

2020

## Bericht

---

**VinnoMiR** – Vorbereitung des Einsatzes innovativer SPNV-Fahrzeuge  
im Mitteldeutschen Revier

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln  
des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem  
Förderkennzeichen 03SSG20501 gefördert.

---

## Inhaltsverzeichnis

0.	Einleitung .....	1
1.	Arbeitspaket Nr. 01 - Infrastrukturen für alternative Antriebe .....	2
1.1	Zusammenfassung AP1 .....	2
1.2	Methodik und Datengrundlagen.....	4
1.3	Bestandsinfrastruktur und Bedarfsermittlung .....	5
1.4	Infrastruktur zur Energieversorgung im Einsatzgebiet .....	10
1.5	Infrastrukturelle Anforderungen für batterieelektrische Züge - BEMU .....	13
1.5.1	Grundlagen für den Betrieb .....	13
1.5.2	Infrastrukturanalyse für batterieelektrische Züge .....	13
1.5.3	Einsatzszenario BEMU für die betrachteten Strecken .....	18
1.6	Infrastrukturelle Anforderungen für Brennstoffzellenzüge - HEMU.....	19
1.6.1	Grundlagen für den Betrieb .....	19
1.6.2	Wasserstofftechnologien .....	20
1.6.3	Aufschlüsselung der notwendigen lokalen Speicherungs- und Transportmaßnahmen .....	26
1.6.4	HEMU-Tankstellenszenario.....	30
1.6.5	Potentielle Standorte der H2-Betankungsanlage .....	33
1.6.6	Einsatzszenario HEMU für die betrachteten Strecken .....	41
1.7	Infrastrukturelle Anforderungen Wartung und Instandsetzung HEMU / BEMU.....	43
1.8	Infrastrukturelle Anforderungen Vergleich BEMU / HEMU .....	44
1.9	Fazit/Handlungsempfehlung.....	46
1.10	Literaturverzeichnis .....	47
2.	Arbeitspaket Nr. 02 – Energieinfrastrukturtechnologien .....	45
2.1	Zusammenfassung.....	45
2.2	Darstellung alternativer Antriebstechnologien und Energieversorgungsketten.....	46
2.2.1	Fahrzeuge.....	46
2.2.2	Marktübersicht.....	47
2.2.3	Energieversorgungsketten.....	48
2.3	Ermittlung der technischen Machbarkeit.....	50
2.3.1	Zugfahrtsimulation mit OpenTrack.....	50
2.3.2	Simulation des Leistungs- und Energiebedarfs.....	55
2.3.3	Simulation des Batterieladezustands und Ableitung der Nachladeinfrastruktur.....	55
2.3.4	Ergebnisse der technischen Machbarkeitsanalyse .....	57
2.4	SWOT-Analyse .....	59
2.4.1	Vorgehensweise und Methodik .....	59

2.4.2	Umsetzung .....	63
2.4.3	Ergebnis.....	64
2.5	Wirtschaftlichkeitsanalyse auf Basis von Systemkosten .....	67
2.5.1	Einleitung .....	67
2.5.2	Fahrzeugkosten .....	67
2.5.3	Energiekosten .....	68
2.5.4	Systemkosten.....	70
2.6	Vergleich mit konventioneller Streckenelektrifizierung .....	72
2.7	Fazit/Handlungsempfehlung.....	73
2.8	Literaturverzeichnis .....	74
2.9	Anhang.....	75
3.	Arbeitspaket Nr. 03 – Recht, Sicherheit und Organisation .....	75
3.1	Analyse rechtlicher Aspekte .....	75
3.1.1	Fragestellung, Analyse rechtlicher Aspekte.....	75
3.1.2	Ergebnis.....	75
3.2	Rechtliche Prüfung.....	76
3.2.1	Energieladeinfrastruktur und Energiebeschaffung .....	76
3.2.2	Errichtung von Ladeinfrastruktur .....	79
3.2.3	Einsatz von Wasserstoffzügen .....	85
3.2.4	Fahrzeugzulassung .....	92
3.3	Vergabemodelle .....	93
3.3.1	Modell 1: „Klassische“ Vergabe aller Leistungen an ein EVU .....	93
3.3.2	Modell 2: „Energiebereitstellung“ durch den AT.....	96
3.3.3	Modell 3.a: Fahrzeugbereitstellung durch den AT .....	104
3.3.4	Modell 3.b: Fahrzeugbereitstellung durch einen Dritten.....	110
3.4	Analyse sicherheitsspezifischer Aspekte .....	113
3.4.1	Ziel des AP 3.2.....	113
3.4.2	Sicherheitsspezifische Aspekte .....	113
3.5	Analyse organisatorischer Aspekte .....	118
3.5.1	Ziel des AP 3.3 / der Variantenbetrachtung .....	118
3.5.2	Varietendefinition .....	119
3.5.3	Relevante Leistungen für Bahnbetrieb mit innovativen Fahrzeugen .....	120
3.5.4	Varianten der Ausschreibung / Vertragsgestaltung.....	132
3.6	Empfehlungen für die Integration in MDSB2025plus .....	141
3.6.1	Ableitung der Ergebnisse auf die konkret betroffenen Strecken .....	141
3.6.2	Festlegung der Traktionsart.....	141

3.6.3	Wahl des Vergabe- und Vertragsmodells .....	142
3.6.4	Weitergehende vertragliche Instrumente im Verkehrsvertrag .....	143
3.7	Literaturverzeichnis und Anlagen .....	149
4.	Arbeitspaket Nr. 04 - Wirtschaftlichkeit alternativer Antriebe .....	150
4.1	Zusammenfassung.....	150
4.2	Einleitung .....	150
4.3	Methodik .....	151
4.4	Datengrundlage.....	152
4.5	Wirtschaftlichkeit des Einsatzes alternativer Antriebe im Mitteldeutschen Revier .	153
4.5.1	Ermittlung der veränderlichen Kosten.....	153
4.5.2	Szenarien Energiepreisentwicklung.....	156
4.5.3	Wirtschaftlichkeit der Antriebskonzepte .....	159
4.5.4	Sensitivitätsanalyse.....	164
4.6	Fazit .....	165
5.	Arbeitspaket Nr. 05 - Umweltaspekte .....	166
5.1	Zusammenfassung.....	166
5.1.1	Hintergrund und Vorgehen .....	167
5.2	SCHADSTOFF- UND KLIMAGAS-EMISSIONSANALYSE .....	169
5.2.1	Allgemeine Methodik.....	169
5.2.2	Beschreibung Well-to-Wheel-Pfade (WtW).....	169
5.2.3	Schadstoffemissionen .....	175
5.2.4	Klimagasemissionen .....	186
5.2.5	Zusammenfassung Emissionen .....	190
5.3	LÄRMEMISSIONEN.....	192
5.3.1	Grundlegendes.....	192
5.3.2	Dokumente.....	192
5.3.3	Gegenstand der Betrachtung .....	192
5.3.4	Datenvergleich .....	193
5.3.5	Zusammenfassung.....	195
5.4	REGIONALE ASPEKTE.....	196
5.4.1	Einführung.....	196
5.4.2	Charakterisierung der Strecken 2020 .....	196
5.4.3	Charakterisierung der Strecken 2025/2035 .....	199
5.4.4	Regionale Energiequellen und Infrastrukturen.....	199
5.4.5	Zusammenfassung.....	201
5.5	Gesamtauswertung .....	202

5.5.1	Aufgabenstellung .....	202
5.6	Fazit .....	206
5.7	Literaturverzeichnis .....	207
6.	AP6 Handlungsempfehlung, Zeitplan .....	209
6.1	Handlungsempfehlung .....	209
6.1.1	Abwägung der Einzelempfehlungen, Handlungsempfehlung gesamt .....	213
6.2	Nutzwertanalyse.....	213
6.3	Projektentwicklungsschritte, -zeitplan .....	218
6.3.1	Errichtung des Fahrzeugpools.....	218
6.3.2	Vergabeverfahren für die Verkehrsleistung .....	219
6.3.3	Beschaffung Darlehensvertrag durch ZVNL für den Fahrzeugpool.....	220
6.3.4	Abschluss Verträge zwischen Fahrzeugpool GmbH und EVU .....	220
6.3.5	Abschluss Darlehensvertrag mit Finanzierungsinstitut.....	220
6.3.6	Abschluss Herstellervertrag zwischen EVU und Hersteller.....	220
6.3.7	Abtretung der Gewährleistungsrechte aus dem Herstellervertrag.....	221
6.3.8	Stellung von Sicherheiten durch das EVU .....	221
6.3.9	Fahrzeugbau .....	221
6.3.10	Direktzahlung Vergütung für Fahrzeuglieferung an Hersteller .....	221
6.3.11	Stellung von Sicherheiten durch Hersteller .....	221
6.3.12	Eigentumserwerb durch Fahrzeugpool GmbH und Besitz des EVU .....	221
6.3.13	Pachtvertrag und Pachtzahlungen des EVU.....	221
6.3.14	Verkehrsleistung .....	221
6.3.15	Zeitplan .....	222
6.4	Literatur.....	227

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Übersicht Bestandssituation Hbf. Döbeln [Goggle Maps].....	7
Abbildung 2 Impressionen Hbf. Döbeln mit wartendem RB110.....	7
Abbildung 3 Impressionen VS Großbothen.....	8
Abbildung 4 Übersicht Bestandsituation VS Grimma ob.Bf [Google Maps].....	8
Abbildung 5 Impressionen VS Grimma ob. Bf mit Triebzug auf Abstellgleis.....	9
Abbildung 6 Übersicht Bestandssituation VS Borsdorf [Google Maps].....	9
Abbildung 7 Impressionen Gleis 2 und 3 VS Borsdorf .....	9
Abbildung 8 Grundlage BEMU-Betrieb [43] .....	13
Abbildung 9 Anteil elektrifizierter Strecken in Prozent [26].....	14
Abbildung 10 Traktionsart des Schienennetzes im Untersuchungsraum [27].....	15
Abbildung 11 Topographie des Bahnstromnetzes [29].....	16
Abbildung 12 Stromnetzinfrastuktur im Untersuchungsraum Leipzig, Zeitz, Gera Döbeln und Grimma [30] .....	17
Abbildung 13 Grundlage HEMU-Betrieb [43] .....	19
Abbildung 14 Versorgungsmodell HEMU.....	19
Abbildung 15 Kategorien der Wasserstoffherstellung [33] .....	20
Abbildung 16 Darstellung der Wasserstoffregion in Mitteldeutschland i.V.m. der H2-Pipeline der Hypos-Region [45] [46].....	23
Abbildung 17 Vergleich volumetrische (links) und gravimetrische (rechts) Energiedichte .....	27
Abbildung 18 Betrachtete Standorte für H2-Betankungsanlage im Großraum Leipzig .....	33
Abbildung 19 Potentieller H2-Betankungsstandort Leipzig-Engelsdorf .....	34
Abbildung 20 Potentieller H2-Betankungsstandort BW Leipzig Hbf Süd .....	35
Abbildung 21 Potentieller H2-Betankungsstandort Umgebung ehemaliger Postbahnhof .....	36
Abbildung 22 Potentieller H2-Betankungsstandort VS Leipzig Stötteritz.....	37
Abbildung 23 Potentieller H2-Betankungsstandort VS Leipzig Plagwitz.....	38
Abbildung 24 Potentieller H2-Betankungsstandort VS Leipzig Miltitzer Allee .....	39
Abbildung 25 Potentieller H2-Betankungsstandort Bahnbetriebsgelände Leipzig Wahren....	40
Abbildung 26 Handlungsempfehlung Leipzig Miltitzer Allee - VS Grimma ob.Bf - Döbeln Hbf .....	46
Abbildung 27 Handlungsempfehlung Leipzig Hbf tief - Gera Hbf .....	46
Abbildung 28: Blockschaltbild BEMU [1].....	46
Abbildung 29: Blockschaltbild HEMU [1].....	47
Abbildung 30: Energieversorgungsketten [2] .....	48
Abbildung 31: Zugkraft-Geschwindigkeits-Kennlinie BEMU .....	52
Abbildung 32: Zugkraft-Geschwindigkeits-Kennlinie HEMU.....	53
Abbildung 33: Fahrprofil v(t) Leipzig - Grimma - Döbeln .....	54
Abbildung 34: Fahrprofil v(t) Leipzig – Gera .....	54
Abbildung 35: elektrischer Leistungsverlauf P(t) BEMU, Leipzig - Döbeln .....	55
Abbildung 36: SOC-Verlauf BEMU, Strecke Leipzig - Döbeln.....	56
Abbildung 37: SOC-Verlauf BEMU, Strecke Leipzig - Gera .....	57
Abbildung 38: resultierende TOWS-Matrix der SWOT-Analyse (BEMU System).....	64
Abbildung 39: resultierende TOWS-Matrix der SWOT-Analyse (HEMU System).....	64
Abbildung 40: SWOT-Analyse, Ergebnisse BEMU System .....	65
Abbildung 41: SWOT-Analyse, Ergebnisse HEMU System .....	65
Abbildung 42: elektrischer Leistungsverlauf HEMU, Strecke Leipzig - Grimma – Döbeln .....	75
Abbildung 43: elektrischer Leistungsverlauf BEMU, Strecke Leipzig - Gera .....	75

Abbildung 44: elektrischer Leistungsverlauf HEMU, Strecke Leipzig - Gera .....	76
Abbildung 45 - Auszug aus „Register of Infrastructure (RINF)“ <a href="https://rinf.era.europa.eu/RINF">https://rinf.era.europa.eu/RINF</a> .....	114
Abbildung 46 - Auszug aus "Technische Netzzugangsbedingungen (TNB)" im Kapitel F.2 .....	115
Abbildung 47: Leipzig – Döbeln, Szenarien, Summe Kosten (in Mio. EUR) .....	159
Abbildung 48: Leipzig – Döbeln, Trendszenario - Summe Kosten (in Mio. EUR) .....	160
Abbildung 49: Leipzig – Döbeln, Rückschlagszenario - Summe Kosten (in Mio. EUR) .....	160
Abbildung 50: Leipzig – Döbeln, Offensiv Szenario - Summe Kosten (in Mio. EUR) .....	161
Abbildung 51: Leipzig – Gera, Szenarien, Summe Kosten (in Mio. EUR) .....	162
Abbildung 52: Leipzig – Gera, Trendszenario - Summe Kosten (in Mio. EUR) .....	162
Abbildung 53: Leipzig – Gera, Rückschlagszenario - Summe Kosten (in Mio. EUR) .....	163
Abbildung 54: Leipzig – Gera, Offensiv Szenario - Summe Kosten (in Mio. EUR) .....	163
Abbildung 55 Übersicht über die Energieversorgungspfade der unterschiedlich angetriebenen Fahrzeuge des SPNV in 2025 .....	167
Abbildung 56 Übersicht über die Energieversorgungspfade der unterschiedlich angetriebenen Fahrzeuge des SPNV in 2035 .....	168
Abbildung 57 Grafische Darstellung einer Energievorkette in E3database am Beispiel von Pfad IIIb .....	169
Abbildung 58 Strommix Deutschland in 2025 [Öko-Institut & Prognos 2019] .....	171
Abbildung 59 Strommix Deutschland in 2035 [Öko-Institut & Prognos 2019] .....	171
Abbildung 60 NMVOC-Emissionen WtSt Szenario 2025 .....	177
Abbildung 61 NMVOC-Emissionen WtSt Szenario 2035 .....	177
Abbildung 62 NO <sub>x</sub> -Emissionen WtSt Szenario 2025 .....	178
Abbildung 63 NO <sub>x</sub> -Emissionen WtSt Szenario 2035 .....	178
Abbildung 64 SO <sub>2</sub> -Emissionen WtSt Szenario 2025 .....	179
Abbildung 65 SO <sub>2</sub> -Emissionen WtSt Szenario 2035 .....	179
Abbildung 66 CO-Emissionen WtSt Szenario 2025 .....	180
Abbildung 67 CO-Emissionen WtSt Szenario 2035 .....	180
Abbildung 68 Emission von Staub und Partikeln WtSt Szenario 2025 .....	181
Abbildung 69 Emission von Staub und Partikeln WtSt Szenario 2035 .....	181
Abbildung 70 NMVOC-Emissionen WtW für Szenario 2025 .....	182
Abbildung 71 NMVOC-Emissionen WtW für Szenario 2035 .....	182
Abbildung 72 NO <sub>x</sub> -Emissionen WtW für Szenario 2025 .....	183
Abbildung 73 NO <sub>x</sub> -Emissionen WtW für Szenario 2035 .....	183
Abbildung 74 SO <sub>2</sub> -Emissionen WtW für Szenario 2025 .....	184
Abbildung 75 SO <sub>2</sub> -Emissionen WtW für Szenario 2035 .....	184
Abbildung 76 CO-Emissionen WtW für Szenario 2025 .....	185
Abbildung 77 CO-Emissionen WtW für Szenario 2035 .....	185
Abbildung 78 Emissionen von Staub und Partikeln WtW für Szenario 2025 .....	186
Abbildung 79 Emissionen von Staub und Partikeln WtW für Szenario 2035 .....	186
Abbildung 80 Treibhausgasemissionen aus der Bereitstellung (WtSt) und Nutzung (Verbrennung) für Szenario 2025 .....	187
Abbildung 81 Treibhausgasemissionen aus der Bereitstellung (WtSt) und Nutzung (Verbrennung) für Szenario 2035 .....	188
Abbildung 82 Treibhausgasemissionen WtW für Szenario 2025 (Leipzig–Grimma–Döbeln) .....	188
Abbildung 83 Treibhausgasemissionen WtW für Szenario 2035 (Leipzig–Grimma–Döbeln) .....	189

Abbildung 84 Treibhausgasemissionen WtW für Szenario 2035 (Leipzig-Gera) .....	189
Abbildung 85 Treibhausgasemissionen WtW für Szenario 2035 (Leipzig–Gera) .....	190
Abbildung 86 Lärmemissionen unterschiedlich angetriebener Triebwagen nach Bewegungszustand [dB].....	194
Abbildung 87 Lärmemission und Grenzwert alternativer Antriebe [dB] .....	195
Abbildung 88 Streckenverlauf [Quelle: Funktionale Leistungsbeschreibung Anlage G, S. 2] .....	198
Abbildung 89 HYPOS – Region (keine Bildrechte) .....	201
Abbildung 90 Analytierte Strom-, Wasserstoff- und Dieselkraftstoff-Versorgungspfade .....	203
Abbildung 91 Vergleich der Schadstoffemissionen unterschiedlicher Antriebskonzepte für 2025 und 2035 am Beispiel SO <sub>2</sub> -Emissionen (WtW) .....	203
Abbildung 92 Vergleich der THG-Emissionen unterschiedlicher Antriebskonzepte für 2025 und 2035 (WtW) .....	204
Abbildung 93 Lärmemissionsvergleich elektrischen mit dieselbetriebenen Triebwagen .....	205

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Zusammenfassung Energiebedarfsanalyse nach AP2; Leipzig Miltitzer Allee - Döbel Hbf .....	5
Tabelle 2 Zusammenfassung Energiebedarfsanalyse nach AP2; Leipzig Hbf tief - Zeitz - Gera .....	5
Tabelle 3 Zusammenfassung Bestandsinfrastruktur .....	6
Tabelle 4 Infrastruktur einzelner VS der Strecke RB110.....	6
Tabelle 5 Einsatzszenarion BEMU; Strecke Miltitzer Allee – Döbeln Hbf.....	18
Tabelle 6 Zusammenfassung Optionen Bereitstellung Wasserstoff .....	25
Tabelle 7 Übersicht Speicherarten für Wasserstoff.....	26
Tabelle 8 Bewertung potentieller H2-Betankungsort Leipzig-Engelsdorf.....	34
Tabelle 9 Bewertung potentieller H2-Betankungsort BW Leipzig Hbf Süd .....	35
Tabelle 10 Bewertung potentieller H2-Betankungsort Umgebung ehemaliger Postbahnhof	36
Tabelle 11 Bewertung potentieller H2-Betankungsort VS Leipzig Stötteritz .....	37
Tabelle 12 Bewertung potentieller H2-Betankungsort VS Leipzig Plagwitz .....	38
Tabelle 13 Bewertung potentieller H2-Betankungsort VS Leipzig Miltitzer Allee .....	39
Tabelle 14 Bewertung potentieller H2-Betankungsort Bahnbetriebsgelände Leipzig Wahren .....	40
Tabelle 15 Vergleich Infrastrukturanforderungen BEMU /HEMU; Strecke VS Miltitzer Allee – Döbeln Hbf .....	44
Tabelle 16 Vergleichsmatrix Infrastruktur BEMU /HEMU; Strecke VS Miltitzer Allee – Döbeln Hbf .....	45
Tabelle 17: Ausgewählte Antriebskonzepte für die Untersuchung .....	48
Tabelle 18: Fahrzeugdaten BEMU.....	51
Tabelle 19: Fahrzeugdaten HEMU .....	52
Tabelle 20: Fahrzeugkosten, Strecke Leipzig - Döbeln.....	67
Tabelle 21: Fahrzeugkosten, Strecke Leipzig - Grimma .....	68
Tabelle 22: Energieverbrauch und Energiekosten, Strecke Leipzig - Döbeln .....	69
Tabelle 23: Energieverbrauch und Energiekosten, Strecke Leipzig - Gera .....	69
Tabelle 24: spezifische Energiekosten alternativer Antriebssysteme .....	69
Tabelle 25: Systemkosten, Strecke Leipzig – Grimma – Döbeln.....	70
Tabelle 26: Systemkosten, Strecke Leipzig – Gera .....	71
Tabelle 27 - Übersicht berücksichtigter Vergabe-/ Vertragsmodelle.....	132
Tabelle 28: Fahrzeuginvestitionen .....	152
Tabelle 29: Streckenbezogener Energieverbrauch .....	152
Tabelle 30 Treibhausgasemissionen von Diesel aus Rohöl.....	170
Tabelle 31 Technische Daten der H <sub>2</sub> -Produktion mittels Wasserelektrolyse .....	172
Tabelle 32 Transport von Wasserstoff mit Lkw-Trailern .....	173
Tabelle 33 H <sub>2</sub> -Produktion mittels Dampfreformierung von Erdgas .....	174
Tabelle 34 Endenergieverbrauch und Emissionen (Tank-to-Wheel) für Triebwagen auf der Strecke Leipzig – Grimma – Döbeln (Einfachtraktion).....	176
Tabelle 35 Endenergieverbrauch und Emissionen Tank-to-Wheel Triebzüge für die Strecke Leipzig – Gera (Einfachtraktion) .....	176
Tabelle 36 Treibhausgas-Wirkungsfaktoren ausgewählter Treibhausgase nach IPCC .....	187
Tabelle 37 Emissionen WtW Leipzig – Grimma – Döbeln (Einfachtraktion) 2025 .....	190
Tabelle 38 Emissionen WtW Leipzig – Gera (Einfachtraktion) 2025 .....	191
Tabelle 39 Emissionen WtW Leipzig – Grimma – Döbeln (Einfachtraktion) 2035 .....	191

Tabelle 40 Emissionen WtW Leipzig – Gera (Einfachtraktion) 2035 .....	191
Tabelle 41 Verwendete Literatur.....	192
Tabelle 42 Abkürzungen.....	192
Tabelle 43 Gemittelte Lärmemissionswerte Dieseltriebzug [dB] .....	193
Tabelle 44 Gemittelte Lärmemissionswerte für alternative Antriebe [dB] .....	194
Tabelle 45 Zusammenfassung der Handlungsempfehlungen .....	213
Tabelle 46: Erfüllungswerte und Nutzwert BEMU .....	216
Tabelle 47: Erfüllungswerte und Nutzwert HEMU .....	217
Tabelle 48 Projektzeitplan .....	223

## 0. Einleitung

Im Zuge der Klimaschutzziele muss auch der Schienenpersonennahverkehr (SPNV) seine Antriebstechnologien auf einen fossilfreien Betrieb ausrichten. Während bei elektrifizierten Strecken die infrastrukturelle Grundvoraussetzung bei Nutzung von Strom aus erneuerbaren Energien gegeben ist, müssen für bisher dieselbetriebene Strecken, die keine oder nur eine sehr langfristige Aussicht auf Elektrifizierung haben, andere Technologien zum Einsatz kommen.

Im Rahmen dieser Analyse waren die Strecken Leipzig Hbf. – Grimma ob. Bf. – Döbeln Hbf. Mit der Erweiterung um die Teilstrecke Grimma ob. Bf. – Großbothen – Colditz – Rochlitz sowie die Strecke Leipzig Hbf. – Zeitz Hbf. – Gera-Hbf. auf die Möglichkeit der Bedienung mit alternativen Antriebstechnologien umfassend zu untersuchen. Die Strecke Leipzig – Döbeln sollte insofern prioritär und als Referenzstrecke betrachtet werden, da diese Strecke bei der SPNV-Vergabe des MDSB ab 12/2025 in den City-Tunnel Leipzig (CTL) eingebunden werden soll.

Vor diesem Hintergrund wurden mehrere Projektpartner bei der Erstellung der Studie für die Themenbereiche

1. Infrastrukturen für alternative Antriebe - Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU
2. Energieinfrastrukturtechnologien - IFB Institut für Bahntechnik GmbH
3. Recht, Sicherheit und Organisation – TÜV Rheinland InterTraffic GmbH
4. Wirtschaftlichkeit - NahverkehrsBeratung Südwest PG
5. Umweltaspekte - Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH
6. Entwicklungsfahrplan, Gesamtdokumentation, Handlungsempfehlung, Projektsteuerung – vci VerkehrsConsult Ingenieurgesellschaft mbH

einbezogen. Dieses Konsortium erarbeitete die nachstehenden Ergebnisse im Zeitraum Juni – Dezember 2020.

## 1. Arbeitspaket Nr. 01 - Infrastrukturen für alternative Antriebe

Vor dem Hintergrund der Neubeauftragung von SPNV-Leistungen durch den ZVNL ab 2025 sind in AP1 des Vorhabens VinnoMiR derzeit dieselbasierte Streckenabschnitte hinsichtlich der infrastrukturellen Gegebenheiten und Anforderungen für einen Betrieb mit alternativen Antriebsvarianten zu analysieren.

In Bezug auf die potentiellen alternativen Antriebe sind folgenden Inhalte in den jeweiligen Arbeitspaketen analysiert und bearbeitet worden:

### **AP1.1** Erfassung der Bestandsinfrastruktur für den Betrieb mit konventionellen Dieselantrieben

Die Erfassung der Bestandsinfrastruktur erfolgt vorrangig für die priorisierte Strecke Leipzig Miltitzer Allee – Döbeln Hbf durch Befragung des Auftraggebers und einer Vor-Ort-Begehung.

### **AP1.2** Infrastruktur zur Energieversorgung

In diesem Arbeitspaket werden die Optionen zur Energieversorgung im Einsatzgebiet als auch die bundesweiten Entwicklungen analysiert und hinsichtlich des Einsatzzweckes ausgewertet.

### **AP1.3** Infrastrukturelle Anforderungen für batterieelektrische Züge – BEMU

Neben der Zusammenfassung der technologischen Anforderungen für das Betreiben batterieelektrischer Züge, werden innerhalb dieses Arbeitspaketes die notwendigen infrastrukturellen Maßnahmen für eine HEMU-Anwendung betrachtet.

### **AP1.4** Infrastrukturelle Anforderungen für Brennstoffzellenzüge – HEMU

Analog zum vorangegangenen Arbeitspaket erfolgt die technologische als auch infrastrukturelle Betrachtung für einen Betrieb mit wasserstoffbasierten Zügen.

### **AP1.5** Infrastrukturelle Anforderungen Wartung HEMU / BEMU

In diesem Arbeitspaket werden die infrastrukturellen Anforderungen hinsichtlich der Aspekte Wartung und Instandhaltung für die beiden alternativen Antriebskonzepte (HEMU / BEMU) betrachtet.

### **AP1.6** Vergleich infrastrukturelle Anforderungen HEMU / BEMU

Abschließen wir innerhalb dieses Arbeitspaketes ein Vergleich zwischen den notwendigen infrastrukturellen Anforderungen zum Betrieb von HEMU / BEMU Zügen im Einsatzgebiet erarbeitet um eine finale Handlungsempfehlung ableiten zu können.

## 1.1 Zusammenfassung AP1

Für die Strecke **Leipzig Miltitzer Allee - Grimma ob.Bf - Döbeln Hbf** mit optionaler Streckenerweiterung bis Rochlitz ist durch die Elektrifizierung des Streckenabschnittes bis Borsdorf als auch des Wendepunktes Döbeln Hbf ein deutlicher infrastruktureller Vorteil hinsichtlich des Betriebes mit batterieelektrischen Zügen zu sehen. Ein BEMU-Betrieb kann mit überschaubaren Infrastrukturmaßnahmen erfolgen. Die Nachladung erfolgt im

Wesentlichen in Döbeln Hbf und den restlichen Oberleitungsabschnitten. Die derzeit vorhandenen Netzleistungen sind für den Betrieb der Strecke ausreichend.

Der potentielle Betrieb mit Wasserstoff bedingt die Betrachtung und Errichtung der kompletten Versorgungskette, von der Bereitstellung, Transport bis zur H2-Bahnbetankungsanlage. Für die Wasserstoffbereitstellung kann von der bestehenden Infrastruktur der Hypos-Region und dem Industriestandort Leuna profitiert werden. Eine, für den Anwendungsfall explizite Errichtung grüner H2-Erzeugungskapazität in Kombination mit EE-Anlagen ist weder kommerziell noch energetisch sinnvoll. Für die Bereitstellung des Wasserstoffs als auch der Konzipierung und Betreibung der Infrastruktur für Transport und Betankungsanlage ist die Verantwortungsvergabe an einen externen Lieferanten zu empfehlen. Der Bezug des Wasserstoffs erfolgt ab Zapfsäule. Mit dem Bahnbetriebsgelände Leipzig Wahren in unmittelbarer Nähe des Güterbahnhofes wird ein potentieller Standort für die H2-Betankungsanlage im Großraum von Leipzig empfohlen. Dieser Standort birgt hinsichtlich der zur Verfügung stehenden Freiflächen, der Anbindung zur H2-Versorgung als auch dem Einbezug potentieller Nebennutzer der Betankungsanlage wesentliche Vorteile.

Die infrastrukturelle Analyse und Bewertung für die Strecke **Leipzig Hbf tief - Gera Hbf** hinsichtlich eines zu favorisierenden Systems ist stark von der zeitlichen Realisierung der im Bundesverkehrswegeplan 2030 (BVWP 2030 (2-038-V01)) geplanten Streckenelektrifizierung Weimar-Gera-Gößnitz als auch der Konkretisierung der Notwendigkeit des Einsatzes alternativer Antriebskonzepte auf der Strecke Leipzig Hbf tief – Gera Hbf abhängig. In Abhängigkeit der zeitlichen Faktoren für beide Vorhaben ist sowohl der Einsatz batterieelektrischer oder wasserstoffbetriebener Triebwagen sinnvoller. Infrastrukturmaßnahmen sind für beide Varianten notwendig. Für die Wasserstoff-Versorgungskette bis zur Zapfsäule sind die oben genannten Aussagen zum Versoger- und Betreibermodell ebenso zutreffend. Bei alleinigem Betrieb der Strecke Leipzig Hbf tief - Gera Hbf mit HEMU-Triebzügen ist der Standort der Betankungsanlage neu zu überdenken. Hier bietet eine Verortung der Tankeinheit nach Zeitz, durch die dort örtlich anliegende H2-Pipeline gewisse Vorteile.

## 1.2 Methodik und Datengrundlagen

Für die Erfassung der Bestandsinfrastruktur, insbesondere für die prioritäre Strecke **Leipzig Miltitzer Allee - Leipzig Hbf - Grimma ob.Bf. - Döbeln Hbf** wurde neben der Befragung des Auftraggebers, ausführlicher Literatur und Internetrecherche weiterhin eine Vor-Ort-Begehung mit Dokumentation der Bestandsinfrastruktur durchgeführt.

Für die sekundär zu betrachtenden Strecken wurde sich vorwiegend auf Literatur- und Internetrecherche beschränkt.

Die Energie-Bedarfsermittlung für den Betrieb mit alternativen Antriebssystemen als auch die Erfassung des Elektrifizierungsgrades der zu betrachtenden Strecken wurde durch das AP2 durchgeführt und dem Projektkonsortium zur Verfügung gestellt [44].

Zur Analyse der technologischen Umsetzung, zur Bewertung des Standes der Technik als auch zur Erfassung potentieller Entwicklungen wurden weiterhin Experteninterviews durchgeführt. Hierzu wurden u.a. Fachkollegen und Stakeholder der Linde AG, Alstom und dem Hypos e.V. kontaktiert.

### 1.3 Bestandsinfrastruktur und Bedarfsermittlung

Die Ermittlung der Bestandsinfrastruktur basiert auf direkter Befragung des Auftraggebers als auch einer detaillierten Vor-Ort-Begehung der Verkehrsstationen (VS) der priorisierten Strecke VS Leipzig Miltitze Allee - Grimma ob.Bf - Döbeln Hbf Die Erfassung des Standes der Elektrifizierung als auch die Energiebedarfsanalyse mit Ableitung notwendiger Nachladezyklen und H2-Bedarfe erfolgte durch das AP2 [44].

Im Folgenden ist zusammenfassend die Energiebedarfsanalyse des AP2 für die weiteren Betrachtungen dargestellt:

**Tabelle 1 Zusammenfassung Energiebedarfsanalyse nach AP2; Leipzig Miltitzer Allee - Döbel Hbf**

BEMU	HEMU
Nutzung der vorhandenen Oberleitungsanlagen ohne zusätzlichen Ertüchtigungsbedarf zwischen VS Miltitzer Allee und VS Borsdorf als auch am Hbf Döbeln	Errichtung einer Wasserstofftankstelle z.B. im Bereich Leipzig Plagwitz notwendig Bedarfsmenge H2: ca. 2.800 kg/d (ohne Reserve)
Errichtung einer Nachladestation in Grimma für 2 Fahrzeuge für die Vorkonditionierung und Systemerhaltung der Fahrzeuge und ggf. partieller Nachladung der Traktionsbatterien. Anschluss an 400 V über Stecker (z.B. CCS) ist ausreichend.	
Für die optionale Streckenbedienung nach VS Rochlitz ist die Errichtung einer leistungsfähigen Oberleitungsinsel erforderlich (ca. 3 MW)	

**Tabelle 2 Zusammenfassung Energiebedarfsanalyse nach AP2; Leipzig Hbf tief - Zeitz - Gera**

BEMU	HEMU
Nutzung der vorhandenen Oberleitungsanlagen ohne zusätzlichen Ertüchtigungsbedarf zwischen Leipzig Hbf tief und VS Plagwitz als auch am Hbf. Gera	Errichtung einer Wasserstofftankstelle z.B. im Bereich Leipzig Plagwitz notwendig Bedarfsmenge H2: ca. 700 kg/d (ohne Reserve)
Errichtung einer Nachladestation in Gera (Regelbetrieb) als leistungsfähige Oberleitungsinsel (ca. 3 MW)	
Errichtung einer Nachladestation in Zeitz für gestörten Betrieb (Verspätung o.ä.) als leistungsfähige Oberleitungsinsel (ca. 3 MW)	

Die Erfassung der Bestandsinfrastruktur ist im Folgenden ebenfalls tabellarisch zusammengefasst:

**Tabelle 3 Zusammenfassung Bestandsinfrastruktur**

Strecke	Infrastruktur
Leipzig_VS Miltitzer Allee – VS Grimma ob.Bf - Döbeln Hbf	32,3 % Elektrifiziert (Großraum Leipzig bis VS Borsdorf) VS Grimma: 2x Elektrant 400 V / 32 A VS Hbf. Döbeln: 6 Gleise elektrifiziert aktueller Betrieb mit Dieseltriebfahrzeugen
VS Grimma ob.Bf - VS Rochlitz	ab VS Großbothen keine Infrastruktur vorhanden bzw. stark zurückgebaut, aktuell kein Betrieb möglich
Leipzig Hbf tief – VS Zeitz – Gera Hbf	15,9 % Elektrifizierung (Großraum Leipzig bis VS Plagwitz) keine Elektrifizierung VS Zeitz und Gera Hbf. vorhanden Elektrifizierung Gera Hbf. geplant (BVWP 2030 (2-038-V01)) aktueller Betrieb mit Dieseltriebfahrzeugen

Die notwendigen Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten der derzeit eingesetzten Dieseltriebfahrzeuge finden vorwiegend bei der Firma RailMaint an den Standorten Delitzsch und Halle als auch optional im ICE Werk Leipzig statt.

Die Dieselbetankung erfolgt im Großraum Leipzig am Bahnhofsvorfeld in unmittelbarer Nähe des HBF Leipzig an Tankanlagen der DB Energie als auch gekoppelt zu den Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten in Delitzsch und Halle an privat betriebenen Bahntankanlagen. Die in den Zügen mitgeführte Menge an Dieselmotorkraftstoff ist im Allgemeinen für einen Betrieb von mehr als einen Tag ausreichend. Die Betankung erfolgt in der Regel dennoch täglich [41].

Die Versorgung der Nebenaggregate erfolgt in der Nachtabstellung über vorhandene Elektranten (400 V / 32 A) bzw. über Kopplung mit der Oberleitung. Für die Beheizung während der Abstellung im Kontext der Fahrtvorbereitung werden die Dieselaggregate der Triebwagen eingesetzt.

Im Folgenden sind die aktuellen Gegebenheiten einzelner VS der aktuellen Strecke Leipzig-Döbeln, RB110 genauer aufgezeigt:

**Tabelle 4 Infrastruktur einzelner VS der Strecke RB110**

VS	Infrastruktur
Döbeln Hbf	6 Gleise elektrifiziert keine Elektranten vorhanden wenig bebaubare Freifläche vorhanden
VS Großbothen	ohne Elektrifizierung keine signifikante bebaubare Fläche vorhanden laufende Sanierungsarbeiten (September 2020)
VS Grimma ob.Bf	keine Gleise elektrifiziert 2 Elektranten 400V/32 A an Abstellgleis vorhanden bebaubare Fläche vorhanden
VS Borsdorf	durch RB110 genutzte Gleis 2 und 3 elektrifiziert, weitere Gleise ebenso elektrifiziert keine bebaubare Fläche vorhanden

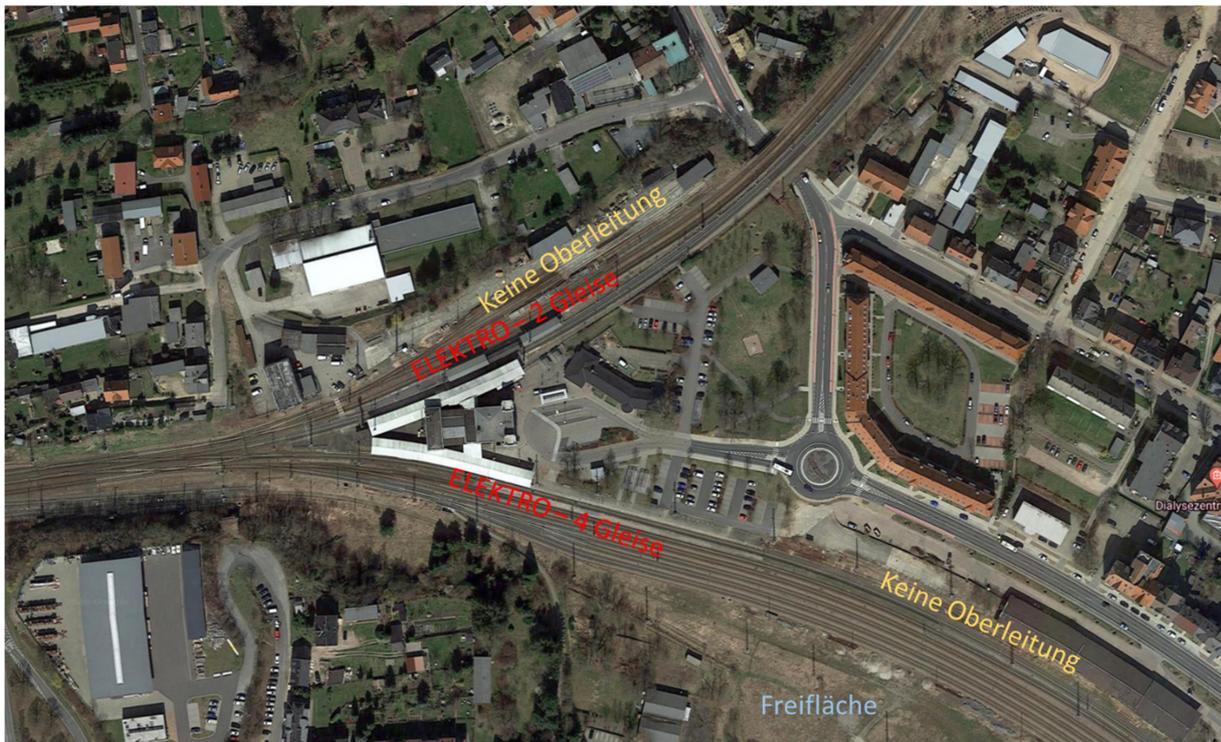


Abbildung 1 Übersicht Bestandssituation Hbf. Döbeln [Goggle Maps]



Abbildung 2 Impressionen Hbf. Döbeln mit wartendem RB110



Abbildung 3 Impressionen VS Großbothen



Abbildung 4 Übersicht Bestandsituation VS Grimma ob. Bf [Google Maps]



Abbildung 5 Impressionen VS Grimma ob. Bf mit Triebzug auf Abstellgleis



Abbildung 6 Übersicht Bestandssituation VS Borsdorf [Google Maps]

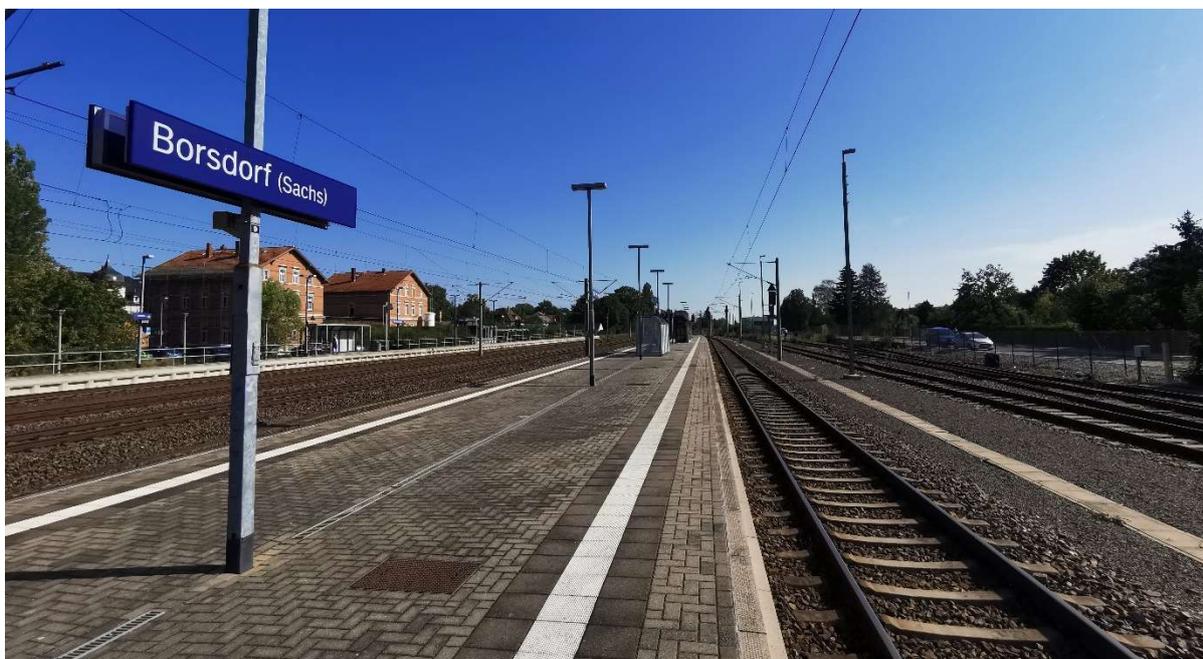


Abbildung 7 Impressionen Gleis 2 und 3 VS Borsdorf

## 1.4 Infrastruktur zur Energieversorgung im Einsatzgebiet

Im Nachfolgenden wird hierarchisch auf die Energiekennndaten von Deutschland, dem Bundesland Sachsen und der Deutschen Bahn eingegangen. Im Fokus sind zum einen der Status Quo der erneuerbaren Energieerzeugung und zum anderen die vorhandene regionale regenerative Energieerzeugungsstruktur/-kapazität unter Berücksichtigung von bestehenden sowie wie perspektivischen erneuerbaren Energieanlagen (EE-Anlagen) bis zum Jahr 2030. Anschließend werden die bestehenden EE-Anlagen Kapazitäten in Verbindung mit den für die Deckung notwendigen Energiemengen für eine elektrische Schienenverkehrsversorgung analysiert.

Das Energiekonzept der Bundesregierung und das Klimaschutzprogramm 2030 sind richtungsweisend für die Energiewende. Im Jahr 2019 betrug der summierte deutschlandweite Nettostromverbrauch 512 TWh [1]. Hierbei beschreibt der Nettostromverbrauch die vom Endverbraucher genutzte elektrische Arbeit nach Abzug des Eigenbedarfes der Kraftwerke und der Stromübertragungs- bzw. Netzverluste. Im Bereich EE-Stromerzeugung konnte im Jahr 2019 sowie im 1. Halbjahr 2020 eine positive Entwicklung im Sektor Strom beobachtet werden. Die internen Statistiken zeigen, dass der Anteil von 37,8 % (2019) auf einen Halbjahres Rekordwert von 42,1 % stieg was wiederum bedeutet, dass der im Klimaschutzprogramm definierte Wert von 35 % übererfüllt wurde [2]. Insgesamt wurden im Jahr 2019 etwa 242,5 TWh Strom aus erneuerbaren Energieträgern erzeugt [3]. Dies waren 19,5 TWh mehr als im Vorjahr (+9 Prozent) [4]. Die Sektoren Wärme und Verkehr haben sich im Vergleich dazu nicht gut bis hin zu gar nicht weiterentwickelt – Wärmebereich 14,4 % auf 14,5 % und der Verkehrssektor stagniert bei 5,6 % [2]. Es werden ausgedehntere Maßnahmen benötigen, damit die Energiewende nicht nur eine Stromwende bleibt. Des Weiteren gibt es trotz Rekordwert im Stromsektor zukünftige Herausforderungen, sodass die anstehenden Meilensteine der Klimaschutzziele Deutschland erfüllt werden können, denn im Widerspruch hierzu stehen die aktuell rückläufigen Zubauraten von erneuerbaren Energieerzeugungskapazitäten. Die onshore Windenergie leidet unter den Rahmenbedingungen: Die netto installierte elektrische Leistung der onshore Windenergieanlagen nahm stetig aus dem Jahr 2017 mit 5,3 GW bis zum Jahr 2019 mit 1,08 GW ab [5]. Dieser Negativtrend beim Zubau kann auch nicht vom positiven Anstieg der neuinstallierten PV-Anlagen kompensiert werden (1,8 GW, 2017 hinzu 3,9 GW, 2019) [6].

Zur detaillierten Bewertung der nationalen erneuerbaren Energien dient der Anteil am Bruttoendenergieverbrauch als Indikator [7]. Der Bruttoendenergieverbrauch umfasst den Endenergieverbrauch an Strom, Wärme sowie Kraftstoffen und beinhaltet die Umwandlungs- und Übertragungsverluste. Dieser Indikator ist als Bezugsgröße und Bewertung für den Anteil der erneuerbaren Energien in der EG Richtlinie 2009/28/EG festgelegt. Im gleichen Bezugsjahr betrug der Anteil aus erneuerbaren Energien 17,1 % am Bruttoendenergieverbrauch. Die Differenz von 0,9 % in Bezug auf das Klimaschutzziel 2020 - Anteil EE am Bruttoendenergieverbrauch 18 % - ist basierend auf Prognosen vom Umweltbundesamt zu schließen [8]. Folglich gibt es hier ebenfalls einen Meilensteinerfolg zu verzeichnen, welcher aufgrund der negativ Entwicklung bei der EE-Anlagen Neuinstallation schwer haltbar ist. Für das Jahr 2030 sind die Klimaschutzziele im Kontext Anteil EE an der Stromerzeugung bei 65 % und Anteil EE am Bruttoendenergieverbrauch bei 30 %. Für die Erfüllung der Ziele sind im Jahr 2030 sind gemessen an dem prognostizierten Anstieg des Bruttoendenergieverbrauchs von 740 TWh eine erneuerbare Energiemenge von 481 TWh erforderlich [9]. Dafür muss der jährliche EE-Zubau massiv gesteigert werden : 4.700 MW

onshore Windenergie, 1.200 MW offshore Windenergie, 10.000 MW Photovoltaik, 600 MW Bioenergie, 50 MW Wasserkraft und 50 MW Geothermie [9].

Analog zur bundesweiten Energieanalyse wird eine dezidierte Darstellung der Energiedaten auf Bundeslandebene für den Freistaat Sachsen aufgezeigt.

Die im Freistaat Sachsen produzierte EE-Strommenge (6.365 TWh) ist geringer als der Stromverbrauch (26,268 TWh), Stand 2020 [10][11]. Trotzdem kommt es zu lokalen Stromüberschüssen, aufgrund fehlender Stromspeicher zur bedarfsgerechten Integration in den Sektoren, weswegen diese Strommengen in andere Bundesländer oder ins Ausland exportiert werden. Bezogen auf den Bruttoendenergieverbrauch hat der Freistaat Sachsen im Jahr 2019 einen erneuerbare Energien Anteil von ca. 22,2 % [10]. Den wesentlichen Anteil bei der regionalen EE-Stromerzeugung übernehmen die Windenergie (37 %) und die Sonnenenergie (=Photovoltaik) (30 %) [10]. Im Bundesländervergleich werden die erneuerbaren Energien (EE) in Sachsen im Anwendungsbereich Strom und Verkehr unterdurchschnittlich genutzt. Im Anwendungsbereich Wärme reiht sich Sachsen in den Bundesdurchschnitt ein [12]. Analog der deutschlandweiten Erkenntnisse zum EE-Anteil in den Sektoren Strom, Wärme und Verkehr muss der Zubau gesteigert werden, damit die bundeslandeigenen Klimaschutzziele erreicht werden können. Für das Jahr 2020 wurde unter anderem das Klimaschutzziel Anteil EE am Bruttoendenergieverbrauch von 24 % definiert – Differenz von 1,8 %, Stand 2020. Dieser geringen Kapazitätslücke und dem Erreichen des eigenen Ziels steht ein Negativtrend in den Erzeugungskapazitäten onshore Windenergie und Photovoltaik gegenüber. Die aktuellen Zubauraten betragen im Bereich Windenergie 2019 – 6 Anlagen mit 17,8 MW Nennleistung [11][13][14], 2020 (bis August) – 4 Anlagen mit 10,1 MW Nennleistung [13][14] und im Bereich Sonnenenergie 2019 – 3.987 Anlagen mit 232,3 MW Nennleistung [15], 2020 (bis August) – 3.878 Anlagen mit 191,6 MW Nennleistung [15] was auf die stark einschränkenden Rahmenbedingungen zurückzuführen ist. Zusätzlich zu diesen Hemmnissen basierend auf regulatorische Bedingungen und Verfahrensschritte folgt eine weitere Herausforderung für den Freistaat Sachsen bei der Ökostromerzeugung. Ab Anfang 2021 fallen EE-Anlagen aus der EEG-Förderung. Mit Fokus auf die markanten EE-Stromerzeugungsanlagen – Windenergie, Photovoltaik - wurde eine Post-EEG Prognose erstellt, sodass deutlich wird was länderspezifisch zu leisten ist, damit Sachsen an den Zielen des Bundes mitwirken kann.

In den Jahren ab 2021 und ab 2024 werden insgesamt 626 Windenergieanlagen mit einer Nennleistung von 637 MW und bis 2030 eine kumulierte Photovoltaiknennleistung von 230 MW allein in Sachsen aus der EE-Stromerzeugung entfallen [16]. In Verbindung mit den Zubauraten werden in Sachsen mehr Windenergie- und Photovoltaikanlagen abgebaut, als neue hinzukommen. Um dies zu verhindern müssen in Sachsen neue Gebiete für die EE-Erzeugungsanlagen ausgewiesen werden. Das entsprechende technische Nutzungspotential / Ausbaupotential bis zum Jahr 2030 in Sachsen vorhanden ist wurde durch ein Gutachten der Sächsischen Energieagentur (SAENA) ermittelt [17]:

#### Stromerzeugung:

- |                                     |                              |
|-------------------------------------|------------------------------|
| • Windenergie                       | 3.380 GWh/a bis 7.560 GWh/a  |
| • Photovoltaik (Aufdachanlagen)     | 5.600 GWh/a bis 13.000 GWh/a |
| • Photovoltaik (Freiflächenanlagen) | 600 GWh/a bis 1.300 GWh/a    |
| • Biomasse                          | 1.934 GWh/a bis 5.753 GWh/a  |
| • Wasserkraft                       | 320 GWh/a bis 450 GWh/a      |

Wärmeerzeugung:

- Solarenergie 1.000 GWh/a bis 2.500 GWh/a
- Biomasse 1.298 GWh/a bis 8.730GWh/a
- sonstigen erneuerbaren Energien (Umweltwärme) bis 4.010 GWh/a bei hoher Gebäudesanierungsrate und Einsatz von Wärmepumpen zur Gebäudeversorgung

Verkehr:

- Kraftstoffproduktion aus Biomasse 1.354 GWh/a bis 1.972 GWh/a

Zum Ausgleich der erläuterten gegensätzlichen Entwicklung muss das landeseigene technische Potenzial voll ausgeschöpft werden und nicht durch regulatorische Einschränkungen und politischer Zurückhaltung behindert werden, damit das Ziel aus dem Energie- und Klimaschutzprogramms des Freistaat Sachsen den Ausbau der erneuerbaren Energien im Jahr 2021/22 auf 28 % am Bruttostromverbrauch zu erhöhen [18]. Aufgrund der nicht ausreichenden regenerativen Energiekapazitäten in Deutschland sowie auch in Sachsen – keine 100 % Grünstrom, wird für den Anwendungsbereich alternativer CO2-freier Schienenpersonennahverkehr auf der Energieversorgungsebene der Deutschen Bahn geschaut. Im Betrachtungsfall Bahnstromversorgung und Bahnstromerzeugung gibt es im Vergleich zu den vorherigen beiden Energieverbraucherstrukturen gewisse Besonderheiten. Die Anforderungen an die elektrische Energieversorgung des Schienenverkehrs unterscheidet sich grundlegend von denen der sonstigen öffentlichen Stromversorgung. Während letztere auf einer Frequenz von 50 Hz basiert, ist der Bahnstrom auf eine Frequenz von 16,7 Hz ausgelegt [19]. Die Versorgung der Züge erfolgt über die Fahrleitungen mit einer Spannung von 15 kV [19]. Das entsprechende Stromnetz der Bahn ist darauf ausgelegt, die elektrische Energie zu den Zügen zu bringen. Es ist nicht in der Lage, größere Energiemengen hin und her zu transportieren. Dazu ist ein eigenes 7.936 km [20] langes Bahnstromnetz 110 kV/16,7 Hz-Netz nötig, das zusätzlich zu Stromtransport auch Lastschwankungen ausgleichen soll. Um den Fahrstrom für die Züge bereitzustellen, greift die Bahn zum Teil auf eigene oder ausschließlich für die Bahn produzierende Energiekapazitäten zurück. Sie gehören nur zum kleinen Teil der Bahn selbst und sind mehrheitlich im Besitz großer Energieversorgungsunternehmen, die die Anlagen auch für die Bahn betreiben [21]. Folglich besteht der Großteil aus bilanziellen EE-Strommengen (nationale und europaweite Herkunftsnachweise), welche von der DB AG zur Elektrifizierung der Züge genutzt werden. Somit bietet der Bahnstrom einen aktuell und zukünftigen hohen Anteil an Grünstrom für alternative Antriebskonzepte für eine positive Umweltverträglichkeit, jedoch fußt dieser nicht auf physische EE-Strommengen (Direkteinspeisung), sondern auf bilanzielle nationale und europaweite erneuerbare Stromkapazitäten [21]. Im Jahr 2019 konnte die DB AG einen Anteil der erneuerbaren Energien am Bahnstrommix von rund 60 % vorweisen. Die restliche Energiemenge stammt aus Kernenergie, Braunkohle, Steinkohle, Erdgas und Sonstige. Die Deutsche Bahn AG hat das Ziel, den Anteil erneuerbarer Energien am Bahnstrommix bis 2030 auf 70% zu erhöhen und bis 2050 ihren Strom für den Schienenverkehr zu 100% CO2-frei zu erzeugen oder zu beziehen. Die erneuerbaren Energien beinhalten Wasser-, Wind- und Sonnenenergie.

Eine detaillierte Betrachtung der Bahnstrominfrastruktur in Abhängigkeit des Schienennetzes zur Beurteilung der Infrastruktur zur Nutzung eines batterieelektrischen Zuges erfolgt in Kapitel 1.6.2.2.

## 1.5 Infrastrukturelle Anforderungen für batterieelektrische Züge - BEMU

### 1.5.1 Grundlagen für den Betrieb

Der Antrieb von BEMU-Batterietriebzügen erfolgt im Allgemeinen über einen Elektromotor. Der Aufbau der BEMU-Züge entspricht im Wesentlichen dem von Elektrozügen mit einer Erweiterung um eine entsprechend dimensionierte Lithium-Ionen-Batterie im Antriebsstrang. Die elektrische Energie wird dabei unmittelbar über die Oberleitung, als auch mittelbar über Lithium-Ionen-Batterien bereitgestellt, wie in Abbildung 8 [43] abgebildet. Die elektrische Energie wird dabei über einen Stromrichter, sowie einen Trafo über die Oberleitung des Schienennetzes bezogen.

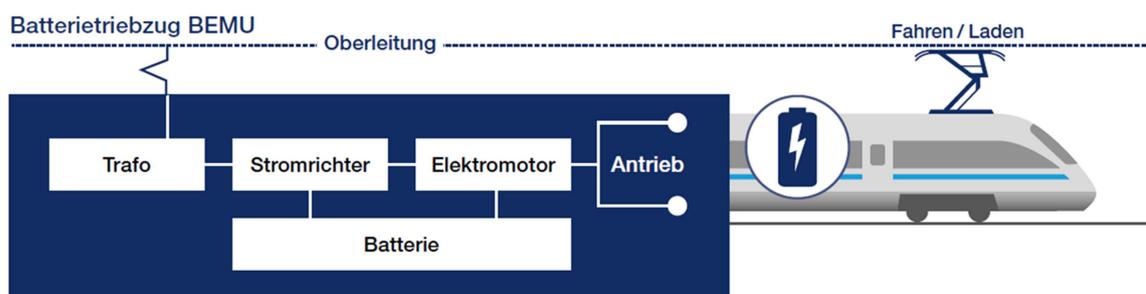


Abbildung 8 Grundlage BEMU-Betrieb [43]

Das Fahren und gleichzeitiges Laden der Batterien erfolgt auf Streckenabschnitten mit Oberleitungen. Das Laden im Stillstand mit aufgebügeltem Pantographen an eine Oberleitung ist ebenfalls möglich. Auf Streckenabschnitten, welche nicht elektrifiziert sind, wird auf Batteriebetrieb umgestellt. Um zusätzliche Energie zu gewinnen wird die Rekuperationsenergie beim Bremsen sowohl in die Batterien, als auch in das Streckennetz eingespeist.

### 1.5.2 Infrastrukturanalyse für batterieelektrische Züge

Vor dem Hintergrund der Neubeauftragung von SPNV-Leistungen durch den ZVNL ab 2025 sind bisher dieselbasierte Streckenabschnitte alternative Antriebsvarianten hinsichtlich der infrastrukturellen (Strom) Gegebenheiten und Anforderungen zu analysieren.

Zur Beurteilung der Bestandsinfrastruktur wird ein bundesweiter Einblick in den Elektrifizierungsgrad der Schienenstrecken gegeben, sodass im nächsten Schritt auf Bundesländerebene mit Fokus auf den Untersuchungsraum die infrastrukturellen Gegebenheiten für den Einsatz von batterieelektrischen Zügen aufgezeigt und bewertet werden.

#### Erfassung des Anteils elektrifizierter Bahnstrecken in Deutschland

Das gesamte Streckennetz der DB Netz AG unterliegt einer nach der Europäischen Norm EN 15528 festgelegten Klassifizierung, die sie entsprechend ihres Zustandes und der Tragfähigkeit von Ober- und Unterbau in bestimmte Kategorien einteilt, und somit den darüber rollenden Verkehr mitbestimmt. Diese Klassifizierung legt fest, mit welchen maximalen Achs- und Meterlasten die Strecke befahren werden darf. Des Weiteren unterscheiden sich die Strecken in ihren Höhen- und Geschwindigkeitsprofilen. Zusätzlich gibt es für die weiteren Technischen Spezifikationen für die Interoperabilität (TSI) von der DB AG ein Infrastrukturregister. Es dient dazu ein sicheres und interoperables, also technisch

kompatibles, europäisches Bahnsystem zu verwirklichen. Hierzu wurden und werden sowohl im Hochgeschwindigkeitsverkehr als auch im konventionellen Verkehr sogenannte Technische Spezifikationen für die Interoperabilität (TSI) eingeführt. Diese TSI enthalten die Anforderungen und die Prüfverfahren für Interoperabilitätskomponenten und Teilsystem [22]. Das Infrastrukturregister ist demzufolge ein interaktives Auskunftssystem. Es beinhaltet technische und betriebliche Informationen zu Strecken und Betriebsstellen. Das Schienennetz wird in ein Knoten-Kanten-Netz dargestellt. Für Gleise, Betriebsstellen, Brücken, Tunnel und Bahnübergänge können Informationen abgerufen werden. Die Streckenerfassung und -charakterisierung erfolgt durch Nutzung des Infrastrukturregisters.

In Deutschland beläuft sich die Streckenlänge der Eisenbahnschienen auf 38.466 km, davon sind 20.726 km elektrifiziert [23, 24]. Folglich sind in Deutschland knapp zwei Drittel der Eisenbahnstrecken elektrifiziert. Die restlichen 18.000 Kilometer Bahnstrecken in Deutschland sind noch nicht elektrifiziert, hier fahren häufig noch Dieselloks. Die eingeschränkte Elektrifizierung trifft vor allem den regionalen Schienenpersonenverkehr [25]. Hier wurde in einer Studie vom VDE (Verband der Elektrotechnik) und dem Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) ermittelt, dass von den etwa 1.000 SPNV-Bahnlinien in Deutschland (mindestens) 469 von Dieseltriebzügen befahren werden, weil diese oberleitungsfreie Streckenabschnitte enthalten. Auf diesen Linien wurden rund ein Drittel der SPNV-Gesamtbetriebsleistung erbracht [25]. Darüber hinaus wurde statistisch ermittelt, dass die Diesellinien im Durchschnitt einen 23%-igen Elektrifizierungsgrad aufweise [25], folglich finden Dieselfahrten unter der Oberleitung statt. Inwiefern sich diese Elektrifizierungslücke in den einzelnen Bundesländern im Verhältnis zur Streckenlänge verhält zeigt die Abbildung 9 .

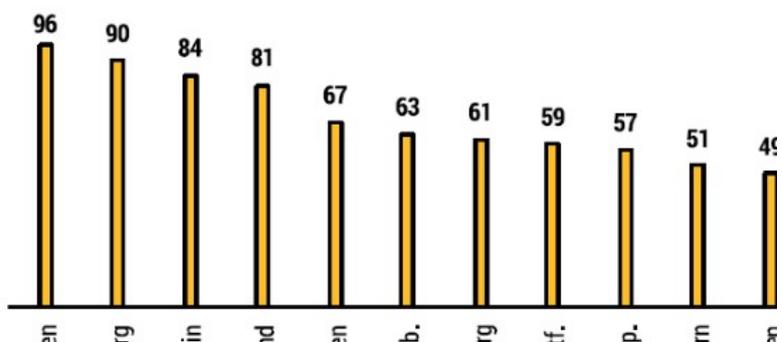


Abbildung 9 Anteil elektrifizierter Strecken in Prozent [26]

Demnach findet sich in Schleswig-Holstein mit 29% der geringste Anteil elektrifizierter Strecken gefolgt von Thüringen (30%) und Sachsen (41%). Den größten Anteil elektrifizierter Strecken verzeichnen die Stadtstaaten Bremen (96%), Hamburg (90%) und Berlin (84%). Weiterführend wird ausgehend vom allgemeinen Elektrifizierungsgrad des Freistaates Sachsen im Detail der Gebietsausschnitt auf diesen Sachstand hin analysiert.

### Darstellung des Untersuchungsraums

Der Untersuchungsraum erstreckt sich von Leipzig ausgehend über Zeitz und Gera sowie Grimma und Döbeln. Die entsprechenden Bahnhöfe liegen an zwei Strecken und einer optionalen Streckenerweiterung. Die erste Strecke in diesem Gebietsausschnitt beinhaltet Leipzig Miltitzer Allee - Leipzig Hbf. - Grimma ob.Bf. - Döbeln Hbf, in der zweiten Strecke

sind inbegriffen Leipzig Hbf. - Zeitz Hbf. - Gera Hbf. haben und die optionale Streckenerweiterung in Verbindung mit der ersten Strecke von Grimma ob.Bf. - Großbothen - Colditz – Rochlitz.

Die Strecken weisen einen gemeinsamen kartographischen Knotenpunkt in Leipzig auf. Die Streckenlänge von Leipzig nach Döbeln beträgt 86,9 km und von Leipzig nach Gera beläuft sich auf 73,8 km [27]. Zur Erfassung des Elektrifizierungsgrads innerhalb des definierten Gebietsausschnitt wurde mittels Infrastrukturregisters das Streckenmerkmal Traktionsart analysiert und ergab, dass für die erste genannte Strecke eine elektrifizierte Streckenlänge von 28,1 km vorliegt und für die zweite Strecke eine Elektrifizierung auf 11,7 km vorherrscht [27]. Die Erkenntnisse sind in Abbildung 10 grafisch dargestellt. Im Knoten Leipzig ist grundsätzlich eine Oberleitung vorhanden. Im Gegensatz dazu sind bei den regional entfernten Bahnhöfen Zeitz, Gera und Grimma bis Döbeln nicht elektrifizierte Streckenabschnitte vorhanden.

