteinplan

Eigene Darstellung.

Bereits im Jahr 2024 können erste Emissionseinsparungen durch die Umstellung einzelner Linien des Ostthüringer Dieselnetzes, wie z. B. der Linien EB 26 Weimar – Kranichfeld, EB 32 Saalfeld – Blankenstein, EB 28 Jena-Saalbahnhof – Pößneck unt. Bf sowie EB 46 Erfurt – Ilmenau, auf Elektro-Akku-Hybrid-Fahrzeuge erreicht werden. Zu diesem Zeitpunkt stehen für diese Leistungen die Neuausschreibung an und es können Synergieeffekte mit den bereits elektrifizierten Strecken genutzt werden. Hierdurch lassen sich bereits bis zu 2.775 t CO₂ pro Jahr einsparen.

⁵⁶ Vgl. BUNDESMINISTERIUM DES INNERN (2018), S. 66.

Im Jahr 2028 wird das Südthüringer Dieselnetz ausgeschrieben, welches vollständig auf Brennstoffzellentechnik umgestellt werden soll. Die Errichtung des notwendigen Tankstellennetzes kann bis 2028 abgeschlossen sein. Zusätzlich soll der RE 7 Erfurt – Würzburg in das neue Brennstoffzellennetz integriert werden. Die Linien STx 50 Erfurt – Ilmenau und STB 48 Fröttstädt – Friedrichroda werden mit neuen Elektro-Akku-Hybrid-Fahrzeugen ausgeschrieben. Damit ergeben sich ab dem Jahr 2028 zusätzliche Einsparungen von bis 9.512 t CO₂ pro Jahr (8.986 t im Brennstoffzellennetz und 526 t durch den Hybrideinsatz).

Es wird davon ausgegangen, dass bis zum Jahr 2030 die Elektrifizierungsmaßnahme des Bundes auf der Strecke Weimar – Gera – Gößnitz/Lehndorf abgeschlossen ist, wodurch die beiden verbleibenden Neigetechlinien RE 1 Glauchau – Göttingen und RE 3 Altenburg – Erfurt sowie die EB 21 Erfurt – Jena-Göschwitz – Gera und der RE 3V Erfurt – Jena-Göschwitz auf elektrische Fahrzeuge umgestellt werden können. Jedoch muss der RE 1 vorerst mit Elektro-Akku-Hybrid-Fahrzeugen verkehren oder in Gotha gebrochen werden, da die verbleibende Streckenelektrifizierung Gotha – Leinefelde voraussichtlich erst nachgelagert im Jahr 2035 in Betrieb gehen wird. Beide Elektrifizierungsmaßnahmen sowie deren Fahrzeugumstellung bringen darüber hinaus eine CO₂-Einsparung von bis zu 23.216 t pro Jahr.

Bis zum Jahr 2040 sollen die durch das Projekt vorgesehenen Maßnahmen zur Teilelektrifizierung für den Einsatz von Elektro-Akku-Hybrid Fahrzeugen vollständig umgesetzt sein, so dass auch auf den verbleibenden Strecken der Fahrzeugtausch erfolgen kann. Dies soll bis zum Jahr 2045 abgeschlossen sein, womit der SPNV in Thüringen ohne Berücksichtigung des Strommixes weitestgehend CO₂-neutral ausgeführt ist. Die endgültige Emissionsfreiheit sollte dann bis 2050 durch eine 100 % emissionsfreie Stromerzeugung im Bahnsektor erreicht werden.⁵⁷

Dort, wo die aktuellen Ausschreibungsintervalle nicht eingehalten werden können, weil die neue Infrastruktur noch nicht zur Verfügung steht, müssen teilweise die Verkehrsleistungen noch einmal ausgeschrieben werden unter der Prämisse, dass die vorhandenen Fahrzeuge verwendet werden müssen oder die Leistungen direkt vergeben werden, bis die infrastrukturellen Maßnahmen umgesetzt worden sind. Dadurch kann verhindert werden, dass durch das EVU, welches die Ausschreibung gewinnt, neue Fahrzeuge angeschafft werden, die aber bald darauf nicht mehr eingesetzt werden sollen oder können. Dies betrifft vor allem das Neigetech-Netz.

⁵⁷ Vgl. DB ENERGIE (2019a).

5.2 Entwicklung der CO₂-Emissionen in Thüringen auf Basis des Bewertungsverfahrens

Im Rahmen des Bewertungsverfahrens wurde für jede Nahverkehrslinie in Thüringen eine geeignete Maßnahme zur Elektrifizierung festgelegt. Basierend auf der im Kapitel 4 beschriebenen Ausgangsbasis und den im Meilensteinplan festgelegten Elektrifizierungszeitpunkten kann die Entwicklung der CO₂-Emissionen je Ausschreibungspaket und für den gesamten SPNV in Thüringen dargestellt werden. Als Basis für die drei in Frage kommenden Elektrifizierungsmöglichkeiten wurde hierbei jeweils ein Musterzug mit den nachfolgenden Musterenergieverbräuchen herangezogen:

- Musterzug E-Triebwagen → 3,65 kWh/km
- Musterzug Hybrid-Triebwagen → 4,0 kWh/km
- Musterzug Brennstoffzellentriebwagen → 6,0 kWh/km

Der CO₂-Ausstoß ab dem jeweiligen Elektrifizierungszeitpunkt wurde hierbei aus den o. g. Musterenergieverbräuchen, den Zugkilometern pro Jahr der jeweiligen Linien/Lose und den in Kapitel 4.4.1 berechneten CO₂-Emission pro Kilowattstunde bei Nutzung des Bahnstromes von DB Energie berechnet. Eine Berücksichtigung der jeweiligen Streckentopographie erfolgte hierbei aus Vereinfachungsgründen nicht. Die entsprechenden Ergebnisse können der Tabelle 10 (Anhang 7) in Verbindung mit Abbildung 25 (Anhang 4) entnommen werden. Die Abbildungen 20 und 21 zeigen die Entwicklung der CO₂-Emission in grafischer Form. Die entsprechenden separaten Diagramme für jede einzelne Linie befinden sich in Anhang 8.

Entwicklung des CO₂-Jahresausstoßes SPNV Thüringen

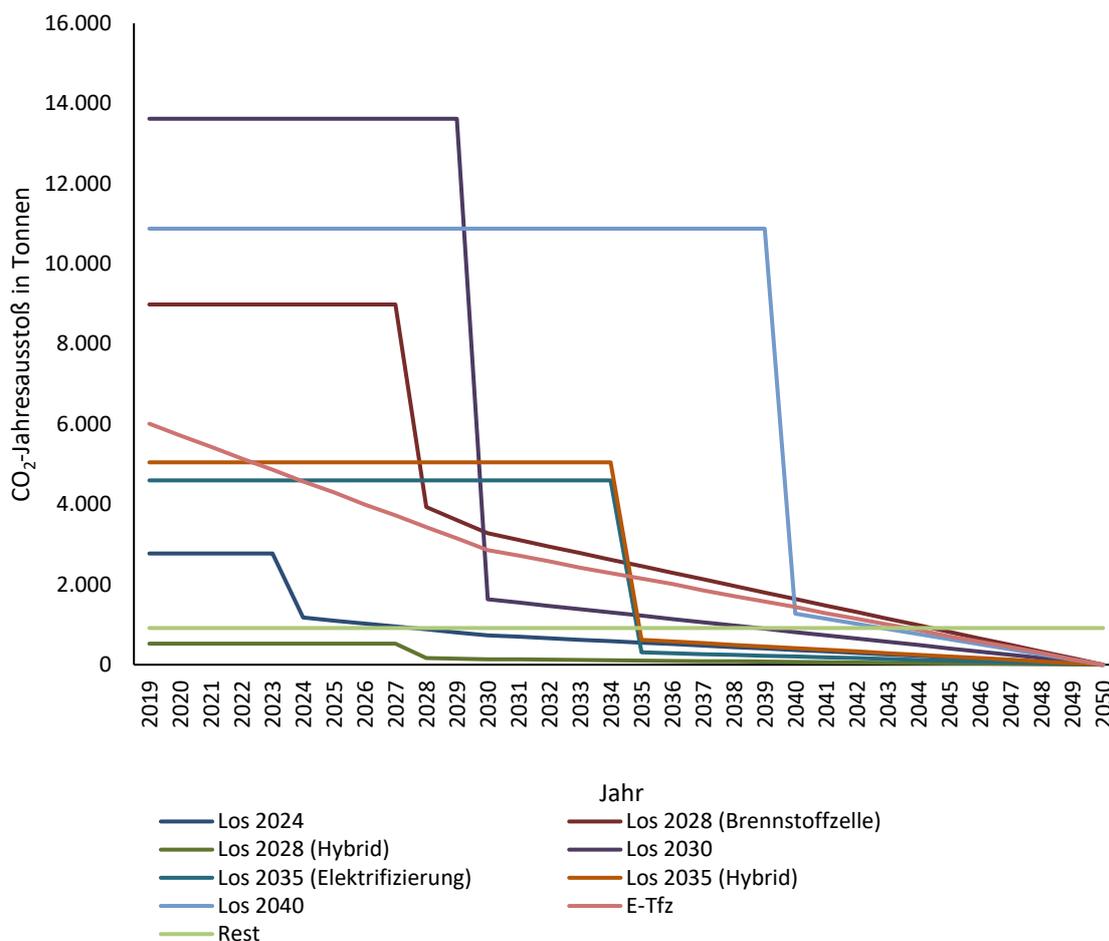


Abbildung 20: Entwicklung des CO₂-Jahresausstoßes SPNV Thüringen
Eigene Darstellung auf Basis: TRASSENFINDER (2019).

Allen Linien ist hier jeweils der konstante Verlauf der CO₂-Emissionen bis zum eigentlichen Elektrifizierungstermin gemein. Mit Umsetzung der Elektrifizierungsmaßnahme erfolgt jeweils die erste erhebliche Reduzierung der CO₂-Emissionen, wobei die restliche Reduzierung dann linear und in Abhängigkeit zur Veränderung der CO₂-Emissionen im Bahnstrom erfolgt. Der verbleibende Rest von 915 t CO₂ im Jahr 2050 lässt sich durch die Nichtbetrachtung der durch das Land Niedersachsen bestellten Nahverkehrslinie Northeim – Nordhausen (RE 80) und der immer wieder von Stilllegung bedrohten Strecke Sömmerda - Buttstädt (EB 27) erklären, für die im Rahmen dieser Projektuntersuchung keine Maßnahmen geplant worden sind.

Entwicklung des CO₂-Jahresausstoßes SPNV Thüringen

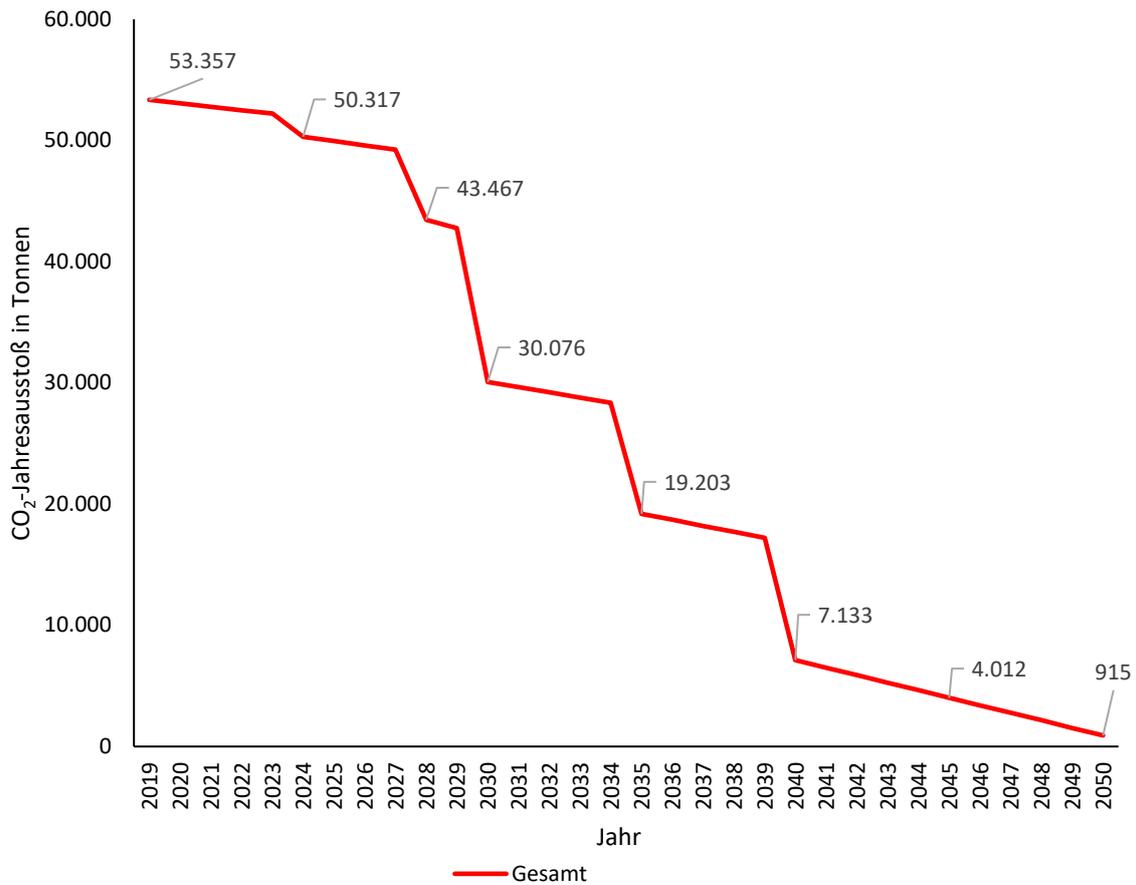


Abbildung 21: Entwicklung des CO₂-Jahresausstoßes SPNV Thüringen
Eigene Darstellung auf Basis: TRASSENFINDER (2019).