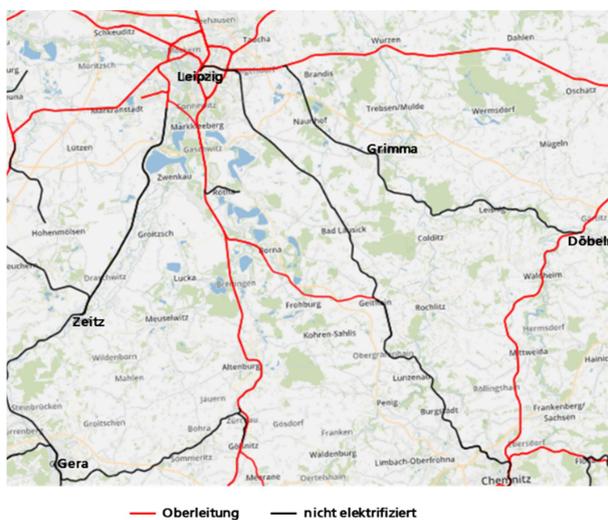


Abbildung 10 Traktionsart des Schienennetzes im Untersuchungsraum [27]

Aus den Ergebnissen der streckenabhängigen und den dazugehörigen Streckenlängen kann abgeleitet werden, dass in Bezug auf die Gesamtstreckenlänge ca. 50 % der Streckenabschnitte im Untersuchungsraum mit einer Oberleitung ausgestattet sind. Diese Erkenntnis steht, trotz der ungleichen Gebietsverhältnisse, in direkter Verbindung mit der bundesweiten stagnierenden Elektrifizierung. Um dem aufgezeigten Negativtrend entgegenzuwirken und für die perspektivisch notwendige Erhöhung der Elektrifizierung im Sinne der Dekarbonisierung im Mobilitätssektor Lösungsansätze zu besitzen, wird nachfolgend für den Gebietsausschnitt eine Potenzialanalyse der Stromnetzinfrastruktur durchgeführt.

### Analyse der Stromnetzinfrastruktur

Anfänglich wird zum besseren Verständnis die Bahnstromversorgung sowie die dazugehörigen Spannungsebenen topographisch dargelegt. Mit Hilfe dieser Feststellungen wird innerhalb des Untersuchungsraums eine Stromnetzinfrastrukturanalyse durchgeführt um potentielle Strominfrastrukturenerweiterungen aufzuzeigen. Die Informationen für die Analyse wurden aus der OpenSource-Energiekarte fIOSM entnommen.

In Abbildung 11 ist die Topographie des Bahnstromnetzes skizziert und wird anschließend erläutert. Die Bahnstromversorgung gliedert sich zum einen in dezentral versorgte Netzteile

und zum anderen in ein zentral versorgtes Netz mit überlagertem bahneigenem 110 kV-, 16,7 Hz-Bahnstromleitungsnetz. Die dezentral versorgten 15 kV-, 16,7 Hz-Oberleitungsanlagen werden mittels Umformer oder Umrichter direkt aus dem 50 Hz-Landesnetz versorgt, wie es im linken Teil der Abbildung dargestellt wird. Anhand der Bahnstromleitungsnetz Karte der DB Energie wird ersichtlich, dass diese Versorgungsart vorrangig im Nordosten Deutschlands vorkommt. Darüber hinaus wird diese Versorgungsart auch für Neu-Elektrifizierung von Strecken außerhalb des Bahnstromleitungsnetzes (110 kV) herangezogen [28].

Dennoch wird in Deutschland der weitaus größere Teil des elektrifizierten Streckennetzes aus dem zentralen Netz versorgt [28]. Das zentrale Netz hat als Hauptkomponente ein 110 kV-, 16,7 Hz-Freileitungsnetz, welches als Verteilnetz die Einspeisungen und die Unterwerke als Lasten miteinander verbindet. Die Unterwerke transformieren Hochspannung in 15 kV Mittelspannung. Diese Energie fließt durch die Oberleitungen und treibt die elektrischen Züge an. Die Einspeisungen bestehen aus eigene oder ausschließlich für die Bahn produzierende Energiekapazitäten in Form von Bahnstromkraftwerken.

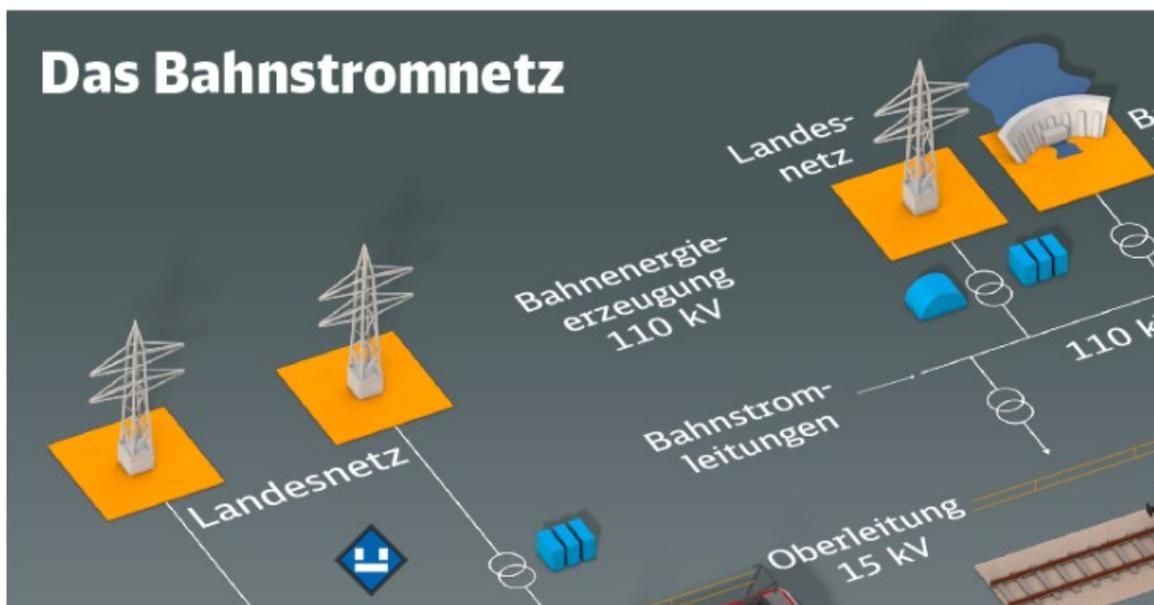
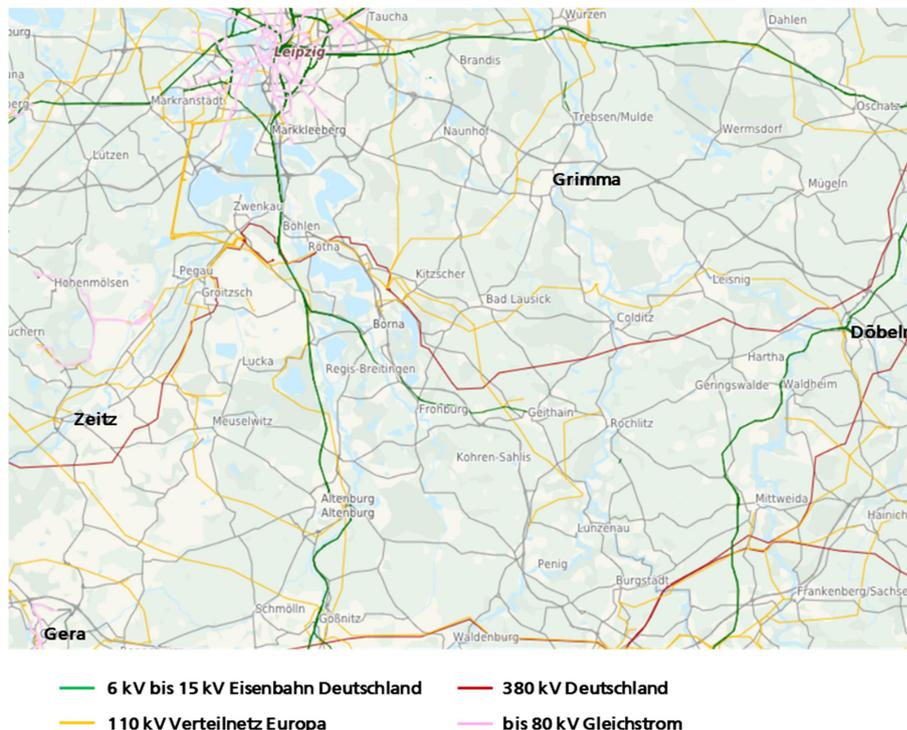


Abbildung 11 Topographie des Bahnstromnetzes [29]

Mit diesen Versorgungsfakten wird die bestehende Stromnetzinfrastuktur im Einsatzszenario auf potentielle Elektrifizierungserweiterungen begutachtet.

In der Abbildung 12 sind im Großraum Leipzig die Spannungsebenen 6 kV bis 15 kV, 80 kV und 110 kV vorzufinden. Diese Vielfalt an Spannungsversorgungsebenen steht zu den Erkenntnissen der Traktionsartbestimmung kohärent. Von diesem Knotenpunkt abgehend ist die Vielfalt an Versorgungsebenen stark diffizil. Allgemein ist festzustellen, dass auf den zu bewertenden Strecken zum einen das 110 kV Übertragungsnetz und das 380 kV Höchstspannungsnetz der Übertragungsnetzbetreiber dauerhaft vorzufinden ist. Ausnahmen bilden die Bahnhöfe Gera und Zeitz. In Gera ist zusätzlich bis 80 kV Gleichstrom und in Döbeln die direkte Eisenbahnspannungsversorgungsebene 6 kV bis 15 kV vorhanden. Die kartographische Gegenüberstellung der Traktionsart und der Stromnetzinfrastuktur zeigt auf, dass die nicht elektrifizierten Streckenabschnitte eine relevante Spannungsversorgungsebene zur Bahnstromversorgung in räumlicher Nähe aufweist.

Konkret wird die Möglichkeit der Elektrifizierungsanteilerhöhung durch das 110 kV-Netz potentiell gewährleistet.



**Abbildung 12 Stromnetzinfrastruktur im Untersuchungsraum Leipzig, Zeitz, Gera Döbeln und Grimma [30]**

Weiterführend ergibt sich dadurch die Möglichkeit zur partiellen Oberleitungserweiterung sowie die Schaffung von Ladestandorten, für eine zukünftige mögliche Integration bzw. Betrieb von batterieelektrischen Zügen. Hier sind zwei Technologien denkbar. Zum einen kann im Stillstand an einer Ladestation elektrische Energie aufgenommen werden und zum anderen durch Ladeinseln auf einigen km Strecke, hierbei kann der Ladevorgang während des Fahrens stattfinden [31]. Bei der Linie Leipzig Hbf. - Zeitz – Gera (15,9 % Elektrifizierung) befindet sich in räumlicher Nähe das 110 kV Übertragungsnetz, wodurch Netzkopplungspunkte zur Errichtung von Ladestationen, Ladeinseln oder Oberleitungserweiterungen möglich sind. Analog gilt diese Erkenntnis für den nicht elektrifizierten Bereich in Grimma.

Eine negative Auswirkung der Spannungsebenen Diversität wird durch das 380 kV-Netz hervorgerufen. Die Einschränkung bezieht sich auf den Bereich Schaffung von EE-Erzeugerkapazitäten zur regenerativen Bahnstromversorgung. Das Übertragungsnetz (380 kV) im Untersuchungsgebiet ist hinsichtlich der Errichtung von Windenergieanlagen zur Direktspeisung in das Bahnstromnetz negativ zu bewerten, da die erzeugte Nachlaufströmung einer Windenergieanlage bei einer Freileitung Schwingungen bewirkt was zum Ermüdungsbruch führen kann [32].

Zusätzlich zu den aktiven denkbaren Maßnahmen wurden Auswirkungen potentieller Infrastrukturentwicklungen in diesem Gebiet analysiert, wodurch beispielweise ein elektrifizierter Abschnitt verlängert wird. Die Recherche ergab, dass im Fall der untersuchten Linien eine Synergie zwischen der geplanten Elektrifizierung der Strecke Weimar-Jena-Gera-Chemnitz ergibt. Konkret soll eine Elektrifizierung von Gera Hbf stattfinden und erhöht somit passiv den Elektrifizierungsgrad der Strecke. Dieses Projekt ist im Bundesverkehrswegeplan

2030 als vordringlicher Bedarf gekennzeichnet (BVWP 2030; 2-038-V01) und befindet sich aktuell in der Bauphase.

### 1.5.3 Einsatzszenario BEMU für die betrachteten Strecken

Ausgehend von den vorangegangenen Analysen, der Bestandsinfrastruktur und der Bedarfsermittlung an Nachladestationen (Tabelle 1 und Tabelle 2) ergibt sich für den Betrieb der Strecke Leipzig Miltitzer Allee - Leipzig Hbf. - Grimma ob.Bf. - Döbeln Hbf folgendes tabellarisch zusammengefasste Einsatzszenario:

**Tabelle 5 Einsatzszenarion BEMU; Strecke Miltitzer Allee – Döbeln Hbf**

Standort	Szenario
Großraum Leipzig bis VS Borsdorf	- vollständig elektrifiziert; - Fahren und Nachladen unter vorhandener Oberleitung, - Nachtabstellung unter Strom (Oberleitung)
VS Borsdorf	- Auf- Abbügeln in Kombination Haltestellenaufenthalt
VS Grimma ob.Bf	- 2 Elektranten 400 V / 32 A vorhanden; Grundversorgung des Bordnetzes möglich - Erweiterung Elektranten auf 400 V / 63 A bei erforderlicher partieller Nachladung Traktionsbatterie - Zugvorbereitung (Heizen / Kühlen) aus Traktionsbatterie
VS Döbeln Hbf	- Nachladung an Oberleitung innerhalb der überschlagenden Wende (ca. 1 h Mindestaufenthalt für entsprechend Nachladeszenarien) - Nachtabstellung unter Oberleitung

Die Deckung des Strombedarfes für den Fahrbetrieb als auch während der Aufenthaltsszenarien mit Nachladung unter Oberleitung bzw. Systemerhaltung über Elektranten erfolgt über den anliegenden Bahnstrommix des Versorgers DB Netz.

Die notwendigen infrastrukturellen Ertüchtigungen zur Realisierung beschränken sich im Wesentlichen auf die VS Grimma. Die Leistung der derzeit anliegenden zwei Elektranten ist mit den technischen Erfordernissen der eingesetzten Triebwagen für die Systemerhaltung bzw. zur partiellen Nachladung der Systembatterie während der Nachtabstellung abzugleichen bzw. ggfls. zu ertüchtigen.

Für die optionale Streckenbedienung ab VS Grimma nach VS Rochlitz ist nach den Berechnungen des AP2 zwingend eine leistungsfähige Oberleitungsinsel oder adäquate Ladeinfrastruktur mit ca. 3 MW für die Nachladung je nach Betriebsmodell am VS Grimma ob Bf oder VS Rochlitz zu errichten.

Ebenfalls in Auswertung der Berechnung des AP2 ergibt sich für die Strecke Leipzig-Gera ein analoges Einsatzszenario für einen möglichen BEMU-Betrieb. Für den Bereich Leipzig Hbf tief bis zur VS Plagwitz ist der Betrieb als auch die Nachtabstellung mittels der installierten Oberleitungsinfrastruktur ohne weiteres möglich. Die erforderlichen Nachladestationen in Gera Hbf und VS Zeitz sind nach der Übersicht in Tabelle 2 auszuführen.

## 1.6 Infrastrukturelle Anforderungen für Brennstoffzellenzüge - HEMU

### 1.6.1 Grundlagen für den Betrieb

Die Antriebe von HEMU-Wasserstofftriebzügen basieren wie die BEMU-Triebzüge auf einem Elektromotor. Die elektrische Energie wird bei den HEMUs jedoch über eine Brennstoffzelle, die mit Wasserstoff aus einem nachgeschalteten Tank (ca. 35 MPa) versorgt wird, generiert. Eine Netzanbindung über Oberleitungen ist somit nicht erforderlich. Für den Ausgleich von Leistungsspitzen, welche die Fahrdynamik betreffen, sind zudem Lithium-Ionen-Batterien integriert, die u.a. durch Rekuperation beim Bremsen des Zuges gespeist werden. Der funktionale Aufbau wird in Abbildung 13 [43] dargestellt.

Wasserstoff-Brennstoffzellen-Triebzug HEMU

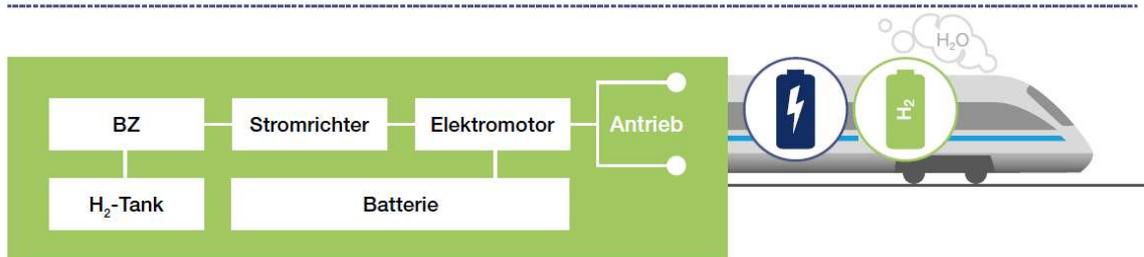


Abbildung 13 Grundlage HEMU-Betrieb [43]

Anders als beim Einsatz von BEMU Triebwagen liegt der wesentliche Fokus beim Einsatz von HEMU Triebeinheiten auf der Wasserstoffbetankungsinfrastruktur, d.h. die Bereitstellung, Transport (Verteilung) und Betankung von Wasserstoff. Die komplette Kette des Versorgungsmodells bis zum Endanwender (Zapfsäule) ist durch vielerlei Optionen in allen Teilbereichen gekennzeichnet.

Das grundsätzliche Versorgungsschema gliedert sich in die Hauptbestandteile: Bereitstellung, Transport und Betankung. Die Kette mit regionalbezogenen Optionen für das Anwendungsszenario ist in der Abbildung 14 aufgezeigt.

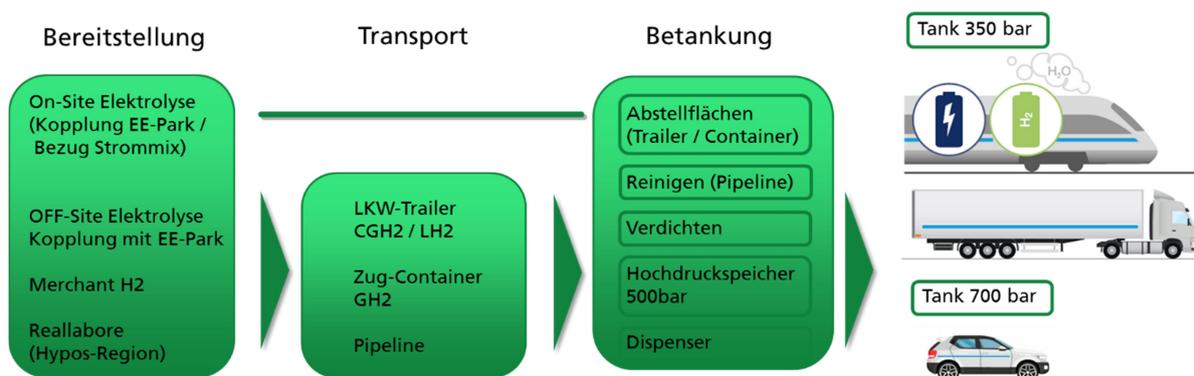


Abbildung 14 Versorgungsmodell HEMU

Bei der Bereitstellung sind die grundlegenden Optionen on-site Elektrolyse, off-site Elektrolyse, marktverfügbarer Merchant-Wasserstoff und Bezug von Wasserstoff aus regionalen Reallaboren zu unterscheiden. Für die Transportwege ergeben sich die folgenden Möglichkeiten: Transport per LKW-Trailer, Zugcontainer oder per H<sub>2</sub>-Pipeline.

Die Tankstellenkonstellation ist von vielerlei Aspekten abhängig. Grundelemente sind aber: Abstellfläche für Anlieferung (Trailer/Container), optionaler H<sub>2</sub>-Reinigung (bei Pipelineversorgung), Verdichtung, Hochdruckspeicher und den Dispensereinheiten.

In den weiteren Ausführungen wird auf die jeweiligen Aspekte genauer eingegangen.

### 1.6.2 Wasserstofftechnologien

Im Bereich der Wasserstofferzeugung wird nach verschiedenen Farben differenziert. Gemessen an der hohen Nachhaltigkeit und der mittel- und langfristigen notwendigen Produktionsausrichtung steht grüner Wasserstoff im Fokus. Für den strategischen Übergangsbereich bei der Transformation der Wasserstoffproduktion wird als treibhausgasärmere Variante blauer Wasserstoff diskutiert. Die anderen Erzeugungsarten sind im zukünftigen Kontext der Dekarbonisierung weniger relevant.

Anfangs sei erwähnt, dass es prinzipiell zwei Produktionskonzepte, welche sich in on-site und off-site gliedern. Bei dem on-site Konzept wird Wasserstoff im kleineren Maßstab vor Ort erzeugt. Die Wassergenerierung per off-Site Konzept beschreibt eine große zentrale Erzeugungsanlage. Die Konzepte sind unabhängig von der „Wasserstofffarbe“.

In Abhängigkeit von der Herkunft der Wasserstoffquellen und der Strombezugsart sowie der dabei freigesetzten CO<sub>2</sub>-Emissionen lässt sich die Wasserstoffherstellung gemäß der Abbildung 15 folgendermaßen klassifizieren:

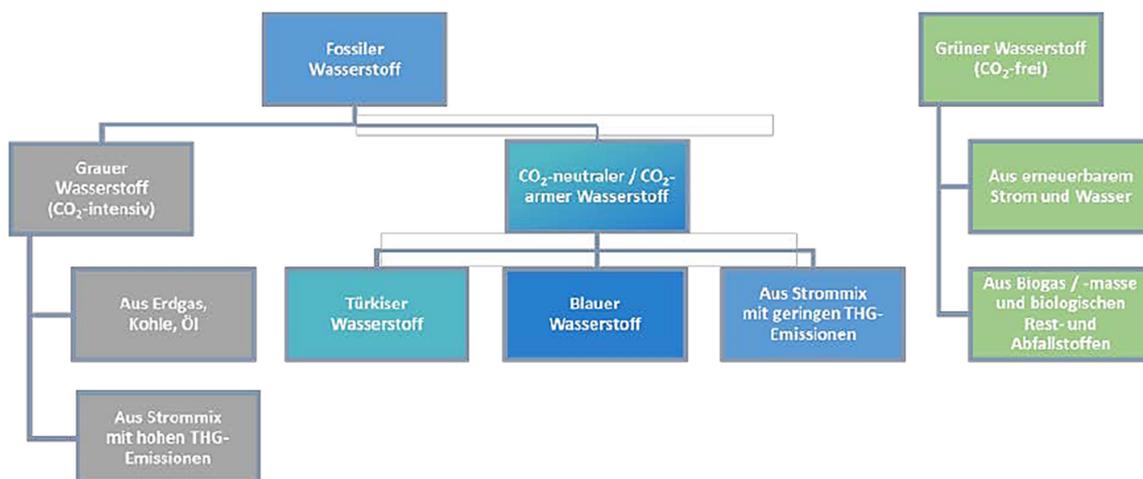


Abbildung 15 Kategorien der Wasserstoffherstellung [33]

#### Grüner Wasserstoff

Für die Herstellung von grünem Wasserstoff durch Power-to-Gas-Verfahren wird Wasser in einem Elektrolyseur mit Hilfe von elektrischem Strom in Wasserstoff und Sauerstoff aufgespalten. Sofern bei der Elektrolyse ausschließlich Strom aus erneuerbaren Energien eingesetzt wird, spricht man von grünem Wasserstoff, da über die gesamte Prozesskette nur geringfügige Mengen CO<sub>2</sub> emittiert werden. Für den Betrieb eines Elektrolyseurs ist neben der ausreichenden Bereitstellung erneuerbaren Stroms die Versorgung mit deionisiertem Wasser notwendig.

Das hierfür genutzte Wasser muss üblicherweise aufbereitet werden, um den Anforderungen der Elektrolyse zu entsprechen. Dies kann u.a. mit Membranfiltrationen, oder ähnlichen Wasseraufbereitungstechnologien geschehen. Für die Herstellung von 1 kg Wasserstoff sind in technischen Anlagen circa 9 bis 10 lH<sub>2</sub>O notwendig. Bei größeren Projekten sollte eine standortbezogene Prüfung der regionalen Auswirkungen auf den Wasserhaushalt erfolgen, um negative Folgen beim länderspezifischen Trinkwasserhaushalt zu vermeiden.

Die verfügbaren Erzeugungstechnologien lassen sich grob in Niedertemperatur-(Alkalische Elektrolyse, AEL und Polymer-Elektrolyt-Membran-Elektrolyse, PEMEL; T < 100 °C) sowie in Hochtemperaturelektrolyse (Solid-Oxide-Elektrolyse, SOEL; T > 700 °C) einteilen. AEL- und PEMEL-Technologien sind bereits relativ weit entwickelt und werden schon heute im Megawatt-Maßstab eingesetzt. Die Hochtemperaturelektrolyse liegt in der technologischen Reife etwas zurück, ist aber aufgrund der hohen elektrischen Wirkungsgrade und der perspektivisch kostengünstigen Herstellung eine sehr vielversprechende Technologie. Aktuell ist die elektrolytische Herstellung von grünem Wasserstoff noch mit hohen Kosten verbunden. Mittelfristig kann mit einer deutlichen Kostendegression um mindestens 50 % gerechnet werden, was auf die weitere technische Entwicklung der Elektrolyseure und ökonomische Skaleneffekte bei deren Produktion zurückzuführen ist. Zu grünem Wasserstoff ist auch die Herstellung aus Biomasse und Biogas zu zählen, da durch die biologische Ausgangsbasis der CO<sub>2</sub>-Kreislauf geschlossen ist.

### **Grauer Wasserstoff**

Der dominierende Anteil des Wasserstoffs wird heutzutage aus Erdgas/Methan über den Pfad der Dampfreformierung oder der autothermen Reformierung hergestellt und wird als grauer Wasserstoff bezeichnet. Dabei reagiert Erdgas unter Zufuhr von Wasserdampf zu Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid. Die gesamte graue Wasserstoffproduktion (inkl. der Wasserstoffherstellung aus Kohle oder Mineralöl) entspricht momentan circa 96 Prozent der globalen Wasserstoffherstellung, welche vorrangig im Industriesektor on-site produziert wird. Die Herstellung ist relativ kostengünstig, geht aber mit bedeutenden CO<sub>2</sub>-Emissionen einher (bspw. werden bei der Umwandlung von Methan 10 kg CO<sub>2</sub> pro kg Wasserstoff freigesetzt). Auch die Wasser-Elektrolyse mittels Strom aus größtenteils fossilen Energien kann als grauer Wasserstoff bezeichnet werden

### **Blauer Wasserstoff**

Bei der Herstellung von blauem Wasserstoff wird das im Reformierungsprozess (vgl. grauer Wasserstoff) entstehende CO<sub>2</sub> abgetrennt und kann langfristig gespeichert (Carbon Capture and Storage, CCS) oder chemisch verwendet (Carbon Capture and Utilization, CCU) werden. Aktuell werden auch bei Verwendung von ausgereiften Technologien rund 85 – 95 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen abgeschieden und in Erdgaslagerstätten eingespeichert. Folglich werden 5 – 15 % emittiert. Die Emittierung wird durch gesetzliche Vorschriften nicht geduldet, jedoch kann ein Störfall und eine damit einhergehende Leckage nie ausgeschlossen werden. Hierbei würde es zu schädlichen Einflüssen auf den Boden und Grundwasser kommen.

### **Türkiser Wasserstoff**

Bei der Herstellung von türkischem Wasserstoff mittels Methanpyrolyse fällt der Kohlenstoff in fester Form an und folglich werden keine direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen frei. Methanpyrolyseanlagen sind derzeit noch nicht großtechnisch verfügbar. Unter der Annahme

einer fortlaufenden technischen Entwicklung kann eine industrielle Marktreife zwischen 2025 und 2030 erreicht werden.

Bei der Bewertung von fossilem Wasserstoffquellen (grau, blau, türkis) sind auch die Emissionen aus der Prozessvorkette (z. B. Methanschlupf bei Förderung und Transport von Erdgas) mit einzubeziehen, wodurch die THG-Emissionsbewertung diffizil wird.

### **Wasserstoffnutzung und –quellen in Deutschland**

Es gibt verschiedene Herstellungsverfahren um reinen Wasserstoff zu erzeugen. Die gängigsten werden im Folgenden kurz erläutert. Bei der Wasserstoffnutzung wird zwischen Nebenprodukt-Wasserstoff („By-Product H<sub>2</sub>“), Handelswasserstoff („Merchant H<sub>2</sub>“) und Industrie-/Chemie-Wasserstoff („Captive H<sub>2</sub>“) unterschieden.

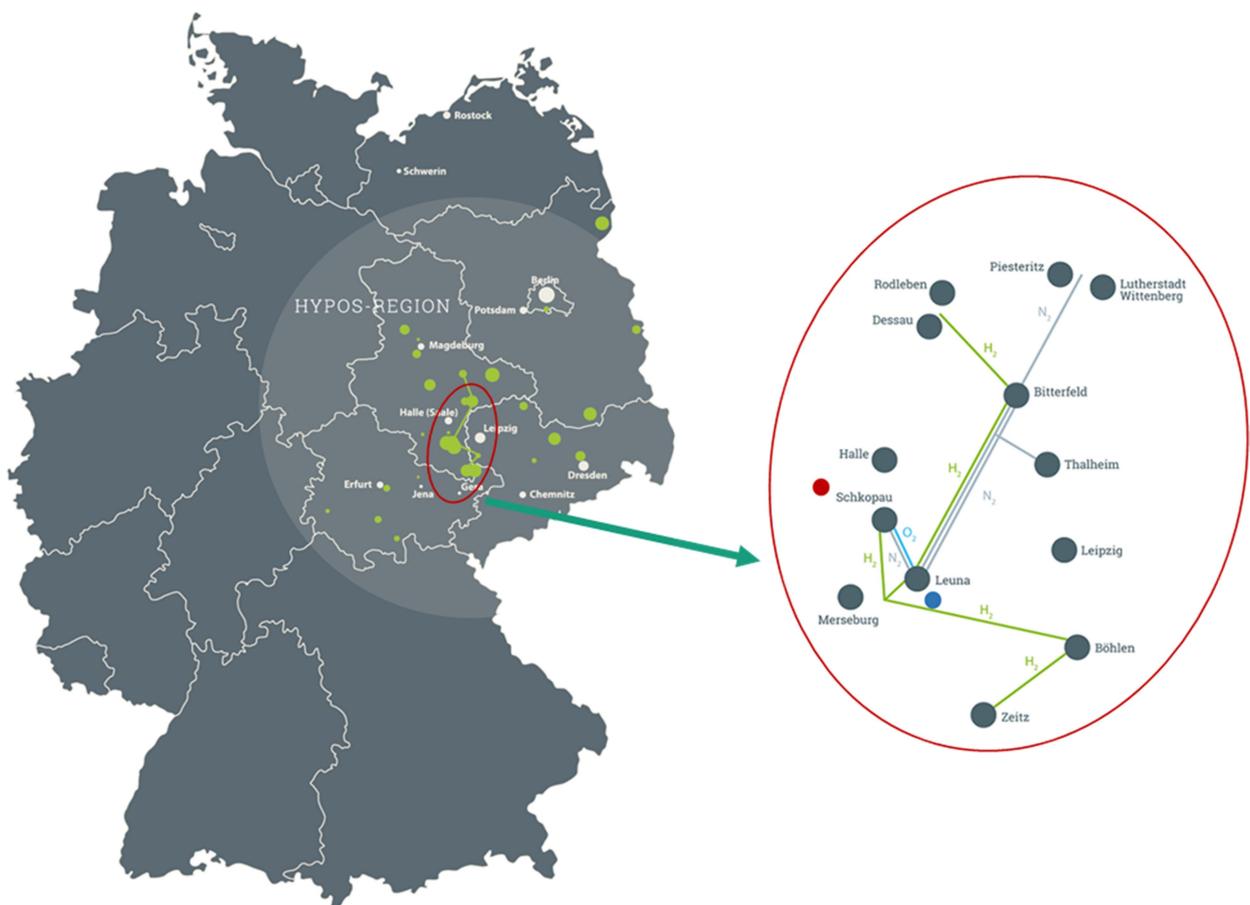
Dabei wird der produzierte Wasserstoff in drei Kategorien unterteilt. Der Nebenprodukt- („By-Product-“) Wasserstoff, welcher in der chemischen Industrie als Nebenprodukt auftritt und im eigentlichen Prozess nicht weiter verwendet werden kann. Außerdem gibt es den Captive H<sub>2</sub>, der in einem chemischen Prozess erzeugt und direkt im Prozessverlauf genutzt wird. Dieser Wasserstoff steht daher nicht für andere Anwendungen zur Verfügung. Als letzte Kategorie gibt es den Handels- („Merchant“-) Wasserstoff, der am Markt frei gehandelt wird und über Lieferanten bezogen werden kann. Die Gesamtproduktion von Wasserstoff belief sich im Jahr 2020 in Deutschland auf kumulierte circa 57 TWh [34]. Etwa ein Drittel davon wurde als Hauptprodukt infolge von Dampfreformierung von Erdgas oder Naphtha hergestellt [34]. Daneben wird Wasserstoff auch als ein Nebenprodukt weiterer Produktionsprozesse wie bei der Ethylen- oder Chlorproduktion gewonnen. Innerhalb dieser Herstellungsverfahren wird grauer Wasserstoff produziert. Gemäß der Wasserstoffnutzungsdefinition ist als H<sub>2</sub>-Bezugsquelle nur der Nebenprodukt- und der Handelswasserstoff relevant. Diese liegen in der Regel in gasförmigem Zustand vor. Nur rund 5 % des in Deutschland verkauften Wasserstoffes werden flüssig geliefert [35].

Die Standorte und die regionale Verteilung der Wasserstoffquellen bzw. -nutzung in Deutschland nach den Kategorien (Captive / Merchant / Nebenprodukt H<sub>2</sub>) ergab, dass H<sub>2</sub> absteigend sortiert in den Kategorien „captive“ ca. 70 %, „merchant“ ca. 20 % und „by-product“ ca. 10 % erzeugt sowie genutzt wird [36]. Gemäß der Verortung der Chemie- und Raffinerieindustrie wird mengenmäßig am meisten Captive H<sub>2</sub> im Westen – Nordrhein-Westfalen, Süden – Bayern und Baden-Württemberg sowie dem Osten – Sachsen-Anhalt und Brandenburg vor Ort erzeugt und genutzt [36]. Häufig werden hierbei werkseigene Gasverteilstrukturen genutzt. Beim merchant H<sub>2</sub> sind die Standorte gemäß der Definition ähnlich der ansässigen Chemieindustrie, da der Handelswasserstoff ebenfalls von Gashersteller vor Ort produziert und in H<sub>2</sub>-Druckgasflaschen und CGH<sub>2</sub>-Trailer vertrieben werden. Der by-Product H<sub>2</sub> fällt bei der chemischen Industrie an und wird auch dort in den meisten Fällen wiederverwertet. Demzufolge sind die Orte der Nutzung primär in Nordrhein-Westfalen und Sachsen-Anhalt. Des Weiteren gibt es in dem Zusammenhang eine Besonderheit und zwar in Nordrhein-Westfalen betreibt die Firma Air Liquide eine 240 km lange H<sub>2</sub>-Rohrleitung, die mit ca. einem Drittel Nebenprodukt H<sub>2</sub> aus der Chlor-Alkali-Elektrolyse sowie zwei Drittel Wasserstoff aus Erdgasdampfrefomern gespeist wird [36]. H<sub>2</sub>-Abnehmer sind die Chemieindustrie sowie die Stahlindustrie. In Sachsen-Anhalt betreibt die Firma Linde eine 130 km lange H<sub>2</sub>-Rohrleitung, die verschiedene Nutzungsorte miteinander verbindet [37]. Primär gespeist wird diese H<sub>2</sub>-Pipeline aus Leuna, wo die Linde AG einen Erdgasdampfreformer zur Wasserstofferzeugung betreibt [37]. Parallel zu den primär fossilen

Wasserstoffherzeugungskapazitäten in Deutschland gab es Stand 2019 insgesamt 62 Power-to-Gas (PtG) -Projekte [38] – grüner Wasserstoff – wovon 10 in Baden-Württemberg und jeweils 7 in den Bundesländer NRW, Niedersachsen, Bayern sind. Der geringste Anteil ist in den östlichen Bundesländern vorhanden - summiert 6 Projekte [39]. Dennoch sind sie eine nachhaltige „grüne“ H<sub>2</sub>-Quelle an denen zukünftige Nutzerstrukturen partizipieren können. Im nächsten Infrastrukturanalyseschritt wird dazu auf Bundeslandebene mit Fokus auf Sachsen sowie dem Untersuchungsraum eingegangen.

### Potentielle Wasserstoffquellen im Untersuchungsraum

Im Bereich des Untersuchungsraums ist die Gasinfrastruktur in Verbindung mit den bestehenden PtG-Projekten in Abbildung 16 dargestellt.



**Abbildung 16 Darstellung der Wasserstoffregion in Mitteldeutschland i.V.m. der H<sub>2</sub>-Pipeline der Hypos-Region [45] [46]**

Hervorzuheben sind hier die großindustriellen H<sub>2</sub>-Projekte westlich von Leipzig, zusammengefasst unter dem Sammelbegriff der Hypos-Region. Im Energiepark Bad Lauchstädt wird ein Reallabor als Kombination eines Windparks (40 MW) mit großindustrieller Elektrolyseleistung von bis zu 40 MW und einer H<sub>2</sub>-Speicherung in der Salzkaverne Bad Dürrenberg [40] errichtet.

Der Kavernenspeicher mit seiner Kapazität von 50 Millionen Kubikmetern sichert eine kontinuierliche Belieferung und gleicht die Leistungsspitzen im Energieaufkommen und der resultierenden diskontinuierlichen Wasserstoffelektrolyse entsprechend aus [40]. Ab dem

Jahr 2024 werden Erprobungsversuche stattfinden und eine lokale Einspeisung sowie ein Transport über umgewidmete Erdgasleitungen erfolgt. Ein weiteres „grünes“ H<sub>2</sub>-Reallabor wird im Industriepark Leuna mit dem Ziel der Erprobung und Optimierung von Großelektrolyseurstechnik in der gesamten Wertschöpfungskette umgesetzt. Die Plattform bietet eine Gesamtelektrolyseleistung von bis zu 100 MW [40]. Der produzierte Wasserstoff soll anwendungsnah im Chemiegebiet Leuna verwendet werden bzw. kommerziell veräußert werden. Die zuvor erwähnte H<sub>2</sub>-Pipeline, dargestellt in Abbildung 16, beinhaltet aktuell primär grauen Wasserstoff, jedoch wird perspektivisch der produzierte grüne Wasserstoff aus der Hypos-Region rund um den Industriestandort Leuna zusätzlich eingespeist, sodass ein Wandel von grauen auf grünen Wasserstoff erfolgt und eine zukünftige Möglichkeit der Partizipation bietet. Demnach stellt die H<sub>2</sub>-Pipeline der Linde AG aktuell und zukünftig im Untersuchungsraum eine relevante Versorgungsstruktur dar. Folglich wird detaillierter auf diese Infrastruktur eingegangen. Das 130 km lange Gasrohrleitungsnetz erstreckt sich von Zeitz, Böhlen, Leuna, Bitterfeld und Rodleben. Das Druckniveau der Pipeline von Leuna nach Bitterfeld beträgt ca. 25 bar bei einer Auslegungskapazität von ca. 1.000 m<sup>3</sup>H<sub>2</sub>/h. Auf der Höhe Zeitz wird das Druckniveau mittels zweier Verdichter auf etwa 63 bar angehoben. Bei Erweiterung der Abnehmerstruktur muss laut Expertenaussage die Verdichterkapazität erhöht werden. Aufgrund des gegenwärtig grauen Wasserstoffs in der Pipeline, welcher für chemische und industrielle Prozesse genutzt wird ist nur eine H<sub>2</sub>-Reinheit von 99,96 % gegeben / notwendig. Für den Anwendungsbereich PEM-Brennstoffzelle muss über eine Gasreinigung die H<sub>2</sub>-Reinheit auf 99,999 % angehoben werden. Zusätzlich verfügt die Linde AG in Leuna über eine großindustrielle Wasserstoffverflüssigungsanlage mit Abfülleinrichtung, um flüssigen Wasserstoff per Lkw zu transportieren.

Die Varianten off-site Elektrolyse in Kombination mit einem EE-Park (Wind und/oder Solar) als auch on-site Elektrolyse direkt an der Tankstelle zur Bereitstellung der notwendigen H<sub>2</sub>-Menge in grüner Form wurde überschlägig betrachtet. Die notwendigen EE-Parkleistungen stehen im Anwendungsraum derzeit nicht zur Verfügung und werden perspektivisch basierend auf den derzeitigen Installationsszenarien auch nicht errichtet. Diese Variante scheidet daher als sinnvolle Bereitstellungsoption aus. Die Partizipation an den oben beschriebenen Reallaboren mit Verteilung des Wasserstoffes über entsprechende Pipelinesysteme bis in den Stadtraum von Leipzig ist eine zukünftig denkbare Versorgungsoption. Für den Betrieb ab Ende 2025 ist dies jedoch noch keine belastbare und zuverlässige Variante.

Eine on-site Elektrolyse direkt an der Tankstelle wird aufgrund des notwendigen Platzbedarfes für die Elektrolyseeinheiten als auch den derzeitigen Strompreisentwicklungen und den notwendigen Investvolumen als nicht sinnvoll erachtet und für die Studie nicht weiter vertieft.

Der für das Projekt alternative Schienenfahrzeuge im mitteldeutschen Revier sinnvollste Bereitstellungspfad des benötigten Wasserstoffs ist der Bezug von Merchant H<sub>2</sub> aus der Region Leuna z. Bsp. über die Linde AG.

Ein weiterer Aspekt zugunsten der Nutzung kommerziellen H<sub>2</sub> ist die Analyse der Kosten für notwendige Infrastruktur (Erzeugung, Transport und Betankung) als auch die sich ergebenden Preis für die Kraftstoffkosten (€/kg H<sub>2</sub>) frei Zapfsäule für die verschiedenen Bereitstellungs- und Versorgungsszenarien. Eine detaillierte Analyse ist in der Studie der NOW GmbH, Wasserstoff-Infrastruktur für die Schiene [42] zu finden. Die Kernaussagen der

Analyse zeigen, dass sich derzeit und mittelfristig ein deutlicher Vorteil bei der Nutzung kommerziellen Wasserstoffs mit Anlieferung bei LKW ergibt.

Die Zusammenfassung potentieller H2-Bereistellungspfade im Anwendungsgebiet ist in der folgenden Tabelle aufgeführt:

**Tabelle 6 Zusammenfassung Optionen Bereitstellung Wasserstoff**

Methode	Details	2025	2030 – 2037
<b>On-Site Elektrolyse</b>	<p>Erzeugung H2 direkt an Tankstellen, Vorteil durch Wegfall Transportwege, Hoher Invest für Elektrolyseur und Nebenaggregate (Verdichter), Erhöhter Platzbedarf durch Elektrolyseur und Nebenaggregate, Notwendiger Trinkwasseranschluss (9l/kg H2) mit resultierenden Wasserkosten,</p> <p>Direkte Kombination Tankstelle mit EE-Park</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• nur PV im städtischen Umfeld möglich, großer Flächenbedarf, praktisch unrealistisch,</li> <li>• diskontinuierliche Auslastung, redundante H2-Bereitstellung notwendig,</li> </ul> <p>Nutzung von Strommix / Bahnstrommix für Elektrolyse</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• hohe elektrische Anschlussleistung notwendig,</li> <li>• hohe resultierende Stromkosten bei derzeitiger ,Strompreiszusammensetzung und –entwicklung,</li> </ul>	--	(✓)
<b>Off-Site-Elektrolyse</b>	<p>Erzeugung H2 im direkten Umfeld eines EE-Parks (Wind oder OV), Speicherung und Transport des H2 zur Tankstelle notwendig, Hoher Invest für Elektrolyseur und Nebenaggregate (Verdichter) und Aufbau eines notwendigen Speichersystems, Hoher Platzbedarf für Elektrolyseur und Speichersysteme, Notwendiger Trinkwasseranschluss (9l/kg H2) mit resultierenden Wasserkosten,</p> <p>Direkte Kombination mit EE-Park und Nutzung aus EEG auslaufende Anlagen bei parallelem Zukauf "grünen Stroms"</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• PV- oder Windpark mit entsprechendem Energieaustrag,</li> <li>• Kosten für Transport,</li> </ul>	--	✓
<b>Merchant H2</b>	<p>Bezug kommerziellen H2 mit perspektivisch „grüner“ Erzeugung, Hohe Abhängigkeit von Lieferanten (z.Bsp.: Linde AG), Derzeit Vergleichsweise günstige Wasserstoffpreise durch bestehende großindustrielle Infrastruktur, Kosten für Transport und Logistik werden auf den Endpreis umgelegt,</p>	✓	✓

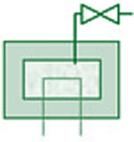
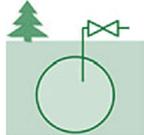
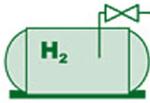
Auf die Aspekte Speicherung und Transport von Wasserstoff wird in den nächsten Abschnitten detailliert eingegangen.

### 1.6.3 Aufschlüsselung der notwendigen lokalen Speicherungs- und Transportmaßnahmen

#### Speicherung von Wasserstoff

Wasserstoff lässt sich auf unterschiedlichsten Wegen speichern, woraus sich gleichzeitig verschiedene Anwendungsfelder ergeben. Das Ziel bei der Wasserstoffspeicherung geht dabei stets mit der Erhöhung der Dichte und somit auch der Energiedichte vom Wasserstoff einher. In Tabelle 7 werden die möglichen Speicherarten für Wasserstoff zusammengefasst.

Tabelle 7 Übersicht Speicherarten für Wasserstoff

Chemische Speicherung		Flüssigspeicherung		Druckspeicherung	
Metallhydridspeicher	Speicherung in H <sub>2</sub> -Verbindungen	Tiefkühlspeicher		Gasspeicher	
					
stationär, mobil, tragbar	vorhandene Infrastruktur nutzen	Trailer-Transport	Stationäre Großspeicher	Kavernen	stationär, mobil, protabel

Aus der Übersicht wird erkenntlich, dass eine chemische, flüssige und druckbasierte Speicherung von Wasserstoff möglich ist. Dabei kann die Speicherung von Wasserstoff sowohl durch Ein- und Auslagern in Festkörpern (Metallhydridspeicher) erfolgen, oder aber die Druckspeicherung sowie die Kryospeicherung des verflüssigten Gases zum Einsatz kommen. Darüber hinaus kann der Wasserstoff in H<sub>2</sub>-Verbindungen wie bspw. Ammoniak und Kohlenwasserstoffe chemisch gespeichert werden. Dies ermöglicht gleichermaßen die Nutzung bereits bestehender Infrastrukturen der H<sub>2</sub>-Verbindungen. Jedoch muss am Ort des Wasserstoffbedarfs eine Aufbereitung stattfinden. Beispiele hierfür sind u.a. stationäre und mobile Stromerzeuger mit Wärmeankopplung (KWK-Systeme).

Die volumetrischen und gravimetrischen Energiedichten der Technologien werden zudem in Abbildung 17 dargestellt, um einen Vergleich zu ermöglichen.

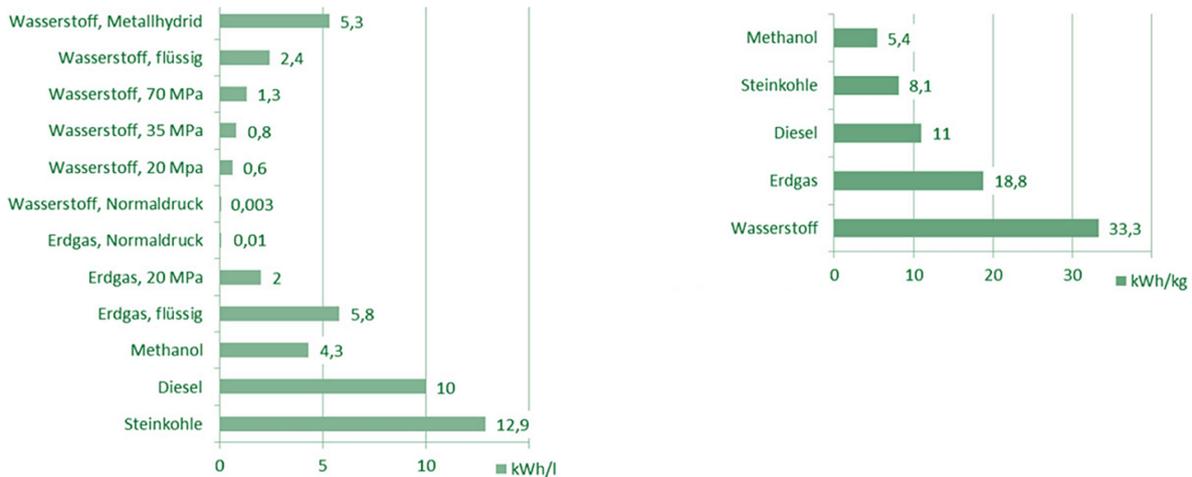


Abbildung 17 Vergleich volumetrische (links) und gravimetrische (rechts) Energiedichte

### Druckspeicherung

Bei der Druckspeicherung wird üblicherweise der vom Elektrolyseur erzeugte Druck (bspw. z. B. 3MPa bei der alkalischen Druckelektrolyse) mit einem für Wasserstoffanwendungen geeignetem Kompressor weiter erhöht. Als Kleinspeicher kommen dabei Industrie-Gasflaschen mit einem Fassungsvermögen von üblicherweise 50l zum Einsatz. Diese können je nach erforderlichem Speichervolumen in Flaschenbündeln zusammengefasst werden. So können etwa 10 bis 100 m<sup>3</sup> in stationären Lagern mit Drücken von ca. 10 MPa gespeichert werden, was den aktuellen Stand der Technik darstellt. Der energetische Aufwand für die Kompression ist dabei verhältnismäßig gering und kann mit ca. 5 % der in Form von Wasserstoff gespeicherten Energie beschrieben werden. Der Wirkungsgrad dieses Speicherschritts liegt somit bei ca. 0,95. Verglichen mit der Energiedichte von Dieselmotorkraftstoff von ca. 10 kWh/l ist erkennbar, dass sowohl auf den Druckstufen von 20 MPa, als auch 35 MPa die Energiedichte von Wasserstoff verhältnismäßig gering ist. Eine mobile Anwendung in Tankgrößen, wie sie üblicherweise in Kraftfahrzeugen eingesetzt werden ist somit nicht möglich. Erst bei höheren Druckstufen wie 70 MPa wird der mobile Einsatz sinnvoll skalierbar. Die dafür entwickelten Composite-Behälter sind dünnwandige metallischer „Liner“, welche mit festem Faserverbundwerkstoff umwickelt und vergossen werden und somit gegenüber konventionellen Stahltanks ein deutlich geringeres Gewicht aufweisen.

Im Vergleich dazu liegen bei der Druckspeicherung im großskalierten Maßstab, wie der Kavernenspeicherung, die Druckniveaus zwischen 5 und 18 MPa. Die Nutzung von Kavernenspeichern für Wasserstoff ist jedoch bisher nicht dem Stand der Technik zu verorten. Eine erste Gasspeicheranlage für grünen Wasserstoff entsteht derzeit in Bad Lauchstädt.

### Kryospeicherung

Bei der Kryospeicherung wird flüssiger Wasserstoff bei -252 °C und Normaldruck gespeichert. Gemäß der Dichte von flüssigem Wasserstoff von 71 kg/m<sup>3</sup> enthält ein Liter ca. 71 g Wasserstoff. Die Energiedichte lässt sich somit auf ca. 2,4 kWh/l beziffern. Bei gleicher Reichweite müssten somit die geometrischen Volumina von Kraftfahrzeugtanks etwa viermal so groß sein, wie bei der Nutzung von Dieselmotorkraftstoff.

Wird verflüssigter Wasserstoff stationär gespeichert, so weisen die Isoliergefäße gemäß den Sicherheitsanforderungen eine Öffnung am höchstgelegenen Punkt auf. Durch diese kann der durch den geringfügigen Wärmeeintrag ständig verdampfende Anteil von Wasserstoff entweichen und ein möglicher Druckaufbau im Speichersystem wird verhindert. Die täglichen Abdampfverluste liegen dabei im einstelligen Prozentbereich je nach Speichersystem.

Abhängig von der Größe der Verflüssigungsanlagen werden für den gesamten Speicherschnitt Wirkungsgrade von 0,65 bis 0,70 erreicht. Möglich sind mit aktuellem Stand der Technik Wirkungsgrade von bis zu 0,80.

### Speicherung in Feststoffen

Wasserstoff kann durch Einlagerung (Absorption) und durch Anlagerung (Adsorption) in bzw. an festen Stoffen gespeichert werden. Ein Beispiel für Adsorption ist die Aufnahme von Wasserstoffgas in Kohlenstoff (Aktivkohle) bei tiefen Temperaturen (Bereich um -200 °C).

Eine immer häufiger genutzte Methode ist die Speicherung von Wasserstoff in Metallhydridbindungen durch Absorption. Hierbei werden typischerweise in den Gitterzellen metallischer Legierungen an energetisch geeigneten Zwischengitterplätzen einzelne Wasserstoffatome eingebunden und somit gespeichert. Die Atome gehen dabei schwache chemische Bindungen ein, wobei Wärme freigesetzt wird. Um den Wasserstoff im Bedarfsfall wieder aus seinen Bindungen zu lösen, muss die Bindungsenergie dem Speicher wieder zugeführt werden. Bei sogenannten Niedertemperatur-Hydriden reicht dabei eine geringe Temperatureinwirkung (bspw. Aufwärmung durch das Kühlwasser eines Verbrennungsmotors im Betriebszustand). In Abhängigkeit der Legierungen sind bis zu 300 °C notwendig.

Die Wasserstoffkapazität von Metallhydridlegierungen liegt bei 2 bis 3 Ma.-% im niedrigen Temperaturbereich. Im Hochtemperaturbereich können auf den Zwischengitterplätzen der Legierungen mehr als 5 Ma.-% absorbiert werden. Die Energiedichte der Metallhydridlegierungen liegt im Durchschnitt bei etwa 5 kWh/l und somit bei etwa der halben Energiedichte von Dieselmotorkraftstoff. Jedoch ist dabei zu beachten, dass bei mobilen Anwendungen gleichermaßen das Gewicht der Metallhydridspeicher mit berücksichtigt werden muss. Somit eignen sich diese Speichertechnologien eher für Spezialfahrzeugen (z. B. Gabelstapler), oder den maritimen Transport (Nutzung der Masse der Metallhydride in Schiffen zur Sicherung der Stabilität und H<sub>2</sub>-Speicherung).

### Transport von Wasserstoff

Der Transport von Wasserstoff ist die Schnittstelle zwischen Erzeugung und Bedarf und kann, wie auch die Wasserstoffspeicherung, mit unterschiedlichen Systemen erfolgen. Hierbei sind explizit für die Region Leipzig der Transport über LKW Trailer (gas/flüssig), der Transport über den Schienenverkehr mittels Container (gas), als auch der Transport über eine Wasserstoff-Pipeline hervorzuheben.

#### LKW Trailer (CGH<sub>2</sub>/LH<sub>2</sub>)

Der Transport von Wasserstoff mittels LKW Trailern als verdichtetes Gas, oder als flüssiger Wasserstoff (s. Wasserstoffspeicherung) kann durch einsatzbereite Systeme (Linde Leuna) ermöglicht werden. Eine Belieferung wäre ab dem Industriestandort Leuna realisierbar (35 bis 45 km). Die Linde AG betreibt am Standort Leuna großindustrielle Erdgasdampfreformer zur Erzeugung von Wasserstoff. Derzeitige Entwicklungen und Beteiligungen im Hypos-

Netzwerk sollen mittelfristig auch zur kommerziellen Bereitstellung „grünen“ Wasserstoffes führen. Die kommerziell zur Verfügung stehenden Wasserstoffmengen durch die Linde AG übersteigen um ein Vielfaches die errechneten täglichen Verbrauchsmengen für den Betrieb der H<sub>2</sub>-Triebwagen [41].

Bei einer Grundversorgung mittels LKW Trailer unterscheiden sich die Transportmengen dabei in Abhängigkeit der Wasserstoffspeicherung. So sind bei auf 300 bar verdichtetem gasförmigem Wasserstoff aufgrund der etwas geringeren Energiedichte Transportmengen von ca. 1.000 kg H<sub>2</sub> je Trailer möglich. Bei Kryospeichersystemen sind ca. 4.000 kg H<sub>2</sub> je Trailer die maximale Transportmenge, wobei der flüssige Wasserstoff Temperaturen von ca. -235 °C besitzt. Die Nutzung von druck- oder kryobasierten LKW Trailern ist im konkreten Einsatzfall stets von vielen Parametern abhängig. So sind infrastrukturelle Gegebenheiten für Tankstellen, sowie Konzepte für Speicherung, Betankungszeit, Transportzyklen, oder auch genehmigungsrechtliche Aspekte hinsichtlich Trailerfahrten zu berücksichtigen. Positiv kann hervorgehoben werden, dass schnelle Reaktionszeiten beim Ausfall eines Trailers möglich sind.

Der per LKW Trailer lieferbare Wasserstoff erfüllt die brennstoffzellenspezifische hohen H<sub>2</sub>-Qualität- und Reinheitsanforderungen. Daher sind zusätzlich notwendige Prozesse als auch zugehörige Infrastrukturkomponenten für die Reinigung des Wasserstoffs bei dieser Lieferform nicht zu berücksichtigen.

### Zug mit Container (CGH<sub>2</sub>)

Eine derzeitige Möglichkeit zum Transport von Wasserstoff mittels Schienenverkehr besteht derzeit nicht, da weder entsprechende Container, noch Abfüllstationen für verdichteten Wasserstoff mit Gleisanschluss zur Verfügung stehen. Grundlagenforschungen zum Einsatz werden derzeit intensiviert. Eine prinzipielle und direkte Anbindung an das Schienennetz „Leuna-Leipzig“ wäre jedoch möglich und ist durch die vorhandene Gleisinfrastruktur sowohl im Industriestandort Leuna als auch die bestehenden Schienenverbindungen Leuna-Großraum Leipzig gegeben.

Die für diesen Transportweg erforderlichen Infrastrukturen müssten jedoch komplett geschaffen werden und Transportfahren in die tägliche Netz- bzw. Auslastungsplanung zusätzlich eingetaktet werden. Zudem müssten im Störfall redundante Transportoptionen im vorgesehen werden (LKW Trailer).

### Wasserstoff-Pipeline

Die Nutzung einer Wasserstoff-Pipeline zum Transport ist neben dem Trailer- und Schienentransport eine weitere Möglichkeit. Diese Variante dient dem Transport großer Volumenströme von Wasserstoff.

Die Trasse der bestehenden H<sub>2</sub>-Pipeline verläuft im Raum Leipzig u.a. zwischen dem Flughafen und dem BMW-Werk. Ein im Bereich des Flughafens Leipzig anliegender aber ungenutzter Abgang wurde für die Verwendung bereits diskutiert. Potentielle H<sub>2</sub>-Projekt in Flughafennähe wie Busse und Versorgungsfahrzeuge für den Flughafenbetrieb, H<sub>2</sub>-Tankstelle am Autobahnkreuz Leipzig und die Nutzung von H<sub>2</sub>-Flurförderfahrzeugen im BMW-Werk sind bereits als zukünftige potentielle H<sub>2</sub>-Abnehmer herausgearbeitet. Im Rahmen dieser Aktivitäten könnte die Versorgung der H<sub>2</sub>-Bahntankstelle zukünftig ebenso adressiert werden.

Grundsätzlich ist eine Erweiterung von bestehenden Pipelinenetzen, bspw. bis zur Tankstelle, aufgrund rechtlicher und baulicher Anforderungen in der praktischen Umsetzung jedoch als sehr kosten- als auch zeitintensiv zu bewerten. Die Kosten belaufen sich dabei auf ca. 1.000 €/m Stahlausführungen, sowie ca. 350 - 600 €/m für Kunststoffausführungen. Neben den erhöhten Investitionskosten sind zudem die erforderlichen Genehmigungs- und Verlegungsprozesse aufwendig und zeitintensiv. Eine vorausschauende Planung (mittel- und langfristig) ist somit notwendig. Weitere Anforderungen an das Transportsystem ergeben sich aus der notwendigen Reinigung und Verdichtung des Wasserstoffs. Auch hier müssen im Falle eines Stör- oder Ausfalls des Transportsystems redundante Transportoptionen vorgesehen werden (LKW Trailer). Die Versorgung der potentielle H2-Bahntankstelle mittels Pipeline ist daher nur als mittel- und langfristige Option im Kontext vielfältiger H2-Projekte rund um den erweiterten Abgang mit entsprechende H2-Tankstelle anzusehen.

### Transport H2 in der Region Leipzig

Aufgrund der im Anwendungsfall vorliegenden Parameter:

- Tagesbedarfs < 4 t/d
- Transportweg ca. 35-40 km (Leuna)
- keine direkten Pipelineberührungspunkte in unmittelbarer Umgebung der priorisierten Zugstrecke

ergibt sich als Vorzugsvariante der Transport von Wasserstoff mittels LKW Trailer auf Basis von verdichtetem, gasförmigen Wasserstoff (CGH<sub>2</sub>). Somit sind je Trailer Transportmengen von ca. 1.000 kg H<sub>2</sub> bei einem Druckniveau von 300 bar möglich. Alternativ ist der Trailer-Transport von flüssigem Wasserstoff möglich, womit ca. 4.000 kg H<sub>2</sub> je Trailer transportiert werden können.

#### 1.6.4 HEMU-Tankstellenszenario

Die Versorgung von BZ-Schienenfahrzeugen mit Wasserstoff ist bisher erst in wenigen Projekten in der Umsetzung. Als eines von wenigen Referenzprojekten ist die Mitte 2021 in betrieb gehende H<sub>2</sub>-Bahntankstelle am VS Bremervörde der derzeit wasserstoffbetriebenen Strecke Buxtehude-Cuxhaven der Eisenbahnen und Verkehrsbetrieben Elbe-Weser GmbH (EVB) zu nennen. Nach einer Testphase mit provisorischer, mobiler H<sub>2</sub>-Tankinfrastruktur wird derzeit in Kooperation zwischen der Linde AG und Alstom eine Wasserstofftankstelle mit einer Kapazität von rund 1,6 t/d errichtet.

Aufgrund der Neuheit der Technologie und der Existenz derzeit nur einzelner Pilotanlagen kann auf entsprechend wenig Erfahrungen zu den benötigten Betankungsanlagen und Versorgungsketten zurückgegriffen werden. Dies spiegelt sich auch in den verfügbaren Daten z.B. zu Kosten und technischen Konzepten wieder. Je Anwendungsfall ist daher basierend auf täglicher Verbrauchsmenge und dem favorisierten Versorgungsmodell ein entsprechendes Anlagenkonzept für die Bahnbetankungsanlage zu konzipieren. Weitere Faktoren wie verfügbare Fläche, Bebauungsumfeld, Ladekonzept, notwendige Ladezeit, Anzahl der Ladeeinheiten, Einbezug von Nebennutzung (LKW, PKW, Nutzfahrzeuge), Speicherkonzept mit vorsehen von Hochdruckspeichern oder entsprechender Trailerabstellung bei reduzierter Hochdruckspeicherkapazität bedingen wesentlich das finale, für den Anwendungsfall zu optimierende Tankstellenkonzept.

Grundlegend kann von einem Grundkonzept aus Anlieferinfrastruktur, Verdichtungseinheit, Hochdruckspeicherung (500 bar) und Dispensereinheiten für die potentielle stationäre H<sub>2</sub>-Tankstelle im betrachteten Anwendungsfall ausgegangen werden.

Weitere Grundlegende Aspekte der Tankstellenkonzepte sind [42]:

- Der Kraftstoff wird über parallel geschaltete Dispenser gasförmig an die voneinander unabhängigen Tanksysteme des Schienenfahrzeugs abgegeben.
- Der Transfer des gasförmigen Wasserstoffs wird durch Druckdifferenz (Überströmen) zwischen Tankstelle und Tanksystem des Schienenfahrzeugs erreicht.
- Um eine möglichst kosten- sowie energieeffiziente Betankung zu ermöglichen, wird der Wasserstoff tankstellenseitig aus verschiedenen, intelligent verschalteter Druckkaskadenabgegeben
- Für die Betankung wird (pro Dispenser) mit einer maximalen Wasserstoff-Transferrate von 120 gH<sub>2</sub>/s ausgegangen. Abhängig vom Füllstand des Fahrzeug-Tanksystems und der Auslegung der Tankstelle kann die durchschnittliche Transferrate deutlich geringer ausfallen. Eine genaue Aussage über die maximal erzielbaren H<sub>2</sub>-Transferraten kann nicht ohne detaillierte Tankstellenauslegung gemacht werden.
- Die einzelnen BZ-Schienenfahrzeuge werden nacheinander mit Wasserstoff betankt. Sollten mehrere Fahrzeuge parallel betankt werden, ist die entsprechende Anzahl verschalteter Dispenser vorzusehen.

Die Tanksysteme der derzeit marktüblichen Fahrzeuge fassen knapp 90 kg je Einheit. Die reine Betankungszeit einer kompletten Betankung, begrenzt durch den maximalen Gasfluss durch die Zapfpistole, beträgt somit mindestens knapp 13 Minuten (bei 90 kg Tankeinheit). Realistisch ist voraussichtlich von einer deutlich längeren Betankungszeit auszugehen. Bedingt durch sich ändernden Druckverhältnisse während des Tankprozesses wird sich eine reduzierte, noch nicht spezifizierbare gemittelte Transferrate einstellen. Die Rangierzeit der Triebwagen zwischen der Betankung einzelner Fahrzeuge wird somit auf ca. 30 Minuten abgeschätzt [42].

Je nach Ausführung der Gesamtanlage ist von einer notwendigen Fläche von 2,5 tm<sup>2</sup> bis 4,0 tm<sup>2</sup> für die gesamte Tankstelleninfrastruktur auszugehen. Dies Fläche umfasst die Anlieferung mit Wenderadien und Abstellflächen für die H<sub>2</sub>-Trailer als auch die Flächen für notwendige Aggregate (Verdichter und Dispenser) und Hochdruckspeicher (siehe Abbildung 14). Erweiterungsflächen für eine potentielle on-site Elektrolyse, Anlieferung per Pipeline mit der resultierend notwendigen Reinigungsinfrastruktur als auch Ausweitung der Nebennutzung durch private PKW, ÖPNV-Fahrzeuge und Nutzfahrzeuge sind in der veranschlagten Grundfläche noch nicht berücksichtigt.

Die Auslegung der jeweiligen Einzelkomponenten sollte durch einen Systemlieferanten erfolgen. Für die vorgesehene Bahntankanlage mit Nebennutzung durch PKW, ÖPNV und Nutzfahrzeuge empfiehlt sich ein Bezug des H<sub>2</sub> ab Zapfsäule mit Betreuung und Verantwortung der kompletten Tankstelleninfrastruktur durch einen externen Anbieter. Die Kompletverantwortung von H<sub>2</sub>-Bereitstellung inklusive Redundanzkoordination, Auslegung, Wartung und Betrieb der H<sub>2</sub>-Tankinfrastruktur liegt dann in der Obhut von einem externen kommerziellen Anbieter. Im konkreten Anwendungsfall ist mit der Linde AG ein entsprechend fachlich versierter Partner lokal verortet und eine Partizipierung aus den Erfahrungen des Projektes H<sub>2</sub>-Tankstelle Bremervörde wäre gegeben. In Vorgesprächen hat die Linde AG

entsprechendes Interesse und Bereitschaft erklärt ein derartiges Betreiberkonzept anzubieten.

### 1.6.5 Potentielle Standorte der H2-Betankungsanlage

Ein geeigneter Betankungsort mit optimaler Minimierung der Aufwendungen für Betankungsfahrten sowohl für die Strecke VS Miltitzer Allee - Döbeln Hbf als auch für die optionale Strecke Leipzig Hbf tief - Gera Hbf ist aufgrund der unterschiedlichen Streckenführungen im Großraum Leipzig nur bedingt zu realisieren [41]. Im Rahmen der Metastudie wurden potentielle Standorte für die H2-Betankungsanlage daher vorrangig für die prioritäre Strecke VS Miltitzer Allee - Döbeln Hbf untersucht. Aufgrund der Vorgabe des Auftraggebers, eine Nebennutzung der Betankungsanlage durch private PKW, ÖPNV und Nutzfahrzeuge einzuplanen wurde die Standortanalyse auf den urbanen Großraum Leipzig beschränkt. Potentielle Standorte im Umfeld Grimma ob .Bf. bzw. Döbeln Hbf wurden daher nicht genauer analysiert.

Für die Potentialbetrachtung wurden die folgenden Bewertungskriterien herangezogen:

- Räumliche Verfügbarkeit (Freifläche)
- Gleisanbindung und räumliche Nähe zur Fahrstrecke LL-Döbeln
- Zusatzstrecke für Betankungsfahrten
- Rangieraufwand für Einfahrt zur Betankungsanlage
- Umgebungsbebauung + Bestandsinfrastruktur
- Verkehrsanbindung für H2-Bereitstellung
- Potentieller H2-Pipelineanschluss
- Einbindungsmöglichkeiten weitere Nutzer

Als potentielle Standorte wurden im Raum Leipzig die folgenden Optionen detailliert betrachtet: Leipzig Engelsdorf (1); ehemaliges BW Leipzig Hbf Süd (2); Umfeld Leipzig Postbahnhof (3); VS Leipzig Stötteritz (4); VS Leipzig Plagwitz (5); geplanter Endhaltepunkt Leipzig Miltitzer Allee (6) und das in flughafennähe befindliche Bahnbetriebsgelände Leipzig Wahren (7).

In der folgenden Abbildung ist die Lage der betrachteten Standorte dargestellt.

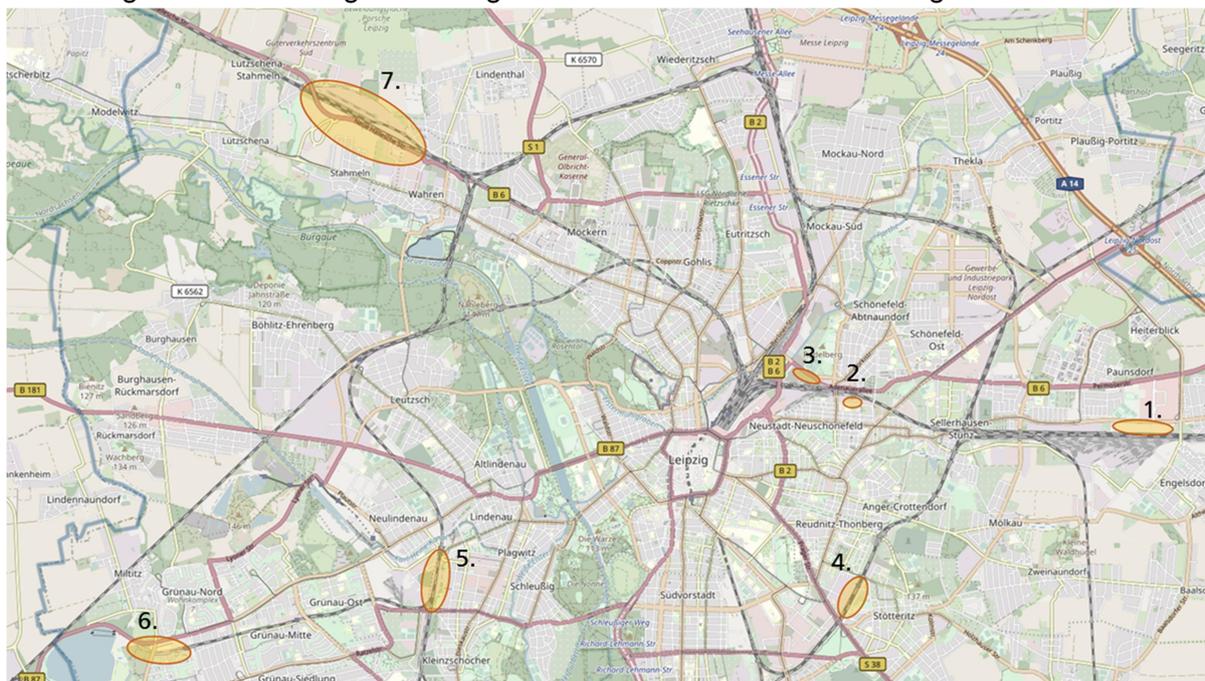


Abbildung 18 Betrachtete Standorte für H2-Betankungsanlage im Großraum Leipzig

In den folgenden Ausführungen werden die Vor- und Nachteile als auch örtlichen Begebenheiten der jeweiligen Standorte detailliert aufgelistet:

### Leipzig Engelsdorf (1)

Für die Standortanalyse wurden die Freiflächen und Industriebrachen nördlich der Haupttrasse (rot markiert) mit Zugang über die Güterbahnhofstraße betrachtet. Die bebauten Flächen des Güterbahnhofes südlich der Haupttrasse (orange markiert) wurden in die Analyse nicht mit einbezogen.

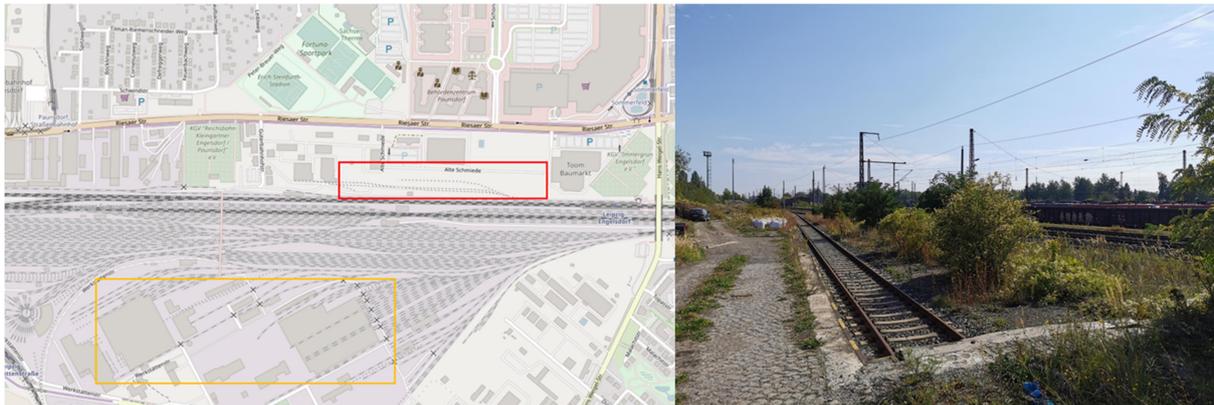


Abbildung 19 Potentieller H2-Betankungsstandort Leipzig-Engelsdorf

Tabelle 8 Bewertung potentieller H2-Betankungsort Leipzig-Engelsdorf

Kriterium	Vorteil	Nachteil
Räumliche Verfügbarkeit	Freiflächen und Industriebrachen vorhanden	Besitzverhältnisse sind zu klären
Gleisanbindung + Rangieraufwand	Direkte Gleisanbindung vorhanden Lage zu Haupttrasse direkte Anbindung an Strecke Miltitzer Allee-Döbeln	Einfahrt nur aus Osten möglich mit entsprechendem Rangieraufwand, hohes Verkehrsaufkommen auf der Haupttrasse, Slots für Rangieraktivitäten müssen eingetaktet werden
Umgebungsbebauung	--	teils genutzte Industrialtbauden
Verkehrsanbindung zur H2-Bereitstellung (LKW)	Anbindung über A1, B6 und Riesaer Straße	Enge Einbindung über Güterbahnhofstraße
Potentiale H2-Pipelineanbindung	--	schwierig realisierbar durch urbanen Raum und zentraler Lage im Stadtgebiet Leipziger , Entfernung von bestehender H2-Pipeline
Einbindung Nebennutzer	Private PKW, ÖPNV z.Bsp.: Busse (Wende- und Versorgungspunkt Paunsdorf), Nutzfahrzeuge der Stadt Leipzig	Zugänglichkeit für Nebennutzer

## BW Leipzig Hbf Süd (2)

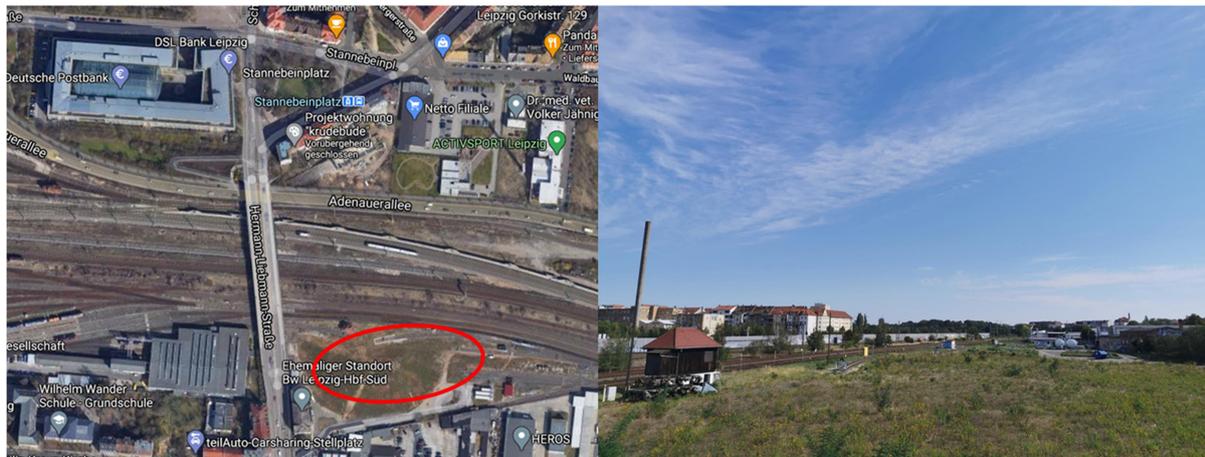


Abbildung 20 Potentieller H2-Betankungsstandort BW Leipzig Hbf Süd

Tabelle 9 Bewertung potentieller H2-Betankungsort BW Leipzig Hbf Süd

Kriterium	Vorteil	Nachteil
Räumliche Verfügbarkeit	Freiflächen mit teils industrieller Nutzung vorhanden	Interessenskonflikte mit anderen Nutzern
Gleisanbindung + Rangieraufwand	Direkte Gleisanbindung vorhanden Lage zu Haupttrasse	Einfahrt nur aus Osten möglich mit entsprechendem Rangieraufwand, hohes Verkehrsaufkommen auf der Haupttrasse, Slots für Rangieraktivitäten müssen eingetaktet werden, Keine direkte Anbindung an Strecke Miltitzer Allee-Döbeln
Umgebungsbebauung	Industriebebauung Nähe zu Hbf	Innerstädtische Lage mit angrenzender Wohnbebauung
Verkehrsanbindung zur H2-Bereitstellung (LKW)	Anbindung über A1, B6	Enger Abzweig Schulze-Delitzscher Straße
Potentiale H2-Pipelineanbindung	--	schwierig realisierbar durch urbanen Raum und zentraler Lage im Stadtgebiet Leipziger, Entfernung von bestehender H2-Pipeline
Einbindung Nebennutzer	Private PKW, ÖPNV z.Bsp.: Busse, Nutzfahrzeuge der Stadt Leipzig und des Hauptbahnhofes, Fernbusterminal Leipzig	Zugänglichkeit für Nebennutzer

### Umgebung ehemaliger Postbahnhof (3)



Abbildung 21 Potentieller H2-Betankungsstandort Umgebung ehemaliger Postbahnhof

Tabelle 10 Bewertung potentieller H2-Betankungsstandort Umgebung ehemaliger Postbahnhof

Kriterium	Vorteil	Nachteil
Räumliche Verfügbarkeit	Freiflächen und alte Bahninfrastruktur vorhanden	Interessenskonflikte mit anderen Nutzern, laufende Sanierung Gebäude Postbahnhof
Gleisanbindung + Rangieraufwand	Direkte Gleisanbindung vorhanden Lage zu Haupttrasse	Einfahrt nur aus Osten möglich mit entsprechendem Rangieraufwand, hohes Verkehrsaufkommen auf der Haupttrasse, Slots für Rangieraktivitäten müssen eingetaktet werden, Keine direkte Anbindung an Strecke Miltitzer Allee-Döbeln
Umgebungsbebauung	Industriebebauung und installierte Bahnwaschanlage, Nähe zu Hbf	Innerstädtische Lage mit angrenzender Wohnbebauung
Verkehrsanbindung zur H2-Bereitstellung (LKW)	Anbindung über A1, B6	--
Potentiale H2-Pipelineanbindung	--	schwierig realisierbar durch urbanen Raum und zentraler Lage im Stadtgebiet Leipziger, Entfernung von bestehender H2-Pipeline
Einbindung Nebennutzer	Private PKW, ÖPNV z.Bsp.: Busse, Nutzfahrzeuge der Stadt Leipzig und des Hauptbahnhofes, Fernbusterminal Leipzig	Flächenbedarf für Nebennutzung

## VS Leipzig Stötteritz (4)

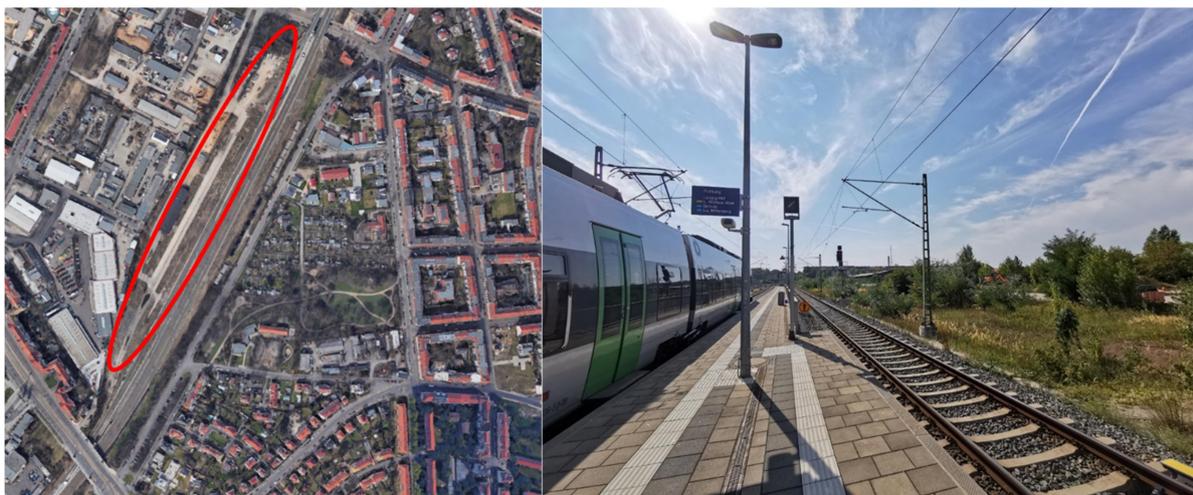


Abbildung 22 Potentieller H2-Betankungsstandort VS Leipzig Stötteritz

Tabelle 11 Bewertung potentieller H2-Betankungsort VS Leipzig Stötteritz

Kriterium	Vorteil	Nachteil
Räumliche Verfügbarkeit	Begrenzte Freiflächen westlich des VS mit teils industrieller Nutzung vorhanden	Interessenskonflikte mit bestehender Nutzung, räumliche Begrenztheit
Gleisanbindung + Rangieraufwand	Direkte Anbindung an Strecke Miltitzer Allee-Döbeln	Gleisanbindung nicht vorhanden,
Umgebungsbebauung	Industriebebauung, direkte Nähe zum VS Leipzig Stötteritz	Innerstädtische Lage mit angrenzender Wohnbebauung
Verkehrsanbindung zur H2-Bereitstellung (LKW)	Anbindung über A1, B6 und B2,	teils enge Zufahrtstraßen durch Wohngebiet
Potentiale H2-Pipelineanbindung	--	schwierig realisierbar durch urbanen Raum und zentraler Lage im Stadtgebiet Leipziger , Entfernung von bestehender H2-Pipeline
Einbindung Nebennutzer	Private PKW, ÖPNV z.Bsp.: Busse, Nutzfahrzeuge der Stadt Leipzig	Zugänglichkeit für Nebennutzer

## VS Leipzig Plagwitz (5)



Abbildung 23 Potentieller H2-Betankungsstandort VS Leipzig Plagwitz

Tabelle 12 Bewertung potentieller H2-Betankungsort VS Leipzig Plagwitz

Kriterium	Vorteil	Nachteil
Räumliche Verfügbarkeit	Begrenzte Freiflächen westlich und östlich des VS, teils industrielle Nutzung	Interessenskonflikte mit bestehender Nutzung im östlichen Bereich (urbane Garten- und Spielplatzprojekte als auch anderweitige Freiraumnutzung), räumliche Begrenztheit, Akzeptanzfrage der Betankungsanlage
Gleisanbindung + Rangieraufwand	Direkte Anbindung an Strecke Miltitzer Allee-Döbeln	Gleisanbindung nicht vorhanden,
Umgebungsbebauung	Industriebebauung, direkte Nähe zum VS Leipzig Plagwitz	Innerstädtische Lage mit angrenzender Wohnbebauung und Freizeitnutzung der östlichen Freiflächen
Verkehrsanbindung zur H2-Bereitstellung (LKW)	Anbindung über A9, B181 und B87,	teils enge Zufahrtstraßen durch Wohn- und Industriegebiet in nach Abzweig von B87
Potentiale H2-Pipelineanbindung	--	schwierig realisierbar durch urbanen Raum und zentraler Lage im Stadtgebiet Leipziger, Entfernung von bestehender H2-Pipeline
Einbindung Nebennutzer	Private PKW, ÖPNV z.Bsp.: Busse, Nutzfahrzeuge der Stadt Leipzig	Zugänglichkeit für Nebennutzer

## VS Leipzig Miltitzer Allee (6)



Abbildung 24 Potentieller H2-Betankungsstandort VS Leipzig Miltitzer Allee

Tabelle 13 Bewertung potentieller H2-Betankungsort VS Leipzig Miltitzer Allee

Kriterium	Vorteil	Nachteil
Räumliche Verfügbarkeit	--	Sehr begrenzte Freiflächen im Wohngebiet und in der Nähe des Kulkwitzer Sees (Waldflächen), Akzeptanzfrage der Betankungsanlage
Gleisanbindung + Rangieraufwand	Direkte Anbindung an Strecke Miltitzer Allee-Döbeln Stumpfgleis von Westen	Gleisanbindung nicht vorhanden,
Umgebungsbebauung	Endhaltepunkt VS Miltitzer Allee	direkt angrenzender Wohnbebauung und Naturflächen, Nutzung der westlichen Freifläche nur durch Kreuzung der „Straße am See“ möglich
Verkehrsanbindung zur H2-Bereitstellung (LKW)	Anbindung über A9, B181 und B87,	teils enge Zufahrtstraßen durch Wohn- und Industriegebiet in nach Abzweig von B87
Potentiale H2-Pipelineanbindung	Erschließung von Westen möglich	Entfernung von bestehender H2-Pipeline
Einbindung Nebennutzer	Private PKW ÖPNV z.Bsp.: Busse Nutzfahrzeuge der Stadt Leipzig	--

## Bahnbetriebsgelände am Güterbahnhof Leipzig Wahren (7)

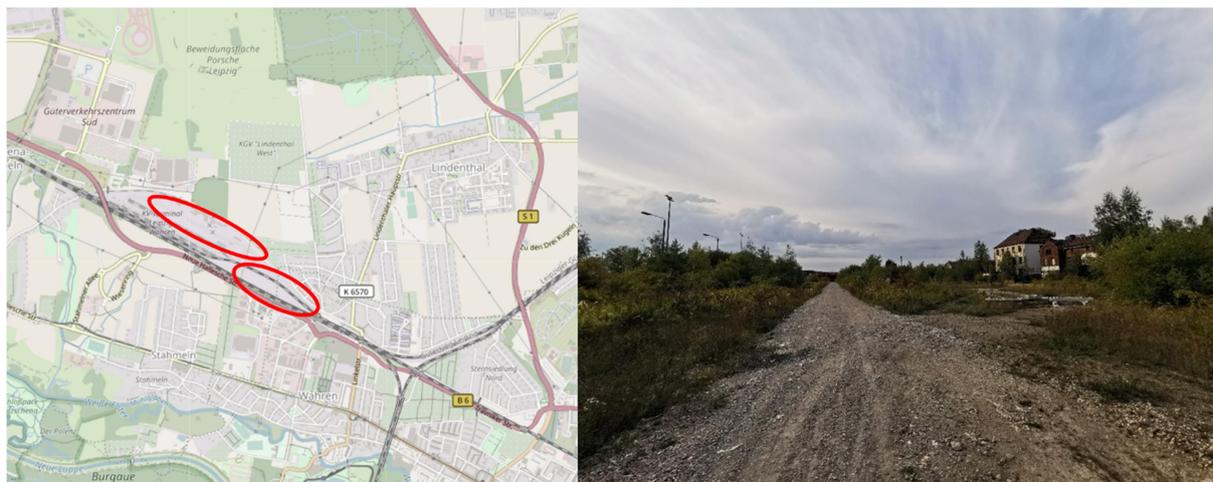


Abbildung 25 Potentieller H2-Betankungsstandort Bahnbetriebsgelände Leipzig Wahren

Tabelle 14 Bewertung potentieller H2-Betankungsort Bahnbetriebsgelände Leipzig Wahren

Kriterium	Vorteil	Nachteil
Räumliche Verfügbarkeit	Sehr große Freiflächen vorhanden	--
Gleisanbindung + Rangieraufwand	Gleisanbindung für Güterbahnhof nutzbar, Altgleise teilweise noch anliegend bzw. notwendige Abzweige leicht realisierbar	Keine direkte Anbindung an Strecke Miltitzer Allee-Döbeln, Betankungsfahrten müssten eingetaktet werden
Umgebungsbebauung	Wenig direkte Umgebungsbebauung, Güterbahnhof und Güterverkehrszentrum Süd als auch Flughafen Leipzig in angrenzender Umgebung	Teilweise stark verfallene Altinfrastruktur des Bahnbetriebswerkes Leipzig Wahren
Verkehrsanbindung zur H2-Bereitstellung (LKW)	Anbindung über A9, B6 und Zufahrt über Güterverkehrszentrum Süd,	--
Potentiale H2-Pipelineanbindung	Perspektivische Erschließung des in Flughafennähe anliegenden H2-Pipeline-Abschnittes	--
Einbindung Nebennutzer	ÖPNV z.Bsp.: Busse, Nutzfahrzeuge der Stadt Leipzig (z.Bsp.: Stadtreinigung Max-Liebermann-Straße), H2-LKW-Tankstelle für Güterverkehrszentrum, Nutzfahrzeuge des Güterverkehrszentrums, Nutzfahrzeuge des Flughafen Leipzig.	Für private PKW aufgrund der Lage nur bedingt attraktiv

Keiner der betrachteten Standorte ist nach allen zugrunde gelegten Bewertungskriterien uneingeschränkt für die Errichtung einer H2-Betankungsanlage geeignet. Trotz der einzukalkulierenden Zusatzstrecken für die Betankungsfahrten erscheint mit Blick auf die

Faktoren wie verfügbare Fläche, Umgebungsbebauung, Gleis- und Straßenanbindung und Einbezug potentieller Nebennutzer der Standort am Güterbahnhof in Wahren am geeignetsten. Die Optionen für Erweiterungen der Betankungsanlage als auch die potentielle Erschließung der in der Nähe anliegende H2-Pipeline erhöhen weiterhin die Vorteile dieses Standortes.

Für den optionalen parallelen Betrieb der Strecke nach Thüringen ergeben sich für den Standort Wahren die gleichen Vor- und Nachteile. Bei Errichtung einer H2-Betankungsanlage alleinig für die Verbindung Leipzig Hbf tief-Gera Hbf sollten potentielle Standorte in Zeit genauer bewertet werden, da dort die H2-Pipeline als potentielle H2-Quelle anliegt. Eine Nutzung von Abzweigen der Pipeline an Streckenschnittpunkten im südlichen Großraum von Leipzig wie z. Bsp. Leipzig Böhlen könnte eine weitere Möglichkeit darstellen, um die Nebennutzung der Betankungsanlage für den Großraum Leipzig zu fördern.

### **1.6.6 Einsatzszenario HEMU für die betrachteten Strecken**

Ausgehend von den vorangegangenen Analysen ergibt sich für den Betrieb der Strecke Leipzig Miltitzer Allee - Leipzig Hbf. - Grimma ob.Bf. - Döbeln Hbf folgendes zusammengefasste Einsatzszenario:

Die Deckung des Wasserstoffbedarfs von täglich ca. 3 t erfolgt 2025 durch kommerziell verfügbaren, derzeit grauen Wasserstoff aus der Industrieregion Leuna. Perspektivisch ist eine kommerzielle Bereitstellung grünen Wasserstoffs durch Partizipation der Industrie an den verschiedenen Reallaboren der Hypos-Region angedacht. Für den Wasserstofftransport zur täglichen Versorgung der Betankungsanlage wird für 2025 die Variante mit LKW-Trailern als zielführend angesehen. Mögliche Entwicklungen und Perspektiven einer Pipelineanbindung sind in Abhängigkeit des Standortes der Betankungsanlage, der allgemeinen Entwicklungen der Hypos-Region als auch der gesteigerten Abnahmemenge bei großflächiger Einbindung von Nebennutzern langfristig zu kalkulieren. Für den Betankungsstandort wird das Bahnbetriebsgelände Leipzig Wahren angesetzt. Als Fläche sind je nach Konzept 2,5 -4,0 tm<sup>2</sup> als Mindestbedarf anzunehmen. Es wird empfohlen die Gesamtverantwortung der Betankungsanlage inklusive Auslegung, Errichtung und Betreuung inklusive Bereitstellung des Wasserstoffs an einen externen, fachlich versierten Anbieter auszulagern. Damit können technische und organisatorische Probleme in der H2-Versorgungskette bis zur Zapfsäule minimiert werden.

Mit dem Anbieter der HEMU-Triebwagen ist im Beschaffungsprozess die technologische und wirtschaftliche Sinnhaftigkeit der Nutzung von Elektranten zur Versorgung des Bordstromnetzes während der Nachtabstellung abzuklären. Derzeit sehen die HEMU-Triebwagenkonzepte eine Versorgung komplett über die Systembatterie, mit Ladung dieser über die Brennstoffzelle vor.

Bei Einsatz von HEMU-Triebwagen für die Streckenerweiterung nach VS Rochlitz ergeben sich keine weiteren infrastrukturellen Besonderheiten bzw. grundlegenden Änderung des vorgeschlagenen Einsatzszenarios. Die Tankkapazitäten der Triebwagen sind entsprechend ausgelegt. Der erhöhte Tagesumsatz an Wasserstoff an der Betankungsanlage sollte entsprechend einkalkuliert werden.

Für die Strecke Leipzig Hbf tief - Gera Hbf ergibt sich ein adäquates Einsatzszenario. Der entsprechende Mehrbedarf an Wasserstoff (ca. 700 kg/d) bei paralleler Umsetzung beider Streckenvorhaben mit HEMU-Triebwagen ist bei der Auslegung der Tankanlage zu berücksichtigen. Eine Neubewertung des Tankstellenstandortes bei alleiniger H<sub>2</sub>-Betreibung dieser Strecke wird angeraten.

## 1.7 Infrastrukturelle Anforderungen Wartung und Instandsetzung HEMU / BEMU

Bezüglich der Wartung und Instandhaltung sind in Abhängigkeit der Triebzug-Technologien spezifische Anforderungen, sowohl innerhalb der Technologien als auch an das Zugpersonal zu stellen.

Für Bestandteile wie Wagenkasten, Drehgestell, Kupplungen und weitere zu Dieseltriebzügen unveränderten Komponenten und Nebenaggregate sind die Anforderungen an die Wartungs- und Instandsetzungsinfrastruktur unverändert.

Im Gegenzug zu konventionellen schienenbasierten Dieselantriebstechnologien sind für HEMU und BEMU insbesondere das Fahrzeugpersonal zu schulen und auf Spezifika der Antriebskomponenten anzulernen. Ferner sind neben den Weiterbildungen des Bestandspersonals weitere Fachkräfte insbesondere für Hochvolttechnik auszubilden und Investitionen in Hochvoltwartungswerkzeug und -infrastruktur zu tätigen. Im Bereich Wasserstoff sind insbesondere sicherheitstechnische Aspekte (Ex-Schutz u. ä.) zu berücksichtigen. Auch der konforme Betrieb von Brennstoffzellen in Abhängigkeit der Brennstoffzellentechnologien sind zu diskutieren.

Analog zu den H2-Bahntankstellen liegen aufgrund der begrenzten Anzahl vergleichbarer Pilotprojekte mit alternativen Antrieben nur wenig Erfahrungen und Informationen hinsichtlich der Wartungs- und Instandsetzungsszenarien und notwendigen Infrastrukturen vor. Wie bei der Betankungsproblematik wird eine, auf das jeweilige Anwenderszenario angepasste Einzelfallkonzipierung notwendig. Hierzu sind in der Konzipierungsphase frühzeitig Abstimmungen und Detaillierung mit Systemanbieter der Triebzüge als auch den entsprechenden Zulassungsinstanzen zu forcieren.

Bedingt durch die modularen Einzelteile für die jeweilige alternative Antriebstechnik (Antriebseinheit, BZ, Tanksystem, Systembatterie usw.) mit teils Dachmontage sind entsprechende Erweiterungen und Lösungen für die Zugänglichkeit wie Dacharbeitsstände, Kransysteme mit entsprechender Nutzlast als auch entsprechende Abstellflächen für die zu wartenden Aggregate in den entsprechenden Serviceeinheiten vorzusehen.

Hinsichtlich der unmittelbaren Wartung und Instandhaltung der Triebzüge sind zunächst die vom Hersteller der Einzelkomponenten (Brennstoffzelle, H2-Tank, Elektromotor etc.) zur Verfügung gestellten Wartungsinformationen zu nutzen. Für die gesamten HEMU- und BEMU-Triebzüge sind zudem die Betriebserfahrungen mit in Wartung und Instandhaltung einzubinden, da diese bisher noch nicht in ausreichendem Maße (Langzeit-Untersuchungen) bewertbar sind. Hierzu gehört u.a. der Einfluss der Wasserstoffreinheit auf den Verschleiß und Wirkungsgrad der Brennstoffzelle.

Sowohl für die Wartung der HEMU- als auch die BEMU-Triebzüge sind aktuell Änderungen der Regularien und Vorschriften hinsichtlich restriktiver Gaswarnanlagen und Brandschutzerweiterungen in Wartungshallen in Kooperation von Systemanbietern (z.Bsp.: Alstom) und Zulassungsstellen in Ausarbeitung. Ein Inkrafttreten dieser überarbeiteten Regularien mit deutlicher Verschiebung der Verantwortlichkeit des Risikomanagements für Wartungs- und Instandsetzung Richtung Systemanbieter wird für das Jahr 2021 erwartet.

## 1.8 Infrastrukturelle Anforderungen Vergleich BEMU / HEMU

Aktuell bietet die Schienenfahrzeugindustrie zwei Antriebstechnologien für einen emissionsfreien Verkehr an: BZ-Züge und Elektrozüge mit zusätzlichen Batterieeinheiten um den oberleitungsfreien Betrieb zu ermöglichen. Der wesentliche Unterschied der beiden Technologien besteht in der Reichweite. So verfügen Batterie-Triebzüge laut Herstellerangaben über eine Reichweite (je nach Fahrprofil und Batteriekapazität) von bis zu 50 km, während BZ-Züge eine Strecke von ca. 1.000 km bis zur nächsten Betankung zurücklegen können. Somit sind Batterie-Triebzüge vor allem für Strecken mit einem hohen Elektrifizierungsgrad geeignet, bei der nur noch ein relativ kurzes Stück ohne Oberleitung überbrückt werden muss. Hinsichtlich des Vergleichs der infrastrukturellen Anforderungen für beiden Systeme für das konkrete Streckenvorhaben Leipzig Miltitzer Allee – Görlitz Hbf ergibt sich in Auswertung der Studie folgende Übersicht:

**Tabelle 15 Vergleich Infrastrukturanforderungen BEMU /HEMU; Strecke VS Miltitzer Allee – Döbeln Hbf**

Kriterium	BEMU	HEMU
Nutzung bestehender Infrastruktur	Relativ hoher Anteil der Strecke elektrifiziert; Oberleitung am Bahnhof Döbeln	keine signifikante Wasserstoffversorgungsinfrastruktur für die Strecke vorhanden; Partizipation der Infrastruktur der Hypos-Region möglich
Notwendige Infrastrukturertüchtigung	Ertüchtigung der Elektranten am VS Grimma ob.Bf je nach Ladekonzept erforderlich	Errichtung der kompletten Versorgungskette notwendig
Investkosten für Infrastrukturertüchtigung	Relativ gering	Sehr hoch bzw. Umlegung auf Bezugskosten des Wasserstoffs durch Anbieter
Aufwand für Planung, Genehmigung und Umsetzung	Relativ gering durch geringen Aufwand	Sehr hoch, aufwendig und langwierig
Notwendige Maßnahmen für Wartung und Instandhaltungsinfrastruktur	Maßnahmen für Hallenneubau oder Ertüchtigung werden für beide Systeme als vergleichbar angesehen	
Expertenmeinungen (Alstom, Linde AG)	Einsatz empfohlen	Einsatz nur bedingt empfohlen

Die inhaltliche Gegenüberstellung wird im Folgenden noch einmal mit einer einfachen Vergleichsmatrix unterlegt.

**Tabelle 16 Vergleichsmatrix Infrastruktur BEMU /HEMU; Strecke VS Miltitzer Allee – Döbeln Hbf**

Kriterium	BEMU	HEMU	Bewertungsmaßstab
Nutzung bestehender Infrastruktur	4	1	1 – keine Infrastruktur vorhanden 5 – komplette Infrastruktur vorhanden
Notwendige Infrastrukturertüchtigung	4	1	1 – vollständig Ertüchtigung notwendig 5 – keine Ertüchtigung notwendig
Investkosten für Infrastrukturertüchtigung	4	1	1 – sehr hohe Kosten 5 – keine Kosten
Aufwand für Planung, Genehmigung und Umsetzung	4	1	1 – sehr hoher Aufwand und Zeitbedarf 5 – keine Aufwand
Notwendige Maßnahmen für Wartung und Instandhaltungsinfrastruktur	1	1	1 – Hallenneubau bzw. Neukonzipierung 5 – keine Maßnahmen erforderlich
Expertenmeinungen (Alstom, Linde AG)	5	1	1 – Einsatz nicht empfohlen 5 – Einsatz uneingeschränkt empfohlen
<b>Summe</b>	<b>22</b>	<b>6</b>	max. 30

Beide Übersichten verdeutlichen den Grundvorteil der batteriebetriebenen Variante als Alternative zu den bisherigen dieselbetriebenen Triebzügen aus Sicht der Infrastruktur für die prioritär ausgewertete Strecke.

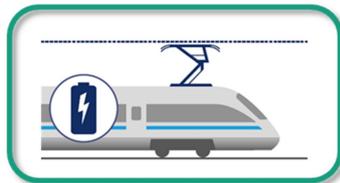
Für die Streckenerweiterung nach VS Rochlitz in BEMU-Ausführung sind zwar deutliche Infrastrukturmaßnahmen für die erforderliche Nachladeertüchtigung notwendig. Diese fallen aber immer noch wesentlich geringer aus als die komplette Errichtung der Versorgungskette für einen Betrieb der Strecken mit Wasserstoff.

Der Vergleich der Infrastrukturanforderungen für die Strecke Leipzig Hbf tief – Gera Hbf fällt weniger deutlich aus und ist maßgeblich von der zeitlichen Umsetzung der geplanten Elektrifizierung in Gera abhängig. Neben der notwendigen Elektrifizierung in Gera wurde durch die Bedarfsanalyse des AP2 aufgezeigt, dass eine zusätzliche Ertüchtigung der Nachladeinfrastruktur in Zeitz sinnvoll ist. Sollte sich die maßgebliche Elektrifizierung in Gera und Zeitz zeitlich stark verzögern, ergeben sich Vorteile für einen Einsatz mit Wasserstoff betriebener Triebzügen. In die Bewertung müssen daher die derzeit noch nicht definierte Bedarfszeit des alternativen Antriebes für diese Strecke als auch die Realisierungszeiten für die Bereitstellung der Infrastrukturen für das jeweilige Antriebssystem einfließen. Die Bewertung sollte nach zeitlicher Konkretisierung beider Vorhaben erneut durchgeführt werden.

## 1.9 Fazit/Handlungsempfehlung

Für die Strecke **Leipzig Miltitzer Allee - VS Grimma ob.Bf - Döbeln Hbf** mit optionaler Streckenerweiterung bis VS Rochlitz wird in Auswertung der vorliegenden Sachlage eine klare Handlungsempfehlung zugunsten des Betriebes **mit batterieelektrischen Zügen** ausgestellt. Der infrastrukturelle Vergleich zeigt einen deutlichen Vorteil gegenüber der wasserstoffbetriebenen Alternative. Das Einsatzszenario und die erforderlichen Maßnahmen sind in Kapitel 1.6.3 zusammengefasst.

Im Folgenden sind die wichtigsten Punkte für diese Strecke prägnant aufgeführt:

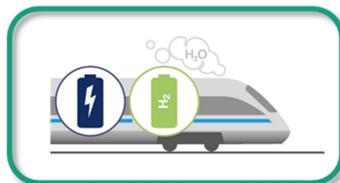


### ▪ Einsatz BEMU

mit überschaubaren Anpassungen der Bestandinfrastruktur,  
z.Bsp. Ertüchtigung der Elektranten in Grimma,  
Notwendige überschlagene Wende in Döbeln Hbf,  
Bei Streckenerweiterung ist VS Rochlitz bzw. VS Grimma ist mit Oberleitungsinsel  
oder adäquater Nachladeinfrastruktur zu ertüchtigen,

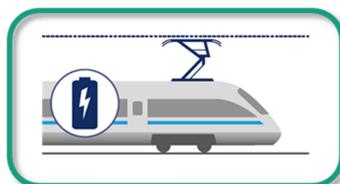
Abbildung 26 Handlungsempfehlung Leipzig Miltitzer Allee - VS Grimma ob.Bf - Döbeln Hbf

Wie in Kapitel 1.9 aufgeführt ist die Handlungsempfehlung für die Strecke **Leipzig Hbf tief - Gera Hbf** hinsichtlich eines zu favorisierenden Systems aus infrastruktureller Sicht stark von der zeitlichen Realisierung der geplanten Streckenelektrifizierung Weimar-Gera-Gößnitz abhängig. Ein weiterer wesentlicher Faktor für die Bewertung ist die zeitliche Konkretisierung und Forderung für den Einsatz eines alternativen Antriebes auf dieser Strecke. Für beide Szenarien sind Infrastrukturmaßnahmen zwingend erforderlich. Die Szenarien und Empfehlungen für die Strecke sind in Kapitel 1.6.3 (BEMU) als auch Kapitel 1.7.6 (HEMU) zusammengefasst.



### ▪ Einsatz HEMU

ohne bzw. stark verzögerter Elektrifizierung Gera Hbf  
Errichtung Tankstelleninfrastruktur,  
Anlieferung per Trailer CGH2 bzw. in *Zeitz* mit Entnahme H2 aus Pipeline,  
Empfehlung: Übergabe Gesamtverantwortung H2-Versorgungskette bis Zapfsäule  
z.Bsp.: Linde AG (analog Projekt Bremervörde)



### ▪ Einsatz BEMU

mit Elektrifizierung Gera Hbf  
Errichtung Oberleitungsinsel oder Elektranten 400 V/63 A in *Zeitz* für partielle  
Nachladung und Versorgung bei Nachtabstellung

Abbildung 27 Handlungsempfehlung Leipzig Hbf tief - Gera Hbf

## 1.10 Literaturverzeichnis

- [1] Statista: Stromverbrauch in Deutschland bis 2019 | Statista, 2021.  
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/164149/umfrage/netto-stromverbrauch-in-deutschland-seit-1999/>, abgerufen am: 03.01.2021
- [2] 2019: Erneuerbare decken 17,1 Prozent des Bruttoendenergieverbrauchs – SOLARIFY, 2021. <https://www.solarify.eu/2020/03/18/069-2019-erneuerbare-decken-171-prozent-des-bruttoendenergieverbrauchs/>, abgerufen am: 03.01.2021
- [3] Umweltbundesamt: Erneuerbare Energien in Deutschland. Daten zur Entwicklung im Jahr 2019 (2020)
- [4] Umweltbundesamt: Erneuerbare Energien in Zahlen, 2021.  
<https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen#strom>, abgerufen am: 03.01.2021
- [5] Statista: Neu installierte Onshore-Windenergieleistung in Deutschland bis 2019 | Statista, 2021. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/218904/umfrage/neu-installierte-windenergieleistung-in-deutschland/>, abgerufen am: 03.01.2021
- [6] Statista: Neu installierte Leistung von Photovoltaikanlagen in Deutschland bis 2019 | Statista, 2021. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/29264/umfrage/neu-installierte-nennleistung-von-solarenergie-in-deutschland-seit-2004/>, abgerufen am: 03.01.2021
- [7] Umweltbundesamt: Indikator: Erneuerbare Energien, 2021.  
<https://www.umweltbundesamt.de/indikator-erneuerbare-energien#welche-bedeutung-hat-der-indikator>, abgerufen am: 03.01.2021
- [8] Wirtschaft und Energie, Bundesministerium für: Deutschland auf Kurs bei EU-Erneuerbaren-Ziel, 2021.  
<https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2020/20200401-deutschland-auf-kurs-bei-eu-erneuerbaren-ziel.html>, abgerufen am: 03.01.2021
- [9] Pieprzyk, B.: Das „BEE-Szenario 2030“. Bruttostromverbrauch, Erneuerbare Stromerzeugung und jährliche Installation Erneuerbarer Energien bis 2030 (2019)
- [10] Schlegel, H.-J.: Erneuerbare Energien in Sachsen 2019. VEE Jahrestagung 2019, <https://www.vee-sachsen.de/sites/default/files/data/pdf/VEE%20Jahrestagung%202019%20-%20Hans-J%C3%BCrgen%20Schlegel%20%20Erneuerbare%20Energien%20in%20Sachsen%202019.pdf>, abgerufen am: 03.01.2021
- [11] Schroeter, S.: Sachsens Ökostrom-Produktion wächst auf niedrigem Niveau, 2021.  
<https://www.stefanschroeter.com/1458-sachsens-oekostrom-produktion-waechst-auf-niedrigem-niveau.html>, abgerufen am: 03.01.2021
- [12] Wernitz, C., Müller, B. u. Gaudchau, E.: Potenziale Erneuerbarer Energien in Ostdeutschland, 2017
- [13] Internationales Wirtschaftsforum Regenerative Energien: Sachsen - Windbranche, Münster 2020.

- <https://www.windbranche.de/windenergie-ausbau/bundeslaender/sachsen?jahr=2020>,  
abgerufen am: 04.01.2021
- [14] Statista: Nennleistung der Windenergieanlagen in Sachsen bis 2019 | Statista, 2021.  
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/28240/umfrage/installierte-leistung-durch-windenergie-in-sachsen-seit-1991/>, abgerufen am: 04.01.2021
- [15] Internationales Wirtschaftsforum Regenerative Energien: Sachsen - Solarbranche, Münster 2020.  
<https://www.solarbranche.de/ausbau/bundeslaender-photovoltaik/sachsen?jahr=2020>, abgerufen am: 04.01.2021
- [16] Allnoch, N.: Sachsen: Schere zwischen Klimaziel und Windausbau wird immer breiter. IWR.de GmbH (2020)
- [17] Schaefer, F.: Grünbuch zu den erneuerbaren Energien in Sachsen, 2020.  
[https://buergerbeteiligung.sachsen.de/portal/download/datei/1061964\\_0/Gr%C3%BCnbuch+zu+den+erneuerbaren+Energien+in+Sachsen.pdf](https://buergerbeteiligung.sachsen.de/portal/download/datei/1061964_0/Gr%C3%BCnbuch+zu+den+erneuerbaren+Energien+in+Sachsen.pdf), abgerufen am: 03.01.2021
- [18] Aktuelle Zahlen bestätigen, Sachsen hat bei den erneuerbaren Energien noch Potenzial!, 2021.  
[https://www.kreis-goerlitz.de/city\\_info/webaccessibility/index.cfm?item\\_id=853047&waid=393&modul\\_id=33&record\\_id=78128](https://www.kreis-goerlitz.de/city_info/webaccessibility/index.cfm?item_id=853047&waid=393&modul_id=33&record_id=78128), abgerufen am: 03.01.2021
- [19] arrhenius Institut für Energie- und Klimapolitik: Eigenversorgung des Schienenverkehrs der Deutschen Bahn mit Strom aus Erneuerbaren Energien | Machbarkeitsstudie
- [20] Broschuere-Daten-und-Fakten-data
- [21] Deutscher Bundestag: Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Matthias Gastel, Lisa Badum, Dr. Julia Verlinden, weiterer Abgeordneter und der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN – Drucksache 19/8817 – Erneuerbare Energien im Bahnstrommix (2019)
- [22] Technische Spezifikationen für die Interoperabilität, 2021.  
[https://www.eba.bund.de/DE/RechtRegelwerk/TSI/tsi\\_node.html](https://www.eba.bund.de/DE/RechtRegelwerk/TSI/tsi_node.html),  
abgerufen am: 07.01.2021
- [23] Allianz pro Schiene: Das Schienennetz der Eisenbahnen in Deutschland, 2021.  
<https://www.allianz-pro-schiene.de/themen/infrastruktur/schienennetz/>, abgerufen am: 06.01.2021
- [24] dpa: Bahn-Elektrifizierung kommt nur langsam voran. heise Online (2020)
- [25] Klebsch, W., Heininger, P. u. Martin, J.: Alternativen zu Dieseltriebzügen im SPNV. Einschätzung der systemischen Potenziale, 2019.  
<https://www.vde.com/resource/blob/1889656/5f42b90859412b8590d0c7539604b0bc/pressemitteilung---studie-alternative-antriebssysteme-im-spnv--1--data.pdf>
- [26] Mikanowski, L., Grant, S. u. (Keine Angabe): Elektrifizierungsgrad der Schieneninfrastruktur, Berlin 2018.

- <https://www.bundestag.de/resource/blob/549342/.../wd-5-027-18-pdf-data.pdf>,  
abgerufen am: 06.01.2021
- [27] DB Netz AG: GeoViewer | DB Netze Fahrweg. Infrastrukturregister - Interaktivekarte, 2021. <https://geovdbn.deutschebahn.com/isr>, abgerufen am: 06.01.2021
- [28] Norman Gerhardt, Dr. Boris Valov, Tobias Trost, Dr. Thomas Degner: Bahnstrom Regenerativ - Analyse und Konzepte zur Erhöhung des A [https://www.ikem.de/wp-content/uploads/2016/08/Endbericht\\_Bahnstrom\\_Regenerativ\\_Fraunhofer\\_DB\\_Netze-IKEM\\_2011\\_10.pdf](https://www.ikem.de/wp-content/uploads/2016/08/Endbericht_Bahnstrom_Regenerativ_Fraunhofer_DB_Netze-IKEM_2011_10.pdf), abgerufen am: 06.01.2021
- [29] Redaktion, D. B.: Wo kommt eigentlich der Bahnstrom her?, 2017. <https://inside.bahn.de/bahnstromnetz/>, abgerufen am: 05.01.2021
- [30] 123map GmbH & Co.KG: Stromnetzkarte auf Basis von OSM-Daten, 2019. <https://www.flosm.de/html/Stromnetz.html?lat=51.3600000&lon=10.4800000&r=740000.00&st=1&sw=powerline380k,powerline400k,powerline420k,powerline750k,powerline765k,powerlinedchigh>, abgerufen am: 06.01.2021
- [31] Zimmermann, U., Mach, S. von, Erbrecht, B. u. Boev, P.: Emissionsfreier SPNV mit Batterietriebzügen. Machbarkeitsstudie im Auftrag des „Zweckverband für den Nahverkehrsraum Leipzig (ZVNL)“, 2019, abgerufen am: 06.01.2021
- [32] Wussow, S.: Windenergie und Hochspannung Notwendige Abstände zu Freileitungen. [https://f2e.de/files/public/f2e\\_freileitungen\\_2014.pdf](https://f2e.de/files/public/f2e_freileitungen_2014.pdf), abgerufen am: 06.01.2021
- [33] Ministerium für Umwelt Landwirtschaft und Energie: Grünbuch zur Entwicklung einer Wasserstoffstrategie
- [34] Kreidelmeyer, S., Dambeck, H., Wünsch, M. u. Dr.Kirchner, A.: Kosten und Transformationspfade für strombasierte Energieträger. Endbericht zum Projekt „Transformationspfade und regulatorischer Rahmen für synthetische Brennstoffe“
- [35] Scholz, R., Gläser, N. u. Paluch, D.: Auf dem Weg zur Emissionsfreiheit im Zugverkehr. Wasserstoff-Infrastruktur für die Schiene, 2016. [https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2020/09/broschuere\\_wasserstoff-infrastruktur-fuer-die-schiene\\_online-version.pdf](https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2020/09/broschuere_wasserstoff-infrastruktur-fuer-die-schiene_online-version.pdf), abgerufen am: 07.01.2021
- [36] Ernst & Young GmbH Wirtschaftsprüfungsgesellschaft, Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, SIGNON Deutschland GmbH, TÜV SÜD Rail GmbH, Becker Büttner Held u. IFOK GmbH: Wasserstoff-Infrastruktur für die Schiene
- [37] Dr. Ulrich Bünger, Daniel Hielscher, Jan Zerhusen, Michael Ritter u. Dr. Jürgen Heyn: H2-SCHIENENVERKEHR MITTELDEUTSCHLAND, 2018. [http://www.hypos-eastgermany.de/fileadmin/content/downloads/pdf/2018-03-01\\_H2-Schiennenverkehr\\_in\\_Mitteldeutschland-oeffentliche\\_Version.pdf](http://www.hypos-eastgermany.de/fileadmin/content/downloads/pdf/2018-03-01_H2-Schiennenverkehr_in_Mitteldeutschland-oeffentliche_Version.pdf), abgerufen am: 07.01.2021
- [38] DVGW: WO AUS WIND UND SONNE GRÜNES GAS WIRD EINE ÜBERSICHT DER POWER-TO-GAS-PROJEKTE IN DEUTSCHLAND (2019)

- [39] Statista: Anzahl der Power-to-Gas-Projekte in Deutschland nach Bundesland 2019 | Statista, 2021. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1088633/umfrage/anzahl-der-power-to-gas-projekte-in-deutschland-nach-bundesland/>, abgerufen am: 07.01.2021
- [40] Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen IMWS: Reallabor erforscht gesamte Wertschöpfungskette für Grünen Wasserstoff - Fraunhofer IMWS, 2021. <https://www.imws.fraunhofer.de/de/presse/pressemitteilungen/greenhydrochem-reallabor-wasserstoff.html>, abgerufen am: 07.01.2021
- [41] Ludwig Bölkow Systemtechnik, 2018, Machbarkeitsstudie H2-Schienenverkehr in Mitteldeutschland, Abschlussbericht
- [42] NOW GmbH, 2016, Ergebnisbericht: Studie Wasserstoff-Infrastruktur für die Schiene
- [43] VDE, 2019, Alternativen zu Dieseltreibzügen im Schienenpersonennahverkehr – Einschätzung der systemischen Potenziale
- [44] IFB Institut für Bahntechnik GmbH, Projektdokumentation VinnoMir *Systemkosten\_LMIA-DDE\_LL-UG\_ifb\_20200929.pdf, Stand 29.09.2020*
- [45] *Hypos e.v., Potentiale der Hypos-Region, 2020*, <https://www.hypos-eastgermany.de/das-innovationsprojekt/potentiale-der-hypos-region/>, abgerufen am 11.09.2020
- [46] DBI – Gastechnologisches Institut gGmbH Freiberg, 2016, Abschlussbericht Wirtschaftliche Bewertung der HYPOS-Wertschöpfungsketten zur Wasserstoffherzeugung im Kontext der verschiedenen Nutzungspfade – H2\_Index; T Teil 1: Potentialanalyse zum Absatz von Wasserstoff in der Modellregion HYPOS; Stand: 15.07.2016

## 2. Arbeitspaket Nr. 02 – Energieinfrastrukturtechnologien

### 2.1 Zusammenfassung

Zur Vorbereitung des Einsatzes innovativer SPNV-Fahrzeuge im Mitteldeutschen Revier wurde ein möglicher Einsatz von alternativen Antriebstechnologien auf den Strecken Leipzig – Grimma – Döbeln und Leipzig – Zeitz – Gera untersucht. Der Fokus im AP 2 „Energieinfrastruktursysteme“ lag dabei in der Untersuchung der betrieblich-technischen Machbarkeit und der Beurteilung der Wirtschaftlichkeit eines Fahrzeugbetriebes mit wasserstoffbetriebenen (HEMU) bzw. batterieelektrischen Fahrzeugen (BEMU) auf zwei verschiedenen Strecken.

Im Rahmen der Untersuchungen konnte die betrieblich-technische Machbarkeit des Einsatzes von wasserstoffbetriebenen sowie batterieelektrischen Fahrzeugen auf beiden Strecken nachgewiesen werden.

Mit Hilfe einer SWOT-Analyse wurden beide alternative Antriebssysteme getrennt voneinander untersucht. Im Ergebnis dieser SWOT-Analyse kann in Hinblick auf die Energieinfrastruktur keines der beiden untersuchten Systeme unmittelbar favorisiert werden. Dennoch ermöglicht die SWOT-Analyse eine deutliche Veranschaulichung der systemimmanenten Vor- und Nachteile sowie der signifikanten Chancen und Risiken der untersuchten alternativen Antriebstechnologien.

Im Rahmen eines Systemkostenvergleichs für einen festen Betrachtungszeitraum wurden die erforderlichen Fahrzeugkosten, Infrastrukturmaßnahmen sowie die anfallenden Energiekosten für beide Strecken separat berechnet. Aufgrund der höheren Fahrzeuginvestitionen des HEMU-Systems und der hohen Wasserstoffpreise und damit einhergehenden hohen Energiekosten liegen die Systemkosten beim Einsatz von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen 46% (Leipzig – Grimma – Döbeln) bzw. 38% (Leipzig – Zeitz – Gera) über den vergleichbaren Kosten beim Einsatz batterieelektrischer Fahrzeuge.

Mit Blick auf die Ausschreibung von SPNV-Leistungen durch den ZVNL ab 2025 wird auf Basis der Ergebnisse des AP2 der Einsatz batterieelektrischer Fahrzeuge (BEMU) für die untersuchten Strecken empfohlen.

Die aus ökonomischer und ökologischer Sicht generell zu favorisierende Alternative einer vollständigen Elektrifizierung insbesondere auf der Strecke Leipzig - Grimma - Döbeln, scheidet aufgrund der begrenzten Zeitspanne bis 2025 aus den umsetzbaren Lösungen aus.

## 2.2 Darstellung alternativer Antriebstechnologien und Energieversorgungsketten

### 2.2.1 Fahrzeuge

Im Rahmen dieses Projektes werden zwei verschiedene Alternative Antriebstechnologien mit einander verglichen:

- Batterie- / Oberleitungs-Hybrid (BEMU),
- Wasserstoff-Hybrid (HEMU).

#### BEMU

BEMU-Fahrzeuge verfügen über zwei Möglichkeiten zur Traktionsenergieversorgung:

- aus der bordinternen Hochvolt-Traktionsbatterie,
- über den Pantographen aus einer Oberleitung.

Auf den Streckenabschnitten mit Oberleitung wird die Fahrzeuggesteuerung via Pantographen bezogen. Zusätzlich kann während dieser Zeit die Batterie geladen werden. In oberleitungsfreien Abschnitten wird die Fahrzeuggesteuerung aus der Traktionsbatterie bezogen. Das Blockschaltbild eines BEMU ist in Abbildung 28 abgebildet.

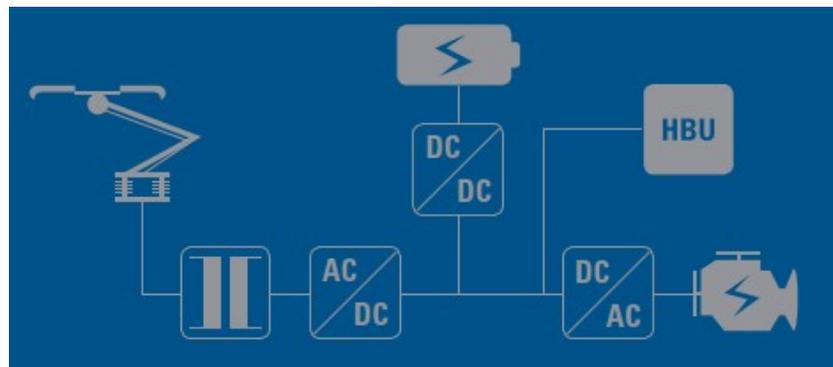


Abbildung 28: Blockschaltbild BEMU [1]

## HEMU

HEMU-Fahrzeuge haben gegenüber BEMU-Fahrzeugen den Primärenergieträger an Bord. Der Wasserstoff ist entweder flüssig oder gasförmig in einem Druckbehälter gespeichert. Der Wasserstoff wird in einer Brennstoffzelle in elektrische Energie umgewandelt und steht dann der Traktion und den Hilfsbetrieben zur Verfügung.

Zur Pufferung kurzzeitiger Leistungsspitzen sowie zur Aufnahme rekuperierter Energie steht eine Hochvolt-Traktionsbatterie zur Verfügung. Für gewöhnlich ist diese Batterie deutlich kleiner dimensioniert als bei BEMU-Fahrzeugen. Das Blockschaltbild eines HEMU-Fahrzeugs ist in Abbildung 29 abgebildet.

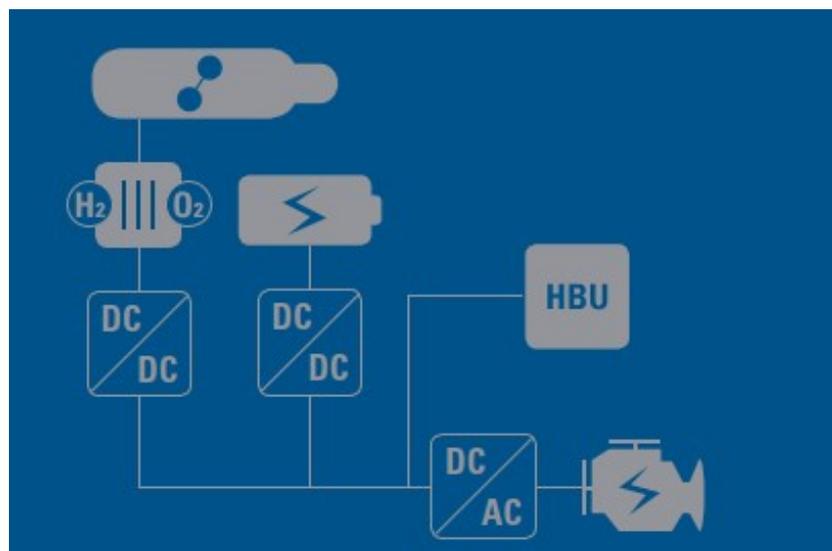


Abbildung 29: Blockschaltbild HEMU [1]

### 2.2.2 Marktübersicht

Im Folgenden ist eine lose Übersicht aktuell am Markt verfügbarer BEMU- und HEMU-Fahrzeuge gegeben.

Aktuell bieten verschiedene Hersteller BEMU-Fahrzeuge an. Diese weisen jedoch unterschiedliche Entwicklungsstände auf. Grundsätzlich kann jedoch von einer sehr weit entwickelten Technologie ausgegangen werden.

HEMU-Fahrzeuge werden aktuell nur von einem Hersteller angeboten. Weitere Hersteller planen HEMU-Fahrzeuge bzw. sind damit bereits in der Testphase.

Tabelle 17: Ausgewählte Antriebskonzepte für die Untersuchung

Antriebskonzept	Beispielprodukt	Entwicklungsstand
<b>BEMU</b>	BT Talent 3 Siemens Mireo Alstom Coradia Continental Stadler Akku-FLIRT	Prototyp im Testbetrieb Serienvorbereitung
<b>HEMU</b>	Alstom iLint Siemens Mireo H	Prototyp im Testbetrieb fortgeschrittene Entwicklung

### 2.2.3 Energieversorgungsketten

Für die beiden alternativen Antriebstechnologien BEMU und HEMU werden grundsätzlich andere Energieversorgungsketten benötigt als dies bisher bei konventionellen Elektrotriebzügen oder Dieseltriebzügen der Fall war. Diese werden im Folgenden dargestellt.

In Abbildung 30 sind für beide alternative Antriebstechnologien die im Rahmen dieser Studie betrachteten Energieversorgungsketten abgebildet. Zusätzlich ist zur Orientierung die Energieversorgungskette für Dieseltriebzüge dargestellt. Dies wird im weiteren Verlauf der Untersuchungen nicht weiter betrachtet.

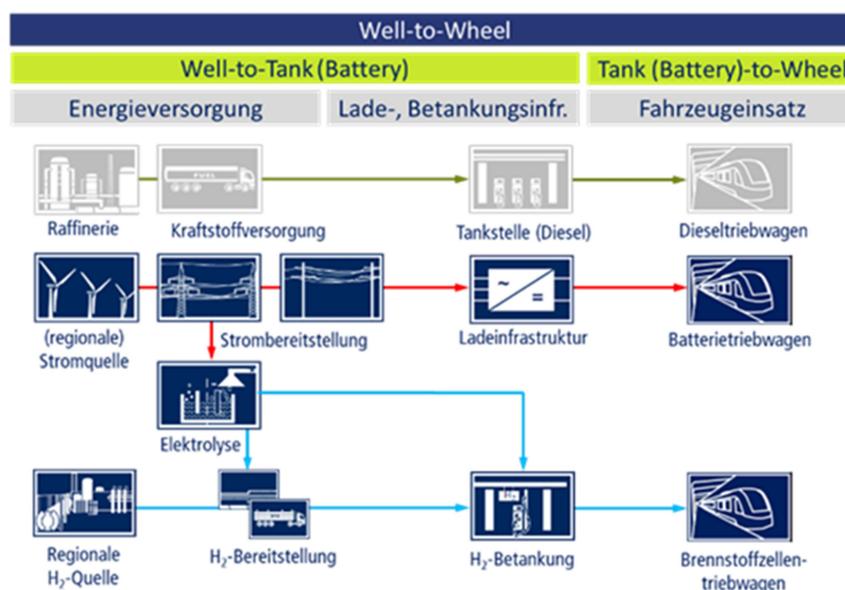


Abbildung 30: Energieversorgungsketten [2]

#### Energiezuführung BEMU

Die Elektroenergie wird aus (vorzugsweise regionalen und regenerativen) Stromquellen gewonnen und muss anschließend zum jeweiligen Verwendungsort übertragen werden. Dafür werden bereits vorhandene Hochspannungsübertragungen genutzt, sodass an dieser Stelle kein zusätzlicher Infrastrukturbedarf entsteht.