5.3 Betrachtung der Kosten je kg CO₂-Reduzierung

Im Rahmen dieses Projektberichtes wurde der Fokus auf die vollumfängliche Erreichung der CO₂-Ziele im Jahr 2050 gelegt. Hierbei besitzen die dabei anfallenden Kosten eine nachrangige Priorität, wurden aber grundsätzlich im Rahmen der Variantenbetrachtung berücksichtigt. Im folgenden Abschnitt werden die tatsächlich anfallenden Kosten je kg CO₂-Reduzierung vereinfacht hergeleitet. Basierend auf der Streckenlänge je Linie und der Anzahl an verkehrenden Zügen je Tag (Takt) konnte über die Umlaufdauer die Anzahl an benötigten Fahrzeugen je Linie (für Thüringen) ermittelt werden. Hierbei wurden eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 50 km/h und eine durchschnittliche Wendezeit von 20 Minuten unterstellt.

Bestimmungsgleichungen: ⁵⁸⁵⁹

$$Umlaufdauer = \left(\frac{\text{Streckenlänge}}{\text{Durchschnittsgeschwindigkeit}} + \frac{1}{3}h \right) * 2$$

$$\text{Anzahl benötigter Fahrzeuge} = \frac{Umlaufdauer}{Takt}$$

Für die weitere Betrachtung wurde unterstellt, dass der Ersatz von Dieseltriebwagen durch Brennstoffzellenfahrzeuge zu Mehrkosten von 2 Millionen (Mio.) € je Fahrzeug führt, der Ersatz durch Elektro-Hybrid-Fahrzeuge zu Mehrkosten von 1 Mio. € je Fahrzeug führt und die Neubeschaffung von reinen Elektrotriebwagen kostenneutral im Vergleich zu neuen Dieseltriebwagen erfolgt.⁶⁰ Auf der Infrastrukturseite wurden je Kilometer Streckenelektrifizierung Investitionskosten von 1 Mio. € Euro in Ansatz gebracht. Für Strecken, auf denen Brennstoffzellenfahrzeuge verkehren sollen, wurde eine Wasserstofftankstelle je angefangene 50 km Streckenlänge unterstellt (Beschaffungskosten pro Wasserstofftankstelle = 1 Mio. €). Für Strecken mit dem Einsatz von Hybridfahrzeugen wurden 1 Mio. € je angefangene 25 km Streckenlänge für zusätzliche Ladeinfrastruktur (OL bzw. Stromanschlüsse) unterstellt.⁶¹

Basierend auf den dargestellten Annahmen konnten die Gesamtinvestitionskosten (Mehrkosten gegenüber weiterem Dieseleinsatz) berechnet werden und zur jeweiligen CO₂-Einsparung ins Verhältnis gesetzt werden. Die entsprechenden Ergebnisse können der

⁵⁸ Vgl. MÜLLER (2017), S. 20.

⁵⁹ Vgl. Ebenda, S. 20.

⁶⁰ Vgl. Ebenda, S. 27.

⁶¹ Vgl. Ebenda, S. 33.

Tabelle 11 (Anhang 9) entnommen werden. Die Gesamtkosten für eine vollständige Elektrifizierung des SPNV bis 2050 belaufen sich demnach auf rund 384 Mio. €.

In der Abbildung 22 sind die gemittelten Ergebnisse hinsichtlich der Kosten pro kg CO₂-Reduzierung je Elektrifizierungsvariante grafisch dargestellt. Hierbei muss natürlich berücksichtigt werden, dass sich eigentlich nur bei der Variante „Streckenelektrifizierung“ Synergieeffekte über den NV hinaus, d. h. für den Schienenpersonenfernverkehr und den Schienengüterverkehr ergeben können. Der Einsatz von Hybrid- bzw. Brennstoffzellenfahrzeugen stellt vom Grundsatz erstmal eine reine Insellösung dar.

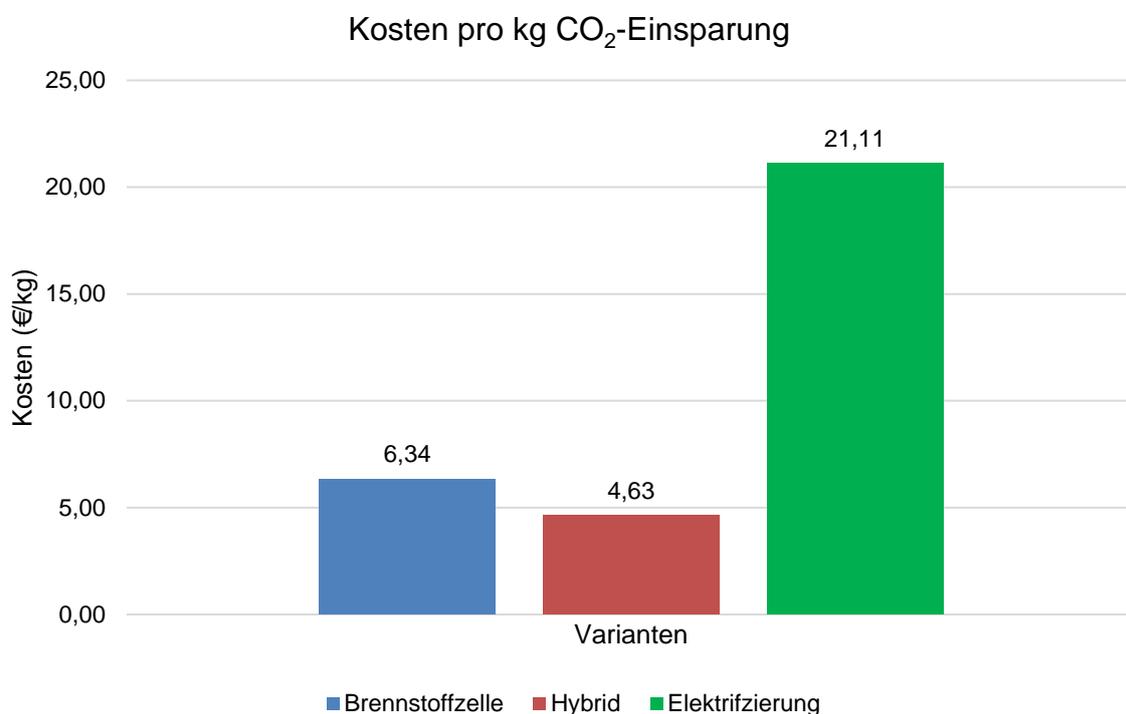


Abbildung 22: Vergleich der Kosten pro kg CO₂-Einsparung
Eigene Darstellung.

6 Zusammenfassung, Fazit und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde aufgezeigt, mit welchen infrastrukturellen und fahrzeugseitigen Lösungen der SPNV in Thüringen bis 2050 weitestgehend CO₂-neutral gestaltet werden kann. Es wurde u. a. festgestellt, dass neben der vergleichsweise kostenintensiven, aber vollumfänglichen Komplettausstattung mit OL auch weitere, insbesondere fahrzeugseitige, Lösungen existieren, mit denen die erwünschte CO₂-Neutralität erreicht werden kann. So wurden im Rahmen des Bewertungsverfahrens und der Meilensteinplanung die drei Lösungen Vollelektrifizierung, Einsatz von Elektro-Akku-Hybrid-Fahrzeugen inklusive möglicher Teilelektrifizierungen und Einsatz von Brennstoffzellenfahrzeugen als Säulen für eine Strategie zur Herstellung der CO₂-Emissionsfreiheit im Jahr 2050 ausgewählt. Dabei wird sich, mit Umsetzung der Maßnahmen aus dem Bundesverkehrswegeplan und der aus der Arbeit definierten Abschnitte, der Anteil des elektrifizierten Streckennetzes um 60 % von 414 km auf ca. 664 km erhöhen. Auf weiteren 347 km Strecke ohne OL würden neue Elektro-Akku-Hybrid-Fahrzeuge mit Akku-Leistungen verkehren und die alten Dieselfahrzeuge ersetzen. Für 295 km Strecke ohne OL ist der Einsatz von Brennstoffzellenzügen und die Errichtung einer Brennstoffzellen-Ladeinfrastruktur vorgesehen, da nach Einschätzung der Autoren auf diesen Strecken eine Teilelektrifizierung mit Einsatz von Elektro-Akku-Hybrid-Fahrzeugen auf Grund fehlender Synergieeffekte nicht zweckmäßig ist. Damit können weitere 1.306 km des, für den SPNV relevanten, Streckennetzes CO₂-neutral betrieben werden. Gesamthaft kann der CO₂-Ausstoß, der durch den SPNV in Thüringen verursacht wird, von 53.357 t CO₂ im Jahr 2019 auf 30.076 t CO₂ zum ersten Meilenstein 2030 gesenkt werden. Das entspricht einer Reduktion von 23.281 t bzw. fast 44 %. Nach Umsetzung aller infrastrukturellen und fahrzeugseitigen Maßnahmen kann bis zum Zielzeitpunkt im Jahr 2050 der Emissionsausstoß auf einen Rest von ca. 915 t CO₂ verringert werden, welcher sich aufgrund der im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigten Linien Nordhausen – Northeim, Sömmerda – Buttstädt sowie darüber hinaus dem Netz der Harzer Schmalspurbahn (HSB) erklärt. Die Gesamtkosten für diese Maßnahmen werden auf rund 384 Mio. € geschätzt.

Bei einer weiteren Verwendung der Ergebnisse dieser Ausarbeitung muss berücksichtigt werden, dass die berechneten Reduzierungspotentiale und der ausgearbeitete Meilensteinplan auf der Annahme basieren, dass zum erwünschten Elektrifizierungszeitpunkt die insbesondere fahrzeugseitigen Lösungen mit entsprechender Leistungsfähigkeit zur Verfügung stehen. Darüber hinaus muss die aufgezeigte Entwicklung bei den im Rahmen des Bahnstrommix erzeugten CO₂-Emissionen weiter fortgesetzt werden. Eine CO₂-Neutralität im SPNV in Thüringen im Jahr 2050 lässt sich nur mit einer vollumfänglichen Stromerzeugung aus 100 % erneuerbaren Energien erreichen.

Literatur- und Quellenverzeichnis

ALLIANZ PRO SCHIENE (2018):

Ein Überblick: Innovative Antriebe auf der Schiene. Berlin,
<https://www.allianz-pro-schiene.de/themen/aktuell/innovative-antriebe-auf-der-schiene/>,
abgerufen am 11.04.2019.

ALSTOM (2019):

Pressebilder online. Saint-Ouen,
<https://www.partners.alstom.com/Assets/View/92a183b6-b12a-4561-b356-76a587d0de4e>,
abgerufen am 11.04.2019.

BAHN EXTRA (2019):

Hybrid-Desiro der Westfrankenbahn. München,
<https://bahn-extra.de/leseprobe/hybrid-desiro-der-westfrankenbahn>,
abgerufen am 11.04.2019.

BMU (=Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit) (2017a):

Verpflichtungsperioden. Berlin,
<https://www.bmu.de/themen/klima-energie/klimaschutz/internationale-klimapolitik/kyoto-protokoll/verpflichtungsperioden/>,
abgerufen am 09.04.2019.

BMU (=Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit) (2017b):

Die Klimakonferenz in Paris. Berlin,
<https://www.bmu.de/themen/klima-energie/klimaschutz/internationale-klimapolitik/pariser-abkommen/>,
abgerufen am 09.04.2019.

BMU (=Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit) (2017c):

Der Klimaschutzplan 2050 – Die deutsche Klimaschutzlangfriststrategie. Berlin,
<https://www.bmu.de/themen/klima-energie/klimaschutz/nationale-klimapolitik/klimaschutzplan-2050/>,
abgerufen am 09.04.2019.

BMVI (=Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur) (2019):

Projektinformationssystem zum Bundesverkehrswegeplan 2030. Berlin,
https://www.bvwp-projekte.de/map_railroad_2018.html,
abgerufen am 09.04.2019.

BMVI (=Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur) (2018):

Verkehr in Zahlen 2018/2019. Berlin,
https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/verkehr-in-zahlen_2019-pdf.pdf?__blob=publicationFile,
abgerufen am 15.03.2019.