Die Zuführung der Energie zu den Fahrzeugen wird über zwei verschiedene Wege realisiert:

- Zuführung während der Fahrt unter Nutzung von Oberleitungsabschnitten,
- Zuführung im Stand an Haltestellen oder im Depot / Abstellanlage.

Bei Zuführung während der Fahrt bezieht das Fahrzeug die notwendige Traktions- und Hilfsbetriebeleistung aus der Fahrleitung. Zusätzlich wird während dieser Zeit die Traktionsbatterie aufgeladen.

Bei einer Zuführung im Stand müssen nur die Hilfsbetriebe des Fahrzeugs versorgt werden. Die restliche verfügbare Leistung steht zur Batterieladung zur Verfügung. Im Stand ist der Strom am Stromabnehmer auf 80 A begrenzt, was einer Leistung von ca. 1200 kW (bei  $U_N = 15$  kV) entspricht.

### Energiezuführung HEMU

Aktuell existieren zwei wesentliche Quellen zur Bereitstellung von Wasserstoff:

- Elektrolyse (vorzugsweise aus regionalen und regenerativen Stromquellen),
- Bereitstellung aus regionalen Quellen (beispielsweise Nebenprodukte der chemischen Industrie).

Die Schnittstelle der Energieversorgung zum Fahrzeug ist analog zu Dieselfahrzeugen über eine Tankstelle realisiert. Diese sollte vorzugsweise an einem zentral gelegenen und für viele Fahrzeuge gut erreichbaren Ort positioniert werden. Die Untersuchungen zum Standort der Wasserstofftankstelle werden im AP 1 durchgeführt.

Für die Zuleitung des Wasserstoffs zur Tankstelle können keine bisher vorhandenen Prozesse oder Infrastrukturen genutzt werden, sodass hierfür verschiedene Konzepte zu überprüfen und zu bewerten sind. Grundsätzlich bestehen folgende technische Möglichkeiten zur Versorgung der Tankstelle [4]:

- Onsite Elektrolyse aus erneuerbaren Energiequellen,
- Onsite Elektrolyse aus dem aktuellen deutschen Strommix,
- Zentrale Reformierung oder Elektrolyse, Zuleitung über Pipeline (gasförmig),
- Zentrale Reformierung oder Elektrolyse, Transport mittels LkW (gasförmig),
- Zentrale Reformierung oder Elektrolyse, Transport mittels LkW (flüssig).

Detaillierte Untersuchungen zur technischen und wirtschaftlichen Machbarkeit werden im AP 1 durchgeführt.

## 2.3 Ermittlung der technischen Machbarkeit

In diesem Kapitel werden die beiden Strecken

- Leipzig Miltitzer Allee – Grimma – Döbeln und
- Leipzig Hbf. – Zeitz – Gera

hinsichtlich der betrieblich-technischen Machbarkeit beim Einsatz alternativer Antriebstechnologien bewertet.

Es werden die Technologien Batterie-/Oberleitungshybrid (BEMU) sowie Wasserstoff (HEMU) betrachtet.

### 2.3.1 Zugfahrtsimulation mit OpenTrack

#### Modellierung der Strecken und Fahrpläne

Für die Simulationen wurden folgende Randbedingungen berücksichtigt:

- Minimaler Takt:
  - Leipzig – Grimma: 30 min in Doppeltraktion, Grimma Döbeln 60 min in Einfachtraktion,
  - Leipzig – Gera: 60 min in Doppeltraktion,
- Stationshalte, Streckengeschwindigkeiten, Höhendaten und Kurvenradien wurden gemäß der den Auftraggeber ZVNL zur Verfügung gestellten Daten zugrunde gelegt,
- Fahrprofile mit Spitzfahrten, d.h. keine energiesparende Optimierung des Fahrprofils.

Die Strecke Leipzig – Grimma – Döbeln mit eine Streckenlänge von 86,9 km weist einen bestehenden Elektrifizierungsgrad von ca. 32% auf. Die Strecke Leipzig – Gera mit einer Streckenlänge von 73,8 km hat mit ca. 16% einen deutlich geringeren Elektrifizierungsgrad.

#### Modellierung der Referenzfahrzeuge

Für die beiden untersuchten Strecken wurde der Einsatz folgender Fahrzeuge untersucht:

- Batterieelektrisch (BEMU): dreiteiliger Triebzug Alstom Coradia Continental, Batteriekapazität 750 kWh
- Wasserstoffbetrieben (HEMU): zweiteiliger Triebzug Alstom iLINT, Wasserstofftank 2 x 130 kg; Batteriekapazität 110 kWh.

Die Fahrzeugmodellierung wurde auf Basis von Erfahrungswerten sowie recherchierten Daten vorgenommen und vom Auftraggeber ZVNL bestätigt.

## BEMU

Für das BEMU-Referenzfahrzeug wurden die Daten gemäß Tabelle 18 verwendet.

**Tabelle 18: Fahrzeugdaten BEMU**

Masse	137 t
Adhäsionsmasse	68.5 t
Drehgestelle	4
angetriebene Drehgestelle	2
Traktionsleistung je Drehgestell	500 kW
Traktionsleistung Doppeltraktion	2 x 1000 kW
Höchstgeschwindigkeit	160 km/h
Länge	56.9 m
Breite	2.92 m
Höhe	4.28 m
Passagier-Kapazität	314
Wirkungsgrad Fahren	0,85
Wirkungsgrad Bremsen	0,85
mittlerer Wirkungsgrad Batterie	0,92
Hilfsbetriebe	60 kW

Die Zugkraft-Geschwindigkeits-Charakteristik wurde aus den vorliegenden Daten abgeleitet und ist in Abbildung 31 dargestellt.

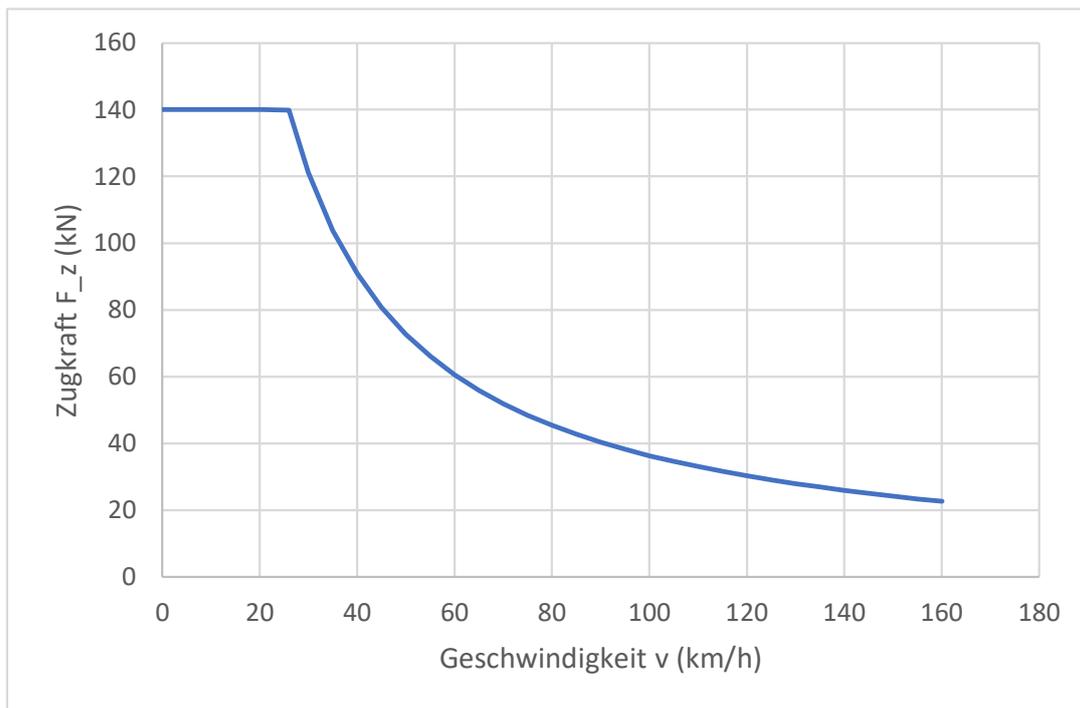


Abbildung 31: Zugkraft-Geschwindigkeits-Kennlinie BEMU

## HEMU

Für das HEMU-Referenzfahrzeug wurden die Daten gemäß Tabelle 19 verwendet.

Tabelle 19: Fahrzeugdaten HEMU

Masse	119 t
Adhäsionsmasse	59.5 t
Drehgestelle	4
angetriebene Drehgestelle	2
Traktionsleistung je Drehgestell	270 kW
Traktionsleistung Doppeltraktion	2 x 540 kW
Höchstgeschwindigkeit	140 km/h
Länge	54.27 m
Breite	2.75 m
Höhe	4.34 m
Passagier-Kapazität	300
Wirkungsgrad Fahren	0,85
Wirkungsgrad Bremsen	0,85
Wirkungsgrad Brennstoffzelle (inkl. Batterie)	0,475
Hilfsbetriebe	60 kW

Die Zugkraft-Geschwindigkeits-Charakteristik wurde aus den vorliegenden Daten abgeleitet und ist in Abbildung 32 dargestellt.

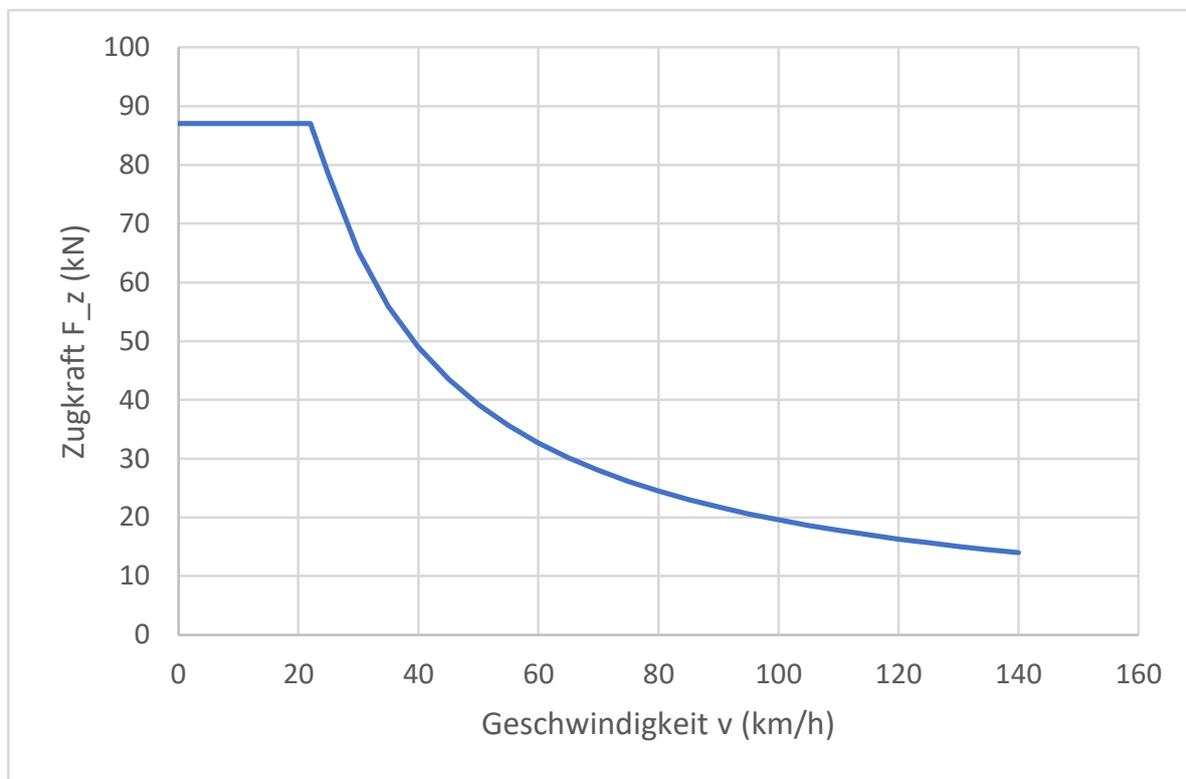


Abbildung 32: Zugkraft-Geschwindigkeits-Kennlinie HEMU

### Fahrprofile

Auf Basis der modellierten Strecken und Referenzfahrzeuge wurden die Fahrprofile für beide Strecken erstellt. In grün ist jeweils die Fahrzeit unter bestehender Oberleitungsanlage gekennzeichnet. In Abbildung 33 ist das Fahrprofil über der Zeit für die Strecke Leipzig Miltitzer Allee – Grimma – Döbeln dargestellt. Vor allem im Zentrum von Leipzig (zeitlicher Beginn des Fahrprofils bis ca. 4:45 Uhr) sind die kurzen Haltestellenabstände und die damit direkt verbunden häufigen Anfahr- und Bremsvorgänge deutlich erkennbar.

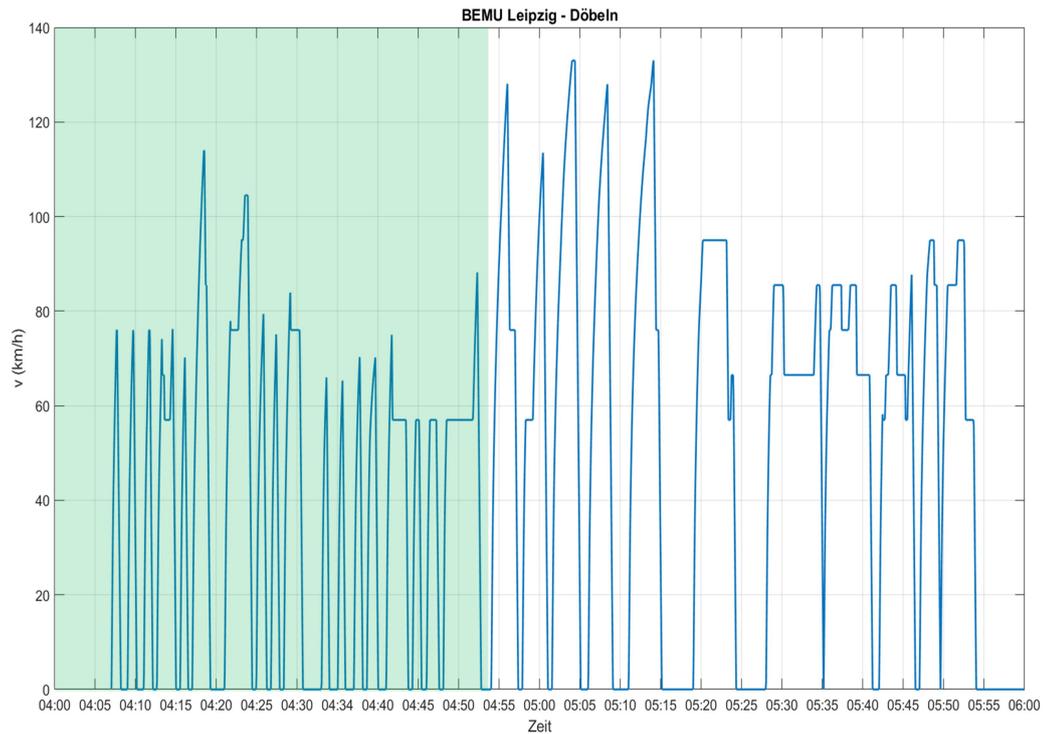


Abbildung 33: Fahrprofil v(t) Leipzig - Grimma - Döbeln

In Abbildung 34 ist das Fahrprofil über der Zeit für die Strecke Leipzig Hbf. – Gera dargestellt. Im Vergleich zur Strecke Leipzig – Döbeln sind deutlich weniger Haltestellen und damit deutlich weniger Anfahr- und Bremsvorgänge erkennbar.

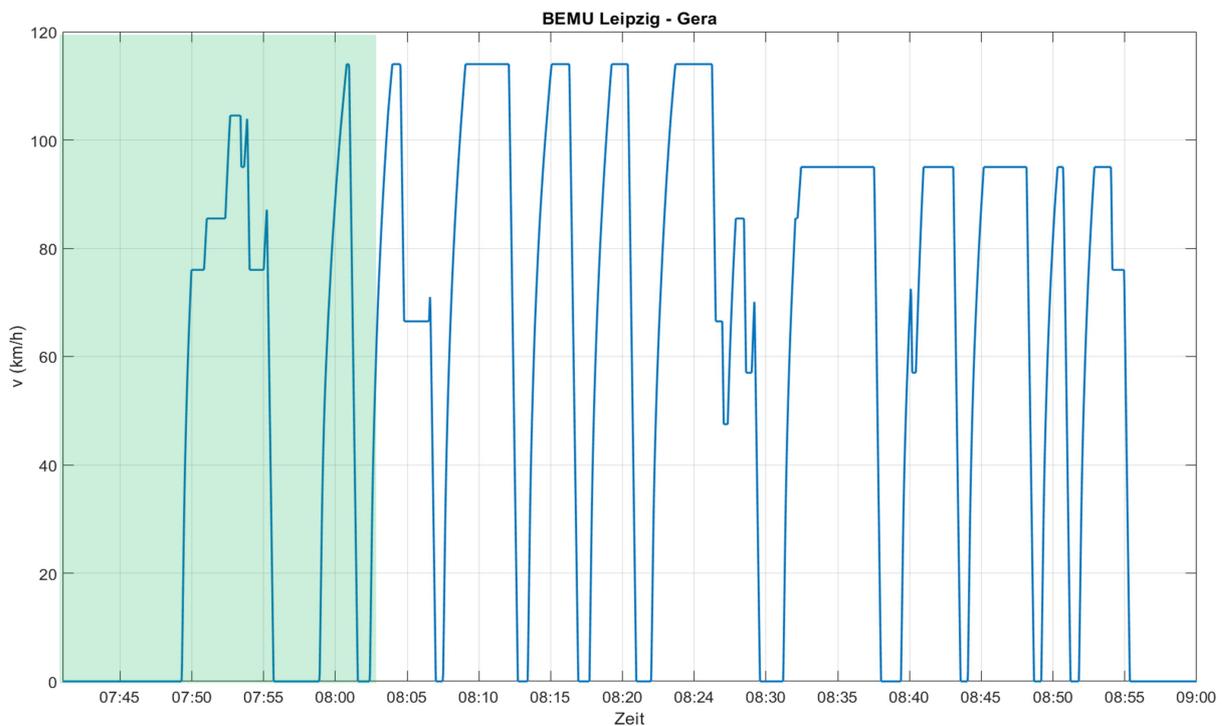


Abbildung 34: Fahrprofil v(t) Leipzig – Gera

### 2.3.2 Simulation des Leistungs- und Energiebedarfs

Auf Basis der Fahrprofile und unter Anwendung der charakteristischen Antriebsdaten der Referenzfahrzeuge wurde für beide Fahrzeugsysteme auf beiden Strecken eine Leistungs- und Energiebedarfsbestimmung durchgeführt.

In Abbildung 35 ist der elektrische Leistungsverlauf über der Zeit für den BEMU auf der Strecke Leipzig – Döbeln für einen vollständigen Betriebstag dargestellt. Die Verläufe für den HEMU als auch die Leistungsverläufe für die Strecke Leipzig – Gera sind im Anhang abgebildet.

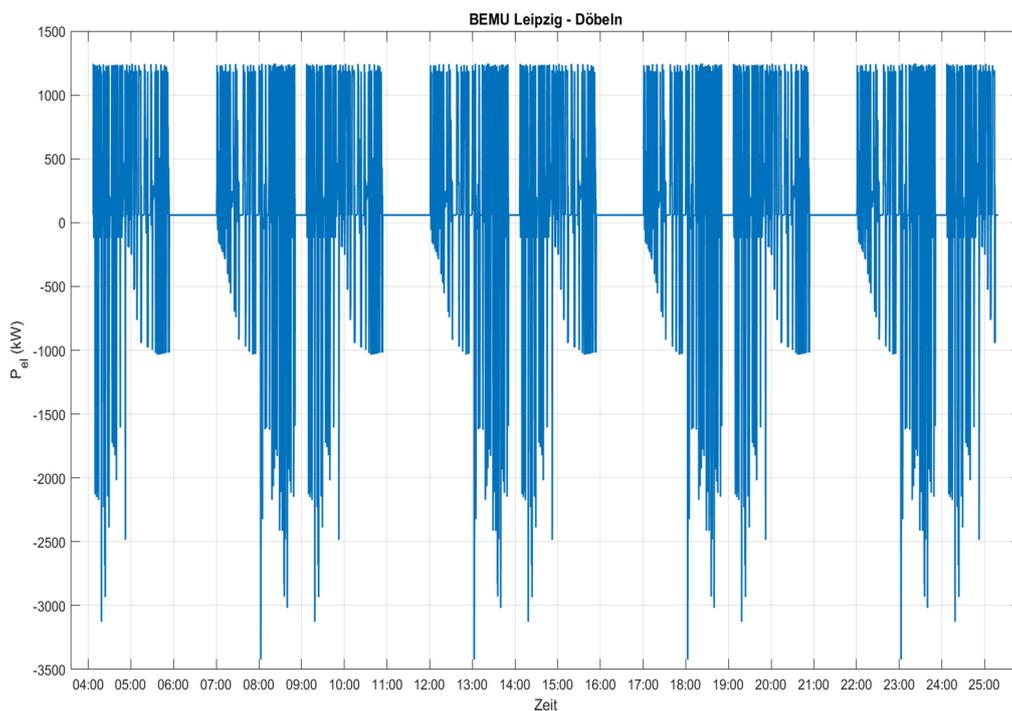


Abbildung 35: elektrischer Leistungsverlauf  $P(t)$  BEMU, Leipzig - Döbeln

### 2.3.3 Simulation des Batterieladestatus und Ableitung der Nachladeinfrastruktur

#### Strecke Leipzig – Grimma – Döbeln

In einer Batteriesimulation wurde für die BEMU-Fahrzeuge der jeweilige Ladezustand der Batterie (SOC – State of Charge) berechnet. Dabei wurden folgende Nachladeoptionen berücksichtigt:

- Nachladung während der Fahrt unter der vorhandenen Oberleitung zwischen Leipzig Miltitzer Allee und Borsdorf,
- Nachladung im Stand in Döbeln unter der dort vorhandenen Oberleitung während der Wendezeit (66 min).

Der resultierende SOC-Verlauf ist in Abbildung 36 dargestellt. Daraus kann folgendes abgeleitet werden:

- Es wird lediglich ein SOC-Bereich von 55% genutzt, wodurch ausreichend Reserve für eventuelle Verspätungen vorhanden ist.
- Ein alterungsbedingter Verlust der Leistungsfähigkeit kann bis zu 20% des SOC-Bereichs beanspruchen. Dies führt zu keinen betrieblichen Einschränkungen.
- Die Ladephasen im Raum Leipzig sowie in Döbeln sind ausreichend, um die Batterie jeweils auf ihren maximal zulässigen SOC (hier 90%) aufzuladen.

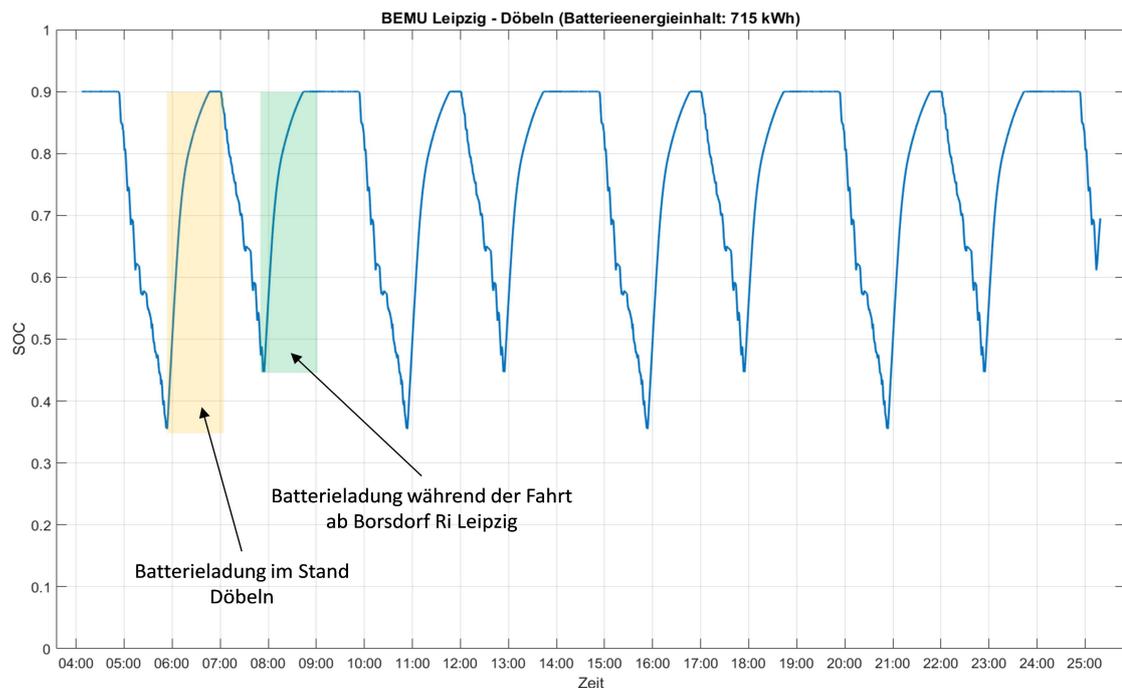


Abbildung 36: SOC-Verlauf BEMU, Strecke Leipzig - Döbeln

### Strecke Leipzig – Gera

In einer Batteriesimulation wurde für die BEMU-Fahrzeuge der jeweilige Ladezustand der Batterie (SOC) berechnet. Dabei wurden folgende Nachladeoptionen berücksichtigt:

- Nachladung während der Fahrt unter der vorhandenen Oberleitung zwischen Leipzig Hbf. und Leipzig Plagwitz,
- Nachladung im Stand in Gera während der Wendezeit.

Der resultierende SOC-Verlauf ist in Abbildung 37 dargestellt. Daraus kann folgendes abgeleitet werden:

- Eine Batterie von ca. 750 kWh ist knapp dimensioniert, um die Fahraufgabe zu absolvieren.
- Es wird ein SOC-Bereich von 72% genutzt. Damit steht nur eine geringe Reserve für eventuelle Verspätungen zur Verfügung.
- Für die Nachladung in Gera muss eine Oberleitungsinsel errichtet werden. Die Ladephase im Raum Leipzig ist ausreichend, um die Batterie auf ihren maximal zulässigen SOC (hier 90%) aufzuladen.

Zur Erhöhung der SOC-Reserve können folgende Maßnahmen ergriffen werden:

- Erhöhung des Batterieenergieinhalts auf min. 800 kWh,
- Erhöhung der Nachladezeit in Gera durch eine überschlagene Wende,
- Errichtung einer zusätzlichen Oberleitungsinsel in Zeitz inkl. Erhöhung der dortigen Aufenthaltszeit.

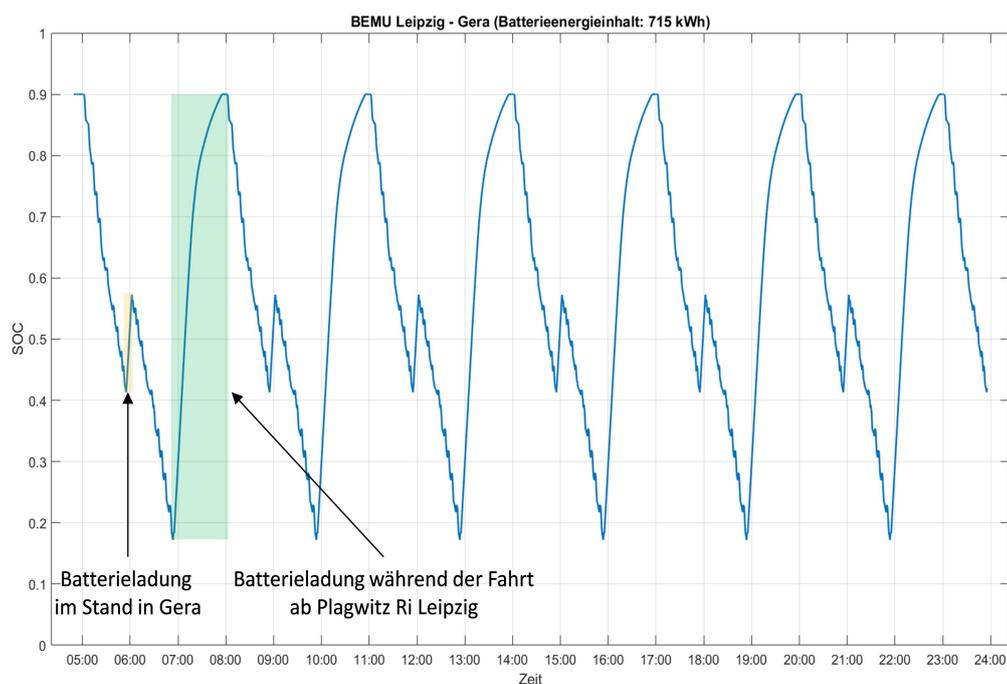


Abbildung 37: SOC-Verlauf BEMU, Strecke Leipzig - Gera

### 2.3.4 Ergebnisse der technischen Machbarkeitsanalyse

Die für die untersuchten Strecken vorgegebenen Fahrplanzeiten (unter Berücksichtigung von Spitzfahrten) werden anhand der Simulationsergebnisse mit beiden alternativen Antriebssystemen erreicht.

Das batteriebetriebene Fahrzeug kann im regulären, störungsfreien Betrieb die oberleitungsfreie Strecke zwischen Borsdorf und Döbeln ohne Zwischenladung der Batterie absolvieren. Bei Ankunft in der Station Döbeln, in der eine Batterieladung über die dort bestehende Oberleitung möglich ist, hat das Batteriesystem noch einen SOC von ca. 0,35 und wird während des Aufenthaltes wieder vollständig geladen. Bei Verspätungen o.ä. Betriebsstörungen und ab einer gewissen Batteriealterung kann bei Ankunft in der Station Döbeln ein SOC von < 0,35 auftreten, was mit Blick auf die dabei entstehenden zusätzlichen Batteriealterungsprozesse zu vermeiden ist.

Für die Konditionierung von Fahrzeugen über Nacht ist in Grimma eine stationäre Nachademöglichkeit vorgesehen. Diese besteht aus zwei Elektranen mit je ca. 150 kW Ladeleistung.

Unter Berücksichtigung einer Streckenbedienung nach Rochlitz sind zusätzliche Maßnahmen vorzusehen. Zur Deckung des zusätzlichen Energiebedarfs ergeben sich drei verschiedene Szenarien:

1. Oberleitungsinsel in Rochlitz

Für die Fahrt von Borsdorf nach Rochlitz (ca. 50 km) ist ein Energiebedarf von ca. 330 kWh erforderlich. Für eine vollständige Ladung bei einer Ladeleistung von 1,2 MW ist eine Ladezeit von mindestens 20 min vorzusehen.

2. Oberleitungsinsel in Grimma

Unter Annahme eines Fahrzeugumlaufes Borsdorf - Grimma - Rochlitz - Grimma ergibt sich ein Energiebedarf von ca. 500 kWh. Folgende Nachladeoptionen bestehen in Grimma:

- a) vollständige Ladung der Batterie in Grimma: min. 30 min Ladezeit
- b) erforderliche Ladung zum sicheren Erreichen von Borsdorf: min. 10 min Ladezeit

Die Entscheidung zur Ladestrategie hängt vom geplanten Fahrzeugumlauf ab.

3. Erhöhung des Batterieenergiegehalts

Für die Fahrt von Borsdorf nach Rochlitz und zurück (ca. 100 km) ist ein Energiebedarf von ca. 660 kWh erforderlich. Unter Berücksichtigung einer Mindestreserve von 20% sowie einer Batteriealterung von 20% ergibt sich ein erforderlicher Mindestenergieinhalt von 1030 kWh. Fahrzeuge mit Batterieenergieinhalten von > 1000 kWh sind am Markt bisher nicht bekannt.

Aufgrund des deutlich geringeren Elektrifizierungsgrades der Strecke Leipzig - Gera im Vergleich zur Strecke Leipzig - Döbeln sind in Gera und für einen auch unter Betriebsstörungen stabilen Betrieb zusätzlich in Zeitz je eine Oberleitungsinsel zur Batterienachladung erforderlich.

## 2.4 SWOT-Analyse

### 2.4.1 Vorgehensweise und Methodik

SWOT-Analysen werden vorwiegend zur strategischen Planung sowie zur Positionsbestimmung von Unternehmen und Organisationen eingesetzt. Ziel ist die Bindung von Stammkunden und die Erarbeitung von Möglichkeiten zur Erschließung neuer Märkte bzw. neuer Produkte. Das Werkzeug liefert jedoch auch bei der Untersuchung technologischer Varianten ein objektives Vorgehen. [3]

Basis der SWOT-Analyse ist ein Vergleich verschiedener strategischer Varianten und Optionen hinsichtlich interner Stärken (**S**trengths) und Schwächen (**W**eaknesses) sowie externer Chancen (**O**pportunities) und Risiken (**T**hreats). [3]

Hierbei wird methodisch in drei Schritten vorgegangen [3]:

1. Externe Faktoren ermitteln: Chancen und Risiken der jeweiligen Konzepte im Marktumfeld darstellen,
2. Interne Faktoren analysieren: Technologische Stärken und Schwächen von Referenz- und alternativen Antriebskonzepten bewerten,
3. Handlungsstrategien durch Gegenüberstellung interner und externer Faktoren (z.B. Normstrategien in TOWS-Matrix) ableiten.

Nachfolgend werden die verwendeten Aspekte zur qualitativen Beurteilung externer und interner Faktoren dargestellt.

### Umfeldanalyse

Eine vergleichende Technologiebewertung erfordert zunächst ein Herausarbeiten der bestimmenden Rahmenbedingungen. Hierbei kann als Grundgerüst das sogenannte PESTEL Schema herangezogen werden:

- Politische Faktoren (**p**olitical),
- Wirtschaftliche Faktoren (**e**conomic),
- Sozio-kulturelle Faktoren (**s**ociological),
- Technologische Faktoren (**t**echnological),
- Umweltbezogene Faktoren (**e**nvironmental),
- Rechtliche Faktoren (**l**egal).

Für die Untersuchung wurden folgende externe Faktoren berücksichtigt und im Einzelnen untersucht:

- politisch
  - Politische Stabilität,
  - Marktanreize,
- ökonomisch
  - Infrastrukturentwicklung,
  - Systemeinführung,
  - Wettbewerb,
  - Neue Geschäftsmodelle,
  - Kosten,
  - Ausgaben für F&E (staatl., privat),
- sozio-kulturell
  - Mobilitätsverhalten,
  - gesellschaftliche Akzeptanz,
  - technologisch,
  - Technologieentwicklung,
  - Systemoptimierung,
  - Technologieverfügbarkeit, -Zuverlässigkeit,
  - Technologie-Verbreitung / -einsatz,
  - Systemdienlichkeit,
- ökologisch
  - Standort (Infrastruktur, Personal),
  - Nachhaltigkeit Energieerzeugung,
  - Ressourcenverfügbarkeit, Rohstoffsicherheit,
  - Schlüsselindustrien,
  - Branchenstrukturen,
  - Emission,
- rechtlich
  - Allgemeine Gesetzgebung,
  - Standardisierung (Normung),

- Wettbewerbsrecht,
- Umweltrecht,
- betrieblich
  - Linienkupplung (Durchbindung),
  - Wartungsinfrastruktur,
  - Personal für Instandhaltung,
  - Nachladung, Tankstelle,
  - Taktung.

### Interne Analyse (Stärken und Schwächen)

Die verschiedenen technologischen Antriebskonzepte sind im Zusammenspiel der drei Bereiche Energie- und Infrastruktur, Rollmaterial und Betrieb zu betrachten. Hierbei wurden folgende Faktoren näher miteinander verglichen:

#### Energie- und Infrastruktur

- Erzeugung:
  - Nachhaltigkeit,
  - Integration EE,
  - Verfügbarkeit der Quelle,
- Transport und Wandlung:
  - Verfügbarkeit,
  - Übertragungsweg,
- Lagerung/Speicherung:
  - Sicherheit,
  - Energieverluste,
- Übergabestelle:
  - Nachladeinfrastruktur,
- Wirkkette gesamt:
  - Wartung und Instandhaltung, Effizienz (WtT, well-to-tank), Notfallversorgung, Redundanz,

## Rollmaterial

- Energie:
  - Energiebezug,
  - Energiedichte Speicher/Tank,
  - Gewichts- und Volumenbedarf,
  - Kraftstoffbeschaffung,
  - Effizienz Fahrzeug (TtW, tank-to-wheel),
  - spez. Energieverbrauch,
  - Optimierungspotential Energieverbrauch ("Betriebsstrategie"),
  - Reichweite,
  - Notfallversorgung,
  - Redundanz auf Fahrzeug,
- Antriebssystem (gesamt):
  - Verfügbarkeit (Wartung, Instandhaltung, Fehleranfälligkeit),
  - Temperaturabhängigkeit,
  - Lebensdauer der Kernkomponenten,
  - Antriebsleistung,
  - Emission,
- Gesamtfahrzeug:
  - Variantenvielfalt,
  - Marktreife,
  - Kosten (Investitionen, Betriebskosten),
  - Sicherheitsaspekte,

## Betrieb

- Zeit für Nachladung,
- betriebliche Flexibilität,
- Einsatzbeschränkungen,
- Sektorkopplung (Netz),

- Nutzung fremder Infrastrukturen bzw. zur Verfügung stellen eigener Infrastruktur, z.B. eigener Speicher, fremde H2-Netz,
- Synergien der Ladeinfrastruktur:
  - Nutzung fremder bzw. Verfügbarmachung eigener Ladepunkte,
- Wartung, Instandhaltung,
  - Fahrzeug,
  - Tankstelle / Nachladung.

### Ableitung von Handlungsstrategien

Nachdem mithilfe der internen und externen Faktoren die technologischen Antriebskonzepte qualitativ untersucht wurden, werden diese nun in einer Tabelle gegenübergestellt. Dabei entsprechen die Zeilen den internen Stärken und Schwächen und die Spalten den externen Chancen und Risiken.

An dieser Stelle ist eine Erweiterung der qualitativen Betrachtung um eine Nutzwertanalyse möglich. Dabei wird für jeden externen Faktor untersucht, wie dieser sich auf interne Faktoren auswirkt und diese quantitativ bewertet.

Anhand der entstehenden TOWS-Matrix (Vgl. Abbildung 38 und Abbildung 39) lassen sich vier sogenannte Normstrategien ableiten, welche sich in den Schnittpunkten der jeweiligen internen und externen Faktoren finden:

1. Ausbauen: Stärken nutzen, um Chancen zu ergreifen (SO),
2. Verteidigen/Absichern: Stärken nutzen, um Risiken zu minimieren (ST),
3. Aufholen gegenüber Konkurrenten: Schwächen ausgleichen, um Chancen ergreifen zu können (WO),
4. Vermeiden: Schwächen ausgleichen, um Risiken zu minimieren (WT).

Mittels dieser vier Quadranten lassen sich abschließend strategische Handlungsempfehlungen nachvollziehbar ableiten.

### 2.4.2 Umsetzung

Der Einsatz beider alternativer Antriebstechnologien wurde einer SWOT-Analyse unterzogen. Dabei wurden in der internen Analyse systemimmanente Stärken und Schwächen und in einer externen Analyse signifikante Chancen und Risiken der BEMU- und HEMU-Systeme aufgezeigt.

Die sich im Rahmen der Kombination von signifikanten Stärken und Schwächen mit wesentlichen Chancen und Risiken ergebenden Auswirkungen wurden gewichtet und bewertet, Abbildung 38, Abbildung 39.



		Chancen (Opportunities)						Risiken (Threats)											
		O1	O2	O3	O4	O5	O6	T1	T2	T3	T4	T5	T6						
<b>BEMU</b>		Fortschritt Batterie-technologie	kontinuierliche Kostenreduzierung der Technik	öffentliche Förderung	Nutzung vorhandener Energie-Infrastruktur (OLA)	hoher Anteil EE	mehrere Fahrzeuganbieter	große Ladezeiten und hohe Ladeleistungen	starke Batteriealterung	fehlende Standardisierung	Änderung pol. Rahmenbedingungen, Wegfall Förderung	fehlende Marktreife der Technologien	Ressourcenverfügbarkeit Batterien, Obsoleszenz						
<b>Stärken (Strengths)</b>		<p>S1 hohe Verfügbarkeit der Energieversorgungskette</p> <p>S2 Nutzung vorhandener Stromnetze zur Energieübertragung</p> <p>S3 weitgehend emissionsfreier Betrieb (Lärm, Schadstoffe, CO2)</p> <p>S4 hohe Energieeffizienz des Systems</p> <p>S5 bewährte Fahrzeugtechnik (Antrieb + Pantol), geringer Wartungsaufwand</p> <p>S6 sehr gute Fahrdynamik des elektrischen Antriebs</p>						<p>die größten Chancen liegen in der bereits heute hohen Verfügbarkeit und hohen Energieeffizienz</p> <p>die größten Chancen bieten die Nutzung bereits vorhandener Infrastruktur sowie der ständige technologische Fortschritt der Batterietechnologie</p>						<p>die größten Risiken des Systems liegen in den immer noch hohen Ladezeiten und Ladeleistungen sowie der bisher noch unbekanntem Batteriealterung</p> <p>diesen Risiken stehen vor allem die hohe Verfügbarkeit und Energieeffizienz gegenüber</p>					
<b>Schwächen (Weaknesses)</b>		<p>W1 Batterie als begrenzendes Element im Antrieb (Leistung, Fahrdynamik)</p> <p>W2 punktueller Ausbau Energieversorgung (OLA-Inseinh) nötig</p> <p>W3 geringe Fahrzeugreichweite</p> <p>W4 realistischer Betrieb nur mit OLA-Abschnitten</p> <p>W5 kein Beitrag zur Sektorkopplung</p>						<p>die derzeit bestehenden Limitierungen des Systems, bedingt durch die Batterie (geringe Reichweite und ggf. begrenzte Fahrdynamik), können durch Nutzung langer (bereits bestehender) OLA-Abschnitte und den technologischen Fortschritt der Batterietechnologie kompensiert werden</p>						<p>es besteht das Risiko, dass die Batteriealterung die Reichweite, die Fahrdynamik und die Nachladung auch zukünftig signifikant beeinflusst</p>					

Abbildung 40: SWOT-Analyse, Ergebnisse BEMU System

		Chancen (Opportunities)					Risiken (Threats)										
		O1	O2	O3	O4	O5	T1	T2	T3	T4	T5	T6					
<b>HEMU</b>		deutliche Effizienzsteigerung H2-Kette (WTW)	kontinuierliche Kostenreduzierung der Technik und Wasserstoff	öffentliche Förderung	Ausbau H2-Infrastruktur durch öffentliche Hand	hoher Anteil EE	fehlende H2-Infrastruktur	sehr kleiner Fahrzeugmarkt	starke Alterung BZ und Batterie	keine Kostenreduzierung bei H2-Herstellung	kein Markthochlauf	Änderung pol. Rahmenbedingungen, Wegfall Förderung					
<b>Stärken (Strengths)</b>		<p>S1 hohe Reichweite</p> <p>S2 Beitrag zur Sektorkopplung (Speicherung Wasserstoff)</p> <p>S3 weitgehend emissionsfreier Betrieb (Lärm, Schadstoffe, CO2)</p> <p>S4 kurze Betankungsdauer</p> <p>S5 hohe betriebl. Flexibilität</p>					<p>die größten Stärken des Systems liegen in der hohen betrieblichen Flexibilität bei weitgehend emissionsfreier Betrieb, darüber hinaus kann ein wesentlicher Beitrag zur Sektorkopplung (Speicherung von grünem Wasserstoff) geleistet werden</p> <p>die größten Chancen bieten eine absehbare Effizienzsteigerung in der gesamten H2-Energieversorgungskette bei hoher zu erwartender öffentlicher Förderung</p>					<p>die größten Risiken des Systems liegen in der noch unbekanntem Alterung der Batterie und der Brennstoffzelle und dem ausbleibenden Markthochlauf von Wasserstoffanwendungen sowie im Wegfall öffentlicher Förderungen</p> <p>diesen Risiken stehen vor allem die Aussicht auf einen großen Beitrag zur Sektorkopplung sowie die hohe betriebliche Flexibilität des Systems gegenüber</p>					
<b>Schwächen (Weaknesses)</b>		<p>W1 hohe Investitionskosten Fahrzeug</p> <p>W2 schlechte Energieeffizienz H2-Wandlung im Fahrzeug</p> <p>W3 keine Redundanz Tankversorgung</p> <p>W4 erhöhter Wartungsaufwand durch BZ und Traktionsbatterie</p> <p>W5 geringere Verfügbarkeit als BEMU aufgrund höherer Komponentenzahl</p>					<p>Die derzeit hohen notwendigen Investitionen für Fahrzeuge sowie der niedrige Wirkungsgrad der H2-Wandlung im Fahrzeug können durch die Aussicht auf eine deutliche Effizienzsteigerung des Gesamtsystems Wasserstoff, unterstützt durch öffentliche Förderung, kompensiert werden</p>					<p>es besteht das Risiko, dass die noch unbekanntem Alterung von Batterie und Brennstoffzelle sowie der ausbleibende Markthochlauf, ggf. bedingt durch den Wegfall öffentlicher Förderung die aktuell hohen Fahrzeuginvestitionen und den hohen Energiebedarf des Systems nicht positiv verändern</p>					

Abbildung 41: SWOT-Analyse, Ergebnisse HEMU System

Im Ergebnis der SWOT-Analyse lassen sich folgende wesentliche Schlussfolgerungen ziehen:

**BEMU**

- Die Stärken des Systems liegen in der bereits heute hohen Verfügbarkeit der Energieversorgungskette bei gleichzeitig hoher Energieeffizienz.
- Bedingt durch die Batterie bestehen derzeit Limitierungen des Systems, die zu geringen Reichweiten und ggf. zu begrenzter Fahrdynamik führen können.
- Die größten Chancen bieten die Nutzung bereits vorhandener Infrastruktur (Oberleitungsabschnitte) sowie der ständige technologische Fortschritt der Batterietechnologie.

- Die größten Risiken des Systems liegen in den noch immer hohen Ladezeiten und Ladeleistungen sowie in den bisher noch (teilweise) unbekanntem Batteriealterungsprozessen und möglichen Wegfall öffentlicher Förderungen.

### HEMU

- Die größten Stärken des Systems liegen in der hohen betrieblichen Flexibilität bei weitgehend emissionsfreiem Betrieb. Darüber hinaus kann ein wesentlicher Beitrag zur Sektorenkopplung (Speicherung von grünem Wasserstoff) geleistet werden.
- Die Schwächen des Systems sind die derzeit noch hohen Investitionen für Fahrzeuge sowie der niedrige Wirkungsgrad der Wasserstoffwandlung (Brennstoffzelle) im Fahrzeug.
- Die größten Chancen bieten eine absehbare Effizienzsteigerung in der gesamten H<sub>2</sub>-Energieversorgungskette, unterstützt durch hohe öffentliche Förderung.
- Die größten Risiken des Systems liegen in der noch unbekanntem Alterung der Brennstoffzelle und der Batterie, im ausbleibenden Markthochlauf von Wasserstoffanwendungen und im Wegfall öffentlicher Förderungen.

Auf der Strecke Leipzig – Grimma – Döbeln werden Vorteile des BEMU im Vergleich zum HEMU aufgrund des Elektrifizierungsgrades von über 30% monetär mehr verstärkt.

Generell weisen beide Antriebstechnologien im Ergebnis der SWOT-Analyse systemimmanente Vor- und Nachteile auf und haben signifikante Chancen und Risiken. Diese Ergebnisse allein lassen noch keine klare Empfehlung zum Einsatz einer bestimmten alternativen Antriebstechnologie auf den untersuchten Strecken zu.

## 2.5 Wirtschaftlichkeitsanalyse auf Basis von Systemkosten

### 2.5.1 Einleitung

Im Rahmen einer Wirtschaftlichkeitsuntersuchung wurden die Systemkosten für den Einsatz von BEMU bzw. HEMU-Systemen auf beiden Strecken ermittelt.

Die Systemkosten umfassen dabei die Investitionen für die Fahrzeuge und die zusätzlichen Infrastrukturkosten sowie die Energiekosten auf Basis der berechneten Energiebedarfswerte für Elektroenergie, für Wasserstoff bzw. Dieserverbrauchswerte, die als Vergleichsreferenz zusätzlich ermittelt wurden. Die Systemkosten wurden für einen Betrachtungszeitraum von 12 Jahren berechnet. Dabei wurden für beide Fahrzeugsysteme jeweils ein Batterietausch und beim HEMU zusätzlich ein Tausch des Brennstoffzellen-Stacks als Re-Investition angenommen. Die spezifischen Energiekosten wurden in Abstimmung mit dem Auftraggeber, dem Projektsteuerer und den anderen parallelen Arbeitspaketen des Vorhabens mit 0,12 Euro/kWh (Mittelwert), 7,00 Euro/kg H<sub>2</sub> bzw. 1,00 Euro/l Diesel angesetzt. Zur Ermittlung der Systemkosten wurde während des Betrachtungszeitraums eine Steigerungsrate von 2,5% p. a. für die spezifischen Elektroenergiekosten unterstellt, die Wasserstoffkosten wurden als konstant angenommen. Kapitalkosten wurden in der vorliegenden Wirtschaftlichkeitsuntersuchung nicht berücksichtigt.

### 2.5.2 Fahrzeugkosten

In Tabelle 20 sind die Fahrzeugkosten inklusive Re-Investitionen für die Strecke Leipzig – Grimma – Döbeln vergleichend gegenübergestellt. Die Fahrzeugkosten des HEMU-Systems liegen dabei 23 Mio. Euro (21%) über den vergleichbaren Kosten des BEMU-Systems.

Für die Strecke Leipzig – Gera ergeben sich Fahrzeugkosten in Höhe von 33,7 Mio. Euro für den Einsatz von BEMU, für den Einsatz von HEMU in Höhe von 40,9 Mio. Euro, Tabelle 21. Der Unterschied in den Fahrzeugkosten beträgt somit 7,2 Mio. Euro und liegt mit 21% qualitativ in gleicher Größenordnung wie auf der Strecke Leipzig – Grimma – Döbeln.

**Tabelle 20: Fahrzeugkosten, Strecke Leipzig - Döbeln**

Komponente	BEMU	HEMU
<b>Investitionen pro Fahrzeug</b> inkl. Batterien bzw. Brennstoffzelle	6,5 Mio. Euro	8,0 Mio. Euro
<b>Anzahl Fahrzeuge</b>	16	16
<b>Energieinhalt Batterie</b>	750 kWh	110 kWh
<b>Re-Investitionen Batterie</b>	320 Euro / kWh	320 Euro / kWh
<b>Re-Investitionen BZ Stack</b>	-	0,14 Mio. Euro / Fzg.
<b>Investitionen gesamt</b>	<b>107,8 Mio. Euro</b>	<b>130,8 Mio. Euro</b>

**Tabelle 21: Fahrzeugkosten, Strecke Leipzig - Grimma**

Komponente	BEMU	HEMU
<b>Investitionen pro Fahrzeug</b> inkl. Batterien bzw. Brennstoffzelle	6,5 Mio. Euro	8,0 Mio. Euro
<b>Anzahl Fahrzeuge</b>	5	5
<b>Energieinhalt Batterie</b>	750 kWh	110 kWh
<b>Re-Investitionen Batterie</b>	320 Euro / kWh	320 Euro / kWh
<b>Re-Investitionen BZ Stack</b>	-	0,14 Mio. Euro / Fzg.
Investitionen gesamt	<b>33,7 Mio. Euro</b>	<b>40,9 Mio. Euro</b>

### 2.5.3 Energiekosten

In Tabelle 22 sind die spezifischen Energieverbrauchswerte als Ergebnis der Simulationsrechnungen, die angesetzten spezifischen Energie- und Kraftstoffkosten sowie die Gesamtenergiekosten eines Betriebsjahres beider Fahrzeugsysteme auf der Strecke Leipzig – Grimma – Döbeln zusammengestellt. Beim Betrieb dieser Strecke mit wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen betragen die Gesamtenergiekosten 7,04 Mio. Euro pro Jahr und liegen damit im Vergleich zum BEMU (3,04 Mio. Euro) mehr als doppelt so hoch und gleichzeitig über den ermittelten Jahresgesamtenergiekosten des Dieselbetriebes (5,57 Mio. Euro) auf dieser Strecke.

Die Ursachen der großen Unterschiede in den Energiekosten zwischen BEMU und HEMU liegen maßgeblich im niedrigen Wirkungsgrad des Brennstoffzellensystems (ca. 50%) sowie in den hohen Wasserstoffkosten.

Aufgrund der geringeren Streckenleistung liegen die Energieverbrauchswerte und damit die Energiekosten zwischen Leipzig und Gera im Gesamtniveau deutlich unter den vergleichbaren Werten auf der Relation Leipzig – Grimma – Döbeln. Der Vergleich der Energie- und Kraftstoffbedarfswerte sowie der Energiekosten zwischen den untersuchten Antriebssystemen der Strecke Leipzig – Gera führt zu qualitativ ähnlichen Ergebnissen wie auf der Strecke Leipzig - Grimma – Döbeln.

Die jährlichen Gesamtenergiekosten für die Strecke Leipzig – Gera betragen beim HEMU 1,79 Mio. Euro und liegen damit im Vergleich zum BEMU (0,71 Mio. Euro) mehr als doppelt so hoch und gleichzeitig über den ermittelten Jahresgesamtenergiekosten des Dieselbetriebes (1,30 Mio. Euro) auf dieser Strecke, Tabelle 23.

**Tabelle 22: Energieverbrauch und Energiekosten, Strecke Leipzig - Döbeln**

	<b>BEMU</b>	<b>HEMU</b>	<b>Diesel</b>
<b>spezifischer Energiebedarf ab Fahrzeug</b> Einfachtraktion	6,7 kWh / km	0,28 kg / km	1,55 l / km
<b>Jahreslaufleistung Gesamtflotte</b> inkl. Werkstatt- und Leerfahrten	3.591.834 km	3.591.834 km	3.591.834 km
<b>Gesamtenergiebedarf/ Jahr</b>	25.331.878 kWh	1.005.714 kg H <sub>2</sub>	5.567.343 l Diesel
<b>Spezifische Energiekosten</b>	0,12 Euro / kWh	7,00 Euro / kg H <sub>2</sub>	1,00 Euro/l Diesel
<b>Energiekosten / Jahr</b>	<b>3,04 Mio. Euro</b>	<b>7,04 Mio. Euro</b>	<b>5,57 Mio. Euro</b>

**Tabelle 23: Energieverbrauch und Energiekosten, Strecke Leipzig - Gera**

	<b>BEMU</b>	<b>HEMU</b>	<b>Diesel</b>
<b>spezifischer Energiebedarf ab Fahrzeug</b> Einfachtraktion	5,3 kWh / km	0,243 kg / km	1,23 l / km
<b>Jahreslaufleistung Gesamtflotte</b> inkl. Werkstatt- und Leerfahrten	1.053.509 km	1.053.509 km	1.053.509 km
<b>Gesamtenergiebedarf/ Jahr</b>	5.910.738 kWh	256.028 kg H <sub>2</sub>	1.295.816 l Diesel
<b>Spezifische Energiekosten</b>	0,12 Euro / kWh	7,00 Euro / kg H <sub>2</sub>	1,00 Euro/l Diesel
<b>Energiekosten / Jahr</b>	<b>0,71 Mio. Euro</b>	<b>1,79 Mio. Euro</b>	<b>1,30 Mio. Euro</b>

Die spezifischen Energiekosten pro Zug-km der untersuchten alternativen Antriebssysteme, betragen auf der Strecke Leipzig – Döbeln für das BEMU-System 0,85 Euro / Zug-km und für das HEMU-System 1,96 Euro / Zug-km. Auf der Strecke Leipzig – Grimma betragen diese Kosten 0,67 Euro / Zug-km für das BEMU-System bzw. 1,70 Euro / Zug-km für das HEMU-System, Tabelle 24.

**Tabelle 24: spezifische Energiekosten alternativer Antriebssysteme**

	<b>BEMU</b>	<b>HEMU</b>
Strecke Leipzig - Grimma - Döbeln	0,85 Euro / Zug-km	1,96 Euro / Zug-km
Strecke Leipzig - Gera	0,67 Euro / Zug-km	1,70 Euro / Zug-km

## 2.5.4 Systemkosten

Tabelle 25 zeigt die Systemkosten über den Betrachtungszeitraum von 12 Jahren beider Fahrzeugsysteme für die Strecke Leipzig – Grimma – Döbeln.

Für den Einsatz des BEMU-Systems ist auf der Strecke Leipzig – Döbeln in Grimma eine stationäre Nachladeeinrichtung (2 Ladesäulen, je 75 TEUR) zur Fahrzeugkonditionierung über Nacht berücksichtigt.

Auf der Strecke Leipzig – Gera sind beim Einsatz des BEMU-Systems zur Batterienachladung zwei Oberleitungsinseln mit Investitionen von jeweils 1,95 Mio. Euro berücksichtigt, (Abschnitt 2.3.4).

Für die Wasserstoffversorgung sind auf beiden Strecken einmalige Investitionen von 3,0 Mio. Euro für jeweils eine Wasserstofftankstelle angesetzt worden.

Die deutlich geringeren Energiekosten auf der Strecke Leipzig – Gera (Tabelle 26) im Vergleich zur Strecke Leipzig – Döbeln (Tabelle 25) liegen hauptsächlich am geringeren Betriebsprogramm (weniger Fahrten/Tag), an der geringeren Anzahl von energieintensiven Zwischenhalten, sowie dem etwas geringeren maximalen Geschwindigkeitsniveau auf dieser Strecke.

Maßgebliche Kostenschwerpunkte der Systemkosten sind die Energie- und die Fahrzeugkosten. Die Infrastrukturinvestitionen haben an den Systemkosten der untersuchten Strecken einen nur vergleichsweise geringen Anteil.

Auf der Strecke Leipzig – Grimma – Döbeln liegen die Systemkosten des HEMU-Systems mit 218,3 Mio. Euro 46% über den vergleichbaren Kosten des BEMU-Systems (149,9 Mio. Euro) für den Betrachtungszeitraum von 12 Jahren, Tabelle 25. Auf der Strecke Leipzig – Gera liegen die Systemkosten des HEMU-Systems 38% über den vergleichbaren Kosten des BEMU-Systems für den gleichen Betrachtungszeitraum von 12 Jahren, Tabelle 26.

**Tabelle 25: Systemkosten, Strecke Leipzig – Grimma – Döbeln**

	<b>BEMU</b>	<b>HEMU</b>
<b>Energiekosten</b>	41,9 Mio. Euro	84,5 Mio. Euro
<b>Infrastrukturkosten</b>	0,2 Mio. Euro	3,0 Mio. Euro
<b>Fahrzeugkosten</b>	107,8 Mio. Euro	130,8 Mio. Euro
<b>Summe</b>	<b>149,9 Mio. Euro</b>	<b>218,3 Mio. Euro</b>
<b>Vergleich</b>	<b>100 %</b>	<b>146 %</b>

**Tabelle 26: Systemkosten, Strecke Leipzig – Gera**

	<b>BEMU</b>	<b>HEMU</b>
<b>Energiekosten</b>	9,8 Mio. Euro	21,5 Mio. Euro
<b>Infrastrukturkosten</b>	3,9 Mio. Euro	3,0 Mio. Euro
<b>Fahrzeugkosten</b>	33,7 Mio. Euro	40,9 Mio. Euro
Summe	<b>47,4 Mio. Euro</b>	<b>65,4 Mio. Euro</b>
<i>Vergleich</i>	<b>100 %</b>	<b>138 %</b>

## 2.6 Vergleich mit konventioneller Streckenelektrifizierung

Insbesondere auf der Strecke Leipzig – Döbeln mit einer vergleichsweise hohen Streckenbelastung, 30-min-Takt auf dem Abschnitt Leipzig – Grimma in Doppeltraktion, liegt eine Elektrifizierungswürdigkeit vor. Aus ökonomischer und ökologischer Sicht ist eine vollständige konventionelle Elektrifizierung der Strecke Leipzig – Döbeln zu empfehlen. Zwar stehen mit einer kompletten Oberleitungsanlage wesentlich höhere Investitionen im Vergleich zur aufwandsärmeren Infrastrukturerrichtung beim Einsatz alternativer Antriebe an. Diese relativieren sich jedoch durch die hohe Verfügbarkeit, die bekannten und damit besser kalkulierbaren Instandhaltungsaufwendungen sowie durch die hohe Lebensdauer der Energieversorgungs-komponenten bei einer klassischen Elektrifizierung.

Ein Vorhaben zur Streckenelektrifizierung in Deutschland muss zunächst immer in den Bundesverkehrswegeplan (BVWP) aufgenommen werden. Aufgrund des bis 2025 sehr kurzen Zeitraumes ist bis zur SPNV-Vergabe des MDSB Ende 2025 keine Elektrifizierung der untersuchten Strecken möglich. Daher empfiehlt sich der Einsatz alternativer Antriebstechnologien auf diesen Strecken.

Insbesondere beim Einsatz batterieelektrischer Fahrzeuge ab 2025 können bei einer späteren Elektrifizierung diese Fahrzeuge auch als konventionelle Elektrotriebzüge auf den dann elektrifizierten Strecken weiter betrieben werden. Mit den heute am Markt verfügbaren wasserstoffbetriebenen Zügen ist das in dieser Weise nicht möglich.

## 2.7 Fazit/Handlungsempfehlung

Folgende Schlüsse können aus den Ergebnissen der Untersuchung abgeleitet werden:

- Technisch und betrieblich sind beide Antriebstechnologien in der Lage, die untersuchten Strecken gemäß der gestellten Beförderungsaufgabe zu bedienen.
- Im Ergebnis der SWOT-Analyse weisen beide Antriebstechnologien systemimmanente Vor- und Nachteile auf und haben signifikante Chancen und Risiken.
- Im Betrachtungszeitraum von 12 Jahren betragen die Energiekosten des HEMU-Systems auf beiden untersuchten Strecken etwa das Doppelte der vergleichbaren Kosten des HEMU-Systems.
- Im Vergleich der Systemkosten weist das HEMU-System auf der Strecke Leipzig – Grimma – Döbeln 46% höhere Systemkosten und auf der Strecke Leipzig – Gera ca. 38% höhere Systemkosten als das BEMU auf.