BUNDESMINISTERIUM DES INNERN (2018):

Handbuch für Organisationsuntersuchungen und Personalbedarfsermittlung. Berlin,
https://www.orghandbuch.de/OHB/DE/ohb_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=28,
abgerufen am 02.04.2019.

BVWP-PROJEKTE (2019):

Projektinformationssystem (PRINS) zum Bundesverkehrswegeplan 2030, ABS Weimar - Gera – Gößnitz. Berlin,
<http://www.bvwp-projekte.de/schiene/2-038-V01/2-038-V01.html>,
abgerufen am 11.04.2019.

CHEMNITZER MODELL (2019):

Fahrzeuge: Aktueller Stand. Chemnitz,
<http://www.chemnitzer-modell.de/fahrzeuge/aktueller-stand/>,
abgerufen am 11.04.2019.

CHEMNITZER MODELL (2016):

Präsentation Zweisystemfahrzeug „Citylink Chemnitz“ auf der Verkehrstechnik-Fachmesse InnoTrans 2016. Chemnitz,
<http://www.chemnitzer-modell.de/aktuelles/v/a/praesentation-zweisystemfahrzeug-citylink-chemnitz-an-der-verkehrstechnik-fachmesse-innotrans/12/>,
abgerufen am 10.04.2019.

DB AG (=Deutsche Bahn Aktiengesellschaft) (2015):

Mehr Bahn für Metropolen und Regionen. Berlin,
https://www.deutschebahn.com/resource/blob/260082/7df5b4e611d0e7ac8cec71ce6e99919f/praesentation_neues_fernverkehrskonzept-data.pdf,
abgerufen am 09.04.2019.

DB ENERGIE (=DB Energie GmbH) (2019a):

Erneuerbare Energien. Frankfurt/Main,
<https://www.dbenergie.de/dbenergie-de/Erneuerbare-Energien-3244834>,
abgerufen am 07.04.2019.

DB ENERGIE (=DB Energie GmbH) (2019b):

Bahnstrommix 2018. Frankfurt/Main,
https://www.deutschebahn.com/resource/blob/3515780/cee9f30d8454d686305183abcc2d2ca9/Bahnstrommix_2018-data.pdf,
abgerufen am 07.04.2019.

- DB NETZ AG (=Deutsche Bahn Netz Aktiengesellschaft) (2019):
Fahrplankonstruktionsprogramm RUT-K Version rk900p05, Fahrplan 2019,
Frankfurt/Main.
- DB NETZ AG (=Deutsche Bahn Netz Aktiengesellschaft) (2018):
ISD-Portal, Infrastrukturdaten 2018, Frankfurt/Main.
- DB NETZ AG (=Deutsche Bahn Netz Aktiengesellschaft) (2016a):
NL Südost, SPNV-Ausschreibungen RB Südost, Leipzig.
- DB NETZ AG (=Deutsche Bahn Netz Aktiengesellschaft) (2016b):
Konzernregelwerksdatenbank – Kostenkennwertekatalog. Frankfurt/Main,
https://dbmp.intranet.deutschebahn.com/DBMP_de/konzernregeln/regelwerksdatenbanken/krwd_suche,
abgerufen am 03.03.2019.
- DB NETZ AG (=Deutsche Bahn Netz Aktiengesellschaft) (2009):
Konzernregelwerksdatenbank - Richtlinie 810.0243A01. Frankfurt/Main,
https://fahrweg.dbnetze.com/resource/blob/1356498/b400294b5a32dbd2925765cc25cead6c/rw2017_810-0243A01-data.pdf,
abgerufen am 15.03.2019.
- DB NETZ AG (=Deutsche Bahn Netz Aktiengesellschaft) (2001):
Konzernregelwerksdatenbank - Richtlinie 997.0101. Frankfurt/Main,
https://dbmp.intranet.deutschebahn.com/DBMP_de/konzernregeln/regelwerksdatenbanken/krwd_suche,
abgerufen am 12.12.2018.
- DB REGIO AG (=Deutsche Bahn Regio Aktiengesellschaft) (2018):
Innovationen alternative Antriebe (EcoTrain). Frankfurt/Main,
https://www.dbregio.de/db_regio/view/mdb/db_regio/zukunftswerkstatt/mdb_278211_unter_strom.pdf,
abgerufen am 08.01.2019.
- DEKRA (=Dekra e.V.) (2019):
CO₂ spielt eine entscheidende Rolle. Stuttgart,
<https://www.dekra.de/de/umwelt-und-co2/>,
abgerufen am 12.04.2019.
- DEUTSCHE BAHN (=Deutsche Bahn AG) (2019):
DB Energie – Strom für die Deutsche Bahn. Berlin,
https://www.deutschebahn.com/resource/blob/3515788/8548552f76385ed5ac2857b2288017af/TD_DB-Energie-data.pdf,
abgerufen am 07.04.2019.

DEUTSCHER BUNDESTAG (2018):

Sachstand – Elektrifizierungsgrad der Schieneninfrastruktur. Berlin,
<https://www.bundestag.de/resource/blob/549342/f2306e768bb6a0963f54a70143a2d81b/wd-5-027-18-pdf-data.pdf>,
abgerufen am 09.04.2019.

DLR (=Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.) (2019):

Forschen für den Zug der Zukunft-LINK Antriebskonzept. Köln,
<https://verkehrsforschung.dlr.de/de/projekte/ngt-link/link-antriebskonzept>,
abgerufen am 17.02.2019.

ENERGIE GEDANKEN (=www.energie-gedanken.ch) (2019):

Umrechnungsfaktoren. Schweiz,
<https://www.energie-gedanken.ch/umrechnungsfaktoren/>,
abgerufen am 12.04.2019.

EURAILPRESS (2019):

Neigetchnik-Netz Thüringen: Direktvergabe angekündigt. Hamburg,
[https://www.eurailpress.de/nachrichten/infrastruktur-ausruestung/detail/news/neigettechnik-netz-thueringen-direktvergabe-an-db-regio-angekuendigt.html](https://www.eurailpress.de/nachrichten/infrastruktur-ausruestung/detail/news/neigetchnik-netz-thueringen-direktvergabe-an-db-regio-angekuendigt.html),
abgerufen am 09.04.2019.

FENDRICH, Lothar (Hrsg.) (2007):

Handbuch Eisenbahninfrastruktur, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.

FREIE PRESSE (2015):

Erzgebirgsbahn schickt bald ersten Hybridzug auf Testfahrt. Chemnitz,
<https://www.freipresse.de/nachrichten/wirtschaft/wirtschaft-regional/erzgebirgsbahn-schickt-bald-ersten-hybridzug-auf-testfahrt-artikel9346058>,
abgerufen 11.04.2019.

FURRER+FREY AG (2012):

Deckenstromschienen. Bern,
<https://www.furrerfrey.ch/de/systeme/deckenstromschiene.html>,
abgerufen am 10.04.2019.

GOLEM.DE (2018):

Alstoms Brennstoffzellenzug ist "erschreckend unspektakulär". Berlin,
<https://www.golem.de/news/coradia-ilint-alstoms-brennstoffzellenzug-ist-erschreckend-unspektakulaer-1804-133923.html>,
abgerufen am 11.04.2019.

GTB-BERLIN (=Gesellschaft für Technik am Bau mbH) (2019):

Projekte Deutsche Bahn. Berlin,
<http://www.gtb-berlin.de/de/projekte/industrie/deutsche-bahn/>,
abgerufen am 15.01.2019.

HANDBUCH (=Bedienungsanleitung Trassenfinder) (2019):

Bedienungsanleitung Trassenfinder (Version 3.4.5). Frankfurt am Main,
<https://www.trassenfinder.de/api/handbuch/>,
abgerufen am 17.03.2019.

LAUSITZER RUNDSCHAU ONLINE (2018):

Hybridzug lässt auf sich warten. Cottbus,
https://www.lr-online.de/nachrichten/sachsen/software-probleme-der-ecotrain-rollt-voraussichtlich-erst-ab-2020-durch-das-erzgebirge_aid-7566679,
abgerufen am 10.04.2019.

LOK-REPORT (2018):

Stadler: Flirt Akku in Berlin vorgestellt. Berlin,
<https://www.lok-report.de/news/deutschland/industrie/item/7717-stadler-flirt-akku-in-berlin-vorgestellt.html>,
abgerufen am 11.04.2019.

MÜLLER André (2017):

Wissenschaftliche Bewertung von alternativen, emissionsarmen Antriebskonzepten für den bayrischen SPNV. Dresden,
<https://beg.bahnland-bayern.de/de/aktuelles/gutachten-alternative-antriebe-im-bahnland-bayern?file=files/media/corporate-portal/aktuelles/2018/Technische%20und%20wirtschaftliche%20Bewertung%20alternativer%20Antriebskonzepte%281%29.pdf>,
abgerufen am 07.01.2019.

NVS (=Nahverkehrsservicegesellschaft Thüringen mbH) (2019):

Die NVS – Ziele. Erfurt,
<https://www.nvsthueringen.de/t3/index.php?id=16>,
abgerufen am 09.04.2019.

NVS (=Nahverkehrsservicegesellschaft Thüringen mbH) (2011):

Karte Streckennetz Thüringen, Erfurt.

ÖPNVG (=Thüringer Gesetz über den öffentlichen Personennahverkehr (ThürÖPNVG)):

§ 2 & § 3 i. d. F. der Bekanntmachung vom 22. Juni 2005.

RAIL POWER SYSTEMS GmbH (2016):

Oberleitungsstromschiene. München,
https://www.railps.com/fileadmin/user_upload/Unternehmen/Fahrleitung/Fahrleitungsanlagen_DE/RP_S_DE_415_TracFeedOSS.pdf,
abgerufen am 03.02.2019.

S-BAHN HAMBURG GmbH (=Stadtschnellbahn Hamburg) (2017):

Geschwindigkeitsbegrenzungen bei der S-Bahn Hamburg. Hamburg,
<https://s-bahn.hamburg/magazin/s-bahn/betrieb-und-technik/hier-gehts-nicht-schneller-geschwindigkeitsbegrenzungen-bei-der-s-bahn-hamburg.html>,
abgerufen am 15.02.2019.

SCHIENENFAHRZEUGTAGUNG (2014):

Innovative Antriebstechnik bei Schienenfahrzeugen aus Sicht der Beschaffung der Deutschen Bahn AG. Graz,
<http://www.schienefahrzeugtagung.at/download/PDF2014/DiV04-Moeller.pdf>,
abgerufen am 11.04.2019.

SIEMENS AG (2019):

Desiro ML ÖBB Cityjet eco für die ÖBB-Personenverkehr AG. München,
<https://www.siemens.com/press/pool/de/feature/2018/mobility/2018-09-oebb/db-desiro-ml-oebb-cityjet-eco-d.pdf>,
abgerufen am 11.04.2019.

STATISTISCHES BUNDESAMT (2018)

Verkehr, Fachserie 8 Reihe 2.1 Eisenbahnverkehr. Wiesbaden,
<https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Transport-Verkehr/Unternehmen-Infrastruktur-Fahrzeugbestand/Publikationen/Downloads-Betriebsdaten-Schieneverkehr/betriebsdaten-schieneverkehr-2080210177004.html>,
abgerufen am 10.04.2019.

STÖCKMANN, Volker (2017):

S-Bahn-Zug in Berlin. Berlin,
<http://karow900.startbilder.de/bild/db~triebzeuge~br-481-berliner-s-bahn/584471/s-bahn-viertelzug-481-428-1-mit-der.html>,
abgerufen am 16.02.2019.

THÜRINGER MINISTERIUM FÜR INFRASTRUKTUR UND LANDWIRTSCHAFT (2017):

Bericht des Thüringer Ministeriums für Infrastruktur und Landwirtschaft – Bereich Schienenpersonennahverkehr. Erfurt,
https://www.thueringen.de/mam/th9/tmblv/nahverkehr/2018-07-17_eu_bericht_1370_2017.pdf,
abgerufen am 15.01.2019.

TRASSENFINDER (2019):

Interaktives Programm zur Routenermittlung der DB Netz AG. Frankfurt/Main,
<https://www.trassenfinder.de/>,
abgerufen am 17.03.2019.

TU Dresden (2014):

Diesel Hybrid Triebwagen. Dresden,
[https://tu-dresden.de/bu/verkehr/ibb/sft/ressourcen/
dateien/forschung/Volltexte_Forschung/ETR_12_2014.pdf?lang=de](https://tu-dresden.de/bu/verkehr/ibb/sft/ressourcen/dateien/forschung/Volltexte_Forschung/ETR_12_2014.pdf?lang=de),
abgerufen am 10.04.2019.

UMWELTMAGAZIN (2018):

Brennstoffzelle für die Schiene. Düsseldorf,
[https://www.umweltmagazin.de/2018/Ausgabe-07-08/Energie/Brennstoffzelle-fuer-
die-Schiene](https://www.umweltmagazin.de/2018/Ausgabe-07-08/Energie/Brennstoffzelle-fuer-die-Schiene),
abgerufen am 11.04.2019.