**Im Ergebnis der Untersuchungen im Arbeitspaket 2 wird der Einsatz von batterieelektrischen Fahrzeugen (BEMU) empfohlen.**

## 2.8 Literaturverzeichnis

Quellenangabe für Bücher:

- [1] Pagenkopf, Johannes; Schirmer, Toni; Böhm, Mathias; Streuling, Christoph; Herwartz, Sebastian; (2020), Marktanalyse alternativer Antriebe im deutschen Schienenpersonennahverkehr,
- [2] Bünger, Ulrich; (2020), 2020-08-10\_VinnoMIR\_Szenarien\_V1.pptx
- [3] Paul, Herbert; Wollny, Volrad; (2020), Instrumente des strategischen Managements, 3. Auflage, De Gruyter Oldenbourg, Berlin/München/Boston
- [4] Bünger, Ulrich; Zerhusen, Jan; Ritter, Michael; Heyn, Jürgen; Hielscher, Daniel; (2018), Machbarkeitsstudie H<sub>2</sub>-Schienenverkehr in Mitteldeutschland

## 2.9 Anhang

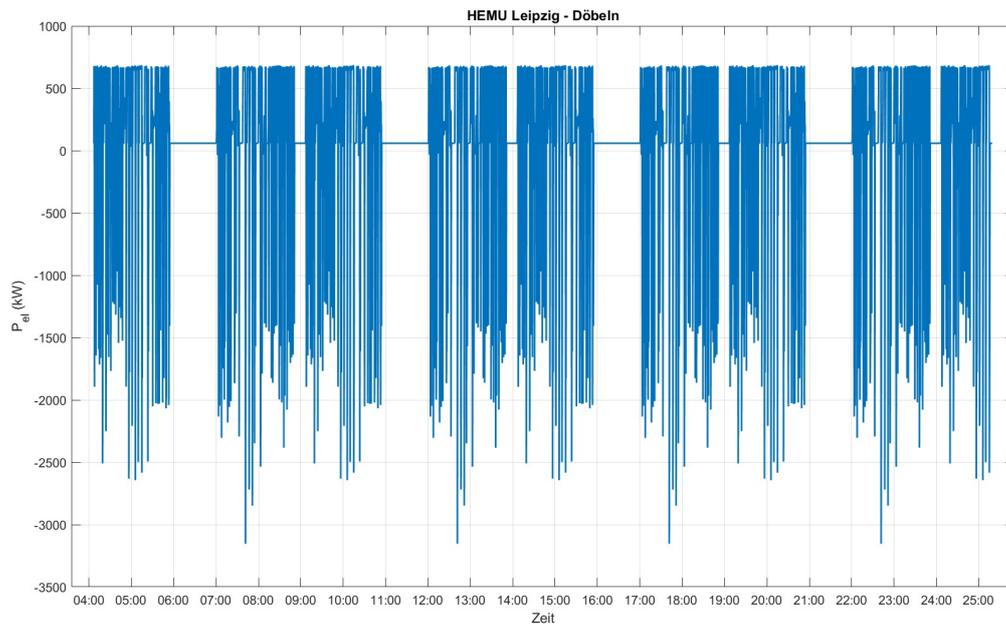


Abbildung 42: elektrischer Leistungsverlauf HEMU, Strecke Leipzig - Grimma – Döbeln

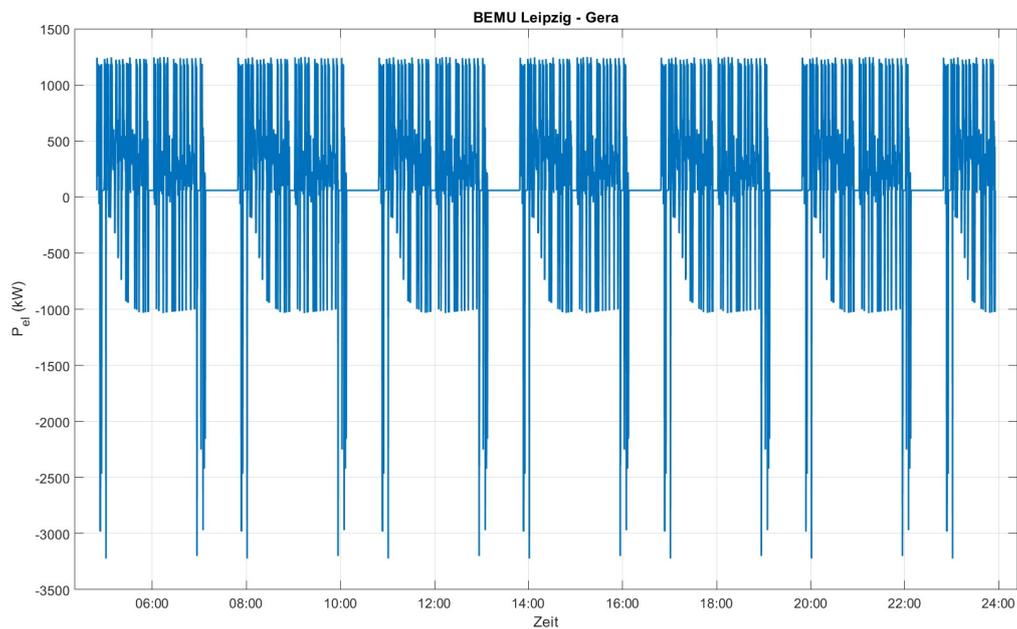


Abbildung 43: elektrischer Leistungsverlauf BEMU, Strecke Leipzig - Gera

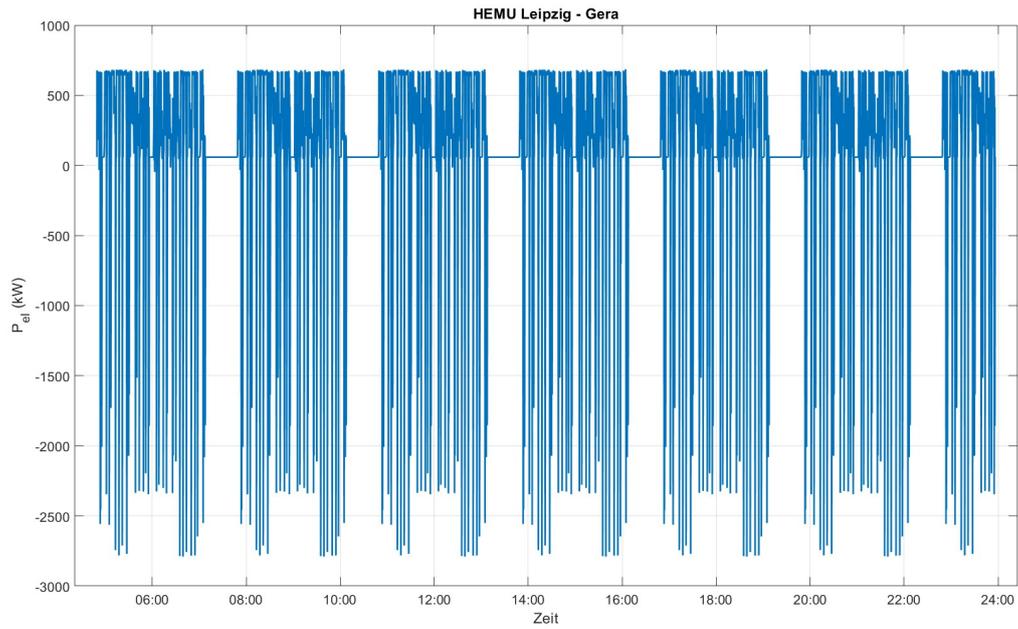


Abbildung 44: elektrischer Leistungsverlauf HEMU, Strecke Leipzig - Gera

### 3. Arbeitspaket Nr. 03 – Recht, Sicherheit und Organisation

In AP3 wird insbesondere geprüft, welche rechtlichen Aspekte (AP3.1), Sicherheitsanforderungen (AP3.2) und organisatorischen Aspekte (AP3.3) hinsichtlich der neuen Technik zu beachten sind, um schließlich entsprechende Empfehlungen für die Art und Weise der Integration für den ZVNL herauszustellen (AP3.4). Kernfrage ist hierbei, ob eine Befahrung des City-Tunnels Leipzig mit alternativen Antrieben zulässig ist.

#### 3.1 Analyse rechtlicher Aspekte<sup>1</sup>

##### 3.1.1 Fragestellung, Analyse rechtlicher Aspekte

In Bezug auf den Arbeitsschritt AP 3.1. hat der ZVNL OKR gefragt,

- welche Beschaffungs- und Vertragsmodelle einschließlich der Risikoverteilung hinsichtlich des Energie-/Strombezugs bei Einsatz von innovativen Fahrzeugen und
- welche mögliche Vertrags- und Vergabemodelle bei Beschaffung des rollenden Materials und der stationären Ausrüstung in Betracht gezogen werden können, und
- welche grundsätzlichen Genehmigungserfordernisse für rollendes Material / stationäre Ausrüstung bestehen, welche Stellen für die Genehmigung- bzw. Planfeststellungsverfahren zuständig und welche Zeiträume und Kosten hierfür zu veranschlagen sind.

##### 3.1.2 Ergebnis

- Sofern Batteriezüge eingesetzt werden und keine ergänzende Ladeinfrastruktur errichtet werden müsste, würden sich wenige Besonderheiten zu einer herkömmlichen Verkehrsausschreibung ergeben. Es könnte dann ein „klassischer“ Verkehrsvertrag ausgeschrieben werden, der sich dadurch auszeichnet, dass das EVU für sämtliche Leistungsteile (einschließlich Fahrzeugbeschaffung, -wartung, -instandhaltung und Energiebezug) verantwortlich ist. Etwaige Unsicherheiten und Kalkulationsrisiken für das EVU, die sich aus dem Einsatz der bislang wenig erprobten Batteriezüge ergeben, könnten durch vertragliche Elemente in dem Verkehrsvertrag berücksichtigt werden (siehe hierzu vorgeschlagene Instrumente in Kapitel 3.3.3.3 .1)
- Sofern Batteriezüge eingesetzt werden und ergänzende Ladeinfrastruktur in Anlagen der DB errichtet werden müsste (z.B. Oberleitungs-Insel), sollte der ZVNL mit der DB die Errichtung dieser Ladeinfrastruktur vereinbaren. Der Verkehrsvertrag kann auch in diesem Fall als „klassischer“ Verkehrsvertrag (mit der vorbenannten Besonderheit) vereinbart werden. Im Blick behalten müsste der ZVNL aber den zeitlichen Vorlauf, den die Planung, Genehmigung und Errichtung der Ladeinfrastruktur benötigt. Je stärker das Betriebsprogramm von dieser zusätzlichen Ladeinfrastruktur abhängt, um so größer würden sich Verzögerungsrisiken der Fertigstellung auswirken.

---

<sup>1</sup> Bearbeiter: Orth Kluth Rechtsanwälte PartG mbB.

- Sofern Wasserstoffzüge eingesetzt werden, müsste der ZVNL entscheiden, ob er Errichtung und Betrieb der Wasserstofftankstelle (1) selber bei einem Dienstleister beauftragt, (2) bei dem Hersteller der Züge beauftragt oder (3) diese Leistung von dem EVU im Rahmen eines „klassischen“ Verkehrsvertrags beauftragt, das seinerseits eine Lösung gemäß Variante (1) oder (2) wählt. Gegen die Variante (1) könnte sprechen, dass der ZVNL damit einen relativ komplexen, SPNV-fernen und langfristigen Leistungseinkauf stemmen müsste, der ggf. nicht zu seinen schlanken Strukturen passt. Gegen Variante (2) spricht, dass eine Beauftragung der Tankstelle beim Zugerhersteller nur dann sinnvoll ist, wenn der ZVNL auch die Züge bei diesem Hersteller erwirbt und dem EVU beistellt. Ein solches Modell ist dem ZVNL derzeit jedoch aufgrund interner Restriktionen nicht möglich. Variante (3) ist grundsätzlich denkbar, jedoch in der praktischen Umsetzung auf Seiten der EVU mit hohen Unwägbarkeiten verbunden. Die Zuweisung der Verantwortlichkeit für Wasserstoffversorgung sowie Errichtung und Betrieb einer Wasserstofftankstelle sollte von Vorprüfungen des ZVNL abhängen. Zum einen sollte die Machbarkeit für das Ausschreibungsnetz geprüft werden und weiterhin sollten potentielle zukünftige Wasserstoffpartner für das EVU vorab im Rahmen einer Marktrecherche ermittelt werden. Grundsätzlich geeignet erscheinen die Fahrzeughersteller als potentielle Anbieter. Die Ergebnisse der Vorprüfungen sollten, ein positives Ergebnis vorausgesetzt, den bietenden EVU übergeben werden, um Zeit und Aufwand zu reduzieren und Hemmnisse / Unwägbarkeiten auf EVU-Seite zu reduzieren.

In Variante (1) oder (3) könnte der ZVNL alle weiteren Leistungen in einem „klassischen“ Verkehrsvertrag vergeben. Etwaige Unsicherheiten und Kalkulationsrisiken für das EVU, die sich aus dem Einsatz der bislang wenig erprobten Brennstoffzellenzüge ergeben, könnten durch vertragliche Elemente in dem Verkehrsvertrag berücksichtigt werden (siehe hierzu vorgeschlagene Instrumente in Kap. 3.3.3.3.1.)

- In jedem Fall müsste der ZVNL bei dem Einsatz von Wasserstoffzügen den zeitlichen Vorlauf für die Planung, Genehmigung und Errichtung der Wasserstofftankstelle genau im Blick behalten. Eine Verzögerung bei der Fertigstellung könnte den gesamten Betriebsstart zum Fahrplanwechsel 2025 des Verkehrsvertrages verhindern.

## 3.2 Rechtliche Prüfung

Auf die Rechtsfragen einschließlich der Genehmigungsfragen im Hinblick auf die **Energieladeinfrastruktur und die Energiebeschaffung** gehen wir nachfolgend **unter I.** ein. Rechtsfragen der **Fahrzeugzulassung**, die auch Auswirkungen auf die Vertragsmodelle haben können, erörtern wir unter **II.**

Welche **Vergabemodelle** vor dem Hintergrund dieser Ergebnisse sinnvoll sein können, erörtern wir unter **III.**

### 3.2.1 Energieladeinfrastruktur und Energiebeschaffung

Bei der rechtlichen Prüfung unterscheiden wir zwischen dem möglichen Einsatz von Batteriezügen (dazu unter 1) und von Wasserstoffzügen (dazu unter 2).

## Einsatz von Batteriezügen

Bei dem Einsatz von Batteriezügen ist zu unterscheiden zwischen der Situation, dass

- **keinerlei neue Ladeinfrastruktur errichtet werden muss**, weil der bisherige Elektrifizierungsgrad für eine Verkehrsbedienung mit Batteriezügen bereits ausreicht (**dazu unter a**),
- **Ladeinfrastruktur in Serviceeinrichtungen** (wie z.B. eine Ladesäule im Bahnhof oder ein Ladedraht oberhalb eines Abstellgleises oder Ladekabel in einer Werkstatt) zu errichten ist, weil die Oberleitungslücken zu groß sind, um ohne zusätzliche Ladeinfrastruktur den Fahrplan zu fahren (**dazu unter b**).

## Strombezug über die Oberleitung oberhalb der Schienenwege der DB Netz AG

Bei der Beladung von Batteriezügen über vorhandene Oberleitungen der DB Netz AG stellen sich in Bezug auf die Infrastrukturnutzung und Strombeschaffung gegenüber „herkömmlichen“ elektrifizierten SPNV-Verkehren keine Besonderheiten.

Dazu im Einzelnen:

## Regulatorische Zulässigkeit der Nutzung der Oberleitungen zu Speicherzwecken

Bei der Nutzung der vorhandenen Oberleitungen durch Batteriezüge bestehen keinerlei regulatorische Besonderheiten oder Schwierigkeiten gegenüber konventionellen Verkehren. Zusammengefasst gilt:

- Die Nutzung der vorhandenen Oberleitungen ist Gegenstand des sog. Mindestzugangspakets, das zusammen mit der Trasse zu gewähren ist (§ 11 Abs. 1 i.V.m. Anlage 2 Nr. 1 lit. e) ERegG). Insoweit besteht ein Zugangsanspruch (§ 11 Abs. 1 ERegG), der insbesondere den EVU und den Aufgabenträgern zusteht (§ 1 Abs. 12 ERegG).
- Die Vergütung für die Nutzung der Oberleitung ist mit dem Trassenentgelt abgegolten (§ 31 Abs. 1 Satz 2 ERegG). Die Entgelte unterliegen der Regulierung der Bundesnetzagentur und sind von ihr zu genehmigen (§ 45 ERegG).

Man könnte allerdings die Frage aufwerfen, ob die dargestellten Nutzungsansprüche nur die Stromentnahme für die jeweilige Fahrt, nicht aber zur Speicherung für künftige Fahrten erfassen. Indem der Gesetzgeber die Nutzung der Oberleitungen als „*Nutzung der Anlagen zur streckenbezogenen Versorgung mit Fahrstrom*“ definierte (§ 11 Abs. 1 i.V.m. Anlage 2 Nr. 1 lit. e ERegG), hatte er offenbar eine Stromentnahme zu Zwecken der aktuellen Fahrt, nicht aber zur Speicherung für künftige Fahrten vor Augen. Gleichwohl lässt der Wortlaut eine Nutzung zur Stromentnahme zur Speicherung für künftige Fahrten ebenfalls zu. Da die Stromentnahme zu Fahrt- und Speicherzwecken im SPNV nach unserem Verständnis auch unter der Netzbelastung der Stromentnahme für Fahrten im Fernverkehr liegt, gibt es aus unserer Sicht auch keine sachlichen Gründe, die gegen eine Nutzung der Oberleitung auch zu Speicherzwecken sprechen. Hinzu kommt, dass auch schon jetzt beim Einsatz

herkömmlicher Elektrozüge die vorhandenen Bordbatterien ebenfalls über die Oberleitungen aufgeladen werden.

### **Regulatorische und vertragliche Grundlagen der Strombeschaffung**

Der Fahrstrom sowie der zu Speicherzwecken über die Oberleitungen bezogene Strom können bei Nutzung der vorhandenen Oberleitungen **frei am Markt beschafft** werden. Die vorbenannten Nutzungsansprüche zu den Oberleitungen berechtigen zur Durchleitung des am Markt beschafften Stroms. Gegenüber der vorgelagerten Bahnstrominfrastruktur (die i.d.R. von DB Energie GmbH betrieben wird) bestehen Netzanschluss- und Netznutzungsansprüche nach dem Energiewirtschaftsgesetz (EnWG).<sup>2</sup>

Für die Beschaffung kommen alle gängigen Modelle in Betracht, insbesondere:

- Stromlieferverträge mit klassischen Lieferanten (wie z.B. DB Energie GmbH, Stadtwerke Tübingen- N-Ergie, u.a.). Typische Regelungsgehalte sind hier die Frage der Preisfixierung über einen definierten Zeitraum sowie die Übernahme des Risikos des Einsatzes von Regelenergie.
- Strombeschaffung am Großhandelsmarkt bzw. über die Strombörse: Bei dieser Variante wird eine Marktstufe eingespart, so dass der Strombezug ggf. günstiger erfolgen kann. Ein solches Vorgehen setzt allerdings entsprechendes Know-how beim Erwerber voraus. Denkbar ist auch, dass sich dieser eines Dienstleisters dafür bedient.
- Strombeschaffung vom Produzenten: Denkbar ist auch die Strombeschaffung direkt vom Produzenten, insbesondere vom Betreiber einer regional gelegenen EE-Anlage. Zu diesem Zweck können Verträge mit den Betreibern der Erzeugungsanlagen abgeschlossen werden (sog. PPAs, Power Purchase Agreements). In einem solchen Fall könnten ggf. in erheblichem Umfang Netzentgelte und EEG-Umlagen eingespart werden, soweit das öffentliche Elektrizitätsnetz bzw. Bahnstromnetz der DB Energie GmbH für die Strombelieferung nicht in Anspruch genommen wird (d.h. praktisch nur bei einer Direkteinspeisung in die Oberleitung).

### **Genehmigungsfragen**

Genehmigungsfragen in Bezug auf die Errichtung oder den Betrieb von Ladeinfrastruktur stellen sich nicht, wenn der Batteriezug ausschließlich über die vorhandenen Oberleitungen der DB Netz AG beladen wird.

### **Fazit**

Im Fall der Aufladung der Batteriezüge ausschließlich über vorhandene Oberleitungen würde sich die Vergabe mit Bezug auf den Energieeinsatz nicht von einer Vergabe von Verkehren mit konventionellen Fahrzeugen unterscheiden.

---

<sup>2</sup> Dies ist seit BGH, Beschl. v. 9.11.2010, EnVR 1/10 – *Bahnstromfernleitungen* gesicherte Praxis der Bundesnetzagentur und der DB Energie GmbH.

### 3.2.2 Errichtung von Ladeinfrastruktur

Um den betrieblichen Spielraum zu erhöhen und ggf. Sicherheitspuffer zu schaffen, kann die **Errichtung zusätzlicher Ladeinfrastruktur** geboten sein. Dabei kommt insbesondere die Möglichkeit in Betracht, eine Ladeinfrastruktur dort zu schaffen, wo der Zug steht, so dass er während der Standzeit aufladen kann. Beispielhaft zu nennen sind etwa eine Oberleitungsinsel oberhalb eines Abstellgleises oder ein Elektrant in einem Bahnhof oder in einer Werkstatt. Letzteres kann auch deshalb notwendig werden, weil die vorhandene Leistung der Elektranten zur Vorklimatisierung der Züge wohl nicht ausreicht. Dabei stellen sich Genehmigungsfragen (dazu unter aa), regulatorische Fragen und ihre Konsequenzen (dazu unter bb) und Fragen nach einer notwendigen Kooperation mit der DB (dazu unter cc).

#### Genehmigungsfragen

Das Genehmigungsverfahren für eine Batterieladestation dürfte im Vergleich zu Wasserstofftankstellen weniger kompliziert und zeitaufwendig sein, da vom Betrieb einer Batterieladestation nach unserer Einschätzung deutlich geringere Gefahren ausgehen.

#### Erfordernis eines Planfeststellungsverfahrens?

Bei Ladeinfrastruktur handelt es sich um Betriebsanlagen der Eisenbahn im Sinne des § 18 Abs. 1 Satz 1 AEG und zugleich um Bestandteile der Eisenbahninfrastruktur (§ 2 Abs. 6 AEG). Die Errichtung von Ladestationen für Batteriezüge ist daher nach § 18 AEG **grundsätzlich planfeststellungspflichtig**. Allerdings sind vorliegend Ausnahmen möglich:

- Das neue Investitionsbeschleunigungsgesetz der Bundesregierung sieht eine Änderung des § 18 AEG vor, wonach künftig die **Ausstattung einer Bahnstrecke mit einer Oberleitung nicht der Planfeststellung** unterliegen soll. Nach unserem Verständnis dürften darunter auch sog. Oberleitungsinseln fallen. Elektranten und sonstige Lademöglichkeiten hingegen dürften nicht damit vergleichbar sein und daher nicht per se von einer Planfeststellung freigestellt sein.
- In einem **einfacher gelagerten Fall** (z.B. wenn die Rechte anderer durch das Vorhaben nicht oder nur unwesentlich beeinträchtigt werden) kann anstelle eines Planfeststellungsbeschlusses auch hier eine **Plangenehmigung** nach § 18 Abs. 1 Satz 3 AEG i.V.m. § 74 Abs. 6 VwVfG erteilt werden.
  - Da **bei Batterieladestationen** – anders als bei Wasserstofftankstellen – keine gefährlichen Stoffe im Sinne des Anhangs 1 zur 4. BImSchV im Spiel sind und das Vorhaben auch sonst nicht in der Anlage 1 (=Liste "UVP-pflichtige Vorhaben") zum UVPG genannt ist, **ist ein einfach gelagerter Fall denkbar**.
- Planfeststellung und Plangenehmigung **entfallen in Fällen von unwesentlicher Bedeutung** (§ 18 Abs. 1 Satz 3 AEG i.V.m. § 74 Abs. 7 Satz 1 VwVfG), vor allem bei unbedeutenden Änderungen oder Erweiterungen von bestehenden planfeststellungspflichtigen Anlagen. Keine planfeststellungspflichtigen Änderungen sind z.B. Unterhaltungs- und Instandsetzungsarbeiten (Bsp. Austausch alter Gleise

gegen gleichwertige neue bzw. gegen Gleisanlagen mit einem höheren Sicherheitsstandard und neuerem Stand der Technik).

Da die (erstmalige) Errichtung von Batterieladestationen nicht unmittelbar mit einer Änderung bestehender Anlagen vergleichbar ist, liegt ein Fall von unwesentlicher Bedeutung nicht direkt auf der Hand, kann aber auch nicht gänzlich ausgeschlossen werden.

### **Alternative Genehmigungserfordernisse**

Sofern eine Batterieladestation als Fall unwesentlicher Bedeutung qualifiziert würde und es deshalb keiner Planfeststellung oder Plangenehmigung bedürfte, wäre folgendes zu beachten:

- Ggf. bedürfte es einer **Baugenehmigung** nach der Landesbauordnung Sachsen, sofern kein verfahrensfreies Vorhaben vorliegt.
- Einer **Genehmigung nach dem BImSchG bedürfte es indes nicht**, da keiner der in Anhang 1 zur 4. BImSchV aufgezählten Anlagentypen vorliegt.
- Möglicherweise bedürfte es aber einer **Anzeige nach § 7 Abs. 2 der 26. BImSchV**, da Bahnstromoberleitungen und sonstige vergleichbaren Anlagen als „Niederfrequenzanlagen“ nach § 1 Abs. 2 Nr. 2 der 26. BImSchV zählen.
- Batterieladestationen dürften Energieanlagen im Sinne des § 3 Nr. 15 EnWG sein (= Anlagen zur Erzeugung, Speicherung, Fortleitung oder Abgabe von Energie). Als solche sind sie nach § 49 Abs. 1 Satz EnWG so zu errichten und zu betreiben, dass die technische Sicherheit gewährleistet ist. Eine Genehmigungspflicht sieht § 4 Abs. 1 Satz 1 EnWG nur für die Aufnahme des Betriebs eines Energieversorgungsnetzes vor, worunter Batterieladestationen nicht fallen dürften. Damit besteht wohl **keine Genehmigungspflicht nach § 4 Abs. 1 Satz 1 EnWG**.

### **Zuständigkeit**

Die sachlich zuständige Planfeststellungsbehörde für „Betriebsanlagen der Eisenbahnen des Bundes“ ist gemäß § 3 Abs. 1 Nr. 1 und Abs. 2 Satz 2 BEVVG das **Eisenbahn-Bundesamt** (EBA). Für nicht bundeseigene Bahnen richtet sich die Zuständigkeit nach Landesrecht (§ 5 Abs. 1a Nr. 2 lit. a AEG). Sofern der ZVNL Vorhabenträger wäre, dürfte die Landesdirektion Sachsen zuständig sein.

### **Dauer des Verfahrens**

Die Dauer eines Planfeststellungsverfahrens (Antragstellung bis Erlass Planfeststellungsbeschluss) hängt vom Einzelfall ab. Entscheidend sind Art und Umfang des Vorhabens, die Qualität der Planunterlagen, etwaige Anpassungen der Planung, Anzahl und Inhalt der Einwendungen und Stellungnahmen sowie gesetzliche Verfahrensvorschriften. **In der Regel beträgt die Gesamtdauer eines Planfeststellungsverfahrens ein bis drei Jahre** (nach Angaben des EBA).

**Ein Plangenehmigungsverfahren und einen Fall unwesentlicher Bedeutung dürfte dagegen ca. 1 Jahr dauern.**

Zuzurechnen sind zudem die **Zeit für die Planung bzw. Vorbereitung der Unterlagen bis zur Antragstellung.**

**Zusätzlich zu der Dauer des eigentlichen Planfeststellungs- bzw. - genehmigungsverfahrens kommt die sich daran anschließende Bauzeit hinzu.**

Da die von einer Batterieladestation ausgehenden Gefahren von uns als geringer eingeschätzt werden, als bei Wasserstofftankstellen, ist davon auszugehen, dass auch das Genehmigungsverfahren weniger zeitaufwendig sein wird.

### **Kosten**

Die Kosten lassen sich schwer exakt prognostizieren. **Die wesentlichen Kostenpositionen** sind:

- Grunderwerb (Ankauf / Pacht)
- Anlagenplanung
- Anlagenbau (Ladestation)
- Anschluss an Stromnetz ggf. der DB Energie
- Betriebskosten

Die Kosten für die Batterieladeinfrastruktur werden aufgrund dem in der Regel wenig aufwendigen Anschluss an ein Stromnetz günstiger eingeschätzt, als die Kosten für die Errichtung einer Wasserstofftankstelle.

### **Regulatorische Einordnung der Ladeinfrastruktur und Strombeschaffung**

Die Ladeinfrastruktur wäre regulatorisch wohl als Serviceeinrichtung im Sinne der Anlage 2 Nr. 2 ERegG einzuordnen. Zwar werden Stromladestationen in dem – abschließenden – Katalog der Serviceeinrichtungen nicht explizit genannt, doch erlaubt der relativ offene Wortlaut des Auffangtatbestandes der Anlage 2 Nr. 2 f) ERegG – andere technische Einrichtungen einschließlich Reinigungs- und Wascheinrichtungen – die Subsumtion auch der Ladestationen.<sup>3</sup> Nach der Rechtsprechung sind die Definitionen der einzelnen Serviceeinrichtungen weit auszulegen.<sup>4</sup>

Konsequenzen der Einordnung der Ladeinfrastruktur als Serviceeinrichtung wären:

- Zugangsberechtigte nach § 1 Abs. 12 ERegG können **Zugangsansprüche zu der Ladestation** geltend machen (§ 11 Abs. 2 ERegG). Der Betreiber muss insoweit regulierte Nutzungsbedingungen einschließlich regulierter Entgelte aufstellen (§ 19 Abs. 4 ERegG). Theoretisch könnte es insoweit zu Kapazitätskonflikten um die

<sup>3</sup> Maas/ter Steg, in: Kühling/Otte, AEG/ERegG, 2020, Anl. 2 ERegG Rdn. 38.

<sup>4</sup> BVerwG, Beschl. v. 8.1.2015, 6 B 36/14, Rdn. 12 f.

Nutzung kommen; insbesondere dürfte sich der Eigentümer kein Vorrangrecht einräumen (arg e § 13 Abs. 3 Nr. 2 ERegG). Praktisch würde sich das Problem indes nur stellen, wenn auch andere Züge mit Ladebedarf auf der Strecke verkehren würden, wovon nicht auszugehen ist.

- Der Betreiber der Ladeinfrastruktur dürfte wohl entscheiden, den **Fahrstrom zu monopolisieren**, d.h. diesen über die Ladeinfrastruktur exklusiv zu stellen. Damit hätten Zugangsberechtigte nicht mehr die Möglichkeit der Beschaffung des notwendigen Fahrstroms am freien Markt. Denn Anlage 2 Nr. 3 a) ERegG definiert die „Bereitstellung von Fahrstrom“ als sog. Zusatzleistungen zum Infrastrukturbetrieb, die der Betreiber der Serviceeinrichtung nach § 14 Abs. 1 S. 1 Nr. 2 ERegG erbringen kann. Der Zugangsanspruch der EVU in § 11 Abs. 2 ERegG ist dann auf die Erbringung der Leistungen, die in den Serviceeinrichtungen erbracht werden, gerichtet, was nach unserem Verständnis eine Eigenerbringung dieser Leistung in Konkurrenz zum Betreiber ausschließt.<sup>5</sup>

Hinzuweisen ist allerdings darauf, dass es auch denkbar wäre, die Ladeinfrastruktur als Bestandteil der Schienenwege zu qualifizieren.<sup>6</sup> Das Gesetz ordnet in Anlage 2 Nr. 1 e) ERegG die Nutzung der „Anlagen zur streckenbezogenen Versorgung mit Fahrstrom“ dem Mindestzugangspaket zu, dass der Schienenwegbetreiber im Rahmen der Trassenzuweisung einzuräumen hat (vgl. oben, D.I.1.a.aa). Der Betreiber der Schienenwege hat diese Anlagen auch zum Gegenstand seines Unternehmens zu machen (§ 4 Abs. 7

<sup>5</sup> Auch Art. 8 Abs. 2 S. 2 Durchführungsverordnung (EU) 2017/2177 über den Zugang zu Serviceeinrichtungen und schienenverkehrsbezogenen Leistungen verbietet dem Betreiber nur, den Zugang an die Auflage zu knüpfen, dass auch andere Leistungen bezogen werden, die keinen Bezug zu der beantragten Leistung haben. Die Auflage, bei Nutzung der Ladeinfrastruktur auch den Fahrstrom vom Betreiber zu bestehen, lässt sich damit vereinbaren.

Auch der Durchleitungsanspruch nach § 20 Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) dürfte dem EVU keinen Anspruch auf Durchleitung eigen beschafften Fahrstroms durch die Ladeinfrastruktur geben. So ist schon problematisch, ob das EnWG überhaupt anwendbar ist, da gem. § 3a EnWG, § 1 Abs. 3 ERegG die Regelungen des ERegG vorrangig sind. Im Übrigen richtet sich der energiewirtschaftsrechtliche Netzzugangsanspruch nur gegen die „Betreiber von Energieversorgungsnetzen“ (§ 20 Abs. 1 S. 1 EnWG). Ob eine Ladeinfrastruktur wie ein Elektrant oder eine Insel-Oberleitung oberhalb eines Abstellgleises als „Netz“ in diesem Sinne einzuordnen sind, erscheint zumindest zweifelhaft. Immerhin hat der Gesetzgeber entschieden, dass „der Strombezug der Ladepunkte für Elektromobile“ dem Letztverbrauch i.S.d. EnWG gleichsteht (§ 3 Nr. 25 EnWG) und somit kein zugangspflichtiges Netz darstellt.

Hinzuweisen ist allerdings darauf, dass die BNetzA am 10. Juni 2020 ein Festlegungsverfahren zur Weiterentwicklung der Netzzugangsbedingungen Strom (BK6-20-160) eingeleitet hat, nach dem u.a. der Zugang zur Ladeinfrastruktur bei Elektromobilen liberalisiert werden soll. Für den Kunden soll es danach möglich sein, spätestens ab dem 1. April 2021 einen Vertrag mit einem Stromversorger seiner Wahl abzuschließen und den Strom zu den dort vereinbarten Konditionen an Ladesäulen zu laden. Zu diesem Zweck soll über den Abschluss eines Netznutzungsvertrags mit dem Netzbetreiber ein bilanzieller Lieferantenwechsel an dem jeweiligen Ladepunkt ermöglicht werden. Unabhängig von der Frage, ob auf die Festlegung auch auf Elektro-Schienenfahrzeuge übertragbar ist, hebt die BNetzA jedenfalls hervor, dass diese keine Aussage darüber treffen soll, ob der Betreiber eines Ladepunktes dem Grunde nach verpflichtet ist, einen bilanziellen Netzzugang zu gewähren. Wenn er sich aber dafür entscheidet, dann hat er die maßgeblichen Netznutzungsverträge abzuschließen.

<sup>6</sup> Maas/ter Steg, in: Kühling/Otte, AEG/ERegG, 2020, Anl. 2 ERegG Rdn. 38.

AEG), so dass dann eine separate Betreiberschaft nicht möglich wäre. Das EVU dürfte über diese Infrastruktur den Strom dann aber frei am Markt beschaffen (vgl. oben D.I.1.a.bb).

Wir meinen aber, dass eine Ladeinfrastruktur, bei welcher der Zug im Stand lädt und sich dabei in einer bestehenden Serviceeinrichtung befindet (z.B. Oberleitungsinsel oberhalb eines Abstellgleises), nicht mehr als „Anlage zur streckenbezogenen Versorgung mit Fahrstrom“ angesehen werden kann. Auch die Bundesnetzagentur vertritt in ihrem Tätigkeitsbericht Eisenbahnen 2017/2018 die Rechtsauffassung, dass derartige Ladeinfrastrukturen als Serviceeinrichtungen zu qualifizieren sind.<sup>7</sup> Gleichwohl verbleibt eine letzte Rechtsunsicherheit, da veröffentlichte Rechtspraxis zu Ladestationen, soweit erkennbar, nicht existiert.

### **Notwendigkeit einer Kooperation mit dem vorhandenen Infrastrukturbetreiber (DB)?**

Sofern die Ladeinfrastruktur auf dem Grundeigentum einer DB-Gesellschaft (DB Netz AG, DB Station & Service AG, DB Energie GmbH) oder in Infrastruktureinrichtungen einer DB-Gesellschaft erfolgen soll (z.B. eine Oberleitung oberhalb eines Abstellgleises oder eine Ladestation im Bahnhof oder an einem Abstellgleis), ist das Einvernehmen mit der DB zur Errichtung einer solchen Ladeinfrastruktur zu suchen. Gesetzliche Ansprüche gegen die DB auf Zustimmung bestehen nicht.<sup>8</sup> Gleiches gilt, sofern die Ladeinfrastruktur auf dem Grundeigentum eines privaten Eigentümers zu errichten wäre. Diese Konstellation könnte deshalb relevant sein, weil die Strecke der Muldentalbahn (Grimma - Rochlitz) wohl einem privaten Eigentümer gehört (Kapitel 3.3.3.4.2).

Die DB (und ggf. der Eigentümer der Muldentalbahn) wird möglicherweise in mehrfacher Hinsicht Bedingungen vorgeben (dazu unter (1)), welche Konsequenzen für das Ausschreibungsmodell haben (dazu unter (2)). Damit der ZVNL die notwendige Rechtssicherheit erhält, sollte er daher einen Vertrag mit der DB bzw. dem Eigentümer der Muldentalbahn schließen (dazu unter (3)).

### **Mögliche Forderungen der DB**

Sofern die DB ihre Zustimmung zur Errichtung von Ladeinfrastruktur in ihren Serviceeinrichtungen erteilt, muss der ZVNL damit rechnen, dass die DB folgende Forderungen aufstellt:

- Die DB wird möglicherweise die Errichtung der Ladeinfrastruktur und die ggf. notwendigen Plangenehmigungs- bzw. Planfeststellungsverfahren selbst übernehmen wollen.
- Die DB wird die Betreiberschaft für die Ladeinfrastruktur übernehmen wollen, um zu vermeiden, dass es zu Abgrenzungsschwierigkeiten hinsichtlich der Verantwortung und Haftung kommt. Dem ZVNL stünde dann nicht die Möglichkeit offen, eine dritte Person (z.B. das EVU oder den Fahrzeughersteller) mit der Betreiberschaft zu beauftragen.

<sup>7</sup> Bundesnetzagentur, Tätigkeitsbericht Eisenbahnen 2017/2018 (S. 66).

<sup>8</sup> Maas/ter Steg, in: Kühling/Otte, AEG/ERegG, 2020, Anl. 2 ERegG Rdn. 11. Begründet wird dies damit, dass der Zugang zu den Serviceeinrichtungen nach dem Wortlaut von Anlage 2 S. 1 Nr. 2 nur „soweit“ gewährt wird, wie diese „vorhanden“ sind.

- Die DB wird wahrscheinlich auf einer exklusiven Strombelieferung durch die DB Energie GmbH bestehen. Eine Strombeschaffung wäre insoweit also nicht mehr über den freien Markt möglich.

Ob der Eigentümer der Muldentalbahn vergleichbare Forderungen erheben würde, bleibt abzuwarten. Da er offenbar bislang den Betrieb von Eisenbahninfrastruktur nicht als sein Kerngeschäft ansieht (Kapitel 3.3.3.4.2), ist denkbar, dass er Errichtung und Betrieb nicht in dem Maße übernehmen wollen würde, wie dies bei der DB zu erwarten ist.

### ***Konsequenzen für das Ausschreibungsmodell***

Für die Ausschreibung der Verkehre folgt aus dem Vorgesagten:

- Wenn die Ladeinfrastruktur auf Grundstücken oder in Infrastruktur der DB errichtet werden soll, besteht in der Umsetzung, aber auch zeitlich und finanziell, eine Abhängigkeit von der DB, die einem Bieter für die Verkehrsverträge wohl nicht überantwortet werden kann. Es dürfte vorzugswürdig sein, wenn der ZVNL die Errichtung der Ladeinfrastruktur organisiert.
- Bei einer Errichtung der Ladeinfrastruktur auf Grundstücken oder in Infrastruktur der DB ist mit der DB zu klären, ob diese auch Betreiberin der Ladeinfrastruktur sein wird. Dies ist zu erwarten. Sollte die DB nicht die Rolle des Betreibers übernehmen wollen, müsste der ZVNL die Person des Betreibers (etwa EVU) im Rahmen des Rollenmodells definieren.
- Sofern die DB die Betreiberschaft der Ladeinfrastruktur übernimmt, wäre mit ihr auch zu klären, ob sie auch die Stromlieferungen für diese Ladeinfrastruktur anbietet und ob sie insoweit auf Exklusivität besteht. In diesem Fall wäre, soweit der Strom nicht während der Zugfahrt aus den Oberleitungen entnommen wird, der Strombezug der wettbewerblichen Beschaffung entzogen. Die bietenden EVU könnten insoweit insbesondere auch keinen Einfluss auf den Strompreis nehmen. Dies wäre bei der Ausschreibung zu berücksichtigen, da den EVU die kalkulationsrelevanten Umstände mitgeteilt werden müssen.
- Bei einer evtl. Reaktivierung der Muldentalbahn wäre mit dem Eigentümer der Strecke zu klären, ob er ebenfalls Errichtung und Betrieb der Ladeinfrastruktur verlangt oder ob er diese Tätigkeiten dem ZVNL bzw. dessen Beauftragten überlassen würde.
- Sofern die Ladeinfrastruktur nicht auf Grundstücken oder in Infrastruktur der DB errichtet werden soll (eigene Grundstücke oder Werkstätten oder bei entsprechender Wahlfreiheit durch den Betreiber der Muldentalbahn), hätte der ZVNL die Freiheit (aber auch die Notwendigkeit), die Person des Betreibers zu organisieren. Zudem könnte die Strombeschaffung für die Ladeinfrastruktur Teil der wettbewerblichen Beschaffung sein.

### 3.2.3 Einsatz von Wasserstoffzügen

Beim Einsatz von Wasserstoffzügen kann unseres Wissens nach nicht auf vorhandene Ladeinfrastruktur zurückgegriffen werden. Insoweit muss also in jedem Fall die entsprechende Infrastruktur (Wasserstofftankstelle) errichtet werden.

#### Genehmigungsfragen

Da es sich bei Wasserstoff um einen gefährlichen Stoff handelt, ist das Genehmigungsverfahren im Vergleich zu Batterieladestationen unter Umständen deutlich komplizierter und zeitaufwendiger. Dementsprechend sind auch an den Betrieb von Wasserstofftankstellen strengere gesetzliche Anforderungen geknüpft.

#### Planfeststellungsvorbehalt

Die Errichtung einer Wasserstofftankstelle für Eisenbahnfahrzeuge unterfällt dem Planfeststellungsvorbehalt des § 18 Abs. 1 AEG. Das bedeutet, dass entweder

- ein **Planfeststellungsverfahren** oder –
- in einfach gelagerten Fällen – ein **Plangenehmigungsverfahren**

erforderlich ist. Denn Wasserstofftankstellen sind Betriebsanlagen der Eisenbahn im Sinne des § 18 Abs. 1 Satz 1 AEG und zugleich Bestandteile der Eisenbahninfrastruktur (§ 2 Abs. 6 AEG). Sie weisen funktional einen Bezug zum Eisenbahnbetrieb auf.

Gleiches dürfte in Bezug auf Anlagen (Werkstätten) für die **betriebsnahe** Wartung, Inspektion und Instandsetzung der Wasserstoffzüge gelten. Denn zu den Betriebsanlagen der Eisenbahn im Sinne des § 18 Abs. 1 AEG zählen auch Bauwerke und sonstige Einrichtungen, die unter Berücksichtigung der örtlichen Verhältnisse zur Abwicklung oder Sicherung des Reise- oder Güterverkehrs auf der Schiene erforderlich sind. Hauptkriterium für die (objektive) Zugehörigkeit zur Bahnanlage ist die sog. Eisenbahnbetriebsbezogenheit, d.h. die Verkehrsfunktion und der räumliche Zusammenhang mit dem Eisenbahnbetrieb. Dies wird in der Literatur zumindest dann bejaht, wenn die Schienenfahrzeuge für die Wartung und Instandsetzung nicht dem laufenden Verkehrsbetrieb entzogen werden, wie das z.B. bei größeren Reparaturen oder Umbauten der Fall ist.<sup>9</sup>

Eine Plangenehmigung kann anstelle eines Planfeststellungsbeschlusses in einem einfach gelagerten Fall (z.B. wenn die Rechte anderer durch das Vorhaben nicht oder nur unwesentlich beeinträchtigt werden) nach § 18 Abs. 1 Satz 3 AEG i.V.m. § 74 Abs. 6 VwVfG erteilt werden. In diesem Fall findet keine Öffentlichkeitsbeteiligung statt, was das Verfahren beschleunigen kann. Ob ein solcher Fall vorliegt, wird von Standort und Dimensionierung der Anlage abhängen.

Das Plangenehmigungsverfahren ist generell ausgeschlossen, wenn für das Vorhaben (ggf. auch erst aufgrund einer Vorprüfung) eine Umweltverträglichkeitsprüfung („UVP“) nach dem UVPG durchzuführen ist (vgl. § 74 Abs. 6 Satz 1 Nr. 3 VwVfG). Ob eine UVP-Pflicht besteht, hängt wiederum maßgeblich vom Fassungsvermögen der Wasserstofftankstelle ab (vgl.

<sup>9</sup> Vgl. Vallendar in: Hermes/Sellner, AEG, 2. Aufl. 2014, § 18 Rn. 58, § 2 Rn. 125.

sogleich unter cc). **Aufgrund des hier anvisierten hohen Fassungsvermögens wird ein einfach gelagerter Fall voraussichtlich nicht gegeben sein.**

Planfeststellung und Plangenehmigung können in Fällen von unwesentlicher Bedeutung auch ganz entfallen (§ 18 Abs. 1 Satz 3 AEG i.V.m. § 74 Abs. 7 Satz 1 VwVfG). Beispiele: unbedeutende Änderung/Erweiterungen bestehender planfeststellungspflichtiger Anlagen; Unterhaltungs- und Instandsetzungsarbeiten; Wiederaufnahme des Eisenbahnbetriebs auf Trassen, die längere Zeit tatsächlich nicht benutzt wurden. **Wir gehen davon aus, dass die Neuerrichtung einer Wasserstofftankstelle kein solcher Fall von unwesentlicher Bedeutung wäre.**

### Konzentrationswirkung

Ein Planfeststellungsbeschluss sowie eine Plangenehmigung entfalten nach § 75 Abs. 1 S. 1 HS 2 VwVfG sog. **Konzentrationswirkung**. D.h. neben einem Planfeststellungsbeschluss bzw. einer Plangenehmigung sind **keine weiteren behördliche Genehmigungen**, Erlaubnisse o.ä. erforderlich.

### Umweltverträglichkeitsprüfung

Als Bestandteil des Planfeststellungsverfahrens würde auch eine ggf. erforderliche **Umweltverträglichkeitsprüfung** stattfinden. Wasserstoff ist unter Nr. 17 der Stoffliste zu Nr. 9.3 des Anhangs 1 zur 4. BImSchV erfasst und fällt damit unter Ziff. 9.3 der Anlage 1 (=Liste "UVP-pflichtige Vorhaben") zum UVPG. Nach Ziffer 9.3 der Anlage 1 zum UVPG sind Errichtung und Betrieb einer Anlage, die der Lagerung von im Anhang 2 (Stoffliste zu Nummer 9.3 Anhang 1) der Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen in der jeweils geltenden Fassung genannten Stoffen mit einer bestimmten Lagerkapazität dient,

- bei einem Fassungsvermögen von 200.000 t oder mehr UVP-pflichtig (und damit zugleich planfeststellungspflichtig)
- bei einem Fassungsvermögen von 30 Tonnen und mehr (= bis weniger als 200.000 t) nur dann UVP-pflichtig, wenn das Vorhaben als solches nach Einschätzung der Behörde im Rahmen einer allgemeinen Vorprüfung erhebliche nachteilige Umweltauswirkungen haben kann;
- ab einem Fassungsvermögen von 3 Tonnen und mehr (= bis weniger als 30 t) UVP-pflichtig, wenn aufgrund der besonderen örtlichen Gegebenheiten im Rahmen einer standortbezogenen Vorprüfung mit erheblichen nachteiligen Umweltauswirkungen zu rechnen ist.

### Störfall-Verordnung

Ggf. gelten für Errichtung und Betrieb der Wasserstoffinfrastruktur Grund- sowie **erweiterte Pflichten nach der Störfall-Verordnung** (12. BImSchV). Denn Wasserstoff ist ein gefährlicher Stoff gemäß Ziffer 2.44 des Anhangs I zur 12. BImSchV.

Wir halten es nicht für ausgeschlossen, dass Wasserstofftankstellen auch in sensibler Nachbarschaft, z.B. zu Wohngebieten, errichtet werden können. Die Einhaltung der Betreiberpflichten dürfte aber eine Herausforderung darstellen.

### Grundpflichten

Die Grundpflichten nach der 12. BImSchV (§§ 3 – 8a 12. BImSchV) erfassen u.a. erforderliche Vorkehrungen, um Störfälle zu verhindern (§ 3 Abs. 1 12. BImSchV) und das Ergreifen von vorbeugenden Maßnahmen, um die Auswirkungen von Störfällen so gering wie möglich zu halten (§ 3 Abs. 3 12. BImSchV).

- Die Grundpflichten des zweiten und vierten Teils der Störfall-Verordnung mit Ausnahme der §§ 9 bis 12 der 12. BImSchV gelten für Betriebsbereiche, in denen Wasserstoff in einer Menge von 5.000 kg oder mehr vorhanden ist, § 1 Abs. 1 Satz 1 der 12. BImSchV.
- Die Grundpflichten erfassen die allgemeine Betreiberpflichten nach § 3 der 12. BImSchV. Danach hat der Betreiber die nach Art und Ausmaß der möglichen Gefahren erforderlichen Vorkehrungen und vorbeugende Maßnahmen zu treffen, um einerseits Störfälle zu verhindern (Abs. 1) und andererseits die Auswirkungen von Störfällen so gering wie möglich zu halten (Abs. 3). Was danach erforderlich ist, hängt von den folgenden Faktoren ab: (1) Art des gefährdeten Rechtsguts, (2) Umfang des drohenden Schadens und (3) Wahrscheinlichkeit des Eintritts eines schadensverursachenden Ereignisses.
- § 4 der 12. BImSchV konkretisiert die Pflichten des Betreibers aus § 3. Danach hat der Betreiber u.a. Maßnahmen zur Vermeidung von Bränden und Explosionen sowie zur Vermeidung der Freisetzung gefährlicher Stoffe zu treffen.
- Auch § 5 der 12. BImSchV führt beispielhaft einige Vorkehrungen auf, die der Betreiber zur Erfüllung seiner Pflichten aus § 3 ergreifen kann – wie z.B. Maßnahmen, damit durch die Beschaffenheit der Fundamente und der tragenden Gebäudeteile bei Störfällen keine zusätzlichen Gefahren hervorgerufen werden.
- § 6 regelt ergänzende Anforderungen an den Betreiber, wie z.B. Überwachung und Wartung der Anlagen in sicherheitstechnischer Hinsicht oder Schulung des Personals zur Vorbeugung von Fehlverhalten.
- Neben den in §§ 5 - 6 aufgeführten Vorkehrungen zur Begrenzung der Auswirkungen von Störfällen kommen konkret solche Maßnahmen wie Wasserberieselungseinrichtungen, Schutzmauern, Werkfeuerwehr usw. in Betracht.<sup>10</sup>
- Die Wahrung angemessener Sicherheitsabstände zwischen Betriebsbereich und benachbarten Schutzobjekten ist nach § 3 Abs. 5 der 12. BImSchV keine Betreiberpflicht. Diese Vorschrift dient gemäß der Gesetzesbegründung der Klarstellung, dass die in Art. 13 der Richtlinie 2012/18/EU (Seveso III) im Rahmen der Überwachung der Ansiedlung geforderte Wahrung angemessener Sicherheitsabstände zwischen Betriebsbereich und benachbarten Schutzobjekten keine Betreiberpflicht darstellt.<sup>11</sup> Die Wahrung angemessener Sicherheitsabstände ist vorrangig im Rahmen der Bauleitplanung<sup>12</sup> bzw. im Rahmen von Entscheidungen über die Zulassung von Vorhaben<sup>13</sup> zu beachten. Hintergrund des § 3 Abs. 5 der 12. BImSchV ist der, dass die Grenzen jederzeit von Dritten – z.B. durch heranrückende Wohnbebauung – verändert werden können. Damit

<sup>10</sup> Rebentisch, NVwZ 2017, 1569, 1572.

<sup>11</sup> BT- Drs. 238/16, S. 47.

<sup>12</sup> Vgl. BT-Drs. 18/9417, S. 16 f.

<sup>13</sup> EuGH, Ur. v. 15. 9. 2011 – C-53/10, EuZW 2011, 873, Rn. 35.

entzieht sich die Wahrung angemessener Sicherheitsabstände in der Regel der Kontrolle des Betreibers. Sicherheitsabstände sollen aber als Maßnahme (nicht Verpflichtung) dann in Betracht kommen, wenn der Betreiber selbst über sämtliche im Abstand befindlichen Grundstücke verfügt und diese von Schutzobjekten freihält.<sup>14</sup> § 3 Abs. 5 der 12. BImSchV steht jedoch nicht dem entgegen, dass es sich beim Sicherheitsabstand gleichwohl um eine vorbeugende Maßnahme im Sinne des § 3 Abs. 3 der 12. BImSchV handelt. Die Einhaltung eines ausreichenden Sicherheitsabstands zu Schutzobjekten kommt zusätzlich zu den bereits genannten als vorbeugende Maßnahme grds. in Betracht.<sup>15</sup>

- § 3 Abs. 5 der 12. BImSchV lässt zudem die sonstigen, nicht von der Norm erfassten Pflichten der Betreiber, für den Schutz ihrer Nachbarschaft zu sorgen, unberührt.<sup>16</sup>
- Nach § 8 ist außerdem vor Inbetriebnahme ein schriftliches Konzept zur Verhinderung von Störfällen auszuarbeiten und der zuständigen Behörde auf Verlangen vorzulegen.
- § 8a enthält bestimmte Informationspflichten des Betreibers. Danach hat der Betreiber der Öffentlichkeit bestimmte Informationen ständig zugänglich zu machen. Darunter fallen u.a. solche Angaben wie Name oder Firma des Betreibers und vollständige Anschrift des Betriebsbereichs sowie eine verständlich abgefasste Erläuterung der Tätigkeiten im Betriebsbereich.

### Erweiterte Pflichten

Für Betriebsbereiche der oberen Klasse, in denen Wasserstoff in einer **Menge von 50.000 kg** oder mehr vorhanden ist, gelten außerdem die **erweiterten Pflichten** der §§ 9 bis 12 der 12. BImSchV. Die erweiterten Pflichten nach der 12. BImSchV (§§ 9 – 12 12. BImSchV) ergänzen die Grundpflichten und erfassen unter anderem solche Pflichten wie

- die Erarbeitung und Fortschreibung von Sicherheitsberichten inkl. Schaffung eines Sicherheitsmanagementsystems (§ 9 der 12. BImSchV),
- die Aufstellung interner Alarm- und Gefahrenabwehrpläne und Übermittlung der für die Erstellung externer Alarm- und Gefahrenabwehrpläne erforderlichen Informationen an die zuständigen Behörden (§ 10 der 12. BImSchV) sowie
- über den § 8a hinausgehende Informationspflichten (§ 11 der 12. BImSchV). Darunter fallen u.a. allgemeine Informationen zu den Gefahren, die von einem Störfall ausgehen können, einschließlich ihrer möglichen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt und zusammenfassende Darstellung der wesentlichen Störfallszenarien und der Maßnahmen, mit denen diese Szenarien verhindert werden oder ihre Auswirkungen begrenzt werden sollen. Durch die Informationen sollen die Beschäftigten,

<sup>14</sup> Landmann/Rohmer UmweltR/Hansmann/König, 92. EL Februar 2020, 12. BImSchV § 3 Rn. 28.

<sup>15</sup> Rebentisch, NVwZ 2017, 1569, 1572.

<sup>16</sup> Landmann/Rohmer UmweltR/Hansmann/König, 92. EL Februar 2020, 12. BImSchV § 3 Rn. 30.

die Nachbarn und die Allgemeinheit besser in die Lage versetzt werden, sich gegen die Auswirkungen eines Störfalls zu schützen.

### **Zuständigkeit**

Die zuständige Planfeststellungsbehörde für „Betriebsanlagen der Eisenbahnen des Bundes“ ist gemäß § 3 Abs. 1 Nr. 1 und Abs. 2 Satz 2 BEVVG das **Eisenbahn-Bundesamt (EBA)**. Für nicht bundeseigene Bahnen richtet sich die Zuständigkeit nach Landesrecht (§ 5 Abs. 1a Nr. 2 lit. a AEG). Sofern der ZVNL Vorhabenträger wäre, dürfte die Landesdirektion Sachsen zuständig sein.

### **Dauer und Ablauf des Verfahrens**

Die Dauer eines Planfeststellungsverfahrens (Antragstellung bis Erlass Planfeststellungsbeschluss) hängt vom Einzelfall ab. Entscheidend sind Art und Umfang des Vorhabens, die Qualität der Planunterlagen, etwaige Anpassungen der Planung, Anzahl und Inhalt der Einwendungen und Stellungnahmen sowie gesetzliche Verfahrensvorschriften. In der Regel beträgt die **Gesamtdauer eines Planfeststellungsverfahrens ein bis drei Jahre** (nach Angaben des EBA).

Ein **Plangenehmigungsverfahren und ein Fall unwesentlicher Bedeutung dürfte dagegen ca. 1 Jahr dauern** (zzgl. der für die Planung bzw. Vorbereitung der Unterlagen bis zur Antragstellung notwendigen Zeiträume).

Der Verfahrensablauf sieht grob skizziert wie folgt aus:

- Antrag auf Planfeststellung bei der Planfeststellungsbehörde/Anhörungsbehörde (entweder EBA oder örtlich zuständige Behörde) unter Beifügung spezifischer Planunterlagen □ Einleitung des Anhörungsverfahrens (§ 73 VwVfG)
- Anforderung von Stellungnahmen betroffener Behörden durch das EBA bzw. die örtlich zuständige Behörde
- Auslegung des Plans für die Dauer eines Monats □ Jeder, dessen Belange durch das Vorhaben berührt werden, kann bis zwei Wochen nach Ablauf der Auslegungsfrist Einwendungen gegen den Plan erheben.
- Behandlung von Einwendungen, Stellungnahmen, Erörterungstermin.

Erlass des Planfeststellungsbeschlusses als Verwaltungsakt oder Ablehnung des Antrags durch die Planfeststellungsbehörde

**Die Realisierung des Vorhabens kann sich zusätzlich verzögern, wenn Dritte (z.B. Nachbarn) gegen den Planfeststellungsbeschluss gerichtlich vorgehen.** Von den Wirkungen des Planfeststellungsbeschlusses Betroffene können nämlich die Verletzung drittschützender planungsrechtlicher Normen rügen. Ferner müssen auch hier Bauzeit etc. berücksichtigt werden.

### **Kosten**

Die **Kosten** lassen sich schwer exakt prognostizieren. Die wesentlichen Kostenpositionen sind:

- Grunderwerb (Ankauf / Pacht)
- Anlagenplanung
- Anlagenbau (Tankstelle)
- Infrastruktur zur Erzeugung (Elektrolyseur o.ä.) oder Zuführung Wasserstoff (Rohrleitung oder Trailer)
- Betriebskosten.

### **Regulatorische Einordnung der Wasserstofftankstelle und Beschaffung des Wasserstoffs**

Regulierungsrechtlich sind die Wasserstofftankstellen nach unserer Einschätzung, die in der Literatur geteilt wird, als Serviceeinrichtungen im Sinne von „Einrichtungen für die Brennstoffaufnahme“ gemäß Anlage 2 Nr. 2 h) ERegG einzuordnen. Bestätigende Rechtspraxis dazu liegt aber, soweit ersichtlich, noch nicht vor. Zwar wird der Gesetzgeber bei Formulierung dieses Tatbestandes wohl vorrangig Dieseltankstellen vor Augen gehabt haben. Der Wortlaut ermöglicht jedoch auch zwanglos eine Subsumtion alternativer Brennstoffe, wie insbesondere Wasserstoff.

Konsequenzen der Einordnung der Wasserstofftankstelle als Serviceeinrichtung wären:

- Zugangsberechtigte nach § 1 Abs. 12 ERegG können **Zugangsansprüche zu der Ladestation** geltend machen (§ 11 Abs. 2 ERegG). Der Betreiber muss insoweit regulierte Nutzungsbedingungen einschließlich regulierter Entgelte aufstellen (§ 19 Abs. 2 ERegG). Theoretisch könnte es insoweit zu Kapazitätskonflikten um die Nutzung kommen; insbesondere dürfte sich der Eigentümer kein Vorrangrecht einräumen (arg e § 13 Abs. 3 Nr. 2 ERegG). Praktisch würde sich das Problem indes nur stellen, wenn auch andere Züge konkret mit Wasserstoff-Ladebedarf auf der Strecke verkehren würden, wovon nicht auszugehen ist.
- Der Betreiber der Wasserstofftankstelle darf dabei nach unserer Einschätzung entscheiden, die Wasserstofflieferungen zu monopolisieren, d.h. den Wasserstoff über die Ladeinfrastruktur exklusiv zu stellen. Anlage 2 Nr. 2 h) ERegG weist die Bereitstellung von Brennstoffen dem Betreiber der Brennstoffeinrichtung als integrale Leistung zu (und nicht nur als Zusatzleistung nach Anlage 2 Nr. 3 Nr. 1 ERegG, wie dies beim Fahrstrom der Fall ist). In der Literatur wird sogar weitergehend vertreten, dass der Betreiber der „Einrichtung für die Brennstoffaufnahme“ sogar *verpflichtet* ist, den Brennstoff zu liefern, da es sich um seine „Pflichtaufgabe“ handelte.<sup>17</sup> Dies würde ein Modell schwierig machen, in welchem der Betrieb der Wasserstofftankstelle und die Lieferung des Wasserstoffs an zwei verschiedene Unternehmen vergeben werden sollen. Bestätigende Rechtspraxis dazu liegt allerdings auch noch nicht vor.

---

<sup>17</sup> Maas/ter Steg, in: Kühling/Otte, AEG/ERegG, 2020, Anl. 2 ERegG Rdn. 41.

### **Notwendigkeit einer Kooperation mit der DB**

Sofern die Wasserstofftankstelle auf Grundstücken oder in Infrastruktur der DB errichtet werden soll, bestünde insoweit eine Notwendigkeit zur Kooperation mit der DB, da keine gesetzlichen Ansprüche bestehen, dass die DB die Errichtung einer solchen Infrastruktur durch einen Dritten dulden oder gar aktiv unterstützen muss. Anders als bei der Betreiberschaft von Stromladeinfrastruktur ist aus unserer Sicht aber eher nicht zu erwarten, dass die DB auch die Betreiberschaft einer Wasserstofftankstelle übernehmen würde.

Sofern die DB lediglich das Grundstück stellt (Verkauf oder Pacht), bestünde keine weitere Abhängigkeit von einer Kooperation mit der DB. Finanzierung und Zeitplan wären in die Gestaltungsmacht des ZVNL gegeben. Der ZVNL könnte dann auch frei die Rolle und Person des Betreibers definieren.

## **3.2.4 Fahrzeugzulassung**

### **Genehmigungsrechtliche Vorgaben**

In Folge des 4. Eisenbahnpakets benötigt man seit dem 16.06.2020 für jedes Eisenbahnfahrzeug eine Genehmigung für das Inverkehrbringen von Fahrzeugen (GIF). Die GIF löst die bisherige Inbetriebnahmegenehmigung von Fahrzeugen ab.

Die GIF ist in Art. 14 Abs. 1 der Durchführungsverordnung (EU) 2018/545 geregelt, der mehrere Genehmigungstatbestände enthält. Grundsätzlich gilt, dass jedes neue Eisenbahnfahrzeug einer individuellen GIF bedarf. Soll bspw. ein neues Fahrzeug in Betrieb genommen werden, das gleichsam einen neuen Fahrzeugtyp darstellt, ist die GIF nach Art. 14 Abs. 1 lit. a) VO (EU) 2018/454 zu beantragen. Um weitere Fahrzeuge dieses Fahrzeugtyps in Betrieb nehmen zu dürfen, muss für das Musterfahrzeug neben der GIF ebenfalls nach Art. 14 Abs. 1 lit. a) VO (EU) 2018/454 eine Typengenehmigung beantragt werden. Zudem ist die Eintragung des Fahrzeugtyps im Register genehmigter Fahrzeugtypen (ERATV) erforderlich. Auf dieser Basis kann dann nach Art. 14 Abs. 1 lit. e) VO (EU) 2018/454 für die weiteren Fahrzeuge jeweils eine GIF auf der Grundlage eines Fahrzeugtyps (im vereinfachten Verfahren) erteilt werden.

Gemäß Art. 2 Nr. 22 der RL (EU) 2016/797, deren Durchführung die angesprochene VO (EU) 2018/454 dient, ist Antragsteller im Sinne der RL „eine natürliche oder juristische Person, die eine Genehmigung beantragt, wobei es sich um ein Eisenbahnunternehmen, einen Infrastrukturbetreiber oder andere natürliche oder juristische Personen wie einen Hersteller, einen Eigentümer oder einen Halter handeln kann“. Demnach dürften die GIF und die Typengenehmigung gemäß Art. 21, 24 der RL (EU) 2016/797 und Art. 14 Abs. 1 der Durchführungsverordnung (EU) 2018/545 von diesem Personenkreis beantragt werden können. In der Praxis ist in der Regel der Hersteller hierfür verantwortlich.

### Verantwortungszuweisung

Die Verantwortung für die Erteilung der notwendigen Genehmigungen sollte unabhängig vom Vergabemodell dem Fahrzeughersteller zugewiesen werden. Nur dieser hat die notwendige Produktkenntnis und -nähe, um sinnvoll ein Zulassungsverfahren zu führen.

### 3.3 Vergabemodelle

Bei der Beschaffung von SPNV-Betrieb und von Fahrzeugen unterscheiden wir nachfolgend, wie zuvor mit dem ZVNL abgestimmt, zwischen verschiedenen Varianten der Ausschreibung und Vertragsgestaltung, nämlich

- Modell 1 der „klassischen“ Vergabe aller Leistungen an ein EVU,
- Modell 2 der „Energiebereitstellung durch den AT“,
- Modell 3.a der der Fahrzeugbereitstellung durch den AT mit dem EVU als reinem SPNV-Betreiber, und
- Modell 3.b der Fahrzeugbereitstellung und -instandhaltung durch einen Dritten mit dem EVU als reinem SPNV-Betreiber.

Nachfolgend sollen die Modelle in Ergänzung dazu in rechtlicher Sicht diskutiert werden.

#### 3.3.1 Modell 1: „Klassische“ Vergabe aller Leistungen an ein EVU

In dieser Variante würde der AT im Ausgangspunkt nur einen Vertrag ausschreiben und abschließen, nämlich den Verkehrsvertrag mit dem EVU. Das EVU seinerseits müsste in eigener Verantwortung insbesondere folgende Leistungen beschaffen und sich vertraglich sichern:

- Fahrzeuge,
- Instandhaltung,
- Werkstatt,
- Energiebezug und
- Energieinfrastruktur.

#### Anwendbarkeit des Modells im vorliegenden Fall

Das klassische Modell stößt **bei Batteriezügen** vorliegend dort an seine Grenzen, wo eine Notwendigkeit zur Errichtung von Strom-Ladeinfrastruktur in vorhandenen Infrastruktureinrichtungen der DB und damit eine Abhängigkeit von der DB in Bezug auf Errichtung, Finanzierung und Zeitplan besteht (dazu oben D.I.1.b.cc). Bei Batteriezügen kommt das klassische Modell damit letztlich nur dann in Betracht, wenn

- die vorhandene Oberleitungsinfrastruktur zum Laden der Fahrzeuge ausreicht und keine neue Ladeinfrastruktur zu schaffen ist oder

- allenfalls in sehr untergeordnetem Umfang Ladeinfrastruktur in DB-Einrichtungen zu schaffen ist (z.B. Errichtung eines Elektranten in einem Bahnhof) und die Abhängigkeitsrisiken von der DB damit überschaubar sind, oder
- die Ladeinfrastruktur in eigenen Werkstätten oder sonstiger Infrastruktur des EVU errichtet wird.

Bei **Wasserstoffzügen** stößt das Modell dort an seine Grenzen, wo für das EVU keine Möglichkeit besteht, mit zumutbarem Aufwand an geeignete Grundstücke für den Betrieb der Wasserstofftankstelle zu gelangen. Insofern müsste der ZVNL die Bieter ggf. zumindest bei der Suche und Auswahl der Grundstücke unterstützen; ggf. sogar Grundstücke bereitzustellen. Sofern keine geeigneten Grundstücke zur Verfügung stehen, wäre das Modell schlicht nicht umsetzbar. Das würde auch ein entsprechendes Vergabeverfahren als unzulässig qualifizieren wegen Verstoß gegen den Verhältnismäßigkeitsgrundsatz aus § 97 Abs. 1 S. 2 GWB.

Ebenfalls stößt das Modell dann jedenfalls praktisch an seine Grenzen, wenn erkennbar ist, dass die EVU das Wagnis eines (beauftragten) Betriebs einer Wasserstofftankstelle nicht übernehmen werden, da die Wasserstoffinfrastruktur und -beschaffung für die EVU absolutes „Neuland“ darstellt und die Hersteller nicht mehr bereit wären, auch die Errichtung und den Betrieb der Wasserstofftankstellen zu übernehmen. In diesem Fall würden schlicht keine Angebote eingehen. Um das zu verhindern, sollte vorab durch eine Markterkundung geklärt werden, ob die EVU diese Leistungen mit erbringen würden.