VDI Verlag GmbH (=Verein Deutscher Ingenieure) (2018):

Transrapid für den Nahverkehr. Düsseldorf,
[https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/verkehr/boegl-hat-heimlich-transrapid-
fuer-nahverkehr-weiterentwickelt/](https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/verkehr/boegl-hat-heimlich-transrapid-fuer-nahverkehr-weiterentwickelt/),
abgerufen am 16.03.2019.

WEKA FACHMEDIEN GmbH (2018):

Batteriezug für nicht elektrifizierte Strecken. Haar,
[https://www.elektroniknet.de/markt-technik/power/batterie-zug-fuer-nichtelektrifizierte-
strecken-157669.html](https://www.elektroniknet.de/markt-technik/power/batterie-zug-fuer-nichtelektrifizierte-strecken-157669.html),
abgerufen am 04.02.2019.

WIKIMEDIA FOUNDATION INC. (2019):

Stromschiene – Fahrschienen. San Francisco,
<https://de.wikipedia.org/wiki/Stromschiene>,
abgerufen am 27.01.2019.

WIKIMEDIA FOUNDATION INC. (2019):

Stromschiene – versenkte und offenliegende Mittelschiene. San Francisco,
<https://de.wikipedia.org/wiki/Stromschiene>,
abgerufen am 02.02.2019.

WIKIMEDIA FOUNDATION INC. (2019):

London Underground Technik. San Francisco,
https://de.wikipedia.org/wiki/London_Underground,
abgerufen am 02.02.2019.

WIKIMEDIA FOUNDATION INC. (2014):

London Underground. San Francisco,
https://de.wikipedia.org/wiki/London_Underground#/media/File:Why_London_Underground_is_nicknamed_The_Tube.jpg,
abgerufen am 02.02.2019.

WIRTSCHAFTSWOCHE (2018):

Bombardier investiert in Batteriezüge für deutschen Markt. Düsseldorf,
<https://www.wiwo.de/unternehmen/industrie/talent-3-bombardier-investiert-in-batteriezeuge-fuer-deutschen-markt/23058982.html>,
abgerufen am 11.04.2019.

WIRTSCHAFTSWOCHE (2015):

Mit Rekordkapazität zum Batterieersatz. Düsseldorf,
<https://www.wiwo.de/technologie/green/superkondensatoren-mit-rekord-kapazitaet-zum-batterieersatz/13552424.html>,
abgerufen am 11.04.2019.

Anhang

Anhangsverzeichnis

Anhang 1:	Abb. 23: Darstellung der Ausschreibungen in Thüringen	ii
Anhang 2:	Abb. 24: Kosten Neubau Oberleitungsanlage	iii
Anhang 3:	Abb. 25: Variantenentscheidung	iv
Anhang 4:	Abb. 26: Tabellarischer Meilensteinplan	v
Anhang 5:	Tab. 8: SPNV Linien Thüringen	vi
Anhang 6:	Tab. 9: Auswertung und Berechnung CO ₂ -Ausstoß nach Linien	viii
Anhang 7:	Tab. 10: Entwicklung CO ₂ -Emissionen 2019 bis 2050 in Tonnen	x
Anhang 8:	Abb. 27: bis 35 Entwicklung CO ₂ -Emissionen 2019 bis 2050	xi
Anhang 9:	Tab. 11: Aufstellung Kosten in € pro kg CO ₂ -Reduzierung	xx

Anhang 1

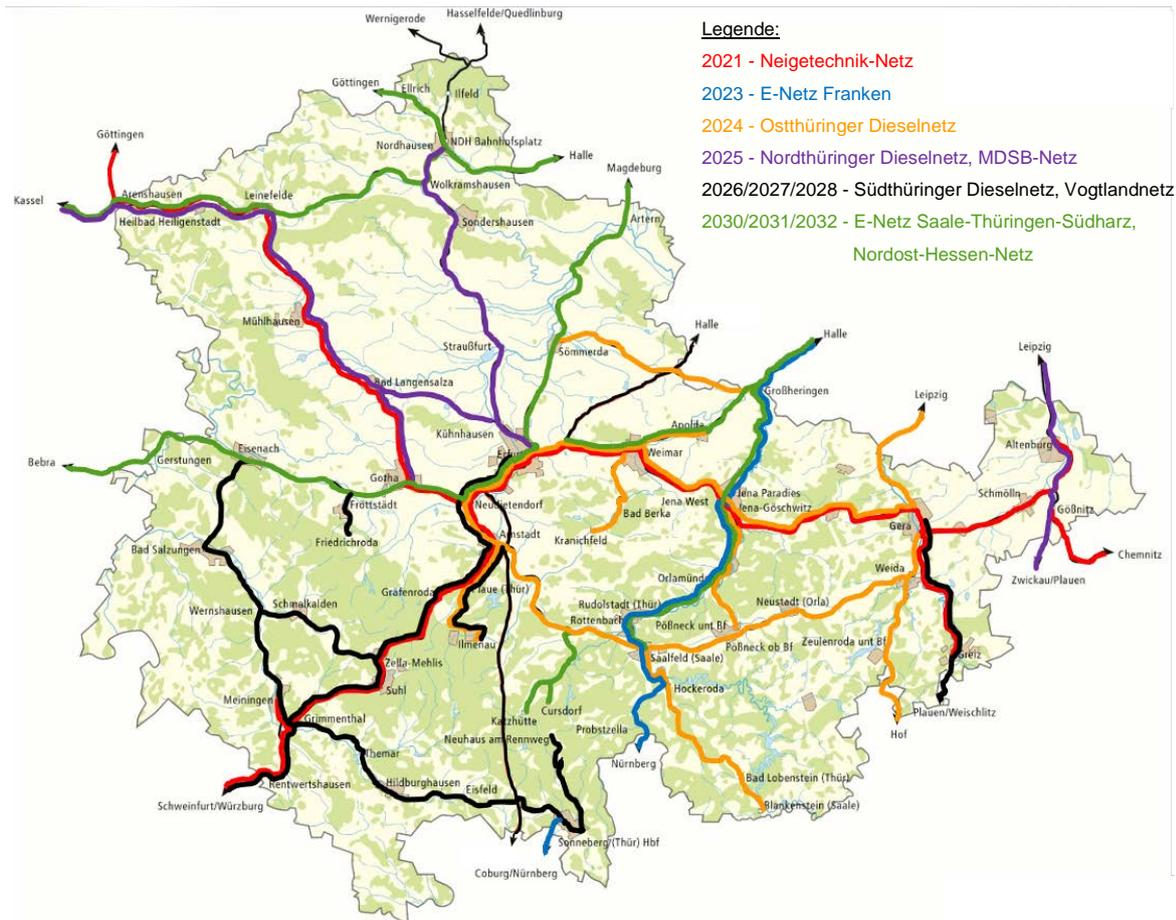


Abbildung 23: Darstellung der Ausschreibungen in Thüringen
Verändert nach: NVS (2011), DB NETZ AG (2016a).

Anhang 2

Auszug Kostenkennwertekatalog

Kostengliederung			Kostenkennwert		
1. Ebene	2. Ebene	3. Ebene	Ausprägung	Einheit	Kosten [EUR]
4. Ebene	5. Ebene	6. Ebene			
Text			Bemerkung zum Kennwert		
4	20	0000	Bahnstrom		
4	21	0000	Neubau Oberleitungsanlage		
4	21	1000	bis Re 200	4201 4202 4203 4204	km 225.000,00
4	21	1300	Bahnhof	4201 4202 4203 4204	St 50.000,00
4	21	2000	bis Re 250 / Re 330	4201 4202 4203 4204	km 445.000,00
4	21	2300	Bahnhof	4201 4202 4203 4204	St 50.000,00
4	21	4000	Doppelfahrdraht	4201 4202 4203 4204	km 238.800,00
4	29	0000	sonstige Maßnahmen		
4	29	5000	Instandsetzungen		
4	29	5100	Ertüchtigung Re 160 auf Re 200	4201 4202 4203 4204	km 56.200,00
4	29	6000	Recycling, Zwischendeponierung und Entsorgung	2002	m3 13,00
4	29	8000	Zusätzliche Maßnahmen		
4	29	8600	Leitungsumlegungen		
4	29	8610	Gas		m 720,00
4	29	8620	Trinkwasser		m 420,00
4	29	8630	Abwasser		m 420,00
4	29	8640	Strom		m 150,00
4	29	8650	Telekom		m 120,00

Abbildung 24: Kosten Neubau Oberleitungsanlage

Aus: DB NETZ AG (2016b).

Anhang 3

Linien	Strecke	elektrisch in Km		Diesel in Km		Varianten					Bemerkungen
		Thür.	andere	Thür.	andere	Elektro-Akku-Hybrid	Diesel-Elektro-Hybrid	Brennstoffzelle	Strecken-vollelektrifizierung	Teilelektrifizierung	
STB 48	Fröststädt - Friedrichroda	0	0	10	0	+	-	0	0	-	Errichtung einer Ladeeinrichtung oder OLA über Gleis 6 im Bf Fröststädt
STB 41	Eisenach - Eisfeld	1,3	0	169	0	-	-	+	-	0	
STB 41	Eisenach - Eisfeld	0,1	0	108,2	0	-	-	+	-	0	Vorzugslösung: Errichtung von Wasserstoff-Tankinfrastruktur an mehreren Standorten notwendig Alternative wäre eine Kombination aus Elektro-Akku-Hybrid und Teilelektrifizierung um den Knoten Grimmenthal von ca. 10-15 km je Richtung (Ri Eisenach, Ri Erfurt, Ri Sonneberg, Ri Schweinfurt) zum Aufladen der Akkus während der Fahrt, sowie Elektrifizierungsverlängerung von Eisenach Richtung Bad Salzungen, Neudietendorf bis Arnstadt, Sonneberg Ri Neuhaus
STB 43	Zella-Mehlis - Wernshausen	0	0	30,5	0	-	-	+	-	-	
STB 44	Grimmenthal - Meiningen	0	0	7,2	0	0	-	+	-	0	
STB 44	Erfurt - Grimmenthal - Meiningen	13,1	0	78,1	0	-	-	+	-	0	
STx 50	Erfurt - Grimmenthal - Meiningen	13,1	0	78,1	0	-	-	+	-	0	
EB 40	Meiningen - Würzburg	0	0,9	20,1	57,6	-	-	+	-	0	
RE 7	Erfurt - Grimmenthal - Würzburg	13,1	43,3	87,1	57,6	+	0	+	-	0	
STx 45	Erfurt - Ilmenau	13,1	0	36,9	0	+	0	-	-	+	Vorzugslösung: Teilelektrifizierung Neudietendorf - Arnstadt (ca. 10 km) in Kombination mit Elektro-Akku-Hybrid und Errichtung von Lademöglichkeiten in Ilmenau bzw. Rennsteig
EB 23	Erfurt - Arnstadt - Saalfeld	13,1	0	57,3	0	+	0	-	-	+	
EB 46	(Erfurt) - Arnstadt - Ilmenau	13,1	0	36,9	0	+	0	-	-	+	
EB 28	Pölsneck unt. Bf - Jena-Saalebahnhof	22	0	11,5	0	+	0	-	-	-	Laden in Weimar Ladung des Akkus bei Fahrt unter OLA (Fahrt je Ri 20 Min unter OLA)
EB 26	Weimar - Kranichfeld	0,3	0	25	0	+	-	-	-	-	
EB 21	Erfurt - Jena-Göschwitz	21,5	0	27,5	0	0	0	-	+	-	Vorzugslösung: Verlängerung aktueller Verkehrsvertrag um 6 Jahre bis 2030 mit Diesel, nach Elektrifizierung Umstellung auf elektrische Fahrzeuge
EB 21	Erfurt - Jena-Göschwitz - Gera	21,5	0	67,8	0	-	0	-	+	-	
EB 22/EBx 12	Leipzig - Gera - Saalfeld	12,2	0	128	0	+	0	-	-	+	Teilelektrifizierung im Abschn. L-Piegwitz - Gera - Weida sowie Könitz - Saalfeld in Kombination Elektro-Akku-Hybrid
EBx13	(Gera) - Weida - Hof	37	0	35,4	0	+	-	-	-	+	
EB 13	Gera - Zeulenroda	0	0	29	0	+	-	-	-	+	
EB 32	Saalfeld - Würzbach - Blankenstein	11,5	0	40	0	+	0	0	-	-	Errichtung einer Ladeeinrichtung in Lobenstein und Blankenstein nach Ausschreibungsende ggf. SPVn-Stillegung vorsehen
EB 27	Sömmerda - Bursfelde	0	0	23	0	-	-	-	-	-	
	Rotenbach - Katzthütte	0	0	25	0	0	-	+	-	-	Vorzugsvariante: Fortführung Bremsstofftechnik (da zukünftig Teilstrecke)
RB 53	Gotha - Bad Langensalza	0	0	21,3	0	+	-	+	-	-	
RB 52	Erfurt - Kühnhausen - Leinefelde	1,7	0	81,8	0	+	-	-	+	-	Vorzugsvariante: Elektrifizierung Gotha - Bad Langensalza - Leinefelde lt. BWP, bei RE 2 und RB 52 in Kombination mit Elektro-Akku-Hybrid, RB 53 bis zur Elektrifizierung mit Elektro-Akku-Hybrid, danach rein elektrisch, Fahrzeuge können dann auf die RB 52 übergehen
RE 2	Erfurt - Kühnhausen - Leinefelde - Kassel	34		81,8	0	+	-	-	+	-	
RE 1	Göttingen - Leinefelde - Gotha	31,5		65,9	0	-	0	-	+	-	
RE 1	Gotha - Gera - Glauchau	53,7	12,8	102,7	0	-	0	-	+	-	Vorzugsvariante: Verlängerung Verkehrsvertrag unter Diesel bis zur Vollelektrifizierung der Strecken 6307, 6268 und 6266 sowie Teilweise Strecke 6383, wie im BWP/ 2030 vorgesehen
RE 3	Erfurt - Gera - Altenburg	31,9	0	99,4	0	0	0	-	+	-	
RE 3 V	Erfurt - Jena-Göschwitz	21,5	0	27,5	0	0	0	-	+	-	
RE 3 Graiz	Gera - Graiz	0	0	32,4	0	+	-	0	-	+	Vorzugsvariante: Teilelektrifizierung (UG) - UGW - UGR in Kombination mit Elektro-Akku-Hybrid bei RB 4
RB 4	Gera - Graiz - Weichlitz	0	0	61,4	0	+	-	-	-	+	
RE 55 / 56	Nordhausen - Kühnhausen - Erfurt	8,7	0	70,7	0	+	-	-	+	+	Vorzugsvariante: Teilelektrifizierung UWK-USH sowie UE-UKU
RE 10	Megdeburg - Sangenhausen - Erfurt	60,4	0	0	0	+	0	-	0	+	

+	Vorzugslösung
0	Neutrale Lösung
-	keine Lösung

Abbildung 25: Variantenentscheidung
Eigene Darstellung.

Anhang 4

Start: 2019	Maßnahme	Elektrisch (Vollelektrifizierung)	Brennstoffzelle	Elektro-Akku-Hybrid
2024	Erste Hybrid-fahrzeuge			EB 26 Weimar - Kranischfeld
				EB 32 Saalfeld - Blankenstein
				EB 28 Jena-Saalbf - Pößneck u.Bf
				EB 46 Erfurt - Ilmenau
2028	Einsatz Brennstoffzellen-Netz		STB 41 Eisenach - Eisfeld - Neuhaus	
			STB 44 Erfurt - Arnstadt - Meiningen	
				STB 48 Friedrichroda - Frottstädt
				STx 45 Erfurt - Ilmenau
				STx 50 Erfurt - Meiningen
				RE 7 Erfurt - Würzburg
				STB 43 Zella-Mehlis - Wernshausen
			EB 40 Meiningen - Schweinfurt	
			RB Rottenbach - Katzhütte	
2030	BVWP-Maßnahme MDV	RE 1 Glauchau - Erfurt - Gotha		
		RE 3 Altenburg - Gera - Erfurt		
		EB 21 Erfurt - Jena - Gera		
		RE 3V Erfurt - Jena-Göschwitz		
2035	BVWP-Maßnahme UGO-JL	RE 1 Gotha - Leinefelde - Göttingen		
		RB 53 Gotha - Bad Langensalza		
				RB 52 Erfurt - Kühnhausen-Leinefelde
				RE 10 Erfurt - Magdeburg
				RE 2 Erfurt - Leinefelde - Kassel
2040	Abschluss Rest-Elektrifizierungsmaßnahmen			RE 55/56 Nordhausen - Erfurt
				VL 4 Gera - Weichlitz
				RE 3 Greiz Gera - Greiz
				EB 22 Leipzig - Gera - Saalfeld
				EBx 12 Leipzig - Gera - Saalfeld
				EBx 13 Gera - Weida - Hof
				EB 23 Erfurt - Arnstadt - Saalfeld

Abbildung 26: Tabellarischer Meilensteinplan
Eigene Darstellung.

Anhang 5

Tabelle 8: SPNV Linien Thüringen

Linie	von / bis	Streckenlänge in km	Züge pro Tag	Baureihe	Traktion
STB 41	Eisenach - Eisfeld	108,3	17	650	V
STB 41	Eisenach - Neuhaus am Rennweg	170,3	18	650	V
STB 44	Erfurt - Grimmental	83,9	22	650	V
STB 44	Grimmental - Meiningen	7,2	37	650	V
EB 40	Grimmental - Schweinfurt	16,1	2	650	V
EB 40	Meiningen - Schweinfurt	20,1	19	650	V
STx 50	Erfurt - Meiningen	91,2	12	650	V
RE 7	Erfurt - Grimmental - Würzburg	100,4	16	612	V
STB 48	Fröttstädt - Friedrichroda	9,9	36	650	V
RB 53	Gotha - Bad Langensalza	21,3	19	641	V
EB 23	Erfurt - Arnstadt - (Saalfeld)	22,6	36	650	V
EB 23	(Erfurt) - Arnstadt - Saalfeld	47,8	37	650	V
EB 46	(Erfurt) - Arnstadt - Ilmenau	27,4	40	650	V
STx 45	Erfurt - Ilmenau	50,0	8	650	V
RE 2	Erfurt - Kühnhausen - Kassel	116,46	17	642	V
RB 52	Erfurt - Kühnhausen - Leinefelde	83,46	19	642	V
RE 55 / 56	Erfurt - Nordhausen	79,39	34	642	V
RE 3	Erfurt - Gera - Altenburg	131,3	21	612	V
RE 3 V	Erfurt - Jena-Göschwitz	49,0	14	612	V
RE 1	(Göttingen)-Leinefelde - Gotha	97,4	21	612	V
RE 1	Gotha - Erfurt - Gera - (Glauchau)	156,4	19	612	V
EB 21	Erfurt - Weimar - J.-Göschwitz - (Gera)	49,0	45	650	V
EB 21	(Erfurt - Weimar) - J.-Göschwitz - Gera	40,3	29	650	V
EB 26	Weimar - Kranichfeld	25,0	41	650	V
Schwarzatalbahn	Rottenbach - Katzhütte	25,0	30	641	V
EB 32	Saalfeld - Wurzbach - Blankenstein	51,5	20	650	V
RB 80	Nordhausen - Northeim	15,1	35	648	V
EB 27	Sömmerda - Buttstädt	23,0	20	650	V
EB 28	Pößneck u. Bf - Jena Saalbf	33,5	26	650	V
EB 22	Leipzig - Gera - Weida - Saalfeld	140,2	24	650	V
EBx 12	Leipzig - Gera - Saalfeld	140,2	15	650	V
EBx 13	Weida - Hof	72,4	14	650	V
EB 13	Gera - Zeulenroda	29,0	7	650	V
RE 3 Greiz	Gera - Greiz	32,4	23	612	V
RB 4	Gera - Greiz - (Weichlitz)	32,4	14	650	V
RB 4	(Gera) - Greiz - Weischlitz	29,0	26	650	V
RE 10	Magdeburg - Sangerhausen - Erfurt	60,4	16	648	V
R 6	Eisenach - Bebra	25,9	34	Talent 2	E
RB 20	Leipzig - Eisenach	109,0	28	Talent 2	E
RB 59	Erfurt - Sangerhausen	60,4	20	Talent 2	E
RB 59	Erfurt - Sömmerda	24,8	10	Talent 2	E
RE 16	Erfurt - Naumburg - Halle	51,0	16	Talent 2	E

RE 9 / 19	Kassel - Nordhausen - Halle	83,8	16	Talent 2	E
RB 75	Eichenberg - Nordhausen - Halle	83,8	6	Talent 2	E
RB 51	Nordhausen - Bad Heiligenstadt	58,3	14	Talent 2	E
RE 42	Leipzig - Jena-Saalbahnhof - Nürnberg	98,7	32	Talent 2	E
RB 25	Saalfeld - Halle	73,7	34	Talent 2	E
RE 15	Jena-Saalbahnhof - Saalfeld	48,5	16	Talent 2	E
RE 18	Halle - Jena-Göschwitz	31,4	16	BR 112+3 Wg	E
S5/S5x	Halle - Leipzig - Altenburg - Zwickau	28,8	58	Talent 2	E

Eigene Darstellung

Anhang 6

Tabelle 9: Auswertung und Berechnung CO₂-Ausstoß nach Linien

Linie	Verbrauch gemittelt (kWh)	Zugkilometer pro Jahr (km)	Verbrauch (kWh/km)*	Verbrauch (Liter/km)*	CO ₂ Emission (g/km)*	CO ₂ Jahresausstoß (t)*
STB 41	318,00	672.001,50	5,87	0,60	1.587,36	1.067
STB 41	427,62	1.118.871,00	5,02	0,51	1.357,45	1.519
STB 44	337,50	673.717,00	8,05	0,82	2.174,64	1.465
STB 44	27,00	97.236,00	7,50	0,77	2.027,25	197
EB 40	60,38	11.753,00	7,50	0,77	2.027,25	24
EB 40	75,38	139.393,50	7,50	0,77	2.027,25	283
STx 50	364,50	399.456,00	7,99	0,82	2.160,62	863
RE 7	966,44	586.336,00	19,25	1,96	5.203,76	3.051
STB 48	30,77	130.086,00	6,22	0,63	1.680,24	219
RB 53	96,00	147.715,50	9,01	0,92	2.436,51	360
EB 23	95,50	296.964,00	8,45	0,86	2.284,39	678
EB 23	152,50	645.539,00	6,38	0,65	1.724,72	1.113
EB 46	99,50	400.040,00	7,26	0,74	1.963,13	785
STx 45	194,50	146.000,00	7,78	0,79	2.102,93	307
RE 2	685,51	722.634,30	11,77	1,20	3.182,09	2.299
RB 52	491,26	578.795,10	11,77	1,20	3.182,09	1.842
RE 55 / 56	452,00	985.229,90	11,39	1,16	3.077,86	3.032
RE 3	1106,00	1.006.414,50	16,85	1,72	4.553,72	4.583
RE 3 V	459,00	250.390,00	18,73	1,91	5.063,99	1.268
RE 1	1022,77	746.571,00	21,00	2,14	5.676,70	4.238
RE 1	1407,07	1.084.634,00	17,99	1,84	4.863,55	5.275
EB 21	188,00	804.825,00	7,67	0,78	2.074,14	1.669
EB 21	144,00	426.575,50	7,15	0,73	1.931,67	824
EB 26	89,33	374.125,00	7,15	0,73	1.931,67	723
Schwarzatalbahn	87,50	273.750,00	7,00	0,71	1.892,10	518
EB 32	142,00	375.950,00	5,51	0,56	1.490,59	560
RB 80	86,51	192.902,50	11,46	1,17	3.097,19	597
EB 27	80,50	167.900,00	7,00	0,71	1.892,10	318
EB 28	137,67	317.915,00	8,22	0,84	2.221,64	706
EB 22	480,50	1.228.152,00	6,85	0,70	1.852,77	2.275
EBx 12	480,50	767.595,00	6,85	0,70	1.852,77	1.422
EBx 13	236,50	369.964,00	6,53	0,67	1.765,91	653
EB 13	121,66	74.095,00	8,39	0,86	2.267,93	168
RE 3 Greiz	213,00	271.998,00	13,15	1,34	3.553,94	967
RB 4	89,50	165.564,00	5,52	0,56	1.493,32	247
RB 4	62,50	275.210,00	4,31	0,44	1.165,09	321
RE 10	287,27	352.736,00	9,51	0,97	2.571,15	907
R 6	62,88	321.419,00	4,86	-	1.277,10	410
RB 20	203,40	1.113.980,00	3,73	-	981,52	1.093
RB 59	72,79	440.920,00	2,41	-	633,92	280
RB 59	34,50	90.520,00	2,78	-	731,73	66

RE 16	85,41	297.840,00	3,35	-	880,86	262
RE 9 / 19	110,15	489.392,00	2,63	-	691,39	338
RB 75	110,15	183.522,00	2,63	-	691,39	127
RB 51	96,50	297.913,00	3,31	-	870,65	259
RE 42	148,46	1.152.816,00	3,01	-	791,19	912
RB 25	107,08	914.617,00	2,91	-	764,26	699
RE 15	72,99	283.240,00	3,01	-	791,66	224
RE 18	242,90	183.376,00	15,47	-	4.068,94	746
S5/S5x	53,36	609.696,00	3,71	-	974,51	594

*) Werte enthalten Korrekturfaktor 2,0

Eigene Darstellung auf Basis TRASSENFINDER (2019).