### Zur vertragsrechtlichen Ausgestaltung

Der Verkehrsvertrag würde sich im Grundsatz nicht von einem klassischen Verkehrsvertrag mit umfassender EVU-Verantwortung unterscheiden. Mit Blick auf den Einsatz alternativer Antriebe (insbesondere also Batteriezüge) wären folgende Punkte insbesondere zu berücksichtigen:

- **Risiken der Zuverlässigkeit und Instandhaltung:** Da es sich bei innovativ angetriebenen Zügen noch nicht um eine erprobte Technik handelt, gibt es gewisse Unsicherheiten im Hinblick auf Funktionalität und Lebensdauer. Das gilt insbesondere für die Leistung und Lebensdauer der Batterien. Zudem ist zu erwarten, dass der Betrieb mittelfristig auch von besonderem Hersteller Know-how abhängig bleibt. Dies betrifft etwa die Wartung und Instandhaltung sowie mögliche Optimierungen während der Lebensdauer des Produkts. Derartige Punkte sind durch das EVU in dem Vertrag mit dem Hersteller eigenverantwortlich zu regeln. Der ZVNL braucht hierauf im Grundsatz keinen Einfluss zu nehmen, um den EVU nicht die möglichen Gestaltungsvarianten zu nehmen und wettbewerbliches Innovationspotential einzuschränken. Hinzuweisen bleibt aber auf die im AP 3.3 angeregte Erwägung, den EVU einen Mindestumfang an Serviceleistungen vorzugeben.
- **Komponentenpreise:** Mit Blick auf die ggf. schwer kalkulierbaren Kosten für die Erneuerung der Komponenten innovativer Antriebe (insbesondere Batterien oder

Brennstoffzellen) wäre zu überlegen, zur Vermeidung zu hoher Risikoaufschläge in dem Vertrag eine Regelung zur Prüfung und ggf. Anpassung des Zuschussbedarfs im Hinblick auf diese Komponenten nach Ablauf einer definierten Frist vorzusehen. Für eine solche Regelung bestehen vergaberechtlich enge Grenzen (vgl. § 132 Abs. 2 Nr. 1 GWB). Ggf. könnten die EVU insoweit auch zur Bildung einer Instandhaltungsrücklage verpflichtet werden.

- **Werkstattbetrieb und Ladestationen:** Der Werkstattbetrieb (und ggf. die Errichtung ergänzender Ladestationen in der Werkstatt) wäre nach eigenem Ermessen und auf Kosten des EVU vorzunehmen (das diese in sein Angebot einkalkuliert). Die notwendige Zusatzausstattung für Werkstätten für innovative Züge hält sich im Rahmen. Damit lägen auch die Suche nach einem geeigneten Grundstück und die Durchführung etwa notwendiger Genehmigungsverfahren für die Werkstattherichtung in der Verantwortung des EVU. Der ZVNL könnte und müsste aber ggf. Hilfestellung bei der Suche nach geeigneten Grundstücken leisten.
- **Energiebezug:** Der Energiebezug läge in der Verantwortung des EVU und wäre von diesem zu kalkulieren. Auch unter diesem Gesichtspunkt ist das „klassische“ Modell als positiv zu bewerten, weil das EVU die Energieparameter des Fahrzeugs direkt mit dem Hersteller abstimmen und in sein Angebot einfließen lassen kann (vgl. dazu auch).
- **Wiedereinsatzgarantie:** Das mit (innovativen) Fahrzeugbeschaffungen verbundene Marktrisiko des jeweiligen EVU, insbesondere da der künftige Einsatzbereich der Fahrzeuge in anderen Netzen auch aufgrund der Konfiguration der Züge für ein spezifisches Netz äußerst schmal ist, kann durch eine Wiedereinsatzgarantie gedämpft werden.
- **Gefährdungsbeurteilung:** Ggf. Verpflichtung des EVU, mit dem Netzbetreiber eine Gefährdungsbeurteilung zum Betrieb des innovativen Antriebsfahrzeugs in dem Netz vorzunehmen.

### Zum Vergaberecht

Im klassischen Modell wird nur ein Auftrag / Los vergeben: der Verkehrsvertrag. Vergaberechtlich ist eine solche klassische Auftragsgestaltung zulässig. Sie unterscheidet sich von herkömmlichen Verfahren nur dadurch, dass eine von Diesel- oder Elektrotraktion abweichende Antriebsart (Wasserstoff bzw. Batterie) vorgegeben wird.

### Bewertung

Zur Bewertung des „klassischen“ Modells in rechtlicher Hinsicht ist festzuhalten:

- Es weist die geringste Komplexität auf und dürfte für den ZVNL jedenfalls bei der Vergabe am einfachsten in der Durchführung sein.
- Es besteht in hohem Maße die Möglichkeit, dass EVU und Hersteller zusammenarbeiten, um ein für den konkreten SPNV-Betrieb optimal abgestimmtes Angebot (Fahrzeug und Betriebsprogramm) zu erzielen.
- Es ermöglicht dem EVU, selbst zu entscheiden, ob es in größerem Umfang eigene Prozesse und Know-how für die innovativen Fahrzeuge (insbes. Instandhaltung/Wartung) entwickelt oder diese Leistungen auf Subunternehmer auslagert (durch entsprechende Serviceverträge).
- Da das EVU die volle Verantwortung auch für die innovativen Antriebe trägt, wird es in seinem Angebot ggf. Wagnisaufschläge kalkulieren. Zudem wird es ggf. Risiken fehl einschätzen, was zu späteren Nachverhandlungen führen kann. Denkbar ist auch, dass sich EVU von den Risiken abschrecken lassen und sich so ggf. die Zahl der Bieter reduziert.
- Das Modell stößt an seine Grenzen, wo Batterieladeinfrastruktur in Anlagen der DB zu errichten ist. Beim Einsatz von Wasserstoffzügen würde die Zuweisung der Verantwortung für die Wasserstofftankstelle die vorbenannten Risiken und ihre Folgen ggf. noch einmal deutlich erhöhen.
- In Betracht gezogen werden könnte das Modell dann, wenn die Analyse ergibt, dass Batteriezüge eingesetzt werden sollen und keine Ladeinfrastruktur oder nur sehr untergeordnete in DB-Anlagen zu errichten ist (etwa, weil die Beladung über die vorhandenen Oberleitungen ausreicht und allenfalls ggf. ein Elektrant in einem Bahnhof zu ergänzen ist).

### 3.3.2 Modell 2: „Energiebereitstellung“ durch den AT

#### Anwendbarkeit des Modells im vorliegenden Fall

Bei diesem Modell würde der ZVNL die Bereitstellung der Ladeinfrastruktur (Batterieladeinfrastruktur oder Wasserstofftankstelle) sowie die Bereitstellung des Wasserstoffes organisieren, nicht aber die Bereitstellung des Fahrstrom, den das EVU je nach Situation frei am Markt beschaffen kann oder der von der DB als Betreiberin einer Ladeinfrastruktur gestellt würde (dazu oben D.1.1.b).

Dieses Modell kommt bei **Batteriezügen** vorliegend dann in Betracht, wenn Ladeinfrastruktur in Infrastruktureinrichtungen der DB zu errichten ist und dem EVU nicht zuzumuten ist, angesichts der Abhängigkeit von der DB in Bezug auf das „Ob“ der Errichtung, die Finanzierung und die Zeitfristen, die Verantwortung für die Errichtung der Ladeinfrastruktur zu übernehmen. In diesem Fall sollte der ZVNL den notwendigen Vertrag mit der DB schließen, da sonst das Risiko besteht, dass sich EVU von der Ausschreibungsgestaltung abschrecken lassen könnten.

Bei **Wasserstoffzügen** kommt das Modell ebenfalls dann in Betracht, wenn dem EVU Errichtung und Betrieb der Wasserstofftankstelle nicht zuzumuten ist oder nicht zugemutet werden soll, weil der ZVNL sonst eine zu starke Reduktion der Bieterzahl (oder zu hohe Wagnisaufschläge) fürchtet. Das vorliegende Modell setzt dabei freilich voraus, dass der ZVNL Errichtung und Betrieb der Wasserstofftankstelle selbst vertraglich vergibt. Soweit dies nicht gewollt ist, käme noch in Betracht, diese Aufgabe in einem anderen Vertragsmodell dem Hersteller zuzuordnen. Darauf gehen wir nachfolgend unter Punkt 3 ein.

### Zur vertragsrechtlichen Ausgestaltung

Der ZVNL muss in dieser Variante zwei Verträge schließen, nämlich über

- Errichtung und Betrieb der Ladeinfrastruktur (dazu unter aa) und
- den Verkehrsvertrag (dazu unter bb).

### Vertrag über Errichtung und Betrieb der Ladeinfrastruktur

Hier ist wieder zu unterscheiden, ob der ZVNL mit der DB einen Vertrag bezüglich der Batterie-Ladeinfrastruktur schließt (**dazu unter (1)**) oder mit einem Betreiber bezüglich der Wasserstofftankstelle (**dazu unter (2)**).

### Vertrag mit der DB über Batterieladeinfrastruktur

Ein solcher Vertrag sollte aus unserer Sicht folgendes beinhalten:

- **Errichtung der Ladeinfrastruktur (und Netzanschlüsse) mit Frist und Meilensteinen:** Zentral ist zunächst die vertragliche Verpflichtung zur Errichtung der Ladeinfrastruktur. Diese Pflicht sollte die Planung, die Genehmigung und den eigentlichen Bau bis zur Fertigstellung umfassen. Ebenfalls vorgeben sollte der ZVNL die Mindestleistungsfähigkeit bei mehreren möglichen Fahrzeugkombinationen. Sofern die Errichtung vorgelagerter Netzanschlüsse erforderlich ist, wäre auch diese Leistung als Pflicht der DB mit aufzunehmen. Dabei ist vorzugswürdig eine harte Endfrist zur Bereitstellung der Ladeinfrastruktur sowie, zur besseren Projektüberwachung, Zwischenfristen für die einzelnen Meilensteine zu setzen. Für den ZVNL drohen erhebliche Risiken, falls die DB die Ladeinfrastruktur nicht rechtzeitig zum Verkehrsstart bereitstellt. In diesem Fall könnte, nach Relevanz der Ladeinfrastruktur, der SPNV-Verkehr bzw. Teile des Betriebsprogramms nicht rechtzeitig beginnen. Es sind auch Schadensersatzansprüche des EVU denkbar, das Vorhaltekosten (Fahrzeuge, Finanzierung, Personal) und Einnahmeverluste (Zuschüsse) geltend machen könnte. Ein etwaiger Haftungsausschluss zu Lasten des EVU in dem

Verkehrsvertrag hätte möglicherweise zur Folge, dass die EVU mögliche Schäden in den Zuschuss einkalkulieren würden, so dass sich dieser erhöht.

- **Bereitstellung der Ladeinfrastruktur für die Dauer des Verkehrsvertrags:**  
Um zu verhindern, dass die DB die Ladeinfrastruktur während der Laufzeit des Verkehrsvertrages wieder stilllegt und abbaut, sollte eine entsprechende Bereitstellungspflicht verbindlich vereinbart werden.
- **Zugang:** Klargestellt werden sollte in dem Vertrag auch, dass die DB verpflichtet ist, die Ladeinfrastruktur während der Laufzeit des Verkehrsvertrages den Zugangsberechtigten nach dem ERegG diskriminierungsfrei zur Verfügung zu stellen. Dies ergibt sich allerdings so schon aus dem Gesetz; eine ergänzende vertragliche Verpflichtung hat insofern nur vorsorgliche Funktion. Nicht vereinbar mit dem ERegG wäre es allerdings, wenn der ZVNL die DB auf die bevorzugte Behandlung des vom ZVNL beauftragten EVU (z.B. Einräumung von Priorität bei Nutzungskonflikten) verpflichten würde.
- **Strombezug durch das EVU:** Im Idealfall wird in dem Vertrag mit der DB vereinbart, dass sie den Nutzern die freie Strombeschaffung ermöglicht. Sollte sich dies nicht durchsetzen lassen, könnte darüber nachgedacht werden, mit der DB zu vereinbaren, dass sie gegenüber dem ZVNL das Ausgangsniveau der Stromabgabe für das erste Jahr des Verkehrsvertrages festlegt; ein solcher Vertrag würde allerdings schnell an regulierungsrechtliche Grenzen stoßen, da der ZVNL (der selber Zugangsberechtigter im Sinne des ERegG ist) hinsichtlich der Nutzungsbedingungen keine „Sondervereinbarungen“ treffen darf, die anderen Zugangsberechtigten nicht zustehen. Wahrscheinlich bräuchte es einer solchen Festlegung des Stromabgabepreises durch die DB auch nicht zwingend. Für seine Kalkulation könnte sich der ZVNL an dem veröffentlichten Stromabgabepreisen der DB Energie GmbH in anderen Serviceeinrichtungen orientieren.
- **Finanzierung:** Vertraglich sind die Konditionen der Finanzierung zu regeln, insbesondere die Höhe des zugesagten Betrags, die Auszahlungsmodalitäten/Raten und die Frage, ob der Betrag (ggf. verzinst) rückzahlbar ist oder nicht. Sinnvoll wäre aus unserer Sicht, die Zahlungsbeträge an das fristgerechte Erreichen definierter Meilensteine zu koppeln.
- Die **Nutzungsbedingungen** für die Bereitstellung der Ladeinfrastruktur gegenüber den Zugangsberechtigten (und damit auch gegenüber dem vom ZVNL beauftragten EVU) sollten nicht Gegenstand der Vereinbarung mit der DB gemacht werden. Insoweit unterliegt die DB dem Diskriminierungsverbot des ERegG (§ 11 Abs. 2 ERegG). Das vom ZVNL beauftragte EVU muss

daher, wie jeder andere Zugangsberechtigte auch, den Zugang zur Ladeinfrastruktur bei der DB beantragen und entsprechende Nutzungsverträge zu den regulierten, veröffentlichten Nutzungsbedingungen schließen. Auch auf die von der DB erhobenen Infrastrukturnutzungsentgelte sollte der ZVNL keinen Einfluss nehmen. Regulierungsrechtlich darf die DB dabei Kosten insoweit nicht in die Nutzungsentgelte einkalkulieren, als der ZVNL diese als nicht rückzahlbare Baukostenzuschüsse finanziert hat.<sup>18</sup> Lediglich etwaige vom ZVNL erhobene Zinsen dürften als Kosten berücksichtigt werden.

### Vertrag mit einem Betreiber über die Wasserstofftankstelle

Ein Vertrag über Errichtung und Betrieb der Wasserstofftankstelle sollte folgende Elemente beinhalten.

- **Errichtung der Wasserstofftankstelle (mit Frist und Meilensteinen):** Der Dienstleister hat sich vertraglich zur Errichtung der Wasserstofftankstelle zu verpflichten. Diese Pflicht sollte die Planung, die Genehmigung und den eigentlichen Bau bis zur Fertigstellung umfassen. Dabei ist vorzugswürdig eine harte Endfrist zur Bereitstellung der Ladeinfrastruktur sowie, zur besseren Projektüberwachung, Zwischenfristen für die einzelnen Meilensteine zu setzen. Im Idealfall wird die Einhaltung der Meilensteine pönalisiert, da für den ZVNL die Umsetzung des gesamten SPNV-Betriebsprogramms von der rechtzeitigen Bereitstellung der Tankstelle abhängt. Auch insoweit drohen erhebliche Risiken, falls die Wasserstofftankstelle nicht rechtzeitig zum Verkehrsstart bereitstellt. In diesem Fall könnte der SPNV-Verkehr nicht rechtzeitig beginnen. Es sind auch Schadensersatzansprüche des EVU nicht auszuschließen, das Vorhaltekosten (Fahrzeuge, Finanzierung, Personal) und Einnahmeverluste (Zuschüsse) geltend machen könnte.
- **Betrieb der Wasserstofftankstelle für die Dauer des Verkehrsvertrags:** Zentral ist weiter eine vertragliche Verpflichtung zum Betrieb der Wasserstofftankstelle mindestens für die Laufzeit des Verkehrsvertrages. Ggf. sollte eine Verlängerungsoption zugunsten des ZVNL für den Fall vereinbart werden, dass auch der anschließende Verkehrsvertrag über Wasserstoffzüge bedient werden wird.

<sup>18</sup> Bühlmeier, in: Kühling/Otte, AEG/ERegG, 2020, § 32 ERegG, Rdn. 28.

- **Ausfallsicherheit:** Es müssen Regelungen aufgenommen werden, die einen Fortbetrieb der Wasserstofftankstelle im Fall einer Insolvenz des Betreibers oder einer Zwangsvollstreckung in die Tankstelle ermöglichen.
- **Wartung/Instandhaltung:** Im Hinblick auf die Angewiesenheit des SPNV-Betriebs auf die Wasserstoffbelieferung sollte auch vereinbart werden, dass der Dienstleister die Wasserstofftankstelle wartet, sie instand hält und Störungen auf ein Minimum reduziert. Im Idealfall werden (pönalisierte) Verfügbarkeitsgarantien und Reaktionszeiten für Störungen sowie „verkehrsschonende“ Zeiten für Reparaturarbeiten vereinbart.
- **Zugang:** Geregelt werden sollte in dem Vertrag auch, dass der Dienstleister verpflichtet ist, die Wasserstofftankstelle während der Laufzeit des Verkehrsvertrages den Zugangsberechtigten nach dem ERegG diskriminierungsfrei zur Verfügung zu stellen. Dies ergibt sich allerdings so schon aus dem Gesetz; eine ergänzende vertragliche Verpflichtung hat insofern nur vorsorgliche Funktion. Nicht vereinbar mit dem ERegG wäre es allerdings, wenn der ZVNL den Betreiber auf die bevorzugte Behandlung des vom ZVNL beauftragten EVU (z.B. Einräumung von Priorität bei Nutzungskonflikten) verpflichten würde. Ebenfalls geregelt werden sollte die Verpflichtung, dem EVU die Nutzung der Wasserstofftankstelle einzuräumen und den Bezug von Wasserstoff zu ermöglichen. Zu diesem Zweck werden eigene Nutzungsverträge zwischen dem Betreiber und dem EVU geschlossen. Der eisenbahnrechtlich geforderte diskriminierungsfreie Zugang potentiell auch für dritte EVU muss formal gewahrt werden.
- **Bereitstellung des Wasserstoffs:** Ebenfalls geregelt werden sollte in dem Vertrag die Verpflichtung des Dienstleisters, den für den SPNV-Betrieb notwendigen Wasserstoff bereitzustellen und an das EVU abzugeben. Die Verpflichtung sollte mindestens für die Dauer des Verkehrsvertrages und ggf. mit Verlängerungsoption für die Laufzeit eines sich anschließenden Verkehrsvertrags bestehen. Geregelt werden sollte eine Verpflichtung zur Bereitstellung von Wasserstoff mindestens in der Menge, wie er für den Verkehrsbetrieb des EVU benötigt wird. Hier sollte genau definiert werden, welche Mengen jeweils vorrätig sein müssen, damit keine Lieferengpässe entstehen.
- **Straßenseitige Nutzung:** Weiterhin zu regeln wäre das Recht des Betreibers, die Wasserstofftankstelle auch für den Straßenverkehr zu öffnen.

- **Finanzierung:** Ebenfalls zu regeln ist die Finanzierung der Wasserstofftankstelle. Es kommen drei „Finanzierungsquellen“ in Betracht: (1) Finanzierungsbeitrag des ZVNL, (2) Nutzungsentgelte und Wasserstoffentgelte des EVU (die letztlich auch vom ZVNL übernommen werden) und (3) Einnahmen über den straßenseitigen Verkauf des Wasserstoffs. Aus welchen Quellen sich der Betreiber der Wasserstofftankstelle in welchem Umfang finanziert, ist in dem Vertrag mit dem ZVNL zu regeln.
  - Ein Modell könnte vorsehen, dass die Errichtungskosten (überwiegend) aus dem definierten Finanzierungsbeitrag des ZVNL abgedeckt werden. Dieser sollte dem Umfang nach klar begrenzt sein; das Risiko von Mehrkosten sollte der Dienstleister tragen. Sinnvoll wäre es, die Auszahlung in einzelnen Raten bei Erreichen definierter Meilensteine vorzusehen.
  - Die ggf. verbleibenden Errichtungskosten und die Betriebskosten könnten durch die Bausteine Infrastrukturentgelte des EVU und straßenseitige Wasserstoffabgabe gedeckt werden.
  
- **Preis für Wasserstoffabgabe:** Der Preis für die Wasserstoffabgabe an das EVU (und auch der straßenseitige Wasserstoffabgabepreis) sollten auf Basis der Wasserstoffbezugskosten zuzüglich eines Kosten- und Margenaufschlags des Betreibers kalkuliert werden. Der Preis für die Wasserstoffabgabe an das EVU sollte zumindest für die ersten Jahre des Verkehrsvertrages fixiert sein. Da der Betreiber insofern seine Bezugskosten (plus Aufschlag) weiterreicht, wird er natürlich auch nur für einen solchen Zeitraum Preisstabilität gewährleisten können, wie er seinerseits einen Festpreis mit seinem Lieferanten vereinbaren kann. Für die Folgezeit sollte vorgesehen werden, dass der Betreiber die Bezugspreise zuzüglich eines Aufschlages weiterreichen darf, wobei er bei sinkenden Preisen einen Teil der Ersparnis einbehalten darf.

Der Preis für die straßenseitige Abgabe des Wasserstoffs sollte vertraglich nicht vorgegeben werden, so dass der Betreiber hier vollständig unternehmerisch agieren kann.

### Verkehrsvertrag

Bei dem Verkehrsvertrag kann es sich weiterhin um eine „klassischen“ Verkehrsvertrag handeln, bei dem das EVU grundsätzlich für die eigenverantwortliche Beschaffung aller relevanten Leistungen verantwortlich ist. Insofern kann auf die Ausführungen oben zu Modell 1 verwiesen werden. Die einzige Abweichung, und insofern Ausnahme zum „klassischen“ Verkehrsvertrag liegt darin, dass das EVU nicht die noch zu errichtende

Energieinfrastruktur zu verantworten hat. Das EVU wäre in dem Verkehrsvertrag zu verpflichten, die vom ZVNL organisierte Ladeinfrastruktur auch zu nutzen.

Mit Blick auf die **Ladeinfrastrukturentgelte (für die Nutzung der Batterieladeinfrastruktur bzw. für die Wasserstofftankstelle) und den Preis für den Bezug der Energie (Strom bzw. Wasserstoff)** ist zu beachten:

- Auf die von der DB bzw. dem Betreiber der Wasserstofftankstelle erhobenen Nutzungsentgelte für die Ladeinfrastruktur hat das EVU keinen Einfluss und kann diese in ihrer künftigen Entwicklung auch nicht abschätzen. Für die Bieter ist dieser Kostenpunkt daher kein beeinflussbarer Wettbewerbsparameter. Die Situation ist vergleichbar mit den Trassenpreisen. Insofern könnte erwogen werden, die Nutzungsentgelte für die Ladeinfrastruktur aus dem vom EVU kalkulierten Zuschuss auszunehmen und die Beträge, wie dies bei den Trassenkosten üblich ist, als durchlaufende Kosten zu behandeln.
- Sollte die DB auch die Stromabgabe in der Ladeinfrastruktur „monopolisieren“, würde auf den ersten Blick auch hier gelten, dass die entsprechenden Preise für die EVU nicht beeinflussbar sind, ihre Entwicklung schwer abschätzbar ist und für die Bieter keinen beeinflussbaren Wettbewerbsparameter darstellen. Gleiches gilt für den Wasserstoffabgabepreis durch den Betreiber der Wasserstofftankstelle.

Dennoch dürfte eine 1:1-Erstattung auch der Strompreise durch den ZVNL nicht angezeigt sein. Wenn auch nicht der Preis, so ist doch die Menge des bezogenen Stroms durch die EVU bis zu einem gewissen Grad beeinflussbar, insbesondere durch energiesparende Fahrweise und die unterschiedliche Ausrichtung der Fahrzeuge. Eine 1:1-Erstattung der Energiekosten würde den EVU jeden Anreiz zur Verbrauchs- und damit Kostenminimierung nehmen. Hinzu kommt, dass die EVU mit den veröffentlichten Strompreisen der DB Energie GmbH in anderen Serviceeinrichtungen durchaus einen Orientierungspunkt für ihre Kalkulation haben. In gleicherweise könnte der ZVNL den Betreiber der Wasserstofftankstelle verpflichten, seinen Wasserstoffpreis vorab bekannt zu geben. Die Kosten für den Energiebezug an der Ladeinfrastruktur bzw. Wasserstofftankstelle sollten daher Teil des von den EVU zu kalkulierenden Zuschussbedarfs sein.

- Der ZVNL sollte das EVU auf die Nutzung der bereit gestellten Ladeinfrastruktur verpflichten, um zu verhindern, dass das EVU parallele Strukturen aufbaut.
- Denkbar wäre, dass sich der ZVNL in dem Verkehrsvertrag gegenüber dem EVU verpflichtet, für die Bereitstellung der Ladeinfrastruktur zu sorgen. Daraus würden dann freilich Haftungsrisiken für den ZVNL folgen, falls die DB die Ladeinfrastruktur nicht rechtzeitig erstellt, ggf. auch bei einem späteren Ausfall bzw. Defekten der Ladeinfrastruktur.

Ratsamer dürfte es daher sein, keine eigene Verpflichtung zur Stellung der Ladeinfrastruktur einzugehen. Die Möglichkeit, die Ladeinfrastruktur zu nutzen, ist dann für das EVU Voraussetzung und Geschäftsgrundlage für die Leistungserbringung. Wird die Ladeinfrastruktur nicht rechtzeitig gestellt bzw. fällt diese aus, haftet der ZVNL dafür nicht. Allerdings haftet auch das EVU dafür nicht gegenüber dem ZVNL (anders als in dem „klassischen“ Modell, in der sich das EVU zur Bereitstellung der Ladeinfrastruktur verpflichtet). Das EVU wird bei Ausfall der Ladeinfrastruktur berechtigt sein, sein Betriebsprogramm, soweit es auf die Nutzung der Ladeinfrastruktur angewiesen ist, zu kürzen.

### Zum Vergaberecht

Vergaberechtlich ist zu unterscheiden:

Sofern die DB mit der Errichtung und dem Betrieb von Energieladeinfrastruktur in ihren Serviceeinrichtungen beauftragt wird, ist dieser Vorgang voraussichtlich vergaberechtsfrei, weil insoweit nur ein Anbieter in Betracht kommt.

Soll ein Dienstleister mit der Errichtung und dem Betrieb einer Wasserstofftankstelle beauftragt werden, sind bei diesem Modell zwei Aufträge auszuschreiben: (1) Verkehrsvertrag und (2) Errichtung und Betrieb der Wasserstofftankstelle.

Der Gewinner des Loses „Verkehrsvertrag“ wird zur Nutzung der Ladestation(en) bzw. Wasserstofftankstelle verpflichtet sein. Vergaberechtlich ist eine solche klassische Auftragsgestaltung zulässig. Sie unterscheidet sich von herkömmlichen Verfahren nur dadurch, dass eine von Diesel- oder Elektrotraktion abweichende Antriebsart (Wasserstoff bzw. Batterie) und ggf. die Nutzung einer bestimmten Ladestation vorgegeben wird. Soweit der ZVNL für diese das rollende Material bzw. die Nutzung einer bestimmten Ladestation einengende Vorgabe aber sachliche und nachvollziehbare Gründe anführen kann, ist sie vergaberechtlich unproblematisch.

### Bewertung

Zur Bewertung dieses Modells in rechtlicher Hinsicht (zu den fachlichen Bewertungen vgl. AP 3.3, Ziff. 5.2) ist festzuhalten:

- Das Modell ist stark an das „klassische“ Modell angenähert und verhilft dessen Grundstruktur dort zur Umsetzung, wo das „klassische“ Modell aufgrund der Schwierigkeiten der Errichtung der Infrastruktur in Reinform nicht umsetzbar ist.
- Sofern der ZVNL die DB mit der Errichtung von Batterieladeinfrastruktur beauftragt, dürfte dieses Modell auch weiterhin mit wenig Komplexität behaftet sein.

- Im Fall einer Beauftragung der Wasserstofftankstelle durch den ZVNL nimmt die Komplexität hingegen stark zu. Der ZVNL müsste den Vertrag mit dem Errichter und Betreiber der Wasserstofftankstelle überwachen und bei Verstößen (etwa Fristüberschreitungen etc.) ggf. einschreiten und würde das Risiko eines Ausfalls (z.B. Insolvenz) des Betreibers tragen.
- Das Modell nimmt dem EVU nicht die Verantwortung für die innovativen Antriebe ab. Damit bleiben die bereits beim „klassischen“ Modell benannten Nachteile bestehen.
- In Betracht gezogen werden könnte dieses Modell dann, wenn die Analyse ergibt, dass Batteriezüge eingesetzt werden sollen und eine Ladeinfrastruktur in DB-Anlagen zu errichten ist (etwa eine Oberleitungs-Insel über einem Abstellgleis).

### 3.3.3 Modell 3.a: Fahrzeugbereitstellung durch den AT

Um dem EVU das Risiko des Wiedereinsatzes, besonders aber auch der Funktionalität, Zuverlässigkeit und Lebenszyklus-Kosten mit Bezug auf die bislang noch wenig erprobte Batterietechnik zu nehmen, kommt grundsätzlich auch ein Modell in Betracht, bei dem der ZVNL die Fahrzeuge erwirbt und diese dem EVU beistellt.

In diesem Fall würde der ZVNL die Risiken der Fahrzeugbereitstellung und Instandhaltung im Verhältnis zum EVU übernehmen. Der ZVNL beschafft im Vorfeld die Fahrzeuge und eine ECM.

Dieses Modell entspricht der bislang von anderen Aufgabenträgern gewählten Vorgehensweise bei der Verkehrsausschreibung von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben.

#### Anwendbarkeit des Modells im vorliegenden Fall

Nach unserem Verständnis ist ein solches Modell für den ZVNL derzeit nicht umsetzbar, da der Erwerb von Betriebsmitteln für den Verkehrsbetrieb vom ZVNL derzeit nicht möglich ist. Gleichwohl wurden wir gebeten, dieses Modell kursorisch vorzustellen.

#### Zur vertragsrechtlichen Ausgestaltung

Der ZVNL müsste in dieser Variante folgende Regelungskomplexe vertraglich zuordnen:

- Fahrzeuglieferung durch den Hersteller
- Wartung und Instandhaltung
- Errichtung und Betrieb der Ladeinfrastruktur
- Verkehrserbringung durch das EVU
- Beistellung der Fahrzeuge gegenüber dem EVU

Dazu im Einzelnen:

### Fahrzeuglieferung durch den Hersteller

Es wäre ein Fahrzeugliefervertrag zwischen dem Hersteller und dem ZVNL zu schließen. Da es sich bei Zügen mit alternativen Antrieben um Produkte mit neuer Technik handelt, die sich im Betrieb noch bewähren müssen und vermutlich der Optimierung bedürfen, wird der Hersteller aufgrund seines besonderen Know-hows für gewisse Aufgaben auf absehbare Zeit unersetzlich sein. Eine Aufgabe der Vertragsgestaltung sollte daher sein, sich einen möglichst guten und langfristigen Zugriff auf den Hersteller und sein besonderes Know-how zu ermöglichen.

Geregelt werden sollten insbesondere folgende Punkte:

- **Funktionale und technische Mindestanforderungen:** In einem Lastenheft, das mit Hilfe technischer Berater erstellt wird, sollten die funktionalen und technischen Mindestanforderungen an die Fahrzeuge vertraglich festgelegt werden. Es sollten auch alle bekannten Aufgabenstellungen und Schwierigkeiten benannt werden, für die der Hersteller eine Lösung finden muss. Erfasst werden sollten auch die Zusage einer Mindestverfügbarkeit, Mindestlaufleistung und Mindestlebensdauer, Kern-Leistungswerte (etwa für Reichweite und Tankzeiten), und Verbrauchskosten (für Energie sowie Ersatz- und Verschleißteile).
- **Umfang von Gewährleistungshaftung, Garantien und Verfügbarkeitszusagen:** Die technischen Leistungsversprechen sollten auf Rechtsfolgenseite mit möglichst weitreichenden Haftungsregelungen versehen werden, da die Risiken aus Fahrzeugverfügbarkeiten weitreichende Auswirkungen auf den SPNV-Betrieb haben können.
- **Übernahme Entwicklungsverantwortung durch den Hersteller:** Der Hersteller sollte das Entwicklungsrisiko bis zur erfolgreichen Inbetriebnahme der Fahrzeuge übernehmen. Alle mit der Entwicklung verbundenen Zusatzkosten (wie neue technische Normen oder Erkenntnisse) hat der Hersteller zu tragen.
- **Optimierung und Anpassungen der Leistungen des Herstellers:** Der Hersteller sollte Optimierungen und Anpassungen der Fahrzeuge auf einseitige Anforderungen von ZVNL durchführen, im Idealfall in weitem Umfang auf eigene Kosten.
- **Schulungen / Inbetriebnahmeunterstützung:** Der Hersteller sollte die Verantwortung für eine erfolgreiche Inbetriebnahme tragen. Zudem sollte er das Bedienpersonal umfassend schulen, insbesondere mit Bezug auf das Aufladen bzw. Tanken bei Brennstoffzellenfahrzeugen.
- **Absicherungen:** Der ZVNL sollte für verschiedene Krisensituationen möglichst insolvenzfest abgesichert werden. Zu den beriet zu stellenden Instrumenten können Vertragserfüllungs- und Gewährleistungsbürgschaften, Abtretung von Ansprüche gegen Vorlieferanten und Versicherungsschutz gehören. Auch sollte der Hersteller

das spezifische Know-how hinterlegen und dem ZVNL Zugriffsrechte erteilen, um die langfristige Durchführung des Verkehrsvertrags zu gewährleisten.

- **Option für Nachbestellungen weitere Fahrzeuge:** Eine solche Option wäre zur Sicherung weiterer Bedarfe aufzunehmen.

## Wartung / Instandhaltung

Die Aufgabe der Wartung und Instandhaltung könnte alternativ der Verantwortung des Herstellers oder des EVU zugeordnet werden.

- Für die Zuordnung zum EVU spricht, dass dann eine Schnittstelle zwischen der Erbringung der Verkehrsleistung und der begleitenden Wartung und Instandhaltung vermieden würde. Die Verantwortung für die Verkehre und den operativ reibungslosen Ablauf bliebe so in einer Hand.
- Gegen die Zuordnung zum EVU spricht allerdings, dass das EVU auf absehbare Zeit auf den Fahrzeughersteller angewiesen sein wird, um die Wartung und Instandhaltung ordnungsgemäß durchführen zu können. Deshalb könnte das EVU auch nur dann mit der Wartung und Instandhaltung beauftragt werden, wenn es so mit ausreichenden Informationen und Kalkulationen versorgt wird, dass eine Kalkulation des Aufwands und der Kosten möglich ist.

Da das Modell einer Beistellung der Fahrzeuge gerade auch unter dem Aspekt zu betrachten ist, dem EVU die Risiken aus dem Einsatz innovativer Fahrzeug abzumildern, spricht viel dafür, den Hersteller auch mit Wartung und Instandhaltung zu betrauen.

Für die Zuordnung zum Hersteller spricht auch, dass damit eine klärungsbedürftige Schnittstelle zur Fahrzeuglieferung (insb. zu Gewährleistungsthemen) vermieden würde.

Ein Wartungs- und Instandhaltungsvertrag mit dem Hersteller sollte formal getrennt von dem Fahrzeugliefervertrag abgeschlossen werden. Wichtige Regelungsgegenstände wären insbesondere:

- **Leistungsumfang:** Der Vertrag sollte die komplette Bandbreite an geplanter und ungeplanter Instandhaltung einschließlich Störungsbeseitigung und Rufbereitschaft abdecken, einschließlich der Versorgung mit Ersatz- und Verschleißteilen. Geregelt werden sollten auch verbindliche Reaktionszeiten.
- **Preissicherheit:** Es sollten möglichst lange Festlaufzeiten und im Anschluss transparente Regelungen zu Preisanpassungen (Indexklauseln, Vorkostenbasis) vereinbart werden.
- Die **Laufzeit** des Vertrages sollte der Fahrzeuglebensdauer entsprechen und wird damit über die Laufzeit eines Verkehrsvertrages hinausgehen. Denkbar ist auch die optionale Verlängerung der Laufzeit auf die Perioden von zwei Verkehrsverträgen.

## Errichtung und Betrieb der Ladeinfrastruktur

Hinsichtlich der Energieinfrastruktur ist zu entscheiden, ob die Verantwortung insoweit

- dem Zugerhersteller,
- dem EVU
- einem eigenen Betreiber (DB bei Stromladeinfrastruktur bzw. Dritter bei Wasserstofftankstelle)

aufzulegen ist. Hier gelten die bereits dargelegten Überlegungen entsprechend:

- Soweit eine Notwendigkeit zur Errichtung von Strom-Ladeinfrastruktur in vorhandenen Infrastruktureinrichtungen der DB und damit eine Abhängigkeit von der DB in Bezug auf Errichtung, Finanzierung und Zeitplan besteht, dürfte die Zuordnung der Ladeinfrastruktur die die Verantwortung des EVU oder des Herstellers nicht zweckmäßig sein. Insofern hätte der ZVNL wie im Modell 2 einen eigenen ergänzenden Vertrag mit der DB zu schließen.
- Bei Wasserstoffzügen wäre zu prüfen, ob die Zuordnung der Errichtung und des Betriebs in die Verantwortung des EVU oder des Herstellers mit Blick auf die Grundstückssituation und die Marktbedingungen zweckmäßig ist. Möglicherweise kann einem Fahrzeughersteller (wie insbesondere Alstom) deutlich eher zugemutet werden, Errichtung und Betrieb von Wasserstofftankstellen zu verantworten. Es kommt allerdings auch hier darauf an zu beurteilen, ob die Zuordnung dieser Leistung zum Hersteller auch praktisch durchsetzbar ist. Das sollte im Wege von Markterkundungen verifiziert werden.

Hinsichtlich der zu regelnden Inhalte eines eigenen Vertrages über Errichtung und Betrieb der Ladeinfrastruktur verweisen wir auf die Ausführungen zum Modell 2.

## Verkehrsvertrag

Bei dem Verkehrsvertrag kann es sich im Grundsatz weiterhin um eine „klassischen“ Verkehrsvertrag handeln, bei dem das EVU grundsätzlich für die eigenverantwortliche Beschaffung aller relevanten Leistungen verantwortlich ist. Insoweit kann auf die Ausführungen zu Modell 1 verwiesen werden. Als Ausnahmen sind zu nennen, dass das EVU nicht verantwortlich ist für

- Fahrzeugbeschaffung,
- Wartung und Instandhaltung,
- ggf. Ladeinfrastruktur.

Die notwendigen Regelungsinhalte im Verkehrsvertrag mit Bezug auf die durch einen Dritten zu erbringende Ladeinfrastruktur haben wir beim Modell 2 dargestellt.

Mit Bezug auf die vom Fahrzeughersteller zu erbringenden Fahrzeuglieferungen sowie Wartungs- und Instandhaltungsleistungen müssten in dem Verkehrsvertrag die Schnittstellen

zwischen den Leistungen des EVU und den Leistungen des Herstellers insbesondere hinsichtlich Fahrzeuglieferung, Wartung, Instandhaltung im Einzelnen geregelt werden.

### **Beistellung der Fahrzeuge gegenüber dem EVU**

Zwischen dem ZVNL als dem Erwerber der Fahrzeuge und dem EVU als dem Nutzer der Fahrzeuge wäre ein Vertrag über deren Beistellung zu schließen. In Betracht kommen hier insbesondere Pachtverträge.

### **Vergaberecht**

Bei diesem Modell wird der Auftrag in zwei bis drei Losen vergeben werden: (1) Verkehrsvertrag und (2) Fahrzeugbeschaffung und Instandhaltung und ggf. (3) Energieinfrastruktur. Der Gewinner des Loses „Verkehrsvertrag“ wird zur Nutzung der vom ZVNL beschafften Fahrzeuge und der Energieinfrastruktur verpflichtet sein.

Sofern die DB mit der Errichtung und dem Betrieb von Energieladeinfrastruktur in ihren Serviceeinrichtungen beauftragt wird, ist dieser Vorgang voraussichtlich vergaberechtsfrei, weil insoweit nur ein Anbieter in Betracht kommt.

Es ist denkbar, die Fahrzeugbeschaffung oder den Verkehrsvertrag mit der Beschaffung der Wasserstofftankstelle und der Wasserstofflieferung in einem Los zu kombinieren. Dabei verbleibt jedoch ein geringes Risiko, das gesetzlich nach § 97 Abs. 4 GWB hier eine Losaufteilung zwischen Errichtung/Betrieb und Wasserstofflieferung erforderlich sein könnte.

Denkbar ist hier ggf. auch ein Viertes Los: (4) Wasserstofflieferung, wobei doch mehr dafür spricht, im Fall der Vorgabe von Wasserstofffahrzeugen für die Wasserstofftankstelle und Wasserstofflieferung zur Vermeidung von Schnittstellenthemen eine Gesamtvergabe vorzunehmen.

Denkbar ist zudem, die Fahrzeugbeschaffung und Instandhaltung aufzuteilen, so dass mit (5) Fahrzeuginstandhaltung ein weiteres Los auszuschreiben wäre. Zur Vermeidung von Schnittstellenthemen bietet es sich aber auch hier an, Fahrzeuge und Instandhaltung aus einer Hand (Gesamtvergabe) zu beschaffen.

Vergaberechtlich ist eine solche Auftragsgestaltung zulässig. Sie unterscheidet sich von herkömmlichen Verfahren dadurch, dass dem EVU bestimmte Fahrzeuge beigestellt werden und die Nutzung einer bestimmten Ladestation sowie ggf. auch den Bezug von H<sub>2</sub> von einem bestimmten Lieferanten vorgegeben wird.

Soweit der ZVNL für diese einengende Vorgaben aber sachliche und nachvollziehbare Gründe anführen kann, ist die Gestaltung vergaberechtlich unproblematisch. Es kann davon ausgegangen werden, dass am Ende der vorliegenden Untersuchung aller Arbeitspakete Klarheit darüber besteht, ob bzw. welche sachlichen und nachvollziehbaren Gründe für die jeweiligen Gestaltungen sprechen.

### **Bewertung**

Zur Bewertung dieses Modells in rechtlicher Hinsicht ist festzuhalten:

- Das Modell nimmt dem EVU die Verantwortung für die innovativen Antriebe ab, so dass mit einer Erhöhung der Zahl der Bieter und ggf. geringeren Wagnisaufschlägen der EVU gerechnet werden kann. Es könnte sich daher als vorteilhaftes Modell darstellen.
- Für den ZVNL bedeutet dieses Modell freilich auch ein höheres Maß an Komplexität, da er die Lieferleistungen durch den Hersteller überwachen und ggf. sanktionieren muss und in der Verantwortung steht, dem EVU diese Leistungen weiterzugeben. Damit gehen für den ZVNL auch höhere administrative Aufwände und Kosten einher.
- Zu beachten ist auch, dass die Ladeinfrastruktur ggf. ergänzend zu beauftragen ist. Soweit lediglich bei der DB Batterieladeinfrastruktur zu bestellen ist, dürfte für den ZVNL die daraus ergebende höhere Komplexität überschaubar bleiben.
- Im Fall einer Beauftragung der Wasserstofftankstelle durch den ZVNL nimmt die Komplexität hingegen stark zu. Wir verweisen insofern auf die Ausführungen oben. Dieser Aspekt würde stark dafür sprechen, dem Hersteller auch die Verantwortung für Errichtung und Betrieb einer Wasserstofftankstelle zuzuordnen.

### 3.3.4 Modell 3.b: Fahrzeugbereitstellung durch einen Dritten

Da der ZVNL nicht selbst die Fahrzeuge erwerben und beistellen kann, könnte für diese Leistung ein Dritter als Dienstleister eingesetzt werden, der die Eigentümeraufgaben anstelle des ZVNL übernimmt. Dieser Dienstleister wäre dann für Erwerb und Instandhaltung zuständig, und zwar sinnvollerweise aufgrund der Lebenserwartung der Fahrzeuge für zwei Verkehrsvertragsperioden. Der Dienstleister würde selbst Eigentümer der Fahrzeuge und würde diese dann dem EVU verpachten. Nach unseren Beobachtungen gibt es Unternehmen in der Branche, die an der Übernahme solcher Aufträge ein Interesse haben könnten (Rock Rail, Alpha Trains, Beacon Rail).

#### Anwendbarkeit des Modells im vorliegenden Fall

Angesichts der Neuartigkeit dieses Modells und der daraus resultierenden Unsicherheit, ob mögliche Anbieter bereit wären, auch im vorliegenden Fall beim Einsatz innovativer Fahrzeuge ihre Leistungen anzubieten, müsste vor einer Ausschreibung das potentielle Interesse von Anbietern geklärt werden.

Sollte diese Variante näher verfolgt werden, würden wir somit Markterkundungsgespräche mit mindestens den drei genannten Unternehmen empfehlen, um die Bereitschaft der Unternehmen abzufragen, diese Leistungen mit innovativen Fahrzeugen (ggf. zzgl. Energiebereitstellung) zu übernehmen.

## Zur vertragsrechtlichen Ausgestaltung

Es wären mindestens zwei Verträge zu schließen, nämlich

- der Vertrag über die Bereitstellung und Instandhaltung/Wartung der Züge,
- der Verkehrsvertrag.

Darüber hinaus wäre ggf. noch der bereits dargelegte Vertrag über die Errichtung und den Betrieb der Energieinfrastruktur zu schließen.

Dazu im Einzelnen:

### Der Vertrag über die Bereitstellung und Instandhaltung/Wartung der Züge

Im Kern des Vertrags stünde die Verpflichtung des Dienstleisters, die Züge (vom Hersteller) und ihre Wartung und Instandhaltung (vom Hersteller oder einem weiteren Dienstleister) zu beschaffen und sie dem EVU auf einer vertraglichen Grundlage (Miete/Pacht) zur Verfügung zu stellen.

Für das EVU hätte eine solche Konstruktion den Vorteil, dass es spezifische Hersteller-, Instandhaltungs- und Wartungsrisiken, die im Zusammenhang mit innovativen Antrieben neu und damit ggf. schwerer kalkulierbar sind, abgenommen bekäme.

Für den ZVNL hätte das Vorgehen den Vorteil, dass er dem EVU eine derartige risikominimierende Konstruktion bieten könnte, obwohl er seinerseits aufgrund seiner Ausrichtung keine Fahrzeuge erwerben darf. Ob die Verteuerung durch die Einschaltung eines zusätzlichen Dienstleisters durch die Kostenersparnisse aufgrund geringeren Risikoaufschlags durch das EVU gerechtfertigt würden, ist eine schwierige wirtschaftliche Frage, die ggf. zu bewerten wäre.

Ergänzend könnte der Vertrag mit dem Dienstleister ggf. auch ausgebaut werden zu einem **Verfügbarkeitsmodell**: Der Dienstleister würde sich dann nicht zur Bereitstellung einer definierten Anzahl Fahrzeuge und ihrer Wartung und Instandhaltung verpflichten. Seine Verpflichtung wäre vielmehr darauf gerichtet, dass stets die notwendige Anzahl von Fahrzeugen für ein bestimmtes SPNV-Betriebsprogramm verfügbar wäre. Es wäre dann an dem Dienstleister zu entscheiden, wie viele Fahrzeuge er (zusätzlich als Betriebsreserve) erwirbt. Er müsste zu diesem Zweck auf Grundlage des Fahrplans selbst zumindest eine Rahmenumlaufplanung erstellen, um den Bedarf ermitteln zu können.

### Verkehrsvertrag

Im Verkehrsvertrag wären die Schnittstellen zwischen den Leistungen des EVU und den Leistungen des Dienstleisters insbesondere hinsichtlich Fahrzeuglieferung, Wartung, Instandhaltung im Einzelnen zu regeln. Bei einem Verfügbarkeitsmodell müsste der Dienstleister auch die Rahmenumlaufplanung erstellen, an die das spätere EVU hinsichtlich seiner eigenen Betriebsplanung gebunden wäre.

### Energieinfrastruktur

Je nach Situation (Abhängigkeit von der DB bei Batterieladeinfrastruktur; Verfügbarkeit von Grundstücken und Marktbewertung bei Wasserstofftankstellen) würde der ZVNL diese Leistungen separat vertraglich regeln oder in die Verantwortung des Dienstleisters geben.

### Zum Vergaberecht

Vergaberechtlich unterscheidet sich die Gestaltung nicht wesentlich von der Variante 3. Der Auftrag wird in mindestens zwei Losen vergeben werden: (1) Verkehrsvertrag und (2) Fahrzeug- und Infrastrukturbereitstellung. Sofern Wasserstoffzüge eingesetzt werden sollen, wird ggf. ein separates Los (3) Wasserstofftankstelle zu bilden sein. Der Gewinner des Loses „Verkehrsvertrag“ wird zur Nutzung der separat ausgeschriebenen Fahrzeuge und der Energieinfrastruktur verpflichtet sein.

### Bewertung

Zur Bewertung dieses Modells in rechtlicher Hinsicht ist festzuhalten:

- Dieses Modell würde dem EVU die Risiken aus dem Einsatz innovativer Fahrzeuge abnehmen und gleichzeitig die Hürde überwinden, dass der ZVNL derzeit selbst keine Fahrzeuge beschaffen kann.
- Es ist allerdings davon auszugehen, dass mit der Einschaltung eines weiteren Dienstleisters die Kosten für den SPNV-Betrieb steigen könnten. Dies wäre aber gesondert zu bewerten.
- Es handelt sich um ein neues Modell mit wenigen Anbietern und einem geringen Erfahrungsschatz im deutschen Markt. Der ZVNL trüge insoweit also gewisse Innovationsrisiken. Hinzu kämen die potentiellen Ausfallrisiken des Dienstleisters.
- Es bestünde ein hoher und komplexer vertraglicher Regelungsbedarf, der auch die Schnittstellen zwischen den Akteuren sauber abbildet.
- Es wäre vor einer positiven Entscheidung zu diesem Modell in jedem Fall eine Markterkundung vorzunehmen, um die Zahl und Qualität der Bieter und ihre Vertrags- und Vergütungsmodelle näher kennen zu lernen.

## 3.4 Analyse sicherheitsspezifischer Aspekte

### 3.4.1 Ziel des AP 3.2

Die sicherheitsspezifischen Aspekte beim Einsatz innovativer SPNV-Fahrzeuge sollen in diesem Arbeitsschritt vertieft werden. Die vorhandene Studie („Machbarkeitsstudie H2-Schienenverkehr in Mitteldeutschland“) bietet eine Startbasis, um im Rahmen des Arbeitsschrittes Gefährdungen zu identifizieren und dabei neue, veränderte oder erweiterte Aspekte zu berücksichtigen. Hierbei greifen wir auch auf einen entsprechenden Expertenkreis zurück, der die aktuellen Entwicklungen in diesem Bereich begleitet. Ziel wird sein, dass erste Inputs für eine spätere Risikoanalyse, die durch alle Beteiligten (u.a. Infrastrukturbetreiber, potentiell Verkehrsunternehmen und auch potentieller Fahrzeughersteller etc.) finalisiert wird, geliefert werden und der Prozess zur Durchführung aufgezeigt wird. Dabei werden auch die am Markt vorhandenen innovativen Fahrzeugkonzepte für die Analyse verwendet.

Gleichzeitig geben wir in diesem Arbeitsschritt einen Ausblick auf den veränderten Fahrzeuggenehmigungsprozess nach dem 4. Eisenbahnpaket, der neben der Genehmigung für das Inverkehrbringen von Fahrzeugen auch die entsprechenden Nachweise fordert. Hierbei ist insbesondere der Aspekt der technischen Kompatibilität des Fahrzeugs mit dem Netz Gegenstand der Betrachtung und soll entsprechend dargelegt werden.

Es sei darauf hingewiesen, dass die Ergebnisse des Arbeitsschrittes zunächst eine gutachterliche Einschätzung sein werden und eine abschließende Aussage letztlich nur getroffen werden kann, wenn entsprechende Informationen zum Fahrzeugkonzept vorliegen und zwischen Fahrzeughersteller, benannter Stelle (NoBo) / bestimmter Stelle (DeBo) und Genehmigungsstelle das Vorgehen zur erfolgreichen Fahrzeugtypgenehmigung vereinbart wurde bzw. das Verkehrsunternehmen eine erfolgreiche Prüfung der Streckenkompatibilität vor der Nutzung genehmigter Fahrzeuge durchgeführt hat. Dies kann erst zu einem späteren Zeitpunkt erfolgen, der nicht mehr Gegenstand der angefragten Leistung ist.

### 3.4.2 Sicherheitsspezifische Aspekte

Seitens des ZVNL besteht die Anforderung eine explizite Aussage zur Befahrung des City Tunnels Leipzig (CTL) mit alternativ angetriebenen SPNV-Fahrzeugen zu erhalten. Daher ist Ziel dieses Kapitels aufzuzeigen, wie die entsprechenden Anforderungen durch vorhandene bzw. in Planung befindliche Fahrzeugkonzepte erfüllt werden. Dabei wird zwischen gesetzlichen, technischen und organisatorischen Anforderungen unterschieden und im Detail näher beleuchtet. Die gesetzlichen und technischen Anforderungen sind insbesondere durch die Fahrzeugkonzepte und somit Fahrzeughersteller zu erfüllen, wohingegen organisatorische Anforderungen durch den späteren Betreiber (Eisenbahnverkehrsunternehmen – EVU) zu erfüllen sind.

#### Gesetzliche Anforderungen

Im Zusammenhang mit den Planfeststellungsunterlagen ist ein Brandschutzkonzept für den CTL erstellt worden. TRIT hat hier beim EBA entsprechend um Einsicht gebeten. Einen einseitigen Auszug des 61 Seiten umfassenden ganzheitlichen Brandschutzkonzeptes mit Stand vom 31.12.2014 wurde am 15.07.2020 TRIT zur Verfügung gestellt. Die dort im Kapitel 5.5 aufgelisteten Anforderungen an Fahrzeuge im Tunnelbetrieb sind durch Vorschriften und eine entsprechende Bewertung belegt. Deren Basis bildete der damalige Stand der geltenden Normen und Regelungen für den Betrieb. Daher wurde neben der EN

45545-1 (damals noch auf die vorläufige Ausgabe der Norm) auf die TSI „Sicherheit im Eisenbahntunnel“ (TSI SRT)<sup>19</sup> verwiesen und auf die darin enthaltene Betriebsklasse der Fahrzeuge. Die gleichzeitigen Verweise auf die DIN 5510-1 oder die EBA-Vorgabe E2 als Zugangsbedingungen für Fahrzeuge wurden zwischenzeitlich durch die EN 45545-1 bzw. übergeordnet durch die TSI SRT Anforderungen abgelöst.

Da die Länge des CTL kleiner 5 km ist, wird er der Kategorie A nach TSI SRT zugeordnet. Diese Anforderung ist auch im Register of Infrastructure (RINF) Datenbank der European Rail Agency (ERA) hinterlegt, die für Schienenfahrzeuge zu erfüllen ist, die diesen Tunnel passieren wollen:

Tunnel City-Tunnel Leipzig (01.01.2020 - 31.12.2020)		
1.1.1.1.8.1	IM's Code	0080
1.1.1.1.8.8.1	Compliance of the tunnel with INF TSI	Not Provided
1.1.1.1.8.8.2	Reference to a document available from the IM with precise description of the tunnel	Not Provided
1.1.1.1.8.2	Tunnel identification	City-Tunnel Leipzig
1.1.1.1.8.3	Start of tunnel	Latitude (51,3516770) + Longitude (+12,3856370) + Kilometer (001,700)
1.1.1.1.8.4	End of tunnel	Latitude (51,3258790) + Longitude (+12,3832790) + Kilometer (004,392)
1.1.1.1.8.5	EC declaration of verification for tunnel (SRT)	NA (Not applicable)
1.1.1.1.8.6	EI declaration of demonstration for tunnel (SRT)	NA (Not applicable)
1.1.1.1.8.7	Length of tunnel	2692
1.1.1.1.8.8	Cross section area	NYA
1.1.1.1.8.9	Existence of emergency plan	NYA
1.1.1.1.8.10	Fire category of rolling stock required	A
1.1.1.1.8.11	National fire category of rolling stock required	NA (Not applicable)

Abbildung 45 - Auszug aus „Register of Infrastructure (RINF)“ <https://rinf.era.europa.eu/RINF>

<sup>19</sup> Technische Spezifikation für die Interoperabilität bezüglich der „Sicherheit in Eisenbahntunneln“ (TSI SRT) im Eisenbahnsystem der Europäischen Union beschreibt die gesetzlichen Anforderungen an Eisenbahntunnel.

Diese Informationen sind auch in den technischen Netzzugangsbedingungen (TNB) der DB-Netze zu finden, die online<sup>20</sup> verfügbar sind. Darin werden die Anforderungen des o.g. ganzheitlichen Brandschutzkonzepts bezüglich Tunnelzugang aufgeführt. Teilweise sind Anforderungen nicht wiederholt aufgeführt in den TNB, da sie in den aktuellen Normen enthalten sind. Im Kapitel F.2 „Besondere Zugangs- und Nutzungsbedingungen“ werden besondere Zugangs- und Nutzungsbedingungen aufgrund spezifischer Verhältnisse auf bestimmten Streckenabschnitten aufgeführt. Der CTL ist dort auch aufgeführt und die darin

<p><b>Leipziger City-Tunnel</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Der Einsatz von Dieselfahrzeugen ist nur in Ausnahme- und Notfällen (Abschleppen eines havarierten elektrisch betriebenen Triebfahrzeuges, Abschleppen eines von einer Oberleitungsstörung betroffenen Zuges und Instandsetzung- und Instandhaltungsarbeiten, die nur bei abgeschalteter Oberleitung stattfinden können) zugelassen,</li> <li>▪ DIN 5510-1 Brandschutzstufe 3 oder EBA-Brandschutzvorgaben E2 oder DIN/EN 45545-1 Betriebsklasse 2 oder TSI SRT „Sicherheit in Eisenbahntunneln“ Brandschutzkategorie A,</li> <li>▪ Kein Güterverkehr,</li> <li>▪ Geschlossenes System der Toilettenanlagen.</li> </ul>
-------------------------------------	--

Abbildung 46 - Auszug aus "Technische Netzzugangsbedingungen (TNB)" im Kapitel F.2

aufgeführten Angaben entsprechen den bereits zitierten Angaben:

### Technische Anforderungen

Die Aktivitäten zur Erlangung einer Genehmigung für das Inverkehrbringen von Fahrzeugen (GIF) im Verwendungsgebiet sind seit dem 16.06.2020 in Deutschland wie folgt geregelt:

- Technische Kompatibilität der Subsysteme innerhalb des Fahrzeuges
- Sichere Integration von Subsystemen in das Fahrzeug
- Technische Kompatibilität des Fahrzeuges mit der Infrastruktur im Verwendungsgebiet

Die Prüfungen der harmonisierten, europäischen Anforderungen (TSI-Anforderungen) sind durch eine benannte Stelle (NotifiedBody – NoBo) und die der notifizierten nationalen Anforderungen (zusätzlich zu den TSI-Anforderungen) durch eine bestimmte Stelle (Designated Body – DeBo) durchzuführen.

Die Fahrzeughersteller verfügen über Fahrzeuge, welche die aktuellen Vorgaben erfüllen bzw. streben nach schriftlicher und mündlicher Aussage entsprechende Erfüllungen dieser Anforderungen an.

Darüber hinaus ist ein „Route Compatibility Check“ entsprechend der (EU) 2016/797 durchzuführen. Die ist Aufgabe des EVU.

<sup>20</sup> Die technischen Netzzugangsbedingungen gelten für den Bereich der Schienenwege der DB Netz AG und sind Bestandteil der Schienennetz-Benutzungsbedingungen (SNB). Die aktuelle TNB wurde am 16.12.2020 abgerufen, die seit 09.12.2018 gültig sind und zuletzt am 03.06.2019 aktualisiert wurden:

<https://fahrweg.dbnetze.com/resource/blob/1357314/3bc67140c0c550c5e0f7d296870028dc/TNB-data.pdf>

Nach Prüfung der entsprechenden Netzzugangsbedingungen (RINF Datenbank und TNB) sehen wir aktuell keine Einschränkungen für einen alternativen Fahrzeugeinsatz im Netz und CTL.

### Organisatorische Anforderungen

Die Sicherheit des Bahnbetriebs ist wesentlich für die Betreiber. Dieses Erfordernis ist formalisiert im Sicherheits-Managementsystem (SMS) eines EVU abgebildet, ebenso wie die entsprechenden Nachweise der Einhaltung von bestimmten Sicherheitsanforderungen. Im SMS sind die Besonderheiten des jeweils individuellen Betreibers abzubilden, hierzu zählt auch der Einsatz von Fahrzeugen mit innovativen Antrieben. Eine betriebliche Gefährdungsanalyse müsste dann thematisch erweitert werden und bspw. folgenden Fragen beantworten:

- Erfüllt das EVU alle regulativen Anforderungen (Normen, Gesetze etc.), die mit den neuen Fahrzeugen/Antrieben zusammenhängen, hinsichtlich
  - Personal / Qualifikation
  - Infrastruktur (Abstellung, Betankung, Wartung)?
- Ergeben sich besondere Gefährdungen für
  - Personal / Werkstatt / Bediener
  - Kunden
  - Umwelt?
- Gibt es geeignete Notfallpläne, sind diese mit den Rettungskräften abgestimmt?

Eine frühzeitige Kontaktaufnahme zum Netzbetreiber zur Klärung von Sicherheitsfragestellungen erscheint hier sehr empfehlenswert, da die neuen Fahrzeugtypen auch für diesen eine teilweise Neupositionierung erfordern. Die Kontaktaufnahme kann bereits vom ZVNL initiiert werden. Weiterhin ist das beauftragte EVU umgehend nach Abschluss eines Verkehrsvertrages zu verpflichten, die Gefährdungsbeurteilung mit Netzbetreiber und Fahrzeughersteller zu beginnen und umzusetzen.

### Einbeziehung des Eisenbahninfrastrukturbetreibers (EIU)

Für die Umsetzbarkeit einer SPNV-Bedienung der anvisierten Strecke durch den CTL ist es von essentieller Bedeutung, dass seitens des Betreibers der Schienenwege DB Netz AG (EIU) keinerlei Einschränkungen in technischer oder sicherheitsbezogener Hinsicht gegen die Befahrung mit alternativen Antrieben bestehen. Diese Fragestellung wurde im Schreiben vom 20.08.2020 an die DB Netz AG von TRIT in Abstimmung mit ZVNL gestellt. In einer ersten Reaktion darauf, wurde mitgeteilt, dass „uns bislang noch keine Hinweise auf notwendige Einschränkungen<sup>21</sup>“ vorliegen. Man hat sich auf ein Abstimmungsgespräch mit der DB Netz verständigt, was aufgrund der aktuell geltenden Hygienemaßnahmen und Kontaktbeschränkungen durch COVID-19 am 14.10.2020 per Videokonferenz durchgeführt wurde. Im Rahmen der Besprechung wurde auf Besonderheiten in Störungsfällen

<sup>21</sup> Schreiben der DB Netz AG vom 07.09.2020.

insbesondere beim Einsatz von Batteriezügen eingegangen. DB Netz AG hat dabei auf ein Rahmenpapier verwiesen, was auch mit der Fahrzeugindustrie diskutiert wurde und somit als bekannt bei den Fahrzeugherstellern anzusehen ist. Das Dokument beschreibt „die technischen Leitplanken der DB Netz AG und der DB Energie GmbH, welche einen standardisierten Aufbau, eine standardisierte Systemschnittstelle zwischen Infrastruktur und Fahrzeug und den Betrieb der neuartigen Ladeinfrastruktur sicherstellen soll“<sup>22</sup> und sollte bei der Umsetzung und Realisierung bzw. Auslegung des Fahrzeugkonzeptes von den Fahrzeugherstellern berücksichtigt werden.

Die im Rahmen der Besprechung am 14.10.2020 gestellte Anfrage eine schriftliche Zusicherung von der DB Netz zu erhalten, dass keine, über die Inhalte der TNB hinausgehenden Vorgaben an Akku- oder Brennstoffzellenfahrzeuge existieren, welche von den Fahrzeugen auf ihrem beabsichtigten Einsatzgebiet im Großraum Leipzig (u. A. Citytunnel Leipzig) einzuhalten sind, wurde von der DB Netz mit Schreiben vom 04.11.2020 beantwortet. Im Ergebnis sind DB Netz aktuell „aus technischer bzw. sicherheitsbezogener Sicht keine Einschränkungen hinsichtlich eines Fahrzeugeinsatzes erkennbar“<sup>23</sup>, insofern die bestehenden, regulativen Anforderungen durch die Fahrzeuge erfüllt werden. Es wird ferner im Schreiben darauf hingewiesen, dass „es sich bei den von Ihnen genannten Zügen mit alternativen Antriebssträngen um eine noch recht junge Technologie handelt, liegen uns bislang noch keine Hinweise auf notwendige Einschränkungen vor“. Eine Garantie, ob dies auch in Zukunft so bleiben wird, kann die DB Netz AG jedoch derzeit nicht übernehmen.

Daher empfehlen wir beim weiteren Vorgehen die DB Netz AG stets informiert zu halten, um über Änderungen von Anforderungen informiert zu sein und mögliche Risiken zu vermeiden.

---

<sup>22</sup> Ergänzende Bestimmungen Ladeinfrastruktur für Akkumulator gestützte Eisenbahnfahrzeuge, DB Netz und DB Energie (Frankfurt am Main, 30. September 2020)

<sup>23</sup> Aus dem Schreiben von Dr. Berg der DB Netz AG vom 04.11.2020

## 3.5 Analyse organisatorischer Aspekte

### 3.5.1 Ziel des AP 3.3 / der Variantenbetrachtung

Der weiteren Ausarbeitung soll an dieser Stelle eine Hypothese vorangestellt werden, aus der sich weitergehend bestimmte Aktivitäten des ZVNL ableiten und begründen lassen.

Hypothese für die weitere Bearbeitung:

Die Integration von Fahrzeugen mit innovativer Antriebstechnik in die Ausschreibung der Verkehrsleistungen MDSB2025plus in klassischer Form (EVU als Pauschalanbieter aller Leistungen gegenüber dem ZVNL) führt aufgrund der Neuheit der Technologien zum heutigen Zeitpunkt evtl. zu unerwünschten Ergebnissen.

Zuerst könnten unerwünschte Effekte in der Ausschreibung auftreten. Genannt sei hier vor allem der Verzicht auf Angebotsabgabe bei einzelnen EVU-Marktteilnehmern, woraus in der Folge ggf. ein sehr kleines EVU-Bieterfeld und damit wenig Wettbewerb / hohe Preise entstehen. Darüber hinaus sind bei den eingereichten Angeboten weitere Risikoaufschläge aufgrund der Neuheit der Technologie zu erwarten. Grund ist die hier teilweise auf Annahmen basierte Angebotskalkulation.

Zu beachten ist aus der Sicht der EVU auch, dass Fahrzeuge mit innovativer Antriebstechnik (derzeit, noch) im Vergleich zu konventionell angetriebenen Fahrzeugen weniger fungibel sind, da wegen der zusätzlichen, infrastrukturellen Anforderungen Einschränkungen bezüglich eines möglichen Einsatzes in anderen Verkehrsnetzen bestehen. Daher ist die Restwertproblematik auf alle Fälle kritisch und verteuert zusätzlich die Finanzierungskosten bei den EVU.

Nach Auftragsvergabe könnten unerwünschte Effekte im späteren Betrieb auftreten. Genannt seien hier vor allem Schlechtleistungen im Betrieb und Nachverhandlungen zu Preisen wegen falscher Annahmen / Unwirtschaftlichkeit / unrealistischer Risikoeinschätzung.

Begründungen für die Hypothese und die unerwünschten Effekte lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- fehlendes Know-how auf Seiten der EVU bezüglich Betriebseinsatz / Handling der Fahrzeuge. Beispiele sind: tatsächliche Reichweiten, Zuverlässigkeit, Instandhaltbarkeit, (neue Teile, neue Verfahren), evtl. Einsatzrestriktionen für den Betrieb / Netzzugang (u.a. City-Tunnel),
- fehlendes Know-how auf Seiten der EVU bezüglich Kosten. Beispiele sind: tatsächlicher Energieverbrauch, Instandhaltungskosten, Kosten für Energieversorgungseinrichtungen, Wasserstoffpreise, Preisentwicklung der neuen Komponenten der Wasserstoff- und Batterietechnologie, etc.
- Organisatorische Komplexität: neue bislang unbekannte Leistungen / Verträge bzgl. Energieversorgung (über Ladestation oder H2-Tankstelle + H2-Versorgung), Genehmigungsverfahren (Fahrzeuge und Infrastruktur)

Auf Basis der obigen Hypothese und den hier kurz aufgeführten Begründungen für die Hypothese (diese werden in Abschnitt 3.5.3 vertieft) sollen daher in AP 3.3. mögliche Ausschreibungsmodelle / Organisationsvarianten dargestellt werden, um die (zurzeit noch

bestehenden) Nachteile beim Einsatz innovativer Fahrzeuge zu überwinden. Die Darstellung erfolgt ergebnisoffen bezüglich der Antriebsart (keine Vorfestlegung auf Wasserstoff oder Akku) und aus dem Blickwinkel ZVNL. Aus den herausgearbeiteten Vor-/Nachteilen jeder Variante werden Empfehlungen für ein weiteres Vorgehen des ZVNL abgeleitet (siehe AP 3.4).

### 3.5.2 Variantendefinition

Die in Abschnitt 3.5.4 aufgeführten Ausschreibungsmodelle / Organisationsvarianten sind definiert aus dem Blickwinkel des ZVNL. Basis für die Variation ist die klassische Vergabe der Hauptleistung Verkehrserbringung pauschal an ein EVU, welches neben dem Fahrbetrieb auch alle weiteren, notwendigen Teilleistungen verantwortet, insbesondere Fahrzeugbeschaffung, Instandhaltung und Beschaffung der notwendigen Energie.

Die Folgevarianten ergeben sich aus dieser Hauptleistung durch Differenzierung von Leistungsbestandteilen, welche relevant für die Vergabe/Erbringung von Eisenbahnverkehr mit innovativen Antrieben sind (also kein Vertrieb, etc.). Diese sind:

- Fahrzeugbeschaffung und -bereitstellung
- Bahnbetrieb
- Fahrzeuginstandhaltung
- Energieversorgung, mit:
  - Wasserstoff-Bereitstellung
  - Wasserstoff-Tankstelle
  - Batterie-Ladestation
  - Bereitstellung Bahnstrom

Eine weitere Ausdifferenzierung dieser Leistungen ist weiterhin denkbar (bspw. Teileversorgung als Teil der Instandhaltung), führte jedoch zu einer zu hohen Komplexität in der Variantendefinition.

Die oben genannten Leistungen werden in Abschnitt 3.5.3 ausführlich dargestellt, um Besonderheiten in Bezug auf die innovativen Fahrzeugtypen herauszuarbeiten, die wiederum Auswirkungen auf die Ausgestaltung der Varianten haben.

### 3.5.3 Relevante Leistungen für Bahnbetrieb mit innovativen Fahrzeugen

#### Fahrzeugbeschaffung und -bereitstellung

##### Einsatzzweck und Einsatztauglichkeit innovativer Fahrzeuge

Fahrzeuge mit innovativen Antrieben können in der Regel die bisherigen Dieseltriebzüge aus Diesel-Netzen ersetzen. Die Fahrzeughersteller haben ihre neuen Typen aus bestehenden Regionalverkehrsfahrzeugen abgeleitet (siehe Folgeabschnitte). Sie entsprechen den typischen Anforderungen der Aufgabenträger hinsichtlich Passagierkapazitäten, Fahrdynamik und Komfort. Teilweise sind Komfortmerkmale bspw. bezüglich Lärmanforderungen auch deutlich besser gegenüber den Altfahrzeugen. Die neuen Fahrzeugtypen sind von Herstellern weiterhin auch entsprechend den relevanten technischen Netzzugangsbedingungen für Regionalverkehrsfahrzeuge ausgelegt (siehe auch AP 3.2). Restriktionen können sich eventuell durch erhöhte Radsatzlasten der Fahrzeuge auf einigen Nebenstrecken mit kleineren Streckenklassen (v.a. unter 20t) aufgrund der Mehrgewichte für die Traktionsbatterien ergeben (sowohl Fahrzeuge mit Brennstoffzelle als auch reine Batteriefahrzeuge verfügen über Traktionsbatterien).

Alleine bezüglich der Reichweiten und dem damit fahrbaren Betriebsprogramm unterscheiden sich die neuen Fahrzeuge mit innovativen Antrieben von Dieselfahrzeugen und auch untereinander.

Brennstoffzellenfahrzeuge sind mit Reichweiten von 600 bis 1000 km gut in die tägliche Umlaufplanung eines Regionalverkehrs zu integrieren und entsprechen in den Einsatzmöglichkeiten nahezu den Dieseltriebzügen (Wasserstoffverfügbarkeit und Wasserstofftankstelle vorausgesetzt).

Die Herstellerangaben der BEMU bezüglich Reichweiten im Batteriebetrieb variieren bislang sehr stark zwischen 40km (Bombardier, siehe <sup>12</sup>) und bis zu 120 km (Siemens, siehe <sup>27</sup>). Mit dieser Reichweitemspanne können die BEMU aktuell noch nicht alle bisherigen Dieserverkehre umgehend ersetzen, zum Teil werden Nachladestationen an bestimmten Punkten im Verkehrsnetz notwendig (siehe Energieinfrastruktur in Abschnitt 0 unten und auch AP1/AP2). Es bleibt aber festzuhalten, dass die Batterieentwicklung sich sehr dynamisch zeigt, und Reichweiten von 150 – 180 km dürften ab ca. 2025 möglich werden.

Darüber hinaus zeigt sich aktuell, dass die Hersteller die Akku-Fahrzeuge (deren Batterien) sehr stark an die Charakteristika des Netzes auslegen (Nachlademöglichkeiten, Betriebsprogramm, Topographie), um ein Optimum aus Gewicht, Reichweite und Wirtschaftlichkeit zu erzielen. Es entstehen somit zum Teil spezielle Fahrzeuge zum Einsatz für bestimmte Linien, die nach Ende eines Verkehrsvertrages nicht universell nutzbar sind. Dieser Umstand könnte sich in Zukunft mit fortschreitender Batterie-Technologie eventuell weniger stark bemerkbar machen.

##### Fahrzeugangebot Brennstoffzellen- und Akku-Fahrzeuge

Bislang existiert mit dem iLint von Alstom ein verfügbares und zugelassenes Brennstoffzellenfahrzeug auf dem europäischen Markt. Die bislang zwei existierenden Prototypen haben im Mai 2020 ihren zweijährigen Probetrieb im Fahrgasteinsatz der EVB

erfolgreich abgeschlossen.<sup>24</sup> Der erfolgreiche Nachweis war Voraussetzung für die Auslösung der Bestellung über insgesamt 14 iLint durch die LNVG.

Daneben werden aktuell 27 iLint für die RMV-Tochtergesellschaft fahma hergestellt und zum Einsatz ab Fahrplanwechsel 2022 / 2023 geliefert.<sup>25</sup>

In der Entwicklung von Brennstoffzellenfahrzeugen befinden sich Siemens und Stadler.

Stadler soll im Dezember 2022 einen Schmalspur-Brennstoffzellen-Prototypen für die Tiroler Zillertalbahn liefern und vier weitere Züge ab Mai 2023. Daneben besteht ein Auftrag für den bekannten Fahrzeugtyp FLIRT, einen Prototypen als H2-Variante an den kalifornischen Aufgabenträger San Bernardino County für den Fahrgastbetrieb im Jahr 2024 zu liefern (mit Option auf vier weitere Fahrzeuge).<sup>26</sup>

Siemens entwickelt eine Brennstoffzellenvariante seines Mireo-Triebzugs.<sup>27</sup> <sup>28</sup> Öffentlich bekannte Bestellungen liegen noch nicht vor, Siemens bestätigte Ende Juli auf Anfrage per E-Mail, dass man hier „angebotsfähig“ ist.

Neben den in Deutschland / Europa bekannten Fahrzeugherstellern ist sicherlich auch CRRC aus China in der Lage Brennstoffzellenzüge zu fertigen, Straßenbahnen in China fahren bereits mit Wasserstoff.<sup>29</sup> Bei öffentlichen Ausschreibungen ist eine Teilnahme von CRRC zu erwarten.

Die in Europa und vor allem Deutschland langjährig bekannten und vertretenen Fahrzeughersteller haben alle eine Akku-Variante ihres Regionalzuges im Angebot. Stadler (Akku-Flirt), Siemens (Mireo plus B) und Alstom (Coradia) können diesbezüglich bereits Bestellungen<sup>30</sup> <sup>31</sup> <sup>32</sup>, Siemens und Stadler auch Zulassungen vorweisen (Stadler in Deutschland<sup>33</sup> / Siemens in Österreich<sup>34</sup> bezogen auf die Prototypen). Bombardier entwickelt und testet einen Akku-Talent<sup>35</sup>. Weiterhin bietet CAF den Regionalzug Civity laut Internetpräsenz auch als Akku-Variante an und verweist auf die bereits umgesetzten Straßenbahnprojekte mit Batterie-Pufferbetrieb<sup>36</sup>.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Fahrzeughersteller zur Zeit Regionalzüge mit Akku- sowie Brennstoffzellenantrieb entwickeln oder fertigen. Beide Antriebsarten haben jeweils spezifische Vorteile für bestimmte Verkehre. Ein eventueller zukünftiger Systementscheid der Branche insgesamt für eine der beiden Antriebstechnologien ist (noch) nicht abzusehen und hängt schließlich auch mit der weiteren Verbreitung dieser Antriebe in der Mobilität gesamthaft zusammen. Kunden können also aktuell – aus einem beschränkten Angebot – die Antriebsart frei wählen. Für den Betriebsstart der MDSB2025plus in 2025 ist

<sup>24</sup> PM Eurailpress - Probebetrieb

<sup>25</sup> PM Alstom fahma

<sup>26</sup> Tagblatt Stadler H2-Züge

<sup>27</sup> Produktpräsentation Mireo Siemens

<sup>28</sup> PM NOW Förderzusage H2-Mireo

<sup>29</sup> PM Railway Gazette CRRC H2-Tram

<sup>30</sup> PM Mireo Bestellung BW

<sup>31</sup> PM Stadler Flirt Akku NAHSH

<sup>32</sup> PM Alstom BEMU VMS

<sup>33</sup> EI 12-2018 Akku-Flirt Vorstellung

<sup>34</sup> PM ÖBB Cityjet eco

<sup>35</sup> BT Präsentation Akku-Talent

<sup>36</sup> <https://www.caf.net/de/productos-servicios/familia/civity/modularidad.php>

von einer Verfügbarkeit von zugelassenen Fahrzeugen mit beiden alternativen Antriebsarten auszugehen.

Generell ist bei den neuen Fahrzeugtypen mit innovativen Antrieben, wie bei allen neuen technischen Systemen, aufgrund der noch nicht ausgeprägten Felderfahrung, mit unerwarteten Einschränkungen oder gar Ausfällen zu rechnen. Auf Käuferseite wird bis zum zuverlässigen Betrieb größerer Fahrzeugflotten in den nächsten Jahren darauf zu achten sein, Ausfallrisiken und auch Risiken von Lieferverzögerungen (bspw. aus Zulassungsverzögerungen, Lieferverzögerungen, Fehlern in der Produktion) durch entsprechende vertragliche Mechanismen abzufedern.

Um eventuellen Anfangsschwierigkeiten bei der neuen Antriebstechnologie zu begegnen und eine reibungslose Einführung der neuen Akkutriebzüge zu erleichtern ist in Schleswig-Holstein bspw. eine temporäre Bereitschaftsflotte aus alten Dieseltriebzügen von den Aufgabenträgern bestellt worden<sup>37</sup>.

### Fahrzeugfinanzierung

Die Finanzierung und Investition in das Rollmaterial stellt für die EVU in jeder Verkehrsausschreibung ein mehr oder weniger großes Hemmnis für die Teilnahme an einer Ausschreibung dar. Die deutschen Aufgabenträger haben daher bereits vor Jahren erprobte und funktionierende Instrumente zur Stimulation des Wettbewerbs, insbesondere Finanzierungsinstrumente und Maßnahmen zur Absicherung von Restwertrisiken entwickelt. Ein Einsatz von Maßnahmen wie Wiedereinsatzgarantien oder Wiederverwendungsgarantien ist wie oben erwähnt unabhängig vom Typ des Rollmaterials häufig sinnvoll, erscheint für Fahrzeuge mit innovativen Antrieben jedoch noch wichtiger.

Aus dem Blickwinkel eines privaten Finanzierers dürfte die Wiederverwendbarkeit von Akkutrieben heute im Vergleich zu Brennstoffzellenzügen besser eingeschätzt werden, da sie den Vorteil haben, dass sie im Grunde Elektrotriebzüge sind, die auch in Zukunft uneingeschränkt unter Oberleitung verkehren können. Brennstoffzellenzüge benötigen dagegen Wasserstoffversorgung und eine entsprechende Tankstelle, was die Einsatzflexibilität derzeit noch einschränkt.

Käufer der innovativen Fahrzeuge waren bislang Aufgabenträgergesellschaften (oder deren Tochtergesellschaften), die diese in ihre Fahrzeugpools einstellen. Abweichend hierzu wählte NahSH die Paribus Holding als Käufer und Vermieter der Züge für 30 Jahre aus, wobei die Finanzierung wiederum über eine vom Land gewährte Kapitaldienstgarantie abgesichert wird<sup>38</sup>. Auch die britische Leasinggesellschaft Rock Rail plant laut eigenen Angaben künftig Akku-Triebzüge in Deutschland anzubieten<sup>39</sup>. Aus Sicht der Eisenbahnunternehmen dürfte der Rückgriff auf einen Pool über Pacht/Leasing eine willkommene Lösung für die Bereitstellung von Akku- oder Brennstoffzellenzügen sein.

Die Preise für Fahrzeuge mit alternativen Antrieben liegen, alleine aufgrund der neuen und zusätzlichen Komponenten an Bord, über denen von vergleichbaren Diesel- oder E-Triebzügen (siehe auch Kostenschätzungen aus AP2). Daneben ist davon auszugehen, dass

<sup>37</sup> PM NAHSH Fahrzeugbereitsteller ausgewählt

<sup>38</sup> Kieler-Nachrichten Akku-Flirt

<sup>39</sup> EI 7-2020 Rockrail

die Hersteller Risiken für Mängel im Rahmen der Gewährleistung zusätzlich in Lieferpreise einpreisen.

Die in Pressemeldungen aufgeführten Flottenpreise sind mit Vorsicht zu interpretieren und dürften noch keine Marktpreise im eigentlichen Sinne darstellen, da die Vermarktung noch am Anfang steht. Darüber hinaus sind neben der Fahrzeuglieferung zumeist auch langfristige Instandhaltungsverträge abgeschlossen worden; das ermöglicht den Herstellern eine freiere Zuordnung von kalkulierten Kosten auf Fahrzeug- oder Servicepreise.

Die zweiteiligen Akku-Triebzüge Flirt und Mireo wurden gemäß Veröffentlichungen für ca. 2,7 Mio. € (55 Flirt für NAHSH) bzw. 3,85 Mio € (20 Mireo für SFBW<sup>7</sup>) je Fahrzeug gekauft. Der Fahrzeugpreis für einen iLint für Niedersachsen liegt gemäß Pressemeldung bei ca. 5,8 Mio. € (14 iLint für LNVG<sup>40</sup>).

Die Anschaffungskosten für einen Dieseltriebwagen Lint 54 liegen im Vergleich hierzu bei ca. 4,5 Mio. €.<sup>41</sup>

Die Beschaffung von Brennstoffzellenzügen wurde bislang im Rahmen des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP2) gefördert. Nach Aussage des Projektsteuerers NOW nach E-Mail-Anfrage im September wird es im Rahmen des NIP keine weiteren Aufrufe für die Beschaffung von Zügen geben. Für die Zukunft sei jedoch beim BMVI bereits ein eigenes, technologieübergreifendes Förderprogramm in der Umsetzung. Den Haushaltstitel „Zuschüsse zur Förderung alternativer Antriebe im Schienenverkehr“ gibt es bereits, die Förderrichtlinie befinde sich derzeit noch in der BMVI-internen Abstimmung. Die Richtlinie wird voraussichtlich sowohl die Beschaffung von Zügen mit Batterie- und H2-BZ-Antrieb, als auch die entsprechende Infrastruktur zur Ladung bzw. Betankung im Stand sowie Anpassungen der Wartungsinfrastruktur und Machbarkeitsstudien umfassen. Wann die Richtlinie veröffentlicht wird und Anträge eingereicht werden können, steht zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht fest, eine Anwendbarkeit für MDSB2025plus scheint Stand heute (Oktober 2020) jedoch wahrscheinlich.

## **Bahnbetrieb**

Die neuen Fahrzeuge mit innovativen Antrieben sind von ihren Herstellern darauf ausgelegt, bisherige Dieseltriebzüge zu ersetzen und entsprechen in ihrer Auslegung größtenteils bekannten Elektrotriebzügen. Aus Fahrgastsicht wird kaum ein Unterschied bemerkbar sein, eher der Komfortgewinn durch geringere Lärmemissionen. Auch für die Betreiber dürfte die Umstellung auf einen Bahnbetrieb mit innovativen Fahrzeugen grundsätzlich problemlos machbar sein. Nachfolgend sollen wesentliche Änderungen und Neuerungen vorgestellt werden sowie sich daraus ergebende Aufwände und eventuelle Risiken.<sup>42</sup>

---

<sup>40</sup> PM Niedersachsen iLint Vertragsunterzeichnung

<sup>41</sup> Machbarkeitsstudie H2 Schienenverkehr in Mitteldeutschland des ZVNL

<sup>42</sup> Die hier aufgeführten Aspekte stammen aus Projekterfahrungen von Fahrzeugbeschaffungen mit alternativen Antrieben des TÜV-Rheinland.

### Reichweiten

Für den Bahnbetrieb sind vor allem die in Abschnitt 4.1.1. aufgeführten, vergleichsweise beschränkten Reichweiten im Batteriebetrieb der Akku-Züge ein elementarer Unterscheid zu den bisherigen Dieseltriebwagen, und dies stellt ein wesentliches Kriterium dar. Tatsächliche betrieblich realisierbare Reichweiten unter verschiedenen Einsatzszenarien werden sich erst in Zukunft zeigen. Die Käufer der Fahrzeuge sollten entsprechende Reserven fordern und eventuell zusätzlich Reichweitengarantien in Verträgen verhandeln.

Anders herum kann auch die Nichtverfügbarkeit / Nichterreichbarkeit einer Energieversorgungseinrichtung (bspw. Defekt, Baustelle, Streckensperrung) im Fall des Einsatzes von Brennstoffzellenfahrzeugen mit einer zentralen Wasserstofftankstelle, aber auch bei Akku-Fahrzeugen, zu massiven Einschränkungen der Fahrbarkeit des Betriebsprogramms führen.

Zur Vermeidung von Fahrtausfällen bei Nichtverfügbarkeit / Nichterreichbarkeit könnten mobile / temporäre Energieversorgungseinrichtungen Abhilfe schaffen. Bei näherer Betrachtung ergeben sich jedoch durch Vorlaufzeiten, Genehmigungsbedarf, Standortverfügbarkeit, Standortanforderungen und schließlich Leistungsfähigkeit der Anlagen erhebliche Umsetzungsschwierigkeiten bzw. -einschränkungen. Eine Notwendigkeit / der Nutzen einer solchen Anlage wäre zu prüfen, insbesondere wäre der Infrastrukturbetreiber (DB-Netz) in die Prüfungen einzubinden.

### Betankung / Laden

Der Tankvorgang eines Brennstoffzellenfahrzeugs (des iLint) ist vergleichbar mit dem eines Dieselfahrzeugs. Leere Dachtanks auf beiden Fahrzeugteilen können zeitgleich über zwei Zapfpistolen / zwei Zapfsäulen (Dispenser) innerhalb von rund 15 Minuten wieder befüllt werden. Die Betankung erfolgt (nach Einweisung) vergleichbar zu heutigen Tankstellen durch einen EVU-Mitarbeiter (Triebfahrzeugführer). Tankvorgänge können bezüglich Intervall und Zeitdauer, vergleichbar zu Dieselfahrzeugen, problemlos in Umlaufpläne eingefügt werden.

Der Ladevorgang von Traktionsbatterien der Akku-Fahrzeuge erfolgt regelmäßig über den Stromabnehmer im elektrifizierten Teil des Netzes oder unter zusätzlichen Oberleitungsinselanlagen (in Ausnahmefällen über einen Elektranten, zusammenfassend: Ladestationen). Außer dem Heben und Senken des Pantographen durch den Triebfahrzeugführer ist keine besondere Handlung zur Ladung notwendig (Beim Laden über den Elektranten wäre ein Stecker durch den Fahrzeugführer in den Elektranten zu stecken). Die Ladedauern variieren stark zwischen Batterietypen und -auslegung. Daneben beeinflussen Ladezeit und -intensität die Lebensdauer der Akkus. Die Käufer / Betreiber von Akku-Fahrzeugen sollten daher in enger Abstimmung mit dem Fahrzeughersteller ein Optimum aus betrieblichen und technisch/wirtschaftlichen Anforderungen bezüglich dem Zusammenspiel von Betriebsprogramm, Akku-Kapazität, Ladedauern anstreben. Dies könnte bspw. auch das Hinnehmen frühzeitiger Alterung und Akkutauch oder ein Zusatzfahrzeug für Ladevorgänge in überschlagenden Wenden sein.

### **Abstellung**

Im Gegensatz zu bisherigen Abstellanlagen für Dieselmotoren sind die Abstellgleise für die neuen Fahrzeugtypen mit höheren Spannungen und Stromstärken auszustatten. Elektranten mit 230V reichen für die notwendige Klimatisierung der Traktionsbatterien in der (Nacht-)Abstellung nicht mehr aus. Der iLint benötigt zumindest 400V/32A, während zwei- und dreiteilige BEMU nach Aussagen mehrerer Hersteller bis zu 400V/63A benötigen. Einige Fahrzeugkonzepte sehen auch die zusätzliche Nutzungsmöglichkeit von Zugvorheizanlagen mit 1.000 V zum langsamen Laden der Traktionsbatterien vor.

Eine frühzeitige Kontaktaufnahme des ZVNL zum Infrastrukturbetreiber bezüglich der Ausstattung der geplanten Abstellorte ist zu empfehlen. Ergänzend können Traktionsbatterien bei beiden Varianten auch in der Abstellung geladen werden – siehe folgender Abschnitt.

### **Betriebsvorbereitung/-abschluss**

Grundsätzlich unterscheiden sich Vorbereitungs- und Abschlussdienste der neuen Fahrzeugtypen nicht von denen bei konventionell angetriebenen Triebzügen. Erwähnenswert sind zusätzlich Zeitbedarfe für die Konditionierung zu Betriebsbeginn und das Herunterfahren der Brennstoffzellen am Betriebsende. Weiterhin ist für die Betreiber der neuen Fahrzeugtypen zu beachten, dass Vorklimatisierungen der Fahrgasträume (Vorheizen im Winter, Vorkühlen im Sommer) nur unter betrieblicher Energieversorgung stattfinden können. Die elektrische Energie der Elektranten in Abstellanlagen reicht hierfür nicht aus. Im Brennstoffzellenfahrzeug erfolgt die Vorklimatisierung nach Aufrüstung aus der Brennstoffzelle. Im Akku-Fahrzeug ist hier die Energieversorgung aus einer Oberleitung vorzuziehen. Bei Betriebsstart in Betriebsstellen / auf Gleisen ohne Oberleitung, wären die Fahrzeugbatterien ansonsten entsprechend zusätzlich für den Energiebedarf der Vorklimatisierungen auszuliegen, oder es bedarf einer „Zugvorheizanlage“.

### **Betriebliche Zuverlässigkeit**

Für die zukünftigen Betreiber von neuen Fahrzeugen mit innovativen Antrieben ist deren konkretes Einsatzverhalten und die Einsatztauglichkeit bislang nur schwer einschätzbar. Es liegen alleine zusammenfassende Veröffentlichungen / Präsentationen der Betreiber der Prototypen von iLint und Desiro / Cityjet (EVB und ÖBB) vor – Herstelleraussagen helfen für eine Einschätzung hier wenig.

Die Erfahrungen über die Einsatztauglichkeit der neuen Fahrzeuge werden bis zum Betriebsstart von MDSB2025plus steigen; einige Netze mit innovativen Antrieben sind (gemäß Plan) dann bereits bis zu drei Jahren im Betrieb. Problematisch ist für interessierte EVU der Zeitpunkt der Angebotsabgabe für die Verkehrssauschreibung MDSB2025plus, da diese auf jeden Fall weit vor der Betriebsaufnahme von XMU-Netzen liegt.

Die Risiken aus Fahrzeugunverfügbarkeiten, bezüglich der Eintrittswahrscheinlichkeit und der Auswirkung in Form von Betriebsstörungen, können für ein Angebot noch nicht realistisch bewertet werden und sind schwerer zu kalkulieren als in klassischen Ausschreibungen. Hier besteht durchaus die Gefahr, dass EVU, welche etwaige Risiken zu

gering einschätzen, aufgrund eines niedrigeren Angebotspreises den Zuschlag erhalten, und sich hieraus in der späteren Betriebsphase für den ZVNL unerwünschte Effekte ergeben.

Käufer / Betreiber von innovativen Fahrzeugen sollten daher versuchen, entstandene Schäden aus betrieblichen Unverfügbarkeiten aufgrund von Fahrzeugfehlern mit wirksamen vertraglichen Mitteln vom Hersteller zurückfordern. Die Gestaltung und Durchsetzbarkeit solcher Vertragsinstrumente ist sicherlich stark abhängig von Marktlage, Auftragsvolumen und Käuferorganisation.

Das Problem der Ungewissheit über die reale Zuverlässigkeit, Fehlerhäufigkeit und technische Verfügbarkeit der neuen Fahrzeuge bzw. der neuen Systeme – Traktionsbatterien, Brennstoffzelle und zugehörige Komponenten gilt aktuell, wenn auch schwächer, für die Hersteller selbst.

Es empfiehlt sich daher, den Hersteller umfassend in die Verantwortung für die Zuverlässigkeit / technische Verfügbarkeit der Fahrzeuge einzubinden. Die in Abschnitt 0 aufgeführten Poolmodelle nehmen sich diesem Anspruch an und positionieren den Fahrzeughersteller als Fahrzeugbereitsteller und langfristigen Instandhalter / Verfügbarkeitsgaranten (siehe auch Abschnitt 0 Instandhaltung). Es sei darauf hingewiesen, dass derzeit die Mehrheit der bereits bestellten und aktuell in der Ausschreibung befindlichen XMU-Netze diesen Anspruch verfolgen.

### Energieverbrauch

Die zukünftigen Betreiber von innovativen Fahrzeugen werden sich bei ihren Prognosen für den Energieverbrauch vor allem auf ihre Expertise und Software in der Energiekalkulation für Elektrotriebzüge stützen, da sowohl Brennstoffzellen- als auch Akku-Fahrzeuge schließlich EMUs sind. Die hierzu notwendigen fahrdynamischen Daten werden von den Fahrzeugherstellern bereitgestellt und werden um eigene Erfahrungen ergänzt.

Schwierigkeiten ergeben sich in der Prognose in der Berücksichtigung der Effizienz / des Wirkungsgrads der Energieerzeugung/Energiewandlung, insbesondere auch deren Entwicklung über die Lebensdauer der Fahrzeuge. Konkrete Fragen sind hier bspw.: Wird rekuperierte Energie in gleichem Maße in die Akkus zurückgespeist wie üblicherweise in die Oberleitung? Zu welchen Zeitpunkten nehmen BEMUs ihre Spitzenlast auf (diese ist kostenrelevant), da unter Oberleitung parallel Traktionsenergie und Ladeenergie aufgenommen wird? Verlieren Traktionsbatterien ihre Leistungsfähigkeit über die Zeit?, wie schnell?

Künftige Käufer/Betreiber sollten in Vorbereitung einer Angebotserstellung für MDSB2025plus entsprechende Fragen an die Fahrzeughersteller richten. Und weiterhin ist zu überlegen, inwiefern Energieverbrauchsversprechen der Hersteller vertraglich abgesichert werden können.

### Sicherheit

Siehe hierzu Abschnitt 3.2.2.

## Fahrzeuginstandhaltung

### Instandhaltungskonzeption allgemein

Die Eisenbahnbetreiber nutzen heute eine Vielzahl an möglichen Konstellationen zur Ausführung der Fahrzeuginstandhaltung. Während einige (v.a. arrivierte) EVU eine integrierte Instandhaltung bevorzugen und Vorteile bezüglich technischem Know-how sowie Wertschöpfung in der eigenen Organisation sehen, favorisieren andere EVU (i.d.R.: „Angreifer“, auch solche in privater Eigentümerschaft) häufig eine schlanke, eigene Organisation und die vollständige oder zumindest teilweise Vergabe der Instandhaltung an Serviceanbieter. Die angebotenen Service-Level sind in unterschiedlichster Form wählbar, abhängig von der Ausrichtung des jeweiligen EVU: von Full-Service bis hin zu Erbringung von Leistungen nur bezüglich spezifischer Tätigkeiten oder der Ersatzteilversorgung. Als Anbieter von Instandhaltungsleistungen treten EVU, spezialisierte Instandhaltungsanbieter und Werkstätten sowie seit einigen Jahren auch verstärkt die Fahrzeughersteller selbst auf.

Die in die innovativen Fahrzeuge neu und zusätzlich eingebauten Komponenten der Energieerzeugung, -wandlung, -speicherung und des Energiemanagements sind in die Instandhaltungskonzepte der Triebzüge zu integrieren. Dieser Prozess erfolgt initial durch die Hersteller, die für ihre Prototypen erste Instandhaltungspläne entwickelt haben (in einigen Fällen dürften diese Pläne noch kaum existent sein). Eine tatsächliche Fahrzeuginstandhaltung an innovativen Fahrzeugkonzepten findet bislang in geringem Umfang statt, bezogen auf die Fahrzeuganzahl und auch auf den tatsächlichen Umfang in der bisherigen Betriebszeit. Vergleichsmöglichkeiten sind heutigen Instandhaltern nicht möglich, da bislang nur Prototypen verkehren. Es ist davon auszugehen, dass die Instandhaltungskonzepte (der Hersteller) für innovative Fahrzeuge bzw. bezogen auf die neuen Antriebstechnologien noch nicht ausgereift sind, noch mit mehr Sicherheiten beaufschlagt sind (häufigere Zyklen, mehr Tätigkeiten) und sich die Instandhaltungspläne über Zeit vereinfachen und strecken werden. Die Weiterentwicklung und -pflege der Instandhaltungsplanung obliegt später der beauftragten Instandhaltungsstelle.

Für die Instandhalter (Hersteller inbegriffen) bestehen zusammenfassend zu Betriebsbeginn noch Ungewissheiten der Fahrzeuginstandhaltung bezüglich

- Prozesse (Tätigkeiten, präventive Intervalle, Notwendigkeit von Tätigkeiten/Intervallen)
- Ausfallverhalten der neuen Systeme (siehe auch Abschnitt 0)
- Kosten / Kostenentwicklung von Ersatzteilen

Diese Ungewissheit gilt in gleicher Form für ein bietendes EVU im Vergabeverfahren MDSB2025plus. Die Bestimmung der Instandhaltungskosten über den Zeitraum eines Verkehrsvertrags fällt je nach Annahmen und Risikobereitschaft des EVU sehr unterschiedlich aus.

Aus Sicht eines EVU ist die mehr oder weniger umfassende Vergabe von Instandhaltungsleistungen an den Fahrzeughersteller eine sinnvolle Lösung, um die oben dargestellten Ungewissheiten abzufedern. Die Leistungen könnten sich eventuell nur auf einen bestimmten Zeitraum (Einschwingphase) oder nur auf die neuen Komponenten beziehen.

Die abzuschließenden Service-Verträge müssen dann Garantien zu Kosten, Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit der Fahrzeuge enthalten. Alstom bietet beispielsweise die Gesamtverantwortung für Instandhaltung (sowie Wasserstoffbereitstellung) aktiv als Produkt an, und auch die anderen Hersteller von Akku-Triebzügen werden Instandhaltung und Service anbieten. In den bislang abgeschlossenen Vergabeverfahren mit innovativen Antrieben haben die Aufgabenträger immer den ausgewählten Fahrzeughersteller mit der langfristigen, gesamthaften Instandhaltung der Flotte beauftragt.

### **Instandhaltung von Brennstoffzellenfahrzeugen**

Ein FCEMU beinhaltet mit Brennstoffzellen und Traktionsbatterien zwei neue, zusätzliche Technologien in einem Fahrzeug im Vergleich zu Elektrotriebzügen. Das bedingt einen vergleichsweise höheren Instandhaltungsaufwand im Vergleich zu BEMU, der jedoch geringer im Vergleich zum Dieseltriebzug ausfällt, bei dem ein Verbrennungsmotor recht hohen Aufwand verursacht. Die notwendigen Tauschintervalle der Brennstoffzellen und deren Beschaffungspreise führen jedoch zu hohen Teilekosten gegenüber Diesel und vor allem auch gegenüber den Akku-Fahrzeugen, selbst bei sehr positiven Annahmen zu Neupreisen in der Zukunft und längeren Lebensdauern.

Werkstätten für Brennstoffzellenzüge benötigen eine gewisse Zusatzausstattung im Gegensatz zu Werkstätten für Elektrotriebzüge (und Akku-Zügen). Der Umfang und die Kosten sind jedoch überschaubar (Wasserstoff-Sensoren, Anbindung an Brandmeldeanlage, zusätzliche Belüftung, Explosionsschutz, zusätzliche Werkzeuge) und fallen im Rahmen eines Gesamtprojekts kaum auf.

Der Umgang mit Wasserstoff in den Eisenbahnwerkstätten bedingt eine teilweise gesonderte Antragstellung und Betriebsgenehmigung gegenüber Werkstätten für Elektrotriebzüge (siehe hierzu → AP 3.1. 4, I. , 2).

Daneben ist der Umgang mit Wasserstoff neu für das Personal in Eisenbahnwerkstätten. Nach entsprechenden Trainings und einer gewissen Einarbeitungsphase sollte jedoch auch die Wartung von wasserstoffführenden Druckgeräten, wie in anderen Industriebereichen auch, zu einer Routinearbeit werden.

### **Instandhaltung von Akku-Fahrzeugen**

BEMUs beinhalten mit den Traktionsbatterien eine neue Technologie in einem Fahrzeug gegenüber bekannten Elektrotriebzügen. Das führt zu einem höheren Instandhaltungsaufwand im Vergleich zu regulären EMU, jedoch weniger Aufwänden als bei FCEMU oder DMU. Die notwendigen Tauschintervalle der Akkus und deren Beschaffungspreise führen zu höheren Instandhaltungskosten im Vergleich zu reinen Elektrotriebwagen, jedoch deutlich geringeren Teilekosten gegenüber Diesel und Brennstoffzellenfahrzeugen.

Auch hier sind die unbekannteren Variablen Lebensdauer und Kostenentwicklung der Batterien ein Problem für eine Instandhaltungsstelle.

Im Unterschied zum FCEMU mit Wasserstoffgeräten sind Arbeiten an Hochvoltanlagen in Eisenbahnwerkstätten Routine, die Instandhaltungstätigkeiten an Traktionsbatterien fügen sich problemlos in eine Werkstatt für Elektrotriebzüge ein, spezifische Werkstattanpassungen sind nicht notwendig.

(Details zu Kosten der Instandhaltung, siehe AP2 und AP4).

### Energieversorgung

Energieversorgungseinrichtungen für Fahrzeuge mit innovativen Antrieben sind regelmäßig zum einen Wasserstofftankstellen sowie zum anderen Oberleitungsanlagen. Ergänzend sei auf die notwendige Energieversorgung in Abstellung in Abschnitt 0 hingewiesen, auf die hier nicht nochmals eingegangen wird.

### Wasserstoff-Tankstelle und Wasserstoffversorgung

Momentan werden netzspezifische Wasserstofftankstellen in Niedersachsen und Hessen aufgebaut. Alstom ist dort jeweils im Konsortium mit einem Industriepartner (Linde, infraserv Höchst) verantwortlich für die Errichtung und den Betrieb der Tankstellen sowie die Wasserstoffversorgung. Das Paketangebot Fahrzeug, Tankstelle und Wasserstoffversorgung ist aktuell noch Verkaufspolitik von Alstom, da der iLint nur im System funktionieren kann. Auf Nachfrage erklärte auch Siemens (per E-Mail im August), ein entsprechendes Paket anbieten zu können. Mittelfristig werden die Fahrzeughersteller jedoch die Verantwortung für Tankstellen und Wasserstoffversorgung nicht mehr übernehmen wollen, da diese Leistungen nicht zum eigentlichen Produktportfolio gehören (und passen) und extern zugekauft werden müssen. Stattdessen werden spezialisierte Lieferanten (wie bspw. Gasversorger) als Vertragspartner für die Energieversorgung ihre Leistungen im SPNV anbieten und so ihrerseits zukünftige Vertragspartner von EVU oder Aufgabenträgern. Eine einheitliche Betankungsschnittstelle vorausgesetzt, steht einer fachlichen Aufteilung der Zuständigkeiten nichts im Weg. Auch eine weitere Differenzierung der Wasserstoffbereitstellung auf zwei Partner in Wasserstofflieferung und Wasserstofftankstellen ist möglich. Sollte sich langfristig die Brennstoffzellentechnologie (auch bei anderen Verkehrsträgern) durchsetzen, wird ein Netz von Wasserstofftankstellen verschiedener Betreiber entstehen und als Service-Einrichtungen vergleichbar zum heutigen Dieseltankstellennetz allen EVU offen stehen.

Von einem Markt und einem Marktpreis für Wasserstoff als Energiequelle im Schienenverkehr kann noch nicht gesprochen werden. Bislang sind die Versorgungsverträge und -preise projektspezifisch gebildet und geschlossen worden. Wirtschaftlichkeitsanalysen (zu verifizieren durch AP4) zeigen, dass bei Preisen über 5 €/kg Wasserstoff die Energiekosten eines FCEMU unwirtschaftlich im Vergleich zur Elektrotraktion werden. Die Preisentwicklung des Wasserstoffs über Zeit hängt maßgeblich von den primären Herstellungswegen ab (Gas oder Strom, siehe AP1) und deren Verhältnis zueinander.

Neben den Preisen sind zukünftig Abnahmemengen, Lieferverfügbarkeit und technische Verfügbarkeit der Tankstellen wesentliche Vertragsregelungen der Besteller (EVU oder Aufgabenträger) mit den notwendigen Lieferanten / Anbietern der Wasserstoffversorgung (vgl. dazu auch AP 3.1, Ziff. 4.III.2.b.aa).

Bei einem Einsatz von Brennstoffzellenzügen im MDSB2025plus wäre zumindest eine neue Tankstelle im Netz zu errichten. (Standorte und Versorgungsmöglichkeiten zeigt → AP1 auf.) Zum Zeitpunkt der Beauftragung des EVU für MDSB2025plus (vgl. 2022) ist davon auszugehen, dass die Hersteller noch Tankstellen und Wasserstoffversorgung anbieten oder zumindest bei der Bereitstellung und Vermittlung an einen Partner stark unterstützen werden müssen.

Zum jetzigen Zeitpunkt ist für jedes EVU die Beschaffung von Leistungen im Zusammenhang mit Wasserstoff absolutes Neuland. Eine Ausnahme könnte DB-Regio mit DB-Energie als Dienstleister an ihrer Seite sein<sup>43</sup>. Es ist mit einem erhöhten zeitlichen Aufwand im Vergleich zu geübten Beschaffungsvorgängen sowie zusätzlichen Kosten für notwendiges externes know-how (beginnend von der Spezifikation, Vergabe, Projektierung, Genehmigung, Leistungsüberwachung, Pflege der Anlage/n) für den gesamten Bereitstellungspfad Wasserstoff für die EVU zu rechnen. Die in einer EVU-Angebotskalkulation angenommenen Kosten sind im Angebotszeitpunkt mit hohen Unsicherheiten verbunden und variieren sicherlich stark von EVU zu EVU.

Zu den Vorgaben für Planung und Genehmigung von H<sub>2</sub>-Tankstellen und dem daraus resultierenden Zeitbedarf siehe AP 3.1, Ziff. 4.1.2.

### Ladestationen

Batteriezüge benötigen dann neu zu errichtende Ladestationen, wenn die größte oberleitungsfreie Distanz in einem Ausschreibungsnetz nicht ausreicht, um die Strecke im reinen Batteriebetrieb zu befahren.

Die Notwendigkeit einer zusätzlichen Ladestation im Verkehrsnetz hängt auch vom Fahrzeugtyp bzw. dessen Batterieauslegung ab (siehe 0, und Ergebnisse aus AP2). Je nach Distanz der oberleitungsfreien Strecke könnte der Umstand eintreten, dass

- Fahrzeuge mit hoher Reichweite im Batteriebetrieb für dieselbe Strecke keine neue Ladestation benötigen,
- während Fahrzeuge mit geringerer Reichweite im Batteriebetrieb für dieselbe Strecke eine Nachladung an einer neuen Ladestation benötigen.

Für die Findung eines gesamtwirtschaftlichen Optimums sind demnach Kosten für Fahrzeuge einerseits und Kosten für neu Ladestationen im Sinne eines Lebenszyklusansatzes gegenüberzustellen. Dieses Optimum könnte nur berechnet werden, wenn ein EVU zum einen Beschaffung und Unterhalt der Fahrzeuge sowie Errichtung und Betrieb der Ladestation verantwortet.

Unbestritten wäre die Entbehrlichkeit neuer Ladeinfrastruktur im MDSB2025plus ein wesentlicher Vorteil, zum einen gegenüber einer Wasserstoffvariante, aber auch für die Realisierbarkeit einer BEMU-Variante in MDSB2025plus.

Betrieblich zu präferierende Standorte für eventuell notwendige Ladestationen befinden sich an Orten mit (relativ langen) Stillstandszeiten der Züge. Dies wären bspw. Orte mit Fahrzeugwenden, Abstellorte, in Teilen auch Haltepunkte in Fahrten. Die genannten

<sup>43</sup> Siehe Internetauftritt DB-Energie: <https://www.dbenergie.de/dbenergie-de/geschaeftskunden/schieneverkehr/alternativeantriebe>

Standorte werden sich im MDSB2025plus voraussichtlich auf DB-Netz Infrastruktur befinden und fallen somit in den Verantwortungsbereich von DB-Netz (siehe hierzu näher AP 3.1, Ziff. D.I.1.b.cc). Mit der DB-Netz Richtlinie 997 liegt neuerdings ein Anforderungskatalog für Ladestationen mit Oberleitung, auch Oberleitungsinselanlagen (OLIA) genannt, vor. Die RIL definiert verschiedene Ausführungsformen mit Oberleitung als Standard-Ladestation (Bahnstromversorgung mit 15 kV / 16,7 Hz), lässt jedoch eine Energieversorgung über Stecker in Ausnahmefällen als Möglichkeit zu.

Die Anforderungen an die notwendige Leistungsfähigkeit neu zu errichtender OLIA (in Megawatt) ergeben sich aus dem geplanten Fahrzeugeinsatz, also vor allem gleichzeitig ladende Fahrzeuganzahl und Ladeleistung je Fahrzeug. Die Anforderungsdefinition im Rahmen eines Errichtungsvertrags mit dem Ersteller und zukünftigen Betreiber der Ladestation setzt demnach eine Kenntnis dieser Parameter voraus, zumindest ist eine Mindestleistungsfähigkeit bei mehreren möglichen Fahrzeugkombinationen zu bestimmen. Sollte der ZVNL einen entsprechenden Vertrag mit DB-Netz schließen, läge die Spezifikation der Anlage in seiner Verantwortung (vgl. dazu AP 3.1, Ziff. 4.III.2.b.aa (1)).

Die Abrechnung bezogener Energie aus einer OLIA erfolgt über die TEMA-Box / DB-Energie, wie gewohnt unter Oberleitung (vgl. dazu AP 3.1, Ziff. 4.I.1.bb/cc und zum vertraglichen Umgang damit AP 3.1, Ziff. 4.III.2.b.bb).

Neben OLIA auf DB-Netz Infrastruktur könnten Ladestationen auch auf Infrastruktur von privaten EIU errichtet werden. Diese Konstellation träte vor allem im Fall der Reaktivierung der Muldentalbahn nach Rochlitz ein, da sich die Strecke im Eigentum der örtlichen Kommunen und der MB Muldentalbahntrasse Invest GmbH & Co. KG befindet<sup>44</sup>. Hier gelten im Grundsatz die gleichen Bedingungen wie bei der Errichtung der Ladeinfrastruktur in Infrastrukturen bzw. auf Grundstücken der DB. Es ist aber fraglich, ob von dem privaten EIU auch, wie bei der DB, erwartet werden kann, dass es Errichtung und Betrieb der Ladeinfrastruktur übernehmen wollen wird; immerhin gehört dies wohl nicht zu seinem Kerngeschäft. Wir verweisen zur Vertiefung auf AP 3.1, Ziff. 4.I.1.b.cc).

Unabhängig vom Eigentümer/Betreiber zusätzlicher Ladestationen im zukünftigen MDSB-Netz, sind Termintreue der Betriebsbereitschaft sowie Störungsfreiheit der Energieversorgung der neuen Ladestationen wesentlich für den ZVNL bzw. den Fahrgastbetrieb. Zum vertraglichen Umgang damit vgl. dazu AP 3.1, Ziff. 4.III.2.b.aa (1) sowie Ziff. 4.III.2.b.bb).

Um dem Risiko einer verspäteten Fertigstellung der Ladestationen zu begegnen, könnte der ZVNL die Auslösung variabler Betriebsaufnahmeterminen (mit bspw. zwei Jahren Vorlauf) mit dem EVU vereinbaren. Diese Flexibilität ist letztlich mit zusätzlichen Kosten für den ZVNL verbunden.

---

<sup>44</sup> Wikipedia Artikel: Bahnstrecke Glauchau–Wurzen, Abruf 15.09.2020

### 3.5.4 Varianten der Ausschreibung / Vertragsgestaltung

Unter Berücksichtigung bereits bestehender Konstellationen von Ausschreibungs- und Vertragsmodellen sowie möglichen Variationen der oben dargestellten, wesentlichen Leistungsbestandteile werden im Folgenden die untenstehenden Modelle vorgestellt.

Zur Vereinfachung der Variantendefinition sind in der nachfolgenden Tabelle nur die beiden Akteure/Vertragspartner EVU und AT aufgeführt.

- EVU bedeutet, dass das EVU aktiv wird, eventuelle Teilleistungen durch Dritte ausführen lässt, jedoch die Leistung gegenüber dem AT im Verkehrsvertrag verantwortet.
- AT bedeutet, dass der ZVNL aktiv wird und sich um die Beschaffung eines Dienstleisters für die Ausführung einer Teilleistung kümmert. Der AT führt selbst keine Leistungen aus, der Dienstleister wird (in der Regel) faktischer Vertragspartner des EVU.
- Tatsächlich in Frage kommende Akteure sind in Abschnitt 3.5.3 dargestellt.

		Fahrzeug- bereitstellung	Bahnbetrieb	Instand- haltung	Energiebereitstellung	
					H2-Bereitstellung H2-Tankstelle	Ladestation
<b>Modell 1</b>	Klassische Vergabe aller Leistungen an ein EVU	EVU	EVU	EVU	EVU	EVU
<b>Modell 2</b>	Energiebereitstellung durch AT	EVU	EVU	EVU	AT	AT
<b>Modell 3.a</b>	Fahrzeuggestaltung durch den AT / EVU als reiner Betreiber	AT (Hersteller)	EVU	AT (Hersteller)	AT (Hersteller)	AT/DB AG
<b>Modell 3.b</b>	Fahrzeuggestaltung und -instandhaltung durch einen Dritten / EVU als reiner Betreiber	AT (Dritter)	EVU	AT (Dritter/EVU)	AT (Dritter/DB AG)	AT/DB AG

**Tabelle 27 - Übersicht berücksichtigter Vergabe-/ Vertragsmodelle**

### Modell 1 - Vergabe aller Leistungen an ein EVU

		Fahrzeug- bereitstellung	Bahnbetrieb	Instand- haltung	Energiebereitstellung	
					H2-Bereitstellung H2-Tankstelle	Ladestation
<b>Modell 1</b>	Klassische Vergabe aller Leistungen an ein EVU	EVU	EVU	EVU	EVU	EVU

Die Vergabe aller Leistungen an ein EVU ist das klassische Modell der Vergabe von Verkehrsleistungen und entspricht aus Sicht des ZVNL einem Vertragsmodell in einem heutigen Dieselnetz. Alle relevanten Leistungen zur Durchführung des Eisenbahnbetriebs werden durch ein EVU verantwortet, auf Basis eines Verkehrsvertrages mit dem ZVNL. Ausführungen der Vergabe und Vertragsgestaltung dieser Variante sind in AP 3.1 Abschnitt 4., III, 1. ausführlich dargestellt.

Zur Bewertung des „klassischen“ Modells ist festzuhalten:

Vorteile:

- Einfachste Form der Vergabe und Vertragsgestaltung aus Sicht ZVNL; geübte Prozesse und Schnittstellen, entspricht der schlanken Organisationsstruktur des ZVNL. Einzige Änderung wäre die Forderung nach Fahrzeugen ohne Verbrennungsmotor für ein ehemaliges Dieselnetz.
- Gesamtübernahme der Verantwortung durch einen Vertragspartner.
- Es ermöglicht dem EVU, selbst zu entscheiden, ob es in größerem Umfang eigene Prozesse und Know-how für die innovativen Fahrzeuge (insbes. Instandhaltung/Wartung) entwickelt oder diese Leistungen auf Subunternehmer auslagert (durch entsprechende Serviceverträge).
- Es besteht in hohem Maße die Möglichkeit, dass EVU und Hersteller zusammenarbeiten, um ein für den konkreten SPNV-Betrieb optimal abgestimmtes Angebot (Fahrzeug und Betriebsprogramm) zu erzielen.
- Die Variante ergibt vsl. ein perfekt abgestimmtes Angebot für das Los.
- In Betracht gezogen werden könnte das Modell dann, wenn die Analyse ergibt, dass Batteriezüge eingesetzt werden sollen und keine Ladeinfrastruktur oder nur sehr untergeordnete in DB-Anlagen zu errichten ist (etwa weil die Beladung über die vorhandenen Oberleitungen ausreicht und allenfalls ggf. ein Elektrant in einem Bahnhof zu ergänzen ist).

Nachteile:

- Die Vielzahl an unbekanntem Einflussgrößen wie in Abschnitt 3.5.3 beschrieben, erschweren eine Angebotskalkulation und die seriöse Einschätzung des Eintritts von Risiken im Betrieb für ein EVU.

- Risikoscheue EVU werden hohe Risikoaufschläge für betriebliche Risiken einpreisen oder gänzlich auf die Abgabe eines Angebots für das Los verzichten. Die Folge sind eventuell überteuerte Angebote oder ein eingeschränkter Wettbewerb.
- Risikoaffine EVU unterschätzen hingegen möglicherweise eventuelle, zukünftige Schwierigkeiten, erhalten aufgrund eines niedrigen Angebotspreises den Zuschlag, in Folge treten zukünftig eventuell betriebliche Mängel auf oder es kommt zu Nachforderungsanträgen aufgrund von unterkalkulierten Kosten an den ZVNL.
- Anders herum ist eine Preisprüfung von besonders niedrigen Angeboten vor Vergabe für die alternativen Antriebe durch den ZVNL ebenso schwer objektiv und belastbar durchführbar.
- Die Energiebereitstellung in Verantwortung des EVU dürfte das größte Hindernis für eine problemlose / wettbewerbliche Vergabe dieser Variante sein:
  - Die Errichtung einer Wasserstofftankstelle wäre unter den in Abschnitt 0 aufgeführten Hemmnissen durch ein EVU mit weiteren Partnern leistbar.
  - Die Errichtung einer Ladestation (auf Grund von DB-Netz) erscheint aus heutiger Sicht für ein EVU alleine nicht leistbar, ausgenommen hiervon ist evtl. DB-Regio als Konzernschwester von DB-Netz. Insbesondere die Unwägbarkeit, ob überhaupt ein Errichtungsvertrag mit DB-Netz geschlossen werden kann, dürfte ein EVU von einem Angebot hierzu zurückschrecken lassen.
- Der ZVNL hat keinen direkten Einfluss auf die Vertragsgestaltung der Energiebereitstellung.
  - Konditionen und Anforderungen sind eventuell speziell auf das EVU und seine Fahrzeugflotte zugeschnitten und erschweren die Weiternutzung nach Ablauf des Verkehrsvertrags.
  - Ein EVU wird keine Synergien einplanen, dies ist vor allem für einen FCEMU-Betrieb relevant, falls gleichzeitig auch Straßenfahrzeuge hier getankt werden sollen.

## Modell 2 - Energiebereitstellung durch den AT

		Fahrzeug- bereitstellung	Bahnbetrieb	Instand- haltung	Energiebereitstellung	
					H2-Bereitstellung H2-Tankstelle	Ladestation
<b>Modell 2</b>	Energiebereitstellung durch AT	EVU	EVU	EVU	AT	AT

Die Variante „Energiebereitstellung durch den Aufgabenträger“ ist eine Folgevariante aus Modell 1 und ergibt sich durch die Herausnahme der Energiebereitstellung aus dem Leistungsumfang des EVU. Die in Modell 1 aufgeführten Vor-/Nachteile bezüglich der verbleibenden Leistungen Fahrzeugbereitstellung, Bahnbetrieb, Instandhaltung verändern sich entsprechend nicht und sollen nicht nochmals wiederholt werden.

Selbstverständlich wird nicht der ZVNL selbst Anbieter der Energieversorgung, sondern zeichnet „nur“ verantwortlich für den Abschluss eines/mehrerer Verträge mit Dritten über die Energiebereitstellung über die Laufzeit des Verkehrsvertrags. Der ZVNL würde einen/mehrere Partner für die Leistungen: Wasserstoff-Bereitstellung und Wasserstoff-Tankstelle oder Bereitstellung von Ladestation/en vorab per Ausschreibung suchen. Die entsprechenden Leistungen müssten spätestens mit Betriebsaufnahme (Vorbereitungsbetrieb) MDSB2025plus abgeschlossen sein.

Mögliche Ausführungen der Vergabe und Vertragsgestaltung dieser Variante sind in Abschnitt 0 bzw. in AP 3.1 Abs. 4., III, 2. ausführlich dargestellt.

Zur Bewertung dieses Modells ist festzuhalten:

Vorteile:

- Das Modell ähnelt stark dem „klassischen“ Modell 1 und verhilft dessen Grundstruktur dort zur Umsetzung, wo das „klassische“ Modell aufgrund der Schwierigkeiten der Errichtung der Infrastruktur in Reinform nicht umsetzbar ist.
- Im Fall einer BEMU-Ausschreibung und bei Notwendigkeit der Errichtung einer Ladestation:
  - generelles Ermöglichen eines EVU-Wettbewerbs (wenn die Analyse ergibt, dass Batteriezüge eingesetzt werden sollen und eine Ladeinfrastruktur in DB-Anlagen zu errichten ist (etwa eine Oberleitungs-Insel über einem Bahnhofsgleis)).
  - (Relative) Freiheit des AT in der Bestimmung des Standortes und in der Aushandlung von Konditionen im Sinne des ZVNL für eine langfristige, übergeordnete Energie-Versorgung in seinem Verbundraum.
  - Sofern der ZVNL die DB alleine mit der Errichtung von Elektranen oder Zugvorheizanlagen beauftragt, dürfte dieses Modell auch weiterhin mit wenig Komplexität behaftet sein.
- Im Fall einer FCEMU-Ausschreibung:
  - Erhöhung der Attraktivität des Loses für ein breiteres Bieterfeld;
  - Vermutlich Kostenreduktion durch Herausnahme des Risikos der Verantwortung für die zeitgerechte Bereitstellung der Energieinfrastruktur für die bietenden EVU.

Nachteile:

- Aufwand und Fehleranfälligkeit des (funktionierenden) Gesamtsystems durch das Einfügen einer Schnittstelle in das ansonsten gesamthafte Angebot aus einer Hand, insbesondere:
  - Neuerungen und Komplexität in den Vergabeunterlagen.
  - Der ZVNL bestimmt die Anforderungen und Vertragskonditionen im Vorhinein für ein zum Zeitpunkt des Vertragsschlusses unbekanntes EVU.
  - Aufbau bzw. Einkauf von zusätzlichem know-how auf Seiten des AT notwendig.
  - Zumindest ein zusätzliches Vergabeverfahren über einen Versorgungsvertrag notwendig (Zeit-, Ressourcenaufwand).

- Zusätzliches Vertragscontrolling zumindest eines Versorgungsvertrages für die Energiebereitstellung.
- Das Modell nimmt dem EVU nicht die Verantwortung für die innovativen Antriebe ab. Damit bleiben die bereits beim „klassischen“ Modell benannten Nachteile bestehen.

### Modell 3 – EVU als reiner Betreiber

		Fahrzeug- bereitstellung	Bahnbetrieb	Instand- haltung	Energiebereitstellung	
					H2-Bereitstellung H2-Tankstelle	Ladestation
<b>Modell 3</b>	Fahrzeuggestellung durch den AT / EVU als reiner Betreiber	AT	EVU	AT	AT	AT

Die Variante „Fahrzeuggestellung (plus Instandhaltung) durch den Aufgabenträger“ ist wie in Abschnitt 3.5.3 dargestellt die bislang gängige Form der Einführung von Fahrzeugen mit innovativen Antrieben in den deutschen SPNV. Ziel ist es nicht, die Aufgabe Fahrzeuggestellung und Instandhaltung generell dem EVU zu nehmen, sondern die Unwägbarkeiten bezüglich Zuverlässigkeit, Instandhaltbarkeit der neuen Technologien, außerdem die Entfernung von Risikozuschlägen wegen der Restwertproblematik aus der Kalkulation. Vor diesem Hintergrund ist diese Vergabevariante eine temporäre und zur Zeit adäquate Form zur Markteinführung der innovativen Fahrzeuge der öffentlichen Hand.

Wie in Modell 2 wird der ZVNL nicht selbst Leistungen „Fahrzeuggestellung“ und „Instandhaltung“ ausführen, sondern vorab einen / mehrere Dritte/n über Ausschreibungen auswählen und diese/n zumindest für den Zeitraum eines Verkehrsvertrags / besser über die gesamte Lebensdauer der Fahrzeuge zur Erfüllung gegenüber dem jeweiligen EVU verpflichten.

Die in Modell 2 beim ZVNL verankerte Verantwortlichkeit für die Energiebereitstellung beim AT wird hier beibehalten.

Im Folgenden sollen zwei Untervarianten von Modell 3 vorgestellt werden:

- a. Zuerst mit einem Fahrzeugpool im Eigentum des Aufgabenträgers, in Kombination mit einer Herstellerinstandhaltung. Nach Aussage des ZVNL ist diese Variante (zur Zeit) aufgrund der Satzung nicht möglich, da der ZVNL kein Eigentum an Fahrzeugen erwerben darf. Dennoch soll auf die Charakteristika sowie Vor- und Nachteile dieser Vertragsvariante hier kurz eingegangen werden.
- b. Folgend aus einer ggf. nicht möglichen Realisierbarkeit von Modell 3.a soll zweitens die Fahrzeuggestellung aus dem Pool eines Dritten dargestellt werden.

### Modell 3.a – Fahrzeugpool des AT und Herstellerinstandhaltung

		Fahrzeug- bereitstellung	Bahnbetrieb	Instand- haltung	Energiebereitstellung	
					H2-Bereitstellung H2-Tankstelle	Ladestation
<b>Modell 3.a</b>	Fahrzeugbereitstellung durch den AT / EVU als reiner Betreiber	AT (Hersteller)	EVU	AT (Hersteller)	AT (Hersteller)	AT

Die Variante „Fahrzeugpool des AT mit Herstellerinstandhaltung“ beinhaltet im Kern den Lebenszyklusansatz von integrierter Zuständigkeit für Entwicklung, Bau und Instandhaltung aus einer Hand. Inhalt ist die zeitgleiche Vergabe eines Fahrzeuglieferungsvertrags sowie eines langfristigen Instandhaltungsvertrags (in der Regel über Fahrzeuglebensdauer, also 25 bis 30 Jahre) an einen Hersteller. Beide Verträge schließt der Aufgabenträger, der jedoch ausschließlich als Finanzierer des Kaufs und als Eigentümer auftritt. Der Aufgabenträger verpachtet die Fahrzeuge danach für den Zeitraum eines Verkehrsvertrags an das beauftragte EVU. Der Hersteller ist für die gesamthafte Instandhaltung zuständig, kombiniert mit Anforderungen an Fahrzeugverfügbarkeit / -zuverlässigkeit. EVU und Hersteller greifen gemeinschaftlich auf die Fahrzeuge zu, zur jeweiligen Vertragserfüllung (Betrieb oder Instandhaltung).

Für den Fall des Einsatzes von Brennstoffzellenzügen sollte der ZVNL in diesem Modell den ausgewählten Fahrzeughersteller zusätzlich als Wasserstoffversorger verpflichten, um die Anzahl notwendiger Vergabeverfahren und Verträge zu reduzieren.

Ausführungen der Vergabe und Vertragsgestaltung dieser Variante sind weiterhin in AP 3.1 Abs. 4, III, 3. ausführlich dargestellt.

Zur Bewertung dieses Modells ist festzuhalten:

Vorteile:

- Möglichkeit für strategische Fahrzeugentscheidungen im Sinne des AT, bspw. für zukünftige Netzänderungen, Kuppelbarkeit, Zugriff auf Fahrzeuge bspw. für Zwischennutzungen in Interimsvergaben.
- Konzentration der Vertragspartner auf die jeweiligen Kompetenzen:
  - Möglichkeit der Nutzung günstiger Kommunalkreditkonditionen des AT für die Fahrzeugbeschaffung.
  - Entstehen für Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit beim Hersteller
- Herausnahme von Finanzierungsrisiken und Wiederverwendungsrisiken für das EVU.
- Risikoübernahme des AT, insbesondere bezüglich der in Abschnitt 3.5.3 benannten Unwägbarkeiten in Zusammenhang mit der Instandhaltung und Zuverlässigkeit der Fahrzeuge mit innovativem Antrieb, so dass mit einer Erhöhung der Zahl der Bieter und ggf. weniger geringeren Wagnisaufschlägen der EVU gerechnet werden kann. Es könnte sich daher als vorteilhaftes Modell darstellen.
  - Erhöhter Wettbewerb und auf EVU-Seite

- Voraussichtlich kostengünstigere Angebote durch Vermeidung einkalkulierter Risiken
- Direkter Zugriff auf den Fahrzeughersteller bei Mängeln.
- Möglichkeit dem Hersteller auch die Verantwortung für Errichtung und Betrieb einer Wasserstofftankstelle zuzuordnen.