Anhang 7

Tabelle 10: Entwicklung CO₂-Emissionen 2019 bis 2050 in Tonnen

Jahr	Los 2024	Los 2028a	Los 2028b	Los 2030	Los 2035a	Los 2035b	Los 2040	E-Netz	Rest	Gesamt
2019	2.775	8.986	526	13.619	4.598	5.048	10.878	6.012	915	53.357
2020	2.775	8.986	526	13.619	4.598	5.048	10.878	5.715	915	53.060
2021	2.775	8.986	526	13.619	4.598	5.048	10.878	5.441	915	52.786
2022	2.775	8.986	526	13.619	4.598	5.048	10.878	5.144	915	52.489
2023	2.775	8.986	526	13.619	4.598	5.048	10.878	4.869	915	52.214
2024	1.174	8.986	526	13.619	4.598	5.048	10.878	4.572	915	50.317
2025	1.101	8.986	526	13.619	4.598	5.048	10.878	4.298	915	49.969
2026	1.028	8.986	526	13.619	4.598	5.048	10.878	4.001	915	49.599
2027	954	8.986	526	13.619	4.598	5.048	10.878	3.726	915	49.251
2028	881	3.933	166	13.619	4.598	5.048	10.878	3.429	915	43.467
2029	807	3.605	152	13.619	4.598	5.048	10.878	3.155	915	42.777
2030	734	3.277	138	1.630	4.598	5.048	10.878	2.858	915	30.076
2031	697	3.113	131	1.549	4.598	5.048	10.878	2.720	915	29.650
2032	661	2.950	124	1.467	4.598	5.048	10.878	2.583	915	29.224
2033	624	2.786	117	1.386	4.598	5.048	10.878	2.423	915	28.775
2034	587	2.622	110	1.304	4.598	5.048	10.878	2.286	915	28.349
2035	551	2.458	104	1.223	306	620	10.878	2.149	915	19.203
2036	514	2.294	97	1.141	286	579	10.878	2.012	915	18.715
2037	477	2.130	90	1.060	265	538	10.878	1.852	915	18.204
2038	440	1.966	83	978	245	496	10.878	1.715	915	17.716
2039	404	1.803	76	897	224	455	10.878	1.577	915	17.228
2040	367	1.639	69	815	204	414	1.270	1.440	915	7.133
2041	330	1.475	62	734	184	372	1.143	1.280	915	6.495
2042	294	1.311	55	652	163	331	1.016	1.143	915	5.880
2043	257	1.147	48	571	143	289	889	1.006	915	5.265
2044	220	983	41	489	122	248	762	869	915	4.650
2045	184	819	35	408	102	207	635	709	915	4.012
2046	147	655	28	326	82	165	508	572	915	3.398
2047	110	492	21	245	61	124	381	434	915	2.783
2048	73	328	14	163	41	83	254	297	915	2.168
2049	37	164	7	82	20	41	127	137	915	1.530
2050	0	0	0	0	0	0	0	0	915	915

Eigene Darstellung

Anhang 8

Entwicklung des CO₂-Jahresausstoßes Los 2024

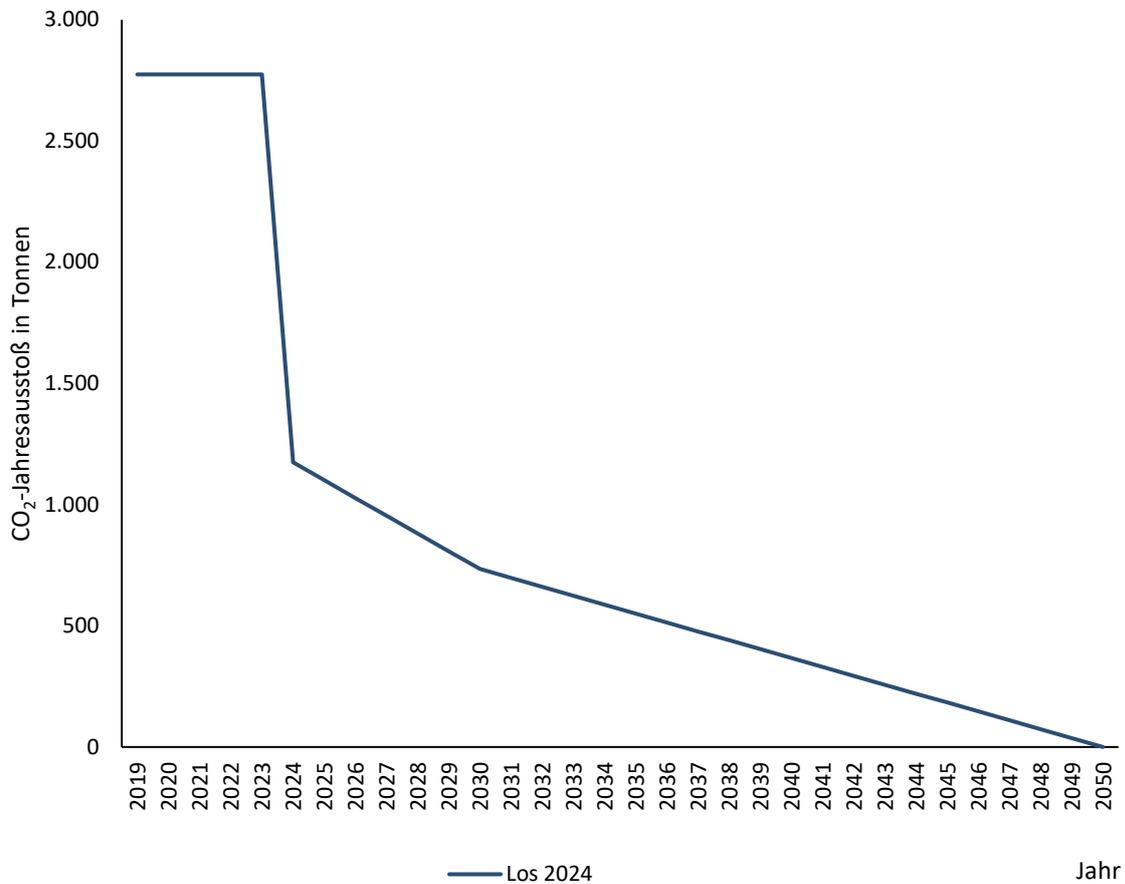


Abbildung 27: Entwicklung CO₂-Emissionen 2019 bis 2050 in t – Los 2024
Eigene Darstellung.

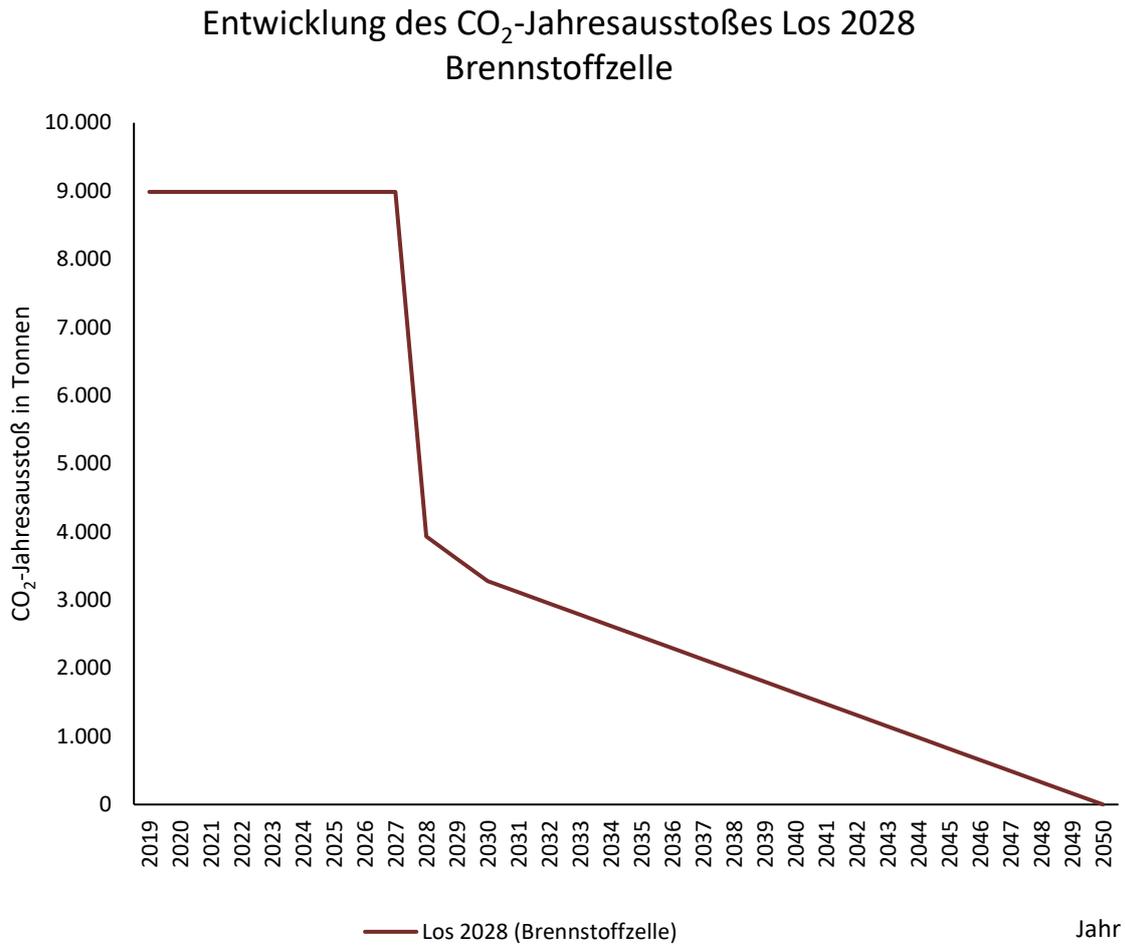


Abbildung 28: Entwicklung CO₂-Emissionen 2019 bis 2050 in t – Los 2028a
Eigene Darstellung.

Entwicklung des CO₂-Jahresausstoßes Los 2028 Hybrid

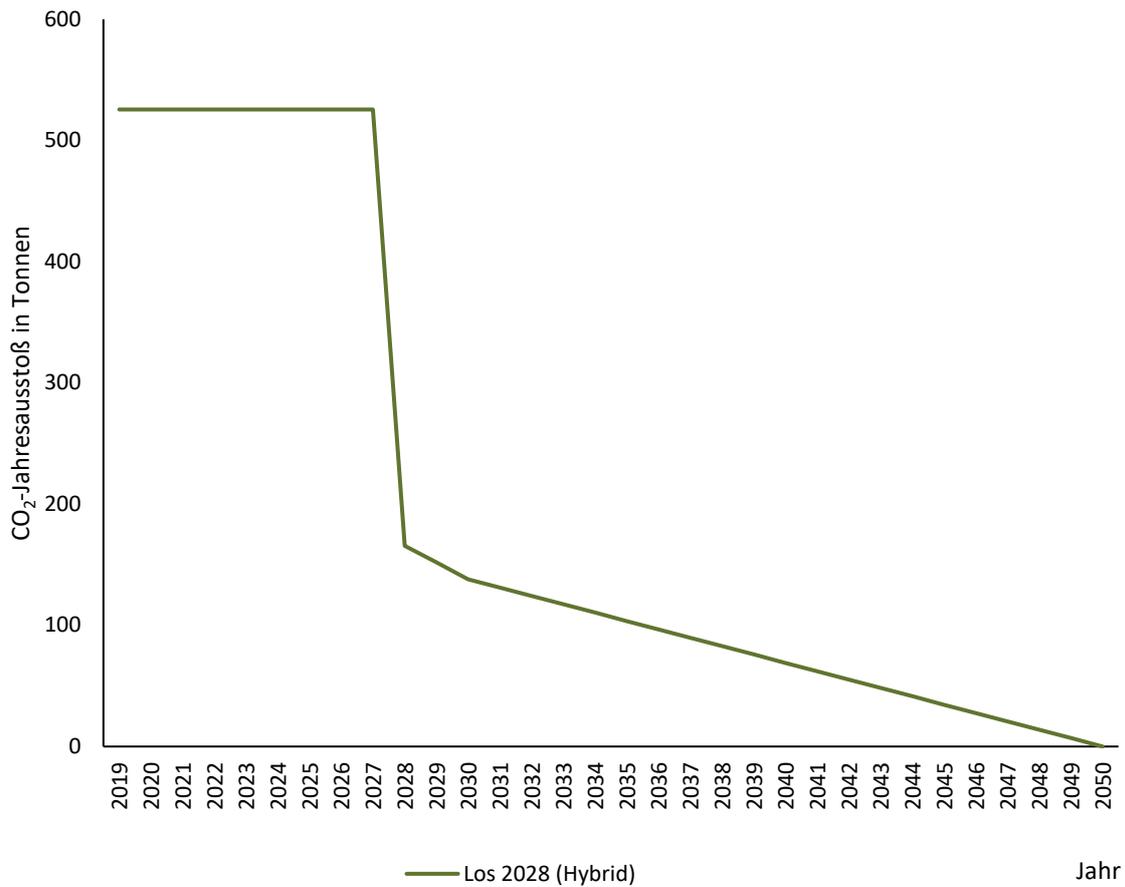


Abbildung 29: Entwicklung CO₂-Emissionen 2019 bis 2050 in t – Los 2028b
Eigene Darstellung.