Nachteile:

- Hohe Verantwortungs- und Risikoübernahme des AT, Fahrzeugeigentum und -bereitstellung liegen außerhalb des eigentlichen Aufgabengebiets.
- Zusätzliche Verträge und Vergabeverfahren, zusätzlicher Zeitbedarf und Ressourceneinsatz.
- Einfügen einer zusätzlichen Schnittstelle in das ansonsten integrierte Angebot aus einer EVU-Hand:
  - Hoher vertraglicher Regelungsbedarf,
  - Gefahr fehlender/unklarer Regelungen in den neuen Verträgen und zwischen den Verträgen der Partner (AT, EVU, Hersteller),
  - Gefahr für den AT, bei Konflikten zwischen Herstellerinstandhalter und EVU „zwischen die Fronten“ zu geraten (was sich aber vertraglich einfangen lässt).
- Erhöhter Aufwand
  - Notwendigkeit des Aufbaus internen Fahrzeug-know-hows,
  - Controlling-Aufwand für das Eigentum (Fahrzeugzustand, werterhaltende Instandhaltung), Überwachung der Fahrzeugbereitstellung / Fahrzeugverfügbarkeit im Rahmen des Instandhaltungsvertrags.
  - Notwendigkeit des zeitweisen Einkaufs externen know-hows (Vergabe, Baubegleitung, Abnahme, laufendes Controlling),
- EVU kritisieren in Poolmodellen mit integrierter Instandhaltung die geringe Wertschöpfungsmöglichkeit für sie und die Reduktion auf die Aufgabe eines „Lohnkutschers“.
- Zu beachten ist auch, dass die Ladeinfrastruktur ggf. ergänzend zu beauftragen ist.

### Modell 3.b - Fahrzeugbereitstellung durch einen Dritten

		Fahrzeug- bereitstellung	Bahnbetrieb	Instand- haltung	Energiebereitstellung	
					H2-Bereitstellung H2-Tankstelle	Ladestation
<b>Modell 3.b</b>	Fahrzeugbereitstellung und -instandhaltung durch einen Dritten / EVU als reiner Betreiber	AT (Dritter)	EVU	AT (Dritter)	AT (Dritter)	AT

Neben der Fahrzeugbereitstellung durch das EVU selbst ist die Nutzung eines Dritten, also vor allem von Leasinggesellschaften, international gängig und auch in Deutschland verbreitet. Die NahSH dürfte der erste deutsche Aufgabenträger sein, der einen Bereitstellungsvertrag zu XMU mit einem Leasinggeber vereinbart hat.

Die Fahrzeugbereitstellung durch einen Dritten soll hier als Variante 3.b dargestellt werden, um einige Vorteile aus Variante 3.a nutzen zu können, auch ohne Fahrzeugeigentum, und andererseits sich ergebende Nachteile aus dem Fahrzeugeigentum zu umgehen. Daneben bleiben weitere unter Modell 3.a genannte Vor- und Nachteile unverändert bestehen.

Ausführungen der Vergabe und Vertragsgestaltung dieser Variante sind in in AP 3.1, Abs. 4, III, 4. ausführlich dargestellt.

Zur Bewertung dieses Modells ist festzuhalten:

Vorteile:

- Kein Eigentumserwerb des ZVNL
- Übernahme der Eigentümersrisiken durch den Bereitsteller (Beschaffung, Baubegleitung, Abnahme, technisches Controlling der Fahrzeuge)
- Übernahme der Unwägbarkeiten in Zusammenhang mit der Instandhaltung und Zuverlässigkeit der Fahrzeuge durch den Bereitsteller.
- Weniger technisches know-how beim ZVNL notwendig (extern einzubinden)
- Weniger Controlling-Aufwand (Überwachung der Fahrzeugbereitstellung / Fahrzeugverfügbarkeit im Rahmen des Bereitstellungsvertrags verbleibt).

Nachteile:

- Laufzeit wahrscheinlich nicht über Verkehrsvertrag möglich, sondern über Lebenszyklus der Fahrzeuge
- Leasinggeber wird vsl. eine Kapitaldienstgarantie des ZVNL verlangen.
- Noch ungeübtes Modell im Markt,
  - verbunden mit Zeitbedarf (Erstellung Vergabeunterlagen + Verfahren), fraglich ob noch vor MDSB2025plus umsetzbar,

- es wären vor einer positiven Entscheidung zu diesem Modell in jedem Fall Markterkundungen vorzunehmen, um die Zahl und Qualität der Bieter und ihre Vertrags- und Vergütungsmodelle näher kennen zu lernen,
- hoher vertraglicher Regelungsbedarf,
- Gefahr fehlender/unklarer Regelungen in den neuen Verträgen und zwischen den Verträgen der Partner (AT, EVU, Hersteller).
- Es ist allerdings davon auszugehen, dass mit der Einschaltung eines weiteren Dienstleisters die Kosten für den SPNV-Betrieb steigen könnten. Dies wäre aber gesondert zu bewerten.
- EVU kritisieren in Poolmodellen mit integrierter Instandhaltung die geringe Wertschöpfungsmöglichkeit für sie und die Reduktion auf die Aufgabe eines „Lohnkutschers“.

## 3.6 Empfehlungen für die Integration in MDSB2025plus

### 3.6.1 Ableitung der Ergebnisse auf die konkret betroffenen Strecken

Ausgehend von den in AP 3.1 und AP 3.3 diskutierten Modellen und dargestellten rechtlichen und organisatorischen Besonderheiten in Vergabe und Betrieb von Fahrzeugen mit innovativen Antrieben für die MDSB2025plus (ergänzt um die Erkenntnisse in AP 3.2) sowie unter Berücksichtigung der Ergebnisse der anderen Arbeitspakete kommen wir mit Blick auf die konkreten Strecken vorliegend zu folgenden Ergebnissen.

### 3.6.2 Festlegung der Traktionsart

#### Ausgangspunkt

Aus rechtlicher und organisatorischer Hinsicht sprechen keine hinreichenden Argumente für oder gegen die Festlegung auf eine der beiden Antriebsarten, also entweder Brennstoffzellen- oder Akkutriebzüge.

Es ist jedoch festzuhalten, dass jeglicher Infrastrukturausbau, sei es in Form einer Wasserstoffversorgung/-tankstelle oder in Form zusätzlicher Oberleitung / Ladestation, der eine Plangenehmigung oder einen Planfeststellungsbeschluss und ggf. eine Abstimmung mit der DB Netz AG erfordert, ein wesentliches Umsetzungsrisiko darstellt. Die damit verbundenen Unwägbarkeiten in zeitlicher und finanzieller Hinsicht sollten keinem EVU aufgebürdet werden. Wir empfehlen hier grundsätzlich die Verantwortungsübernahme durch den ZVNL.

#### Ableitung für die konkrete Situation

Im Fall des Einsatzes von Brennstoffzellenzügen ist vorliegend die Neuerrichtung einer Wasserstoffversorgung/-Tankstelle im Ausschreibungsnetz unumgänglich.

Im Fall des Einsatzes von Batteriezügen ist gemäß den Analyseergebnissen von AP 1<sup>45</sup>

- a. auf der Strecke Leipzig – Grimma - Döbeln allenfalls die Ertüchtigung der Elektranten zur Vorkonditionierung für zwei Fahrzeuge in Grimma von 32 auf 63 Ampere notwendig,
- b. für eine zukünftige, zu reaktivierende Streckenbedienung nach Rochlitz die Errichtung einer leistungsfähigen Oberleitungsinsel notwendig,
- c. gemäß Ergebnis AP 2<sup>46</sup> für eine zukünftige Bedienung der Strecke Gera – Leipzig die Errichtung von Nachladeinfrastruktur als leistungsfähige Oberleitungsinseln (bis 3 MW) in Gera und in Zeit notwendig.

Im Ergebnis ist aus rechtlich-organisatorischem Blickwinkel für die aktuell anstehende Einbindung der Strecke Leipzig – Grimma – Döbeln in die MDSB2025plus, die Entbehrlichkeit eines Infrastrukturausbaus ein gewichtiges Argument für den Einsatz von Batteriezügen.

Aufgrund der Unwägbarkeiten für den ZVNL über die tatsächliche und zeitliche Realisierung der zukünftigen Erweiterungen (gemäß b. und c. oben), sollte die heutige, unkomplizierte Implementierung eines Batteriebetriebs maßgeblich sein für die Entscheidung der Traktionsart. Sollten die Erweiterungstrecken (entgegen unseres Wissens) jedoch vor der

<sup>45</sup> AP 1, Foliensatz „Kernergebnisse“ aus der Präsentation vom 1. Oktober 2020, dort Folie 13.

<sup>46</sup> Korrigierter Stand zu den Energiebedarfswerten, Energie- und Systemkosten von Herrn Fritz (AP2, IFB); Mail und Datei vom 29. September 2020.

Realisierung stehen, sähe die Entscheidung weniger eindeutig aus; Besonderheiten sind in AP 3.1 ausführlich dargestellt und sollen hier nicht wiederholt werden.

### 3.6.3 Wahl des Vergabe- und Vertragsmodells

Bei der Wahl des Vergabe- und Vertragsmodells für den Betrieb der Batteriezüge ist danach zu unterscheiden, welche Strecken im Einzelnen befahren werden sollen.

#### Strecke Leipzig-Grimma-Döbeln (KBS 506)

Für die Bedienung der Strecke Leipzig-Grimma-Döbeln mit Batteriezügen wurde festgehalten, dass aufgrund des Elektrifizierungsgrades allenfalls die Ertüchtigung einer Nachladestation für zwei Fahrzeuge in Grimma von 32 auf 63 Ampere notwendig sei. Wir gehen davon aus, dass die damit verbundene infrastrukturelle Umrüstung, sofern die DB sich damit einverstanden erklärt, von überschaubarem Umfang bleibt und mit ihr keine unkalkulierbaren zeitlichen oder finanziellen Risiken einhergehen.

Vor diesem Hintergrund ist aus unserer Sicht ein Vorgehen gemäß dem von uns vorgeschlagenen Modell 1 zu empfehlen, d.h.:

- der ZVNL bestellt die Verkehre im Rahmen eines „klassischen“ Verkehrsvertrags bei einem EVU, wobei er die Unsicherheiten, die aus dem Einsatz von Batteriefahrzeugen resultieren, durch geeignete vertragliche Regelungen auffangen kann (siehe Abschnitt 3.6.4)
- das EVU ist gemäß Verkehrsvertrag weiterhin dafür verantwortlich die zusätzliche Ladeinfrastruktur (sowie sämtliche Abstellanlagen als Serviceeinrichtung) bei der DB zu beauftragen,

Unabhängig von der grundsätzlich gesamthaften Zuständigkeit des EVU, empfehlen wir, dass der ZVNL möglichst frühzeitig auf die DB zwecks Abstimmung und Vorprüfung der zusätzlichen Ladeinfrastruktur zugeht. Sollte die Abstimmung ergeben, dass einer Umsetzung durch das EVU bestimmte Hindernisse im Wege stehen (bspw. durch notwendige Vorlaufzeiten der Beauftragung und Planung für DB-Netz), könnte der ZVNL noch frühzeitig ein stärkeres, eigenes Engagement diesbezüglich in Erwägung ziehen (siehe Abschnitt 0 bzw. Modell 2).

#### KBS 506 mit Erweiterung bis Rochlitz

Für die zukünftige Streckenbedienung nach Rochlitz ist die Notwendigkeit einer Oberleitungsinsel vor vorgesehen. Da die gesamte Eisenbahninfrastruktur der Strecke nach Rochlitz vor einer Betriebsaufnahme des Verkehrs nach unserem Verständnis noch errichtet werden müsste, dürfte es zweckmäßig sein, mit der Streckenerrichtung auch die notwendige Oberleitungsinsel zu bauen. Da die Strecke unseres Wissens einem privaten Eigentümer sowie mehreren Kommunen gehört, wäre zu klären, ob diese mit einer Reaktivierung der Strecke und Errichtung der Infrastruktur einverstanden wären und ob diese als Betreiber der Strecke auftreten würden oder ob hierfür ein dritter Betreiber gefunden werden müsste. Derartige Verhandlungen sollte der ZVNL, und nicht die EVU führen (vgl. AP 3.1).

Wir empfehlen daher, in diesem Fall gemäß dem von uns vorgeschlagenen Modell 2 vorzugehen, d.h.

- der ZVNL bestellt die Verkehre im Rahmen eines „klassischen“ Verkehrsvertrags, wobei er die Unsicherheiten, die aus dem Einsatz von Batteriefahrzeugen resultieren, durch geeignete vertragliche Regelungen auffangen kann (siehe Abschnitt 3.6.4),
- der ZVNL beauftragt die Errichtung und den Betrieb der Eisenbahninfrastruktur auf der Strecke nach Rochlitz einschließlich einer Oberleitungsinsel mit dem Infrastruktureigentümer.

Für die Verhandlungen mit dem Eigentümer der Strecke, die Planungen, das Genehmigungsverfahren und die Umsetzung sollte ausreichend Zeit, im Zweifel mehrere Jahre veranschlagt werden. Es ist zu erwarten, dass hier auch ein Planfeststellungsverfahren durchzuführen ist.

### Strecke Gera-Leipzig

Für den SPNV-Betrieb mit Batteriezügen auf der Strecke Leipzig-Gera ist die Notwendigkeit der Errichtung von Nachladeinfrastruktur als leistungsfähige Oberleitungsinsel (bis 3 MW) in Gera und in Zeit vorgesehen.<sup>47</sup>

Die Beauftragung der DB mit der Errichtung der Infrastruktur unmittelbar durch den ZVNL ist gegenüber einer Beauftragung durch das EVU vorzuziehen, weil den EVU (zumindest im Bieterstadium) eine Verhandlung mit der DB über die Errichtung der Ladeinfrastruktur nur schwer möglich sein wird, nicht zuletzt, weil gegenüber der DB kein Anspruch auf Errichtung besteht und alle Einzelheiten einvernehmlich verhandelt werden müssen (vgl. zu den Inhalten eines solchen Vertrags mit der DB AP 3.1). Dabei empfehlen wir, dass der ZVNL möglichst frühzeitig auf die DB zugeht. Zu bedenken ist, dass ggf. noch die notwendigen Stromnetzanschlüsse zu errichten und Genehmigungsverfahren zu durchlaufen sind. Wir sehen allerdings gute Chancen, dass aufgrund des Investitionsbeschleunigungsgesetzes für die Oberleitungsinsel kein Planfeststellungsverfahren, sondern nur eine Plangenehmigung notwendig sein könnte, was das Verfahren verkürzen würde (vgl. AP 3.1).

### 3.6.4 Weitergehende vertragliche Instrumente im Verkehrsvertrag

Die aus unserer Sicht real bestehenden Unsicherheiten, die aus dem Einsatz von Batteriefahrzeugen und einer klassischen Vergabe gemäß Modell 1 nach AP 3.3 resultieren, sollte der ZVNL weiterhin durch geeignete vertragliche Regelungen auffangen. Wir sehen zur Zeit nachfolgende spezifische Instrumente für den ZVNL zur Förderung dieser Variante, zur Mitigation von Risiken, zur Stimulierung des Wettbewerbs und Sicherung eines qualitativen Betriebs (siehe auch Darstellung in AP 3.1 und AP 3.3.), welche in einem nachfolgenden Schritt auf Umsetzbarkeit im Vergabeverfahren und im Verkehrsvertrag zu prüfen wären:

- Das mit (innovativen) Fahrzeugbeschaffungen verbundene Marktrisiko des jeweiligen EVU kann durch erprobte Finanzierungsinstrumente seitens des Aufgabenträgers gedämpft werden.

<sup>47</sup> Korrigierter Stand zu den Energiebedarfswerten, Energie- und Systemkosten von Herrn Fritz (AP2, IFB); Mail und Datei vom 29. September 2020.

- Die bereits genannten Risiken der Instandhaltung und der technischen Zuverlässigkeit könnte ein EVU durch einen Service-Vertrag mit dem Fahrzeughersteller abfedern. Es ist zu prüfen, inwiefern der ZVNL einen Mindestumfang an Serviceleistungen als Vorgabe verpflichtend in den Vergabeunterlagen fordern kann.
- Die Preisentwicklung der neuen Komponenten der innovativen Fahrzeuge, wie Brennstoffzelle oder Akkus, könnte aus der allgemeinen Vergütung (Euro/Zug-km) und Preisfortschreibung ausgenommen werden. Zu prüfen wäre eine Neujustierung (nach oben bzw. unten) nach Komponententausch auf Basis der bekannten Preise für diese Komponenten in der Zukunft.
- Da sich der Austausch von Brennstoffzellen / Akkus in mehrjährigen, teuren Zyklen wiederholt wäre zur Sicherung der Liquidität des EVU in diesen Kostenspitzen eine Vorgabe zur Rücklagenbildung oder eines Einbehalts eines Anteils der Vergütung durch den ZVNL zu prüfen (Instandhaltungsrücklage).
- Im Fall der Notwendigkeit einer zusätzlichen Ladestation (auf Grund der DB-Netz) für BEMU im MDSB2025plus muss der ZVNL tätig werden. Eine frühzeitige Abstimmung mit DB-Netz und schließlich ein Errichtungs-/Nutzungs-/Finanzierungsvertrag über die Ladestation/en ist hier unumgänglich.

### 3.7 Literaturverzeichnis und Anlagen

Genutzte Pressemeldungen und Veröffentlichungen (als digitale Anlagen):

1. Pressemeldung: Eurailpress - Probebetrieb
2. Pressemeldung: Alstom fahma
3. Artikel: Tagblatt Stadler H2-Züge
4. Produktpräsentation: Mireo Siemens
5. Pressemeldung: NOW Förderzusage H2-Mireo
6. Pressemeldung: Railway Gazette CRRC H2-Tram
7. Pressemeldung: Mireo Bestellung BW
8. Pressemeldung: Stadler Flirt Akku NAHSH
9. Pressemeldung: Alstom BEMU VMS
10. Artikel: EI 12-2018 Akku-Flirt Vorstellung
11. Pressemeldung: ÖBB Cityjet eco
12. Produktpräsentation: BT Präsentation Akku-Talent
13. Produktpräsentation: <https://www.caf.net/de/productos-servicios/familia/civity/modularidad.php>
14. Pressemeldung: NAHSH Fahrzeugbereitsteller ausgewählt
15. Artikel: Kieler-Nachrichten Akku-Flirt
16. Artikel: EI 7-2020 Rockrail
17. Pressemeldung: Niedersachsen iLint Vertragsunterzeichnung
18. Machbarkeitsstudie: H2 Schienenverkehr in Mitteldeutschland des ZVNL

## 4. Arbeitspaket Nr. 04 - Wirtschaftlichkeit alternativer Antriebe

### 4.1 Zusammenfassung

Im Arbeitspaket 4 der Metastudie werden die übergreifenden Wirtschaftlichkeitsfragen des SPNV-Betriebs mit alternativen Fahrzeugantrieben beleuchtet. Leitend ist hierbei die Betrachtung über mindestens einen Vertragszyklus. Dieser ist Ausgangsbasis einer jeden Kalkulation eines anbietenden Eisenbahnverkehrsunternehmens und muss spiegelbildlich durch entsprechende Budgets seitens des zuständigen SPNV-Aufgabenträgers abgesichert sein. Von nicht geringer Bedeutung ist dabei die wirtschaftliche Absicherung von Investitionen, die über eine Verkehrsvertragsperiode hinausreichen. Dies betrifft neben Fahrzeugen auch Werkstätten und sonstige fahrzeugspezifischen Investitionen.

Die Berechnungen ergeben in allen betrachteten Szenarien eine eindeutige Vorzugswürdigkeit für den Einsatz batterieelektrischer Fahrzeuge (BEMU). Auf der Linie S1 ergibt sich dies schon durch den hohen Anteil der im Bestand elektrifizierten Strecken von 32% sowie die sehr geringen Investitionen. Hier kommt die bereits vorhandene Elektrifizierung in Döbeln zu Gute, aber selbst der perspektivisch betrachtete Abzweig nach Rochlitz (Flügelzug) würde das Ergebnis nicht grundlegend verändern.

Richtung Gera sind die Vorteile des batterieelektrischen Zugs geringer, da hier höhere Investitionen notwendig sind und auch der weitere Vorteil der sehr hohen Rekuperationsleistung nicht ganz so entscheidend ist. Bei einem Zielpreis für Wasserstoff von 5,00 EUR/kg und weiterer günstiger Rahmenbedingungen zu Gunsten des Wasserstoffs wäre hier zumindest ein Gleichstand der Total Costs gegenüber einem Akkuzug erreichbar.

### 4.2 Einleitung

Aufgabe von Arbeitspaket 4 ist es, die wirtschaftliche Machbarkeit der zwei zu untersuchenden SPNV-Linien

- Leipzig – Döbeln (mit ggf. Abzweig Rochlitz) und
- Leipzig – Gera

zu untersuchen. Für die Strecke Leipzig – Döbeln ist dabei Zeitdruck zu konstatieren, da die S1 gemäß Vorabkennzeichnung des ZVNL mit Betriebsaufnahme zum 14.12.2025 auszuschreiben ist und für die angestrebten innovativen Fahrzeuge ein angemessener Beschaffungsvorlauf abzusichern ist.

Für die Strecke Leipzig – Gera steht eine Technologieentscheidung in den nächsten Jahren an, da hier grundsätzlich Elektrifizierungsmittel nach dem Strukturstärkungsgesetz Kohleregionen zur Verfügung stehen, andererseits aber auch hier der Einsatz alternativer Antriebstechnologien in Frage kommt.

Bei der Prüfung der wirtschaftlichen Machbarkeit werden die ökonomischen Auswirkungen auf die Betriebskosten der Eisenbahnverkehrsunternehmen modelliert. Dies ermöglicht es den SPNV-Aufgabenträgern mögliche Zusatz- bzw. Minderbelastungen gegenüber einem Dieselbetrieb bei der Vorbereitung der Vergabeverfahren zu kalkulieren.

### 4.3 Methodik

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung stellt die durch den veränderten Fahrzeugeinsatz resultierenden Kostenänderungen dar. Als Referenzpunkt dient eine Kostenmodellierung für den konventionellen Dieserverkehr.

Es wurde also der Einsatz von

- Dieselfahrzeugen (DMU) als Referenzfahrzeuge,
- Batterieelektrischen Fahrzeugen (BEMU) und
- Wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen (HEMU)

wirtschaftlich aus Sicht der SPNV-Aufgabenträger als Besteller bewertet.

Dabei bezog sich die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung nur auf einen Teil der Betriebskosten. Abhängig vom Fahrzeugantrieb sind einige Betriebskostenarten nicht veränderlich und müssen daher nicht betrachtet werden, beispielsweise

- Personalkosten für Triebfahrzeugführer oder Zugbegleiter,
- Infrastrukturnutzungsentgelte oder
- Vertriebskosten.

Daher stellt die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung auf die Veränderung der folgenden Kostenarten in den unterschiedlichen Antriebskonzepten ab:

- Fahrzeuganschaffungskosten: es wurden unterschiedliche Investitionskosten für 3-teilige Fahrzeuge unterstellt (Neufahrzeugpreise).
- Energiekosten: die unterschiedlichen Antriebsarten weisen einen unterschiedlichen Materialaufwand, für Diesel, Strom und Wasserstoff auf.
- Instandhaltungskosten: ebenfalls unterschiedlich sind die Aufwendungen im Bereich der Instandhaltung der Triebfahrzeuge bei den Antriebsarten.
- Anteiliger Aufwand für Infrastrukturinvestitionen (für BEMU-Fahrzeuge).

Die Modellierung der Kosten wurde zum Preisstand 2020 vorgenommen. Um die Auswirkungen im Zeitraum des Verkehrsvertrages abzubilden, wurden die Kostenentwicklungen bis 2037 fortgeschrieben.

Dabei wurden unterschiedliche Szenarien zu Veränderung insbesondere der Energiepreise über einen Vertragszeitraum von 12 Jahren (Dez 2025 – Dez 2037) festgelegt und bewertet. Folgende Szenarien wurden abgebildet:

- Trendszenario: Fortschreibung der heutigen Preise.
- Rückschlagszenario: Geringere Teuerung bei Diesel im Vergleich zu Strom und Wasserstoff.

- Offensivscenario: Höhere Teuerungsraten des Dieselpreises gegenüber Strom- und Wasserstoffpreis und Berücksichtigung weiterer Markteffekte bei HEMU.

Beim Wirtschaftlichkeitsvergleich wurde jeweils auf die Summe der zwischen den Antriebsarten veränderlichen Kosten im Verkehrsvertragszeitraum abgestellt. Auf eine Diskontierung der Zeitreihen wurde angesichts des Nullzinsniveaus zum Zeitpunkt der Erarbeitung verzichtet.

#### 4.4 Datengrundlage

Es wurden durchgängig Marktvergleichsdaten bei der Modellberechnung angesetzt (Ausnahme: Szenarien).

Als Fahrzeuginvestitionen wurden – soweit bekannt – Marktpreise für zwei bis dreiteilige Triebwagen mit >100 Sitzplätzen (nur feste Sitze, 2. Klasse) und >15 Fahrradabstellplätzen mit ca. 50m Länge<sup>48</sup> in den drei Antriebsarten ermittelt. Folgende Eingangsdaten wurden schließlich hinterlegt:

Tabelle 28: Fahrzeuginvestitionen

	Einheit	Invest	Beispiel
<b>DMU3</b>	Mio. EUR	4,6	Alstom LINT54, Pesa LINK3
<b>BEMU3</b>	Mio. EUR	6,5	Siemens Mireo-B, Alstom Coradia-A, Stadler Flirt-Akku, Bombardier E-Talent III Batterie
<b>HEMU3</b>	Mio. EUR	8,0	Alstom ILINT, Siemens Mireo-H, Stadler Flirt-Hydro

Zusätzlich wurden besondere Reinvestitionsanforderungen für die Fahrzeugtypen unterstellt:

- DMU: Tausch der Antriebsanlage (650 TEUR) nach 15 Jahren
- BEMU: Batterietausch (800 TEUR) nach 8 Jahren
- HEMU: Tausch der Brennstoffzellen (400 TEUR) nach 4 Jahren

Die Energieverbrauchspreise wurden eigens modelliert. Dabei wurden wichtige Eingangsparameter wie Haltestellenabstand, Geschwindigkeit, Fahrzeuggewicht etc. streckenbezogen berücksichtigt. Es wurde eine möglichst energiesparende Fahrweise unterstellt, hierzu wurden die Erfahrungswerte des ZVNL zu bisher erreichten Pünktlichkeiten im Netz und damit die Möglichkeit zum energiesparenden Fahren ausgewertet.

Tabelle 29: Streckenbezogener Energieverbrauch

	Einheit	Leipzig – Döbeln	Leipzig – Gera
<b>Diesel</b>	l/Fzgkm	1,64	1,02
<b>Strom</b>	kWh/Fzgkm	4,9	4,1
<b>Wasserstoff</b>	kg/Fzgkm	0,23	0,20

<sup>48</sup> Railistics, Kurzvorstellung Vergabernetz MDSB 2025 – Fahrzeuganforderungen, 4/2020.

## 4.5 Wirtschaftlichkeit des Einsatzes alternativer Antriebe im Mitteldeutschen Revier

Bei der Bearbeitung der Frage der wirtschaftlichen Folgen eines Einsatzes von batterieelektrischen Fahrzeugen (BEMU) oder wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen (HEMU) auf den beiden untersuchten Strecken wurde wie folgt vorgegangen:

- Ermittlung der veränderlichen Kosten
- Definition von Szenarien der Energiepreisentwicklung
- Ermittlung der wirtschaftlichen Folgen aus AT-Sicht
- Szenarioanalyse
- Bewertung/Fazit

### 4.5.1 Ermittlung der veränderlichen Kosten

Mehr- oder Minderbelastungen treten nicht in allen Kostenkategorien auf. Beispielsweise werden die Infrastrukturnutzungsentgelte von den Eisenbahninfrastrukturunternehmen unabhängig von der Traktionsart bemessen. Daher waren im ersten Schritt die veränderlichen Kostenkategorien zu ermitteln und einzugrenzen.

#### Kapitalkosten Fahrzeuge

Der nächstliegende Unterschied zwischen einem Betrieb mit alternativen Antrieben und einem DMU liegt in den Investitionskosten der Fahrzeuge begründet. Dieseltriebwagen, von denen im deutschen Markt bis dato etwa 3.000 Stück in Betrieb gingen, werden „von der Stange“ hergestellt. Daher sind hier entsprechende Skaleneffekte zu verzeichnen, wenngleich die Stellung von Alstom als Quasi-Monopolist aufgrund der Qualitätsmängel des konkurrierenden PESA-Produktes zuletzt zu deutlichen Preisaufschlägen geführt hat. Dagegen sind die Fahrzeugkonzepte der Hersteller bei BEMU und insbesondere bei HEMU noch in der Entwicklungsphase:

- BEMU-Fahrzeuge wurden bislang in drei Netzen vergeben:
  - Netz Ortenau (NVBW) 20 Siemens Mireo+B ab 6/2023
  - Akku-Netz Schleswig-Holstein (NAH.SH) 55 Stadler Flirt Akku ab 12/2022
  - RE6 (ZVMS) 11 Alstom Coradia Continental ab 2023

Die Fahrzeuge befinden sich jeweils noch in der Fertigung, ein Regelbetrieb wurde noch nicht begonnen.

Hinzu kommen mit dem Pfalznetz (ZV RP-Süd), dem Netz Ostbrandenburg (VBB) und dem Netz Warnow II (VMV) weitere laufende Vergaben/Vergabeverfahren, in denen BEMU zur Vorgabe gemacht wurden. Mit der Beschaffung der Fahrzeuge ist z.T. noch im Jahre 2021 zu rechnen.

- HEMU-Fahrzeuge wurden bisher vergeben für:
  - Netz Taunus (RMV) 27 Alstom iLint ab 12/2022

- Elbe-Weser (LNVG) 14 Alstom iLint. Im Netz Elbe-Weser wurde ein erfolgreicher Probetrieb mit 2 HEMU zwischen September 2018 und Februar 2020 durchgeführt, ab 12/2021 kommen alle 14 Fahrzeuge zum Einsatz
- Prototypen sollen einerseits von Siemens (1) auf der Strecke Pforzheim – Horb und von einem noch nicht bekannten Hersteller auf der Schwarzatalbahn in Thüringen (2) ab dem ersten Halbjahr 2023 eingesetzt werden. Daneben existiert noch ein Wasserstoffprojekt der Niederbarnimer Eisenbahn ab 2024, welches ebenfalls auf den iLint von Alstom setzt. Hier scheinen noch entsprechende Abhängigkeiten von einem lokalen Wasserstoffherstellungsprojekt in Brandenburg zu stehen.

Die noch relativ überschaubaren Anwendungsbeispiele für BEMU und HEMU erklären den Preisvorteil des DMU, der sich in den in Kap. 4.4 aufgeführten Fahrzeugpreisen widerspiegelt.

Für die unterschiedlichen Antriebsarten wurde bei der Bemessung des Restwertes nach Ablauf des Verkehrsvertrages von 12 Jahren keine Unterscheidung unterstellt. Vorausgesetzt, dass sich im echten Betrieb keine gravierenden Nachteile der Fahrzeugvarianten ergeben, erscheint es aus heutiger Sicht nahezu ausgeschlossen, dass sich – insbesondere für die neuen Technologien – keine Weiterverwendung mehr im deutschen oder europäischen Fahrzeugmarkt finden lässt. Ebenso keine Unterscheidung zwischen den Antriebsarten wurde bei den Finanzierungskosten unterstellt. Auch hinsichtlich der Werkstattreserve der Antriebsarten wurde keine Unterscheidung unterstellt, da im Vergleich keine gravierenden zusätzlichen Instandhaltungsarbeiten anfallen, die einen Fahrzeugmehrbedarf rechtfertigen würden.

Gerade im Fall von BEMU kann es dazu kommen, dass fehlende elektrifizierte Streckenabschnitte eine überschlagene Wende nötig machen, um genug Ladezeiten für die Rückfahrt zu haben. Dies kann dann zu einem Fahrzeugmehrbedarf gegenüber den anderen Traktionsarten führen. Auf der Strecke Leipzig – Döbeln sind wegen einer überschlagenen Wende in Döbeln 17 BEMU-Fahrzeuge nötig – jeweils eines mehr als DMU und HEMU. Auf der Strecke Leipzig – Gera wurde von durchgängig 8 Fahrzeugen ausgegangen (3 Umläufe in Doppeltraktion zzgl. Reserve). In Gera wurde unterstellt, dass die Wendezeit für die notwendige Aufladung ausreichend ist.

## Energiekosten

Die Antriebsarten unterscheiden sich zuvorderst in den eingesetzten Energieträgern:

- In DMU werden Verbrennungsmotoren (Diesel) eingesetzt.
- In BEMU wird elektrische Energie in Batterien gespeichert, welche auf nicht-elektrifizierten Abschnitten verbraucht wird. Im Gegensatz zum DMU kann die Bremsenergie wiedergewonnen werden, sofern die Batterien nicht voll aufgeladen oder das Fahrzeug unter Fahrdraht ist.
- Der HEMU wird von einer Brennstoffzelle betrieben, in der Wasserstoff (H<sub>2</sub>) zu Antriebsenergie umgewandelt wird. Zusätzlich verfügen die Fahrzeuge über eine Speicherbatterie, die einerseits Lastspitzen ausgleicht, da die Brennstoffzelle

möglichst im gleichbleibenden Betriebsmodus arbeiten soll, aber andererseits v.a. der Rekuperation der Bremsenergie dient.

Energiekosten sind immer noch im starken Maße vom Ölpreis abhängig, da neben Diesel hieraus auch immer noch weltweit gesehen fast ein Drittel des Strombedarfs generiert wird. Hinzu kommt, dass Erdgas v.a. kommerziell stark an den Ölpreis gekoppelt ist, was v.a. in der gegenseitigen Substituierbarkeit im Wärmemarkt seinen Ursprung hat.

Langfristig ist dagegen mit einer Dominanz der regenerativen Energieträger wie v.a. Sonne und Wind zu rechnen. Waren deren Erzeugungskosten in Deutschland lange durch die garantierten Einspeisevergütungen im Rahmen des Erneuerbaren Energie-Gesetzes (EEG) staatlich gesteuert, erfolgt derzeit eine Umorientierung zu Ausschreibungsmodellen, die Ergebnisse im Bereich von Onshore-Windanlagen im Bereich 5,8 Ct je kWh, Solar 6,1 je kWh und Offshore-Windanlagen von 4,7 Ct je kWh<sup>49</sup> erzielen.

Gleichwohl sind für alle Energiearten nach wie vor die Steuer- und sonstige Abgabenlast ebenfalls zentraler Bestandteil. Obwohl die Mineralölsteuer vor allem dem Straßenausbau und -unterhalt dient, wird auch der Eisenbahnsektor mit dieser belastet. Trotz einer kleinen Ermäßigung im Rahmen der Einführung der Ökosteuern 1999 beträgt diese mit 42 Ct je Liter 40% der Gesamtkosten. Durch die CO<sub>2</sub>-Steuer (Einbezug in den Emissionshandel mit Zielpreis 55 EUR je Tonne CO<sub>2</sub>) wird die Belastung bis 2025 auf rund 60 Ct je Liter Diesel steigen.

Beim Bahnstrom fallen neben den reinen Stromkosten von 4 bis 6 Ct je kWh zusätzlich 5,9 Ct als Netzentgelt (variabel – ja nach Spitzenlast), die ermäßigte EEG-Umlage (20%) mit 1,3 Ct und weiteren Umlagen für Offshore, Kraft-Wärme-Kopplung, abschaltbare Lasten etc. mit ebenfalls 1,3 Ct je kWh an. Schließlich ist die ermäßigte Stromsteuer mit 1,142 Ct je kWh zu veranschlagen.

Wasserstoff ist derzeit in ausreichenden Mengen nur als sog. „grauer Wasserstoff“ verfügbar. Dieser wird aus Erdgas im Wege der Dampfreformation gewonnen. Die Kapazität liegt in Deutschland derzeit bei 55 TWh. Die reinen Produktionskosten liegen bei unter 1,50 EUR je kg, allerdings sind Transport- und Lagerkosten erheblich, da sein Einsatz bislang weitgehend in geschlossenen Industrieanlagen erfolgt. Aufgrund der hohen Transport- und Lagerkosten wird dieser Wasserstoff in den vorhandenen Kfz-Tankstellen H<sub>2</sub>.Mobility aktuell für 8,00 EUR/kg netto abgegeben.

Für den hier zu unterstellenden „grünen Wasserstoff“, also Erzeugung über Elektrolyse per Ökostrom ist bedeutend, dass seit 2019 eine Befreiung von den Netzentgelten beim Strombezug (rund 6 Ct je kWh) greift und nun im Rahmen der EEG-Novelle 2021 auch die Befreiung von der EEG-Umlage (ebenfalls rund 6 Ct je kWh) beschlossen wurde, sofern der Wasserstoff ausschließlich aus „grünem Strom“ hergestellt wird. Insofern erscheinen nun Strombezugskosten für grünen Wasserstoff unter Einbezug der Kosten für Zertifikate (Herkunftsnachweise im Bereich von 6 bis 7 Ct. je kWh als realistisch, was einen Energieeckpreis von ca. 2,60 € je kg H<sub>2</sub> ergäbe. Damit wäre Wasserstoff bezogen auf den Energiegehalt ebenso teuer wie Diesel, jedoch fehlen hierbei noch alle Nebenkosten der Herstellung wie Elektrolyseinvest und -betrieb, sowie Transport, Distribution und

---

<sup>49</sup> Ergebnisse der BNetzA

[https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen\\_Institutionen/Ausschreibungen/Ausschreibungen\\_node.html](https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/Ausschreibungen/Ausschreibungen_node.html)

Vermarktung. Zudem ist zu beachten, dass im Dieselpreis rund 50% Steuern enthalten sind, während der Strom zur Wasserstoffproduktion steuerbefreit ist und keinen Beitrag zu den Netzkosten der Stromverteilung zahlt.

### Instandhaltungskosten und Infrastrukturinvestitionen

Die Instandhaltungskosten wurden „Bottom-up“ anhand einer Modellierung von vereinfachten Fristenplänen für die Fahrzeugtypen für ein durchschnittliches Jahr ermittelt. Dieser Wert wurde sodann fortgeschrieben. Dabei wurde eine jährliche Teuerung von 1,9% unterstellt – ein Mischwert aus der historischen Teuerung gewerblicher Produkte und Lohnkostensteigerungen.

Für die Herstellung von lokalen Lademöglichkeiten wurde anhand der Angaben des IFB (AP 2) eine einmalige Investition

- von 0 Mio. EUR bei der BEMU-Variante S1 Döbeln (vorhandene Elektrifizierung bzw. Elektranten in Grimma ausreichend),
- von 1,9 Mio. EUR bei der BEMU-Flügelung der S1 zusätzlich nach Rochlitz für eine dortige Elektrifizierungsinsel und
- von 3,9 Mio. EUR bei der BEMU Bedienung nach Gera für zwei Elektrifizierungsinseln in Gera und Zeitz

unterstellt.

Für die HEMU wurden keine weiteren Infrastrukturinvestitionen angesetzt. Der unterstellte Wasserstoffpreis versteht sich inkl. aller Investitionsaufwände, z.B. für Tankstelle, Lagerung etc. (Preis frei Tankstelle). Zwar sind bislang H<sub>2</sub>-Tankstellen in Investition (> 1 Mio. EUR je Tankanlage) und Betrieb sehr teuer und keine marktgängige Infrastruktur, jedoch liegt dies bislang an der schwankenden und zu geringen Absatzmenge. Es ist davon auszugehen, dass sich – in Folge der Kombination des derzeitigen Förderprogramms 1.000 Tankstellen im Rahmen des Nationalen Innovationsprogramms-Wasserstoff mit einer Förderung von 40 bzw. 50% der Investitionskosten<sup>50</sup> und mit Hochlauf der Nachfrage – Marktpreise (EUR/kg) herausbilden<sup>51</sup>, die wie in allen anderen Sektoren der Verteilung von flüssigen oder gasförmigen Brennstoffen die Distribution miteinschließen, da sie sich unter 10% der Absatzpreise einpendeln. Die kontinuierliche Nachfrage nach Wasserstoff in der Größenordnung von einer oder gar mehrerer Tonnen pro Tag durch den SPNV Betrieb wäre hierzu ein zentraler Beitrag.

### 4.5.2 Szenarien Energiepreisentwicklung

Die Entwicklung der Energiepreise vorherzusagen ist in einem Vertragszeitraum von 12 Jahren inkl. Vorlauf bis zur Inbetriebnahme für Verkehrsunternehmen objektiv nicht möglich. Aus diesem Grund werden die kalkulierten Energiekosten in den Verträgen üblicherweise mit branchenüblichen Indices fortgeschrieben. Gerade im Vergleich von drei unterschiedlichen

<sup>50</sup> Siehe dazu zuletzt Aufruf vom 5.11.2019,

<https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/foerderung-wasserstoff-tankstellen.html>

<sup>51</sup> Prognos, Kosten und Transformationspfade für strombasierte Kraftstoffe, Studie im Auftrag BMWI, 5/2020, S. 67 f.; FZ Jülich, Neue Optionen für einen wirtschaftlichen Betrieb durch Nutzung der LOHC-Technologie, 2019, S. 38 ff.

Energieträgern und deren Preisentwicklung ist es daher unabdingbar, Szenarien zu definieren, wie sich die Preise untereinander entwickeln können.

In den kommenden Jahrzehnten ist zu erwarten, dass die politisch-regulatorischen Einflüsse auf die Energiepreise v.a. aus dem Emissionshandel bzw. der CO<sub>2</sub>-Besteuerung zunehmen werden. Grund ist, dass der Preismechanismus bei der Erreichung der klimapolitischen Ziele eine zentrale Rolle spielen wird:

- Auch wenn a priori von überproportional steigenden Kosten für fossile Brennstoffe (Diesel) auszugehen ist, kann dies nicht mit absoluter Sicherheit gesagt werden. Schließlich spielen auch konjunkturelle Effekte eine wichtige Rolle.
- Selbst die Entwicklung der Strompreise hängt vom Tempo ab, das beim Umstieg von Kohle- und Atomverstromung auf alternative Energiequellen angeschlagen wird.
- Gleichzeitig ist v.a. die Entwicklung des Wasserstoffpreises höchst unsicher, zumal heute noch kein relevanter Markt zu verzeichnen ist. Zu vermuten ist, dass neben der allgemeinen Entwicklungsgeschwindigkeit staatliche Einflussfaktoren einen besonders signifikanten Effekt auf die künftigen Preise ausüben werden.

Es ist leicht ersichtlich, dass unterschiedliche Preisentwicklungen bei den drei Energieträgern einen wesentlichen Einfluss auf die Frage haben können, welche Antriebsart über einen längeren Zeitraum die wirtschaftlichste sein wird.

Dabei bestand die Herausforderung darin, einen **Wasserstoffmarktpreis** in EUR/kg „ab Tankstelle“ (inkl. aller Vorlauf- und Investitionskosten) abschätzen zu müssen, der sich in den kommenden Jahren erst noch entwickeln muss. Hinzu kommt, dass bei der Herstellung des H<sub>2</sub> davon auszugehen ist, dass von den heute gängigen Produktionsmethoden des „grauen Wasserstoffs“ aus Dampfreformation eine stärkere Zuwendung/Förderung der Herstellung von „grünem Wasserstoff“ aus erneuerbaren Energiequellen zu erwarten ist. Dies hat auf der Produktionskostenseite erhebliche Auswirkungen, ebenso wie z.T. bereits heute absehbare regulatorische Eingriffe. Ausgangspunkt ist ein heutiger Preis von etwa 8,00 EUR/kg netto für grauen H<sub>2</sub>. Die Herstellungskosten des grauen Wasserstoffs im industriellen Kontext liegen deutlich niedriger, jedoch wird nur ein Bruchteil des Energieträgers frei verkauft. Die Produktionskosten von grünem Wasserstoff sind ungleich höher. Insbesondere sind hier die Kosten von dezentralen Elektrolyseuren zu nennen. Unterstellt man aber die Befreiung des grünen H<sub>2</sub> von der EEG-Umlage und Netzkosten sowie eine ausgiebige Förderung, kann mittelfristig ein **Zielpreis von 7 EUR/kg für grünen Wasserstoff** unterstellt werden.<sup>52</sup>

Um die künftigen Entwicklungen bestmöglich abzubilden, wurden drei Szenarien definiert, die aus heutiger Sicht mögliche Entwicklungspfade beschreiben:

<sup>52</sup> Diese Preise werden auch als realistische Preise in den diversen Studien für ein MittelfristszENARIO 2025 genannt. Z.B. Prognos, Kosten und Transformationspfade für strombasierte Energieträger, Studie im Auftrag BMVI, 5/2000, S. 43; Wissenschaftlicher Dienst des Bundestags, WD 5 3000 029/20 Kosten Grünen Wasserstoffs, S. 8; Wuppertal/Institut/DIW, Bewertung von Vor- und Nachteilen von Wasserstoffimporten, 11/2020, S. 50; Energy Commenta, Blauer Wasserstoff, Studie in Auftrag von Greenpeace, 2020, S. 13; Forschungszentrum Jülich, Neue Optionen für einen wirtschaftlichen Betrieb von Wasserstoffzügen durch Nutzung der LOHC-Technologie, 2019, S. 39 f. Hinweis: Sofern die dortigen Preise in Ct/kWh angegeben sind, sind zur Umrechnung auf EUR/kg diese mit dem Energiefaktor 33 zu dividieren.

- **Trendszenario:** Das Trendszenario beschreibt eine Fortentwicklung der Energiepreise entsprechend des heutigen Marktniveaus und ggf. der jüngst zurückliegenden Teuerung. Konkret wurden angesetzt:
  - Diesel und Strom: gleichförmige Steigerung um 4,0% p.a. ab heutigem Marktpreis
  - Grüner Wasserstoff: Zielpreis von 7 EUR/kg
- **Rückschlagszenario:** Ein Szenario beschreibt besonders ungünstige Rahmenbedingungen für die neuen Antriebsarten infolge einer unterdurchschnittlichen Teuerung bei Diesel. Im Einzelnen wurde unterstellt:
  - Diesel Steigerung um 2,0% p.a. ab heutigem Marktpreis
  - Strom Steigerung um 4,0% p.a. ab heutigem Marktpreis
  - Grüner Wasserstoff 9,50 EUR/kg (heutiger Preis für grauen H<sub>2</sub>)
- **Offensivszenario:** Im dritten Szenario sind Bedingungen unterstellt, welche die Wirtschaftlichkeit von BEMU und HEMU befördern, beispielsweise infolge einer starken Verteuerung fossiler Kraftstoffe durch CO<sub>2</sub>-Abgaben. Gleichzeitig wird für den Wasserstoffpreis eine überproportionale Entwicklung unterstellt. Konkret angesetzt sind:
  - Diesel Steigerung um 8,0% p.a. ab heutigem Marktpreis
  - Strom Steigerung um 2,0% p.a. ab heutigem Marktpreis
  - Grüner Wasserstoff 5,00 EUR/kg
  - Zusätzlich wurde unterstellt, dass sich die Investitionskosten eines HEMU wegen Skaleneffekten auf das „BEMU-Niveau“ i.H.v. 6,5 Mio. EUR angleicht.

V.a. der Zielpreis von 5,00 EUR je kg H<sub>2</sub> stellt große Herausforderungen an die Effizienzverbesserung der grünen Wasserstoffproduktion. Während bei Einstandspreisen von 6 Ct/kWh für grünen Strom bei weitgehender Befreiung von allen Steuern und Umlagen bei einem kaum noch wirtschaftlich steigerbaren Wirkungsgrad von rund 65% der PEM-Elektrolyseure mit 2,85EUR je kg bereits das Optimum kurzfristig erreichbar ist, setzt die Senkung der Investitionskosten von Elektrolyseuren auf unter 1 Mio. EUR je MW mit 8% CAPEX und 4% OPEX bei mindestens 5.000 Betriebsstunden pro Jahr und 20,8kg je H<sub>2</sub> Output je Betriebsstunde noch erhebliche Anstrengungen voraus. Einen Output von 104t pro Jahr und installierten 1 MW wäre mit 1,15 EUR je kg belastet, so dass noch 1,00 EUR für Transport, Tankstelle und Vermarktung verblieben. Die Studie von MOW 2018<sup>53</sup> hat aufgezeigt, unter welchen anspruchsvollen Rahmenbedingungen dies möglich ist. Mit der weitgehenden Abgaben-, Umlagen- und Steuerbefreiung hat der Gesetzgeber zumindest die ersten Schritte hierzu unternommen.

<sup>53</sup> Fraunhofer, Stand und Entwicklung der Wasserelektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff aus regenerativen Energien, Studie im Auftrag NOW, 7/2011, S 32. ff. und NOW, InWEdE – Industrialisierung der Wasserstoffelektrolyse in Deutschland, 2018, S. 42 ff.

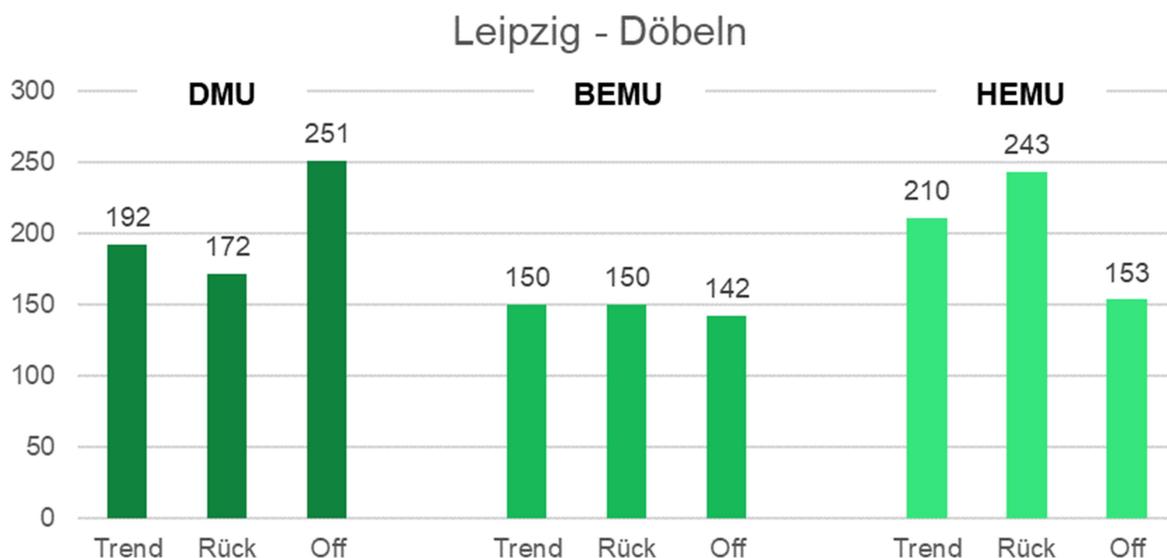
### 4.5.3 Wirtschaftlichkeit der Antriebskonzepte

#### Leipzig – Döbeln

Im Vergleich der Antriebsalternativen ist für die Linie S1 in allen Szenarien der BEMU die wirtschaftlichste Alternative. Dies ist umso bemerkenswerter, da ein zusätzliches Fahrzeug für den batterieelektrischen Betrieb mehr nötig ist, als für DMU und HEMU. Das Ergebnis bei Gesamtbilanzierung des Energiebedarfs ist jedoch wenig überraschend. Als S-Bahn lebt diese Linie von einem geringen Haltestellenabstand, zudem ist die Endgeschwindigkeit eher überschaubar und erreicht selten mehr als 100 km/h. In diesem Einsatzbereich ist die Rekuperationsfähigkeit von zentraler Bedeutung. Hier erreicht die Batterietechnologie mit Hochleistungs-Wechselrichtern die höchste Effizienz, die sogar die übliche Rückspeisung in das Wechselstrom-Bahnstromnetz übersteigt. Zwar kann die HEMU-Technik ebenfalls elektrisch bremsen, jedoch kann dieses den technologischen Nachteil des Faktor 2 schlechteren Wirkungsgrad des zweimaligen Umwandelns von Strom in Wasserstoff und zurück mit Verlusten von über 50% nicht kompensieren.

In der Übersicht stellen sich die Ergebnisse der Antriebsarten auf dieser Strecke<sup>54</sup> wie folgt dar:

Abbildung 47: Leipzig – Döbeln, Szenarien, Summe Kosten (in Mio. EUR)



Im **Trendszenario** – einer Fortschreibung der Strom- und Dieselpreise um 4% p.a. und der Realisierung eines H<sub>2</sub>-Zielpreises von 7,00 EUR/kg – besitzt der BEMU robuste Vorteile. Die Summe der veränderlichen Kosten zwischen den Antriebssystemen liegen für den **BEMU** bei 150 Mio. EUR in 12 Jahren und damit

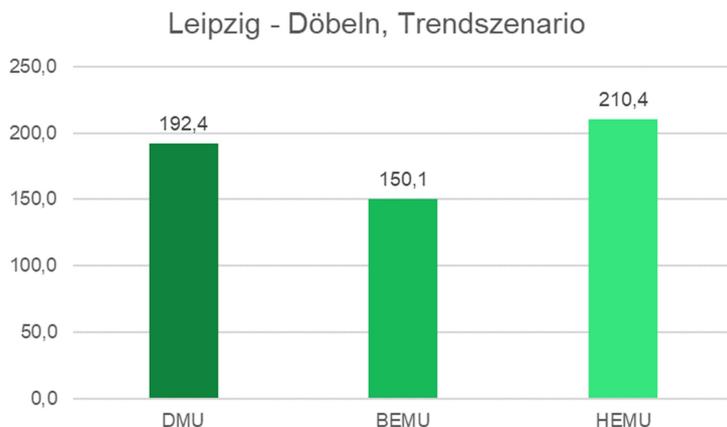
- gegenüber dem Dieselbetrieb (DMU) um 28,2% und

<sup>54</sup> Bei den Ergebnissen wurde bei den BEMU bereits jeweils die notwendige Investition für eine Elektrifizierungsinsel von 1,9 Mio. EUR bei der Flügelung der S1 nach Rochlitz unterstellt.

- gegenüber dem HEMU um 40,4%

günstiger.

Abbildung 48: Leipzig – Döbeln, Trendszenario - Summe Kosten (in Mio. EUR)

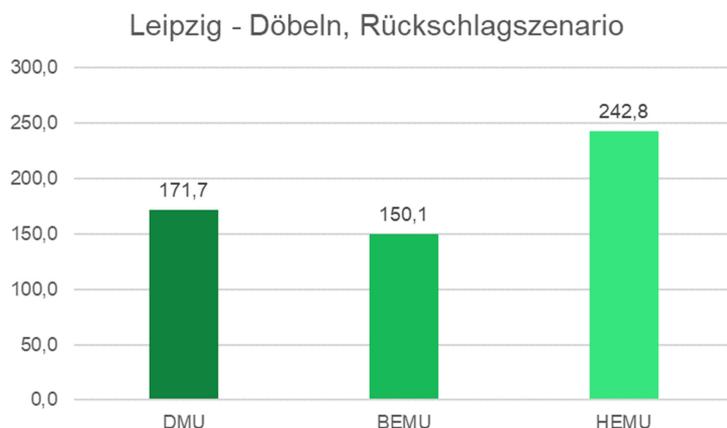


Hauptgrund für die Wirtschaftlichkeit des BEMU ist der Vorteil im Bereich der Energie. Beim DMU fallen Energieaufwendungen mit dem Faktor 2,5 höher an, beim HEMU liegt der Faktor bei 2,3.

Selbst im **Rückschlagszenario** bleibt der BEMU die günstigste Alternative. Trotz einer nur hälftigen Teuerung des Diesels gegenüber dem Strom bleibt der Vorteil des BEMU beim Energieaufwand erhalten. Da zusätzlich ein weniger attraktiver H2-Zielpreis von 9,50 EUR/kg unterstellt ist, vergrößert sich der Abstand zum HEMU weiter. Im Ergebnis beträgt der Wirtschaftlichkeitsvorteil des **BEMU** hier

- gegenüber dem Dieselbetrieb (DMU) 14,4% und
- gegenüber dem HEMU 61,8%.

Abbildung 49: Leipzig – Döbeln, Rückschlagszenario - Summe Kosten (in Mio. EUR)

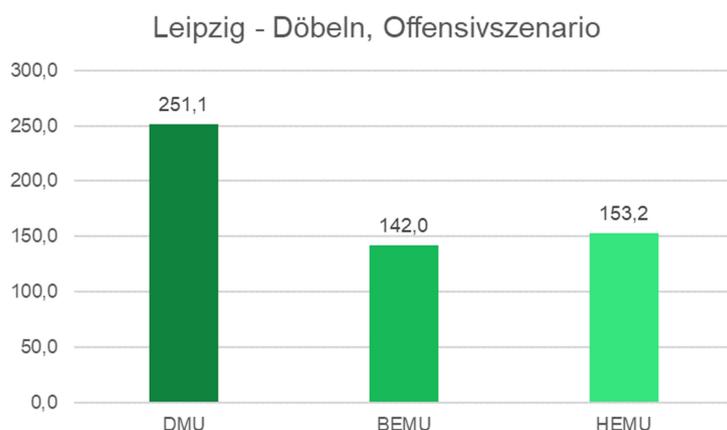


Im **Offensivscenario** hingegen reicht die unterstellte Marktentwicklung beim Wasserstoff nicht aus, dass der HEMU das wirtschaftlichste Antriebskonzept stellt. Der BEMU ist auch hier, wenngleich auch knapp, am wirtschaftlichsten. Grund ist, dass trotz der günstigen Bedingungen für Wasserstoff die Energiekosten des BEMU dennoch nur 60% im Vergleich zum HEMU-Betrieb ausmachen. Dagegen fällt der DMU aufgrund der angenommenen Verteuerung der fossilen Brennstoffe weit ab.

Die Vorteile des **BEMU** betragen in diesem Szenario

- gegenüber dem Dieselbetrieb (DMU) 76,8% und
- gegenüber dem HEMU 7,9%.

Abbildung 50: Leipzig – Döbeln, Offensivscenario - Summe Kosten (in Mio. EUR)

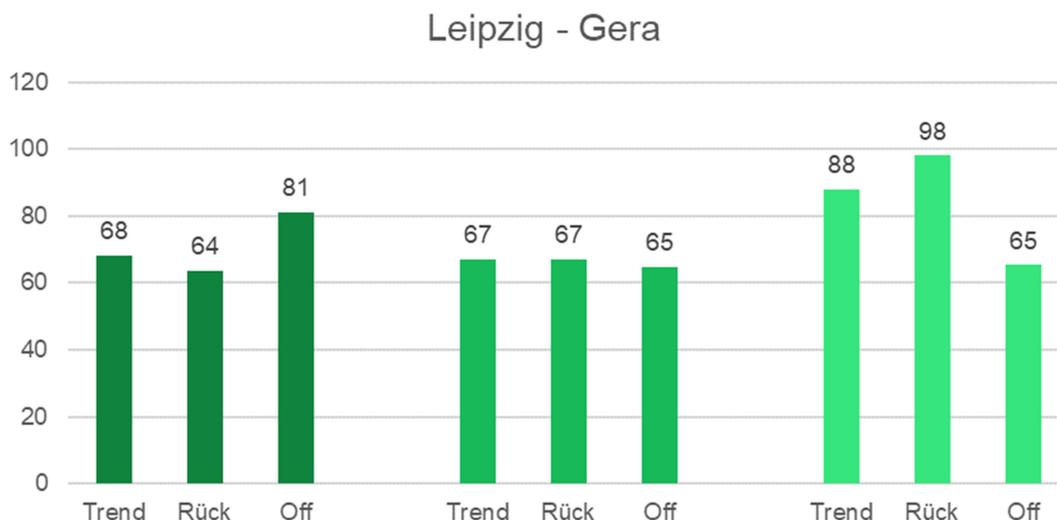


### Leipzig – Gera

Die Ergebnisse des Wirtschaftlichkeitsvergleichs sind auf der Strecke Leipzig – Gera weniger eindeutig, da hier einerseits höhere Investitionskosten für Akkuzüge (BEMU) wie Elektrifizierungsinselfallen anfallen, andererseits die spezifischen Vorteile der hohen Rekuperation deutlich weniger ins Gewicht fallen. Im Trendszenario und im Offensivszenario ist der BEMU-Betrieb am vorteilhaftesten, jedoch liegt im Rückschlagszenario der Dieselmotorbetrieb vorn.

In der Übersicht stellen sich die Ergebnisse der Antriebsarten auf dieser Strecke wie folgt dar:

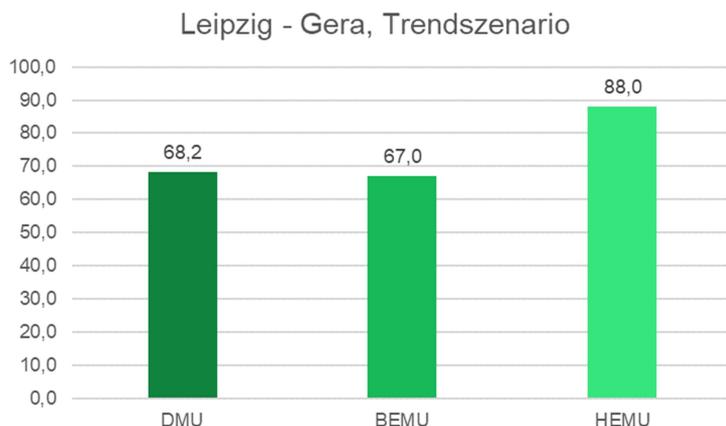
Abbildung 51: Leipzig – Gera, Szenarien, Summe Kosten (in Mio. EUR)



Schon im **Trendszenario** ist der Abstand des BEMU zum DMU knapp. Den Nachteil des BEMU im Bereich der Fahrzeugbereitstellungskosten kann dieser in den Energiekosten knapp aufholen. Bei diesen Kosten liegt der DMU fast 90% über dem BEMU. Daher ergibt sich hier das Ergebnis, dass der **BEMU** im Trendszenario eine Wirtschaftlichkeit

- gegenüber dem Dieselmotorbetrieb (DMU) von 1,8% und
- gegenüber dem HEMU von 31,3% aufweist.

Abbildung 52: Leipzig – Gera, Trendszenario - Summe Kosten (in Mio. EUR)

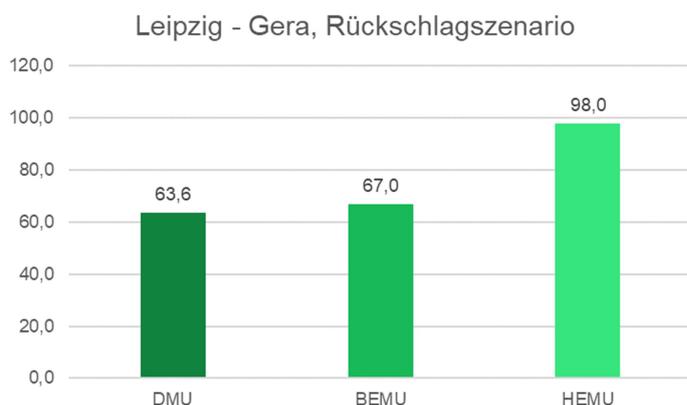


Im **Rückschlagszenario** dreht sich die Vorteilhaftigkeit zugunsten des Dieselpetriebs. Infolge der höheren durchschnittlichen Teuerung sinkt der Energiekostenvorteil des BEMU auf unter 50%. Da parallel der Wasserstoff als deutlich teurer unterstellt wird, vergrößert sich auch der Abstand des HEMU zu den Alternativen.

Im Ergebnis ist der **DMU** das wirtschaftlichste Antriebskonzept mit Wirtschaftlichkeitsvorteilen

- gegenüber dem BEMU von 5,3% und
- gegenüber dem HEMU von 54,1%.

Abbildung 53: Leipzig – Gera, Rückschlagszenario - Summe Kosten (in Mio. EUR)

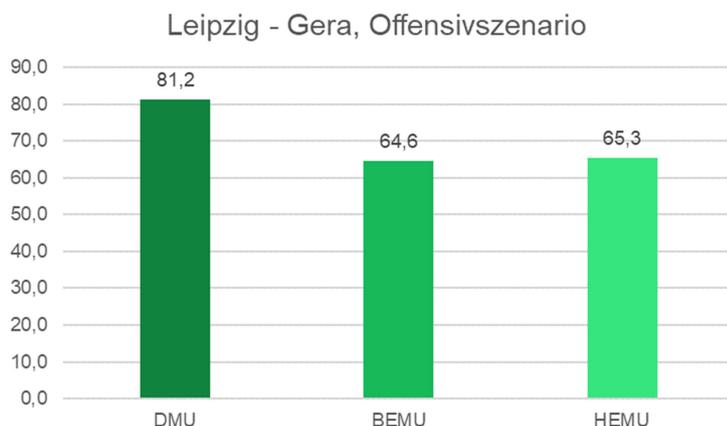


Im **Offensivscenario** kann der BEMU auf der Strecke Leipzig – Gera einen knappen Wirtschaftlichkeitsvorteil gegenüber dem HEMU behaupten. Die dem Wasserstoff förderlichen Rahmenbedingungen dieses Szenarios führen dazu, dass die Energiekosten des HEMU um knapp 70% über denen des BEMU liegen. Da zusätzlich auch die Fahrzeugbereitstellungsaufwendungen auf BEMU-Niveau abgesenkt werden, kann der HEMU in Summe fast die wirtschaftlichste Position erreichen.

Dennoch verbleibt als wirtschaftlichste Variante der **BEMU** mit Wirtschaftlichkeitsvorteilen

- gegenüber dem DMU von 25,7% und
- gegenüber dem HEMU von 1,2%.

Abbildung 54: Leipzig – Gera, Offensivscenario - Summe Kosten (in Mio. EUR)



#### 4.5.4 Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse untersucht, welche Rahmenbedingungen sich ändern müssten, um folgende, andere Ergebnisse zu zeitigen:

1. den Verlust der Wirtschaftlichkeit des BEMU und
2. eine Wirtschaftlichkeit des HEMU.

#### Wann würde der BEMU seine Vorteilhaftigkeit verlieren?

Auf der Strecke **Leipzig – Döbeln** ist der Wirtschaftlichkeitsvorsprung des BEMU äußerst robust. Der BEMU verliert seinen Vorsprung im Trendszenario nur, wenn eines der folgenden, aus heutiger Sicht unwahrscheinlichen Ereignisse einträte:

- Die verwendeten Akkumulatoren müssen bereits nach 3 Jahren (angenommen wurden 8 Jahre) ausgetauscht werden.
- Der Stromverbrauch läge um den Faktor 2,5 höher als angenommen.
- Für den Einsatz mit BEMU wären 13 zusätzliche Fahrzeuge nötig