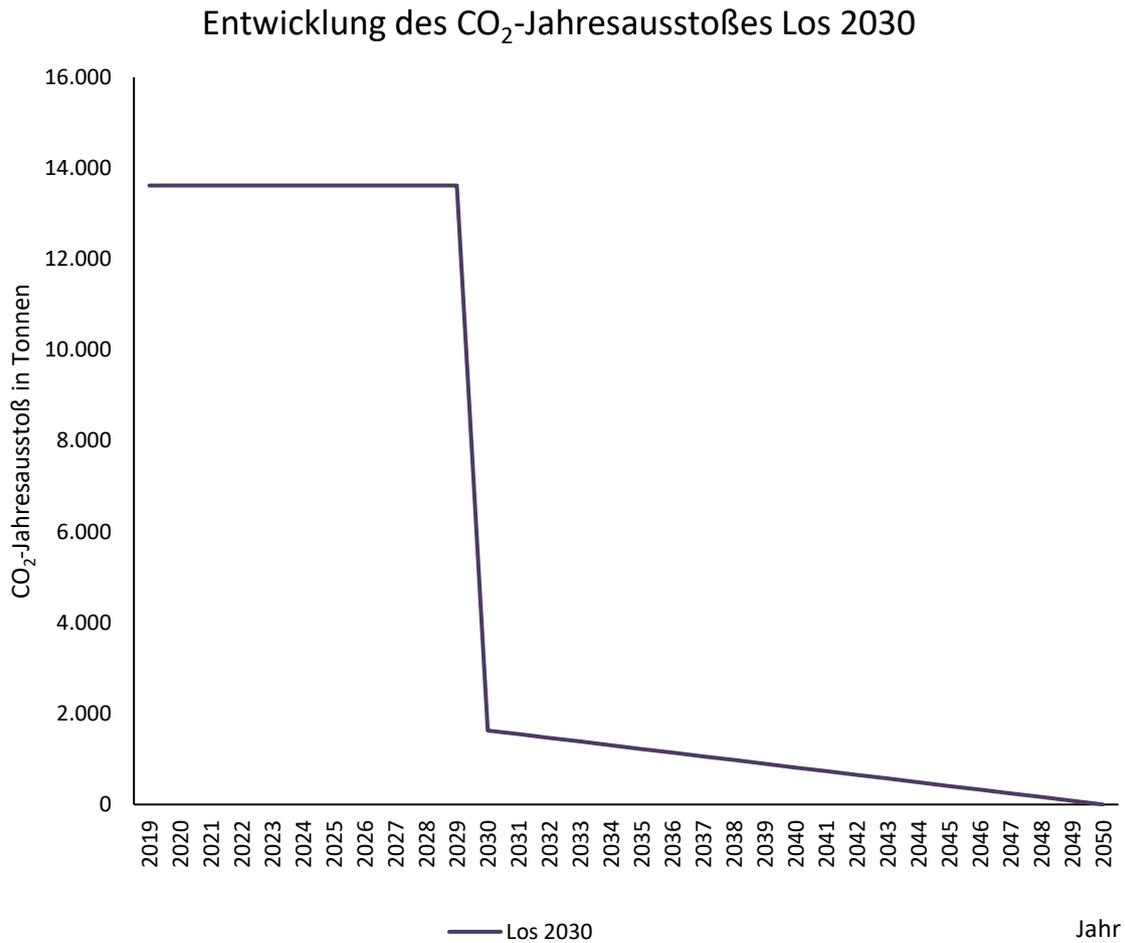


Abbildung 30: Entwicklung CO₂-Emissionen 2019 bis 2050 in t – Los 2030
Eigene Darstellung.

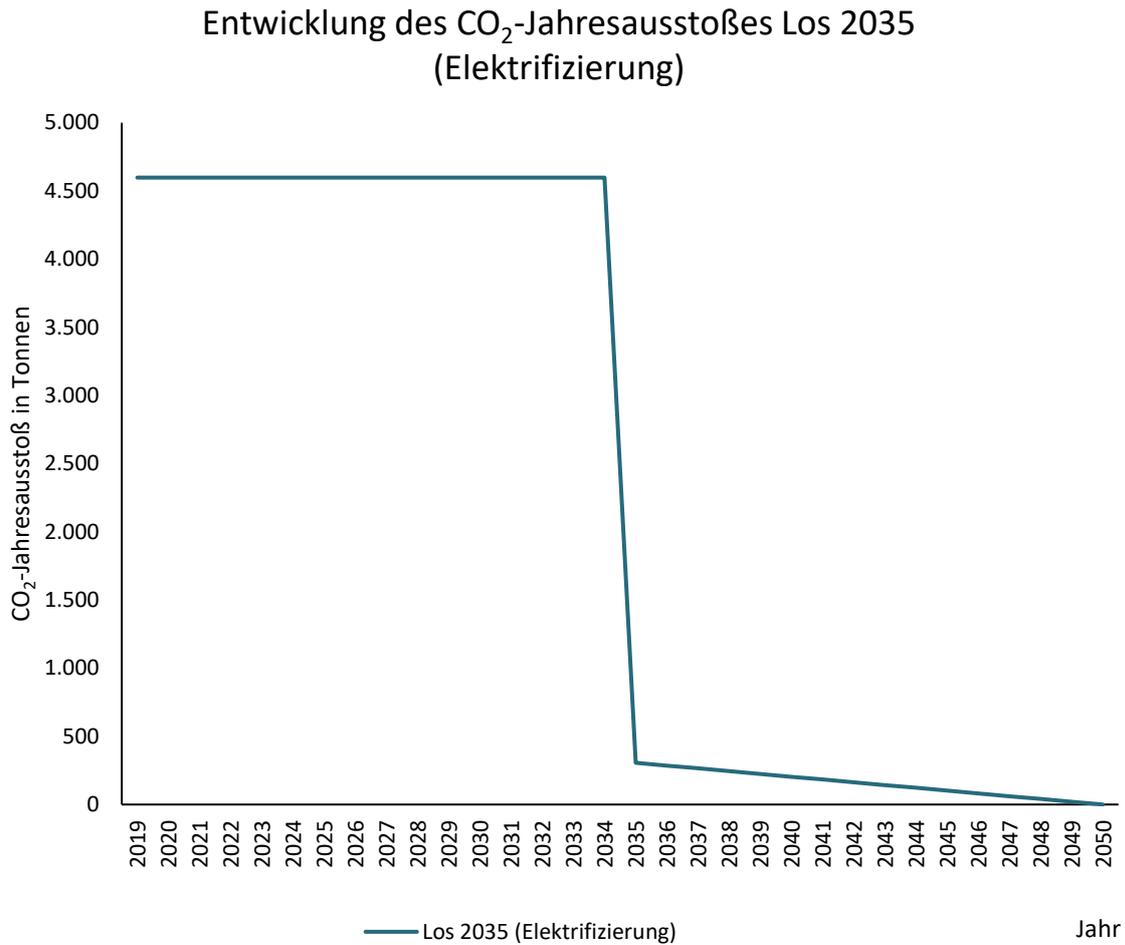


Abbildung 31: Entwicklung CO₂-Emissionen 2019 bis 2050 in t – Los 2035
Eigene Darstellung.

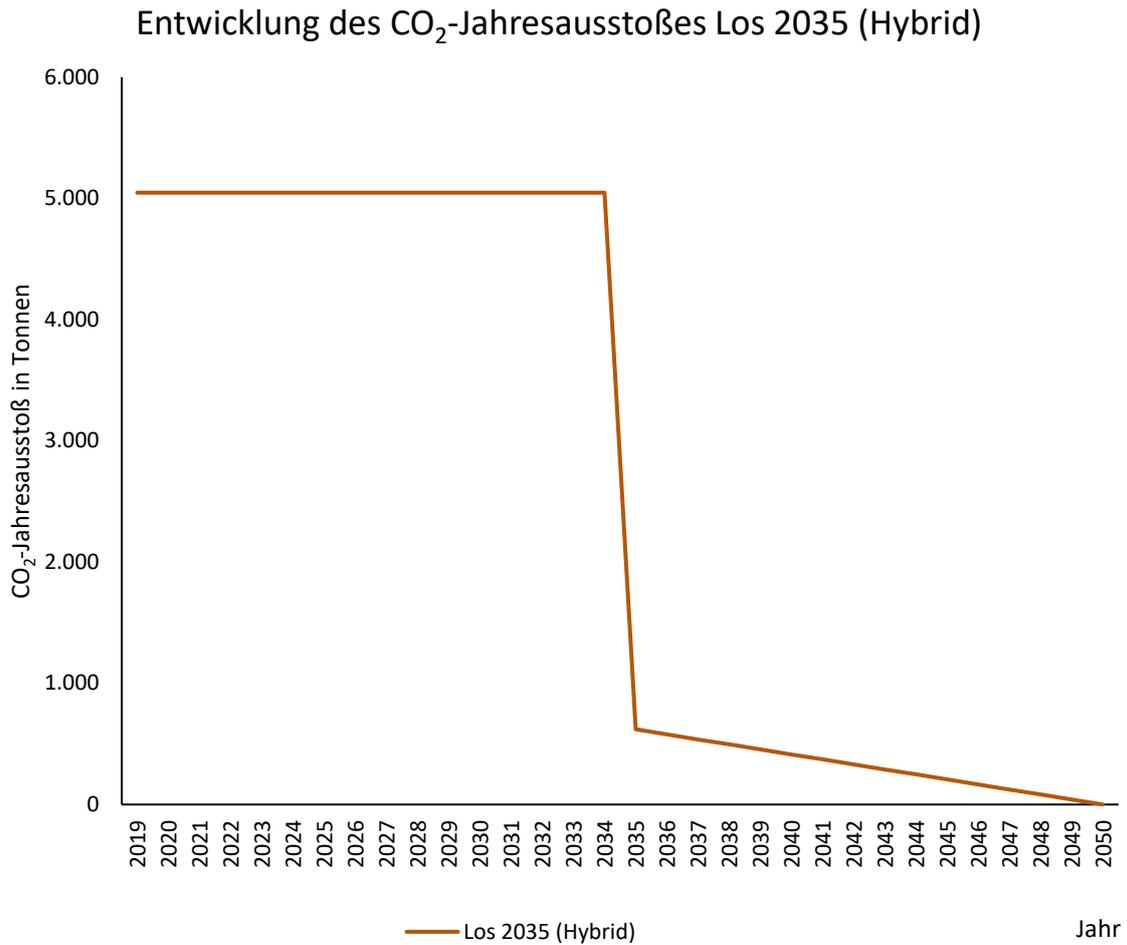


Abbildung 32: Entwicklung CO₂-Emissionen 2019 bis 2050 in t – Los 2035b
Eigene Darstellung.

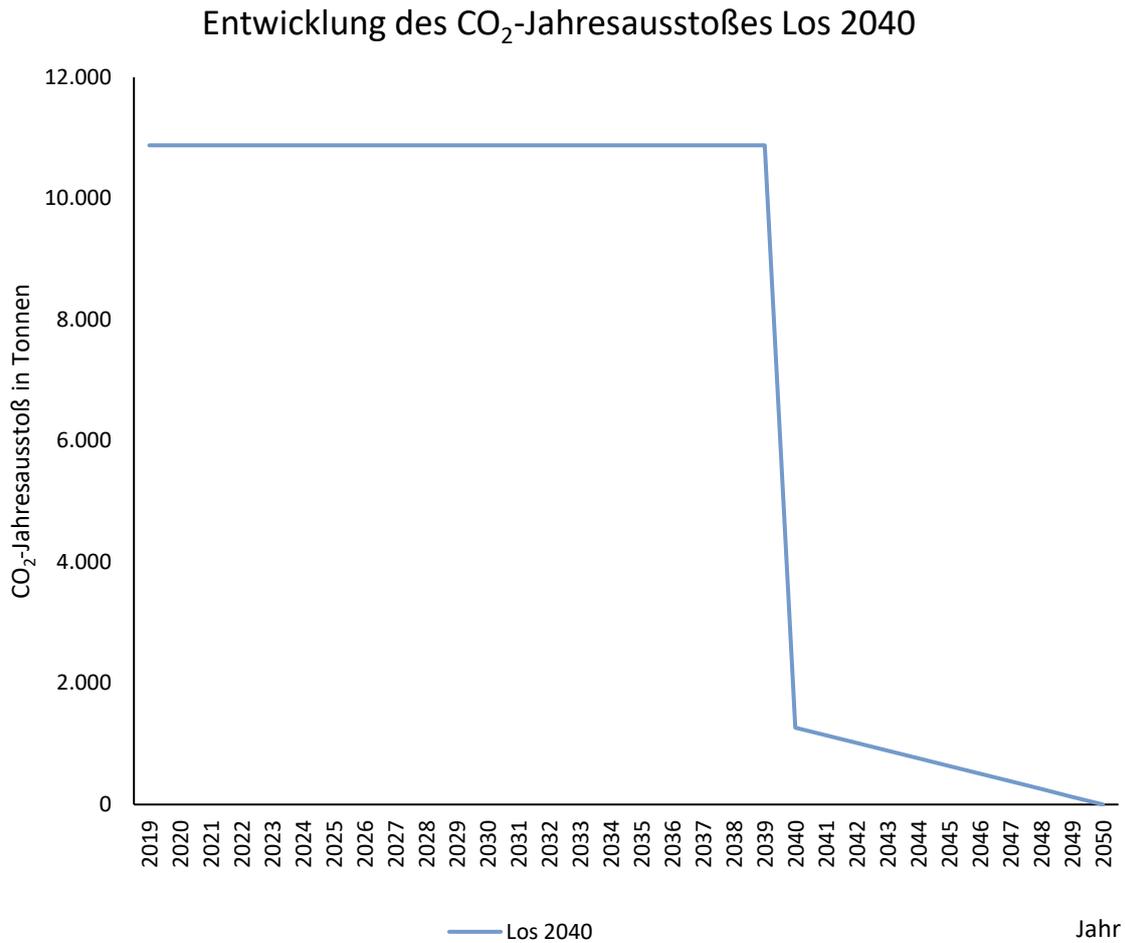


Abbildung 33: Entwicklung CO₂-Emissionen 2019 bis 2050 in t – Los 2040
Eigene Darstellung.

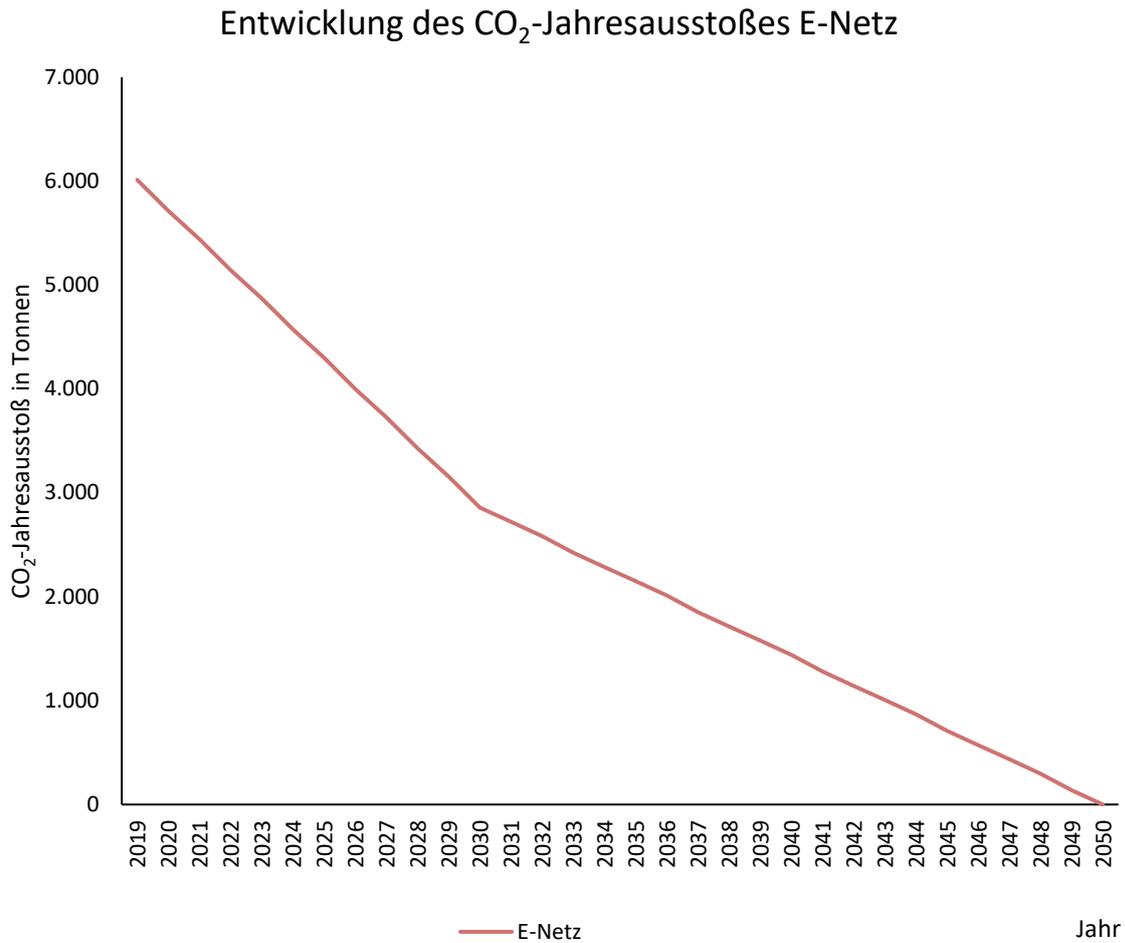


Abbildung 34: Entwicklung CO₂-Emissionen 2019 bis 2050 in t – E-Netz
Eigene Darstellung.

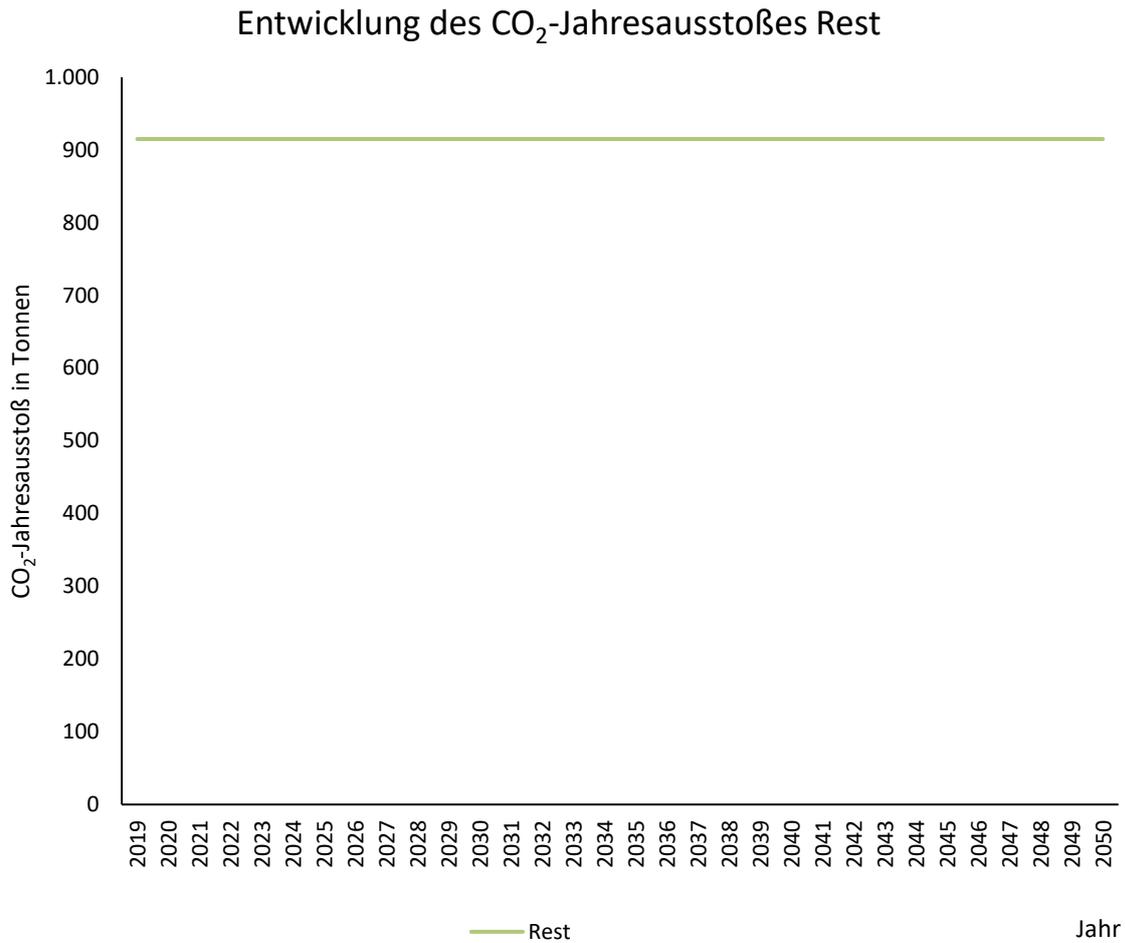


Abbildung 35: Entwicklung CO₂-Emissionen 2019 bis 2050 in t – Rest
Eigene Darstellung.

Anhang 9

Tabelle 11: Aufstellung Kosten in € pro kg CO₂-Reduzierung

Linie	Nicht- elektrifizierte Strecken- kilometer	Benötigte Fahrzeuge	Variante	Kosten Infra- struktur (€)	Mehrkosten Fahrzeuge (€)	Gesamtkosten (€)	CO ₂ -Ausstoß pro Jahr in kg	Kosten (€) pro kg CO ₂ - Einsparung
STB 41	108,18	3	Brennstoffzelle	3.000.000	6.000.000	9.000.000	1.066.706,51	8,44
STB 41	169	4	Brennstoffzelle	4.000.000	8.000.000	12.000.000	1.518.809,26	7,90
STB 44	70,8	3	Brennstoffzelle	2.000.000	6.000.000	8.000.000	1.465.093,58	5,46
STB 44	7,2	1	Brennstoffzelle	1.000.000	2.000.000	3.000.000	197.121,68	15,22
EB 40	16,1	1	Brennstoffzelle	1.000.000	2.000.000	3.000.000	23.826,27	125,91
EB 40	20,1	1	Brennstoffzelle	1.000.000	2.000.000	3.000.000	282.585,47	10,62
STx 50	78,1	2	Brennstoffzelle	2.000.000	4.000.000	6.000.000	863.073,31	6,95
RE 7	87,3	3	Brennstoffzelle	2.000.000	6.000.000	8.000.000	3.051.149,79	2,62
STB 48	9,9	2	Hybrid	1.000.000	2.000.000	3.000.000	218.576,12	13,73
RB 53	21,3	1	Elektro	21.300.000	0	21.300.000	359.909,86	59,18
EB 23	9,5	2	Hybrid	1.000.000	2.000.000	3.000.000	678.382,72	4,42
EB 23	47,8	3	Hybrid	2.000.000	3.000.000	5.000.000	1.113.372,46	4,49
EB 46	27,4	2	Hybrid	2.000.000	2.000.000	4.000.000	785.329,62	5,09
STx 45	36,9	1	Hybrid	2.000.000	1.000.000	3.000.000	307.028,36	9,77
RE 2	81,76	3	Hybrid	3.000.000	3.000.000	6.000.000	2.299.490,71	2,61
RB 52	81,76	3	Hybrid	3.000.000	3.000.000	6.000.000	1.841.780,77	3,26
RE 55 / 56	70,74	4	Hybrid	2.000.000	4.000.000	6.000.000	3.032.398,39	1,98
RE 3	99,4	3	Elektro	99.400.000	0	99.400.000	4.582.931,09	21,69
RE 3 V	27,5	2	Elektro	27.500.000	0	27.500.000	1.267.971,89	21,69
RE 1	65,9	3	Elektro	65.900.000	0	65.900.000	4.238.062,61	15,55
RE 1	102,7	4	Elektro	102.700.000	0	102.700.000	5.275.175,35	19,47
EB 21	27,5	3	Elektro	27.500.000	0	27.500.000	1.669.318,74	16,47
EB 21	40,3	3	Elektro	40.300.000	0	40.300.000	824.004,14	48,91
EB 26	25	2	Hybrid	1.000.000	2.000.000	3.000.000	722.686,96	4,15
Schwarzatalbahn	25	2	Brennstoffzelle	1.000.000	4.000.000	5.000.000	517.962,38	9,65
EB 32	40	2	Hybrid	2.000.000	2.000.000	4.000.000	560.385,96	7,14
EB 28	11,5	3	Hybrid	1.000.000	3.000.000	4.000.000	706.293,90	5,66
EB 22	128	7	Hybrid	5.000.000	7.000.000	12.000.000	2.275.482,71	5,27
EBx 12	128	4	Hybrid	5.000.000	4.000.000	9.000.000	1.422.176,69	6,33
EBx 13	35,4	2	Hybrid	2.000.000	2.000.000	4.000.000	653.323,21	6,12
EB 13	29	1	Hybrid	2.000.000	1.000.000	3.000.000	168.042,13	17,85
RE 3 Greiz	32,4	1	Hybrid	2.000.000	1.000.000	3.000.000	966.665,78	3,10
RB 4	32,4	1	Hybrid	2.000.000	1.000.000	3.000.000	247.240,71	12,13
RB 4	29	2	Hybrid	2.000.000	2.000.000	4.000.000	320.643,38	12,47
RE 10	0	2	Hybrid	2.000.000	2.000.000	4.000.000	906.935,88	4,41
Brennstoffzelle (Gesamt)				17.000.000	40.000.000	57.000.000	8.986.328,24	6,34
Hybridisierung (Gesamt)				42.000.000	47.000.000	89.000.000	19.226.236	4,63
Elektrifizierung (Gesamt)				384.600.000	0	384.600.000	18.217.373,69	21,11

Eigene Darstellung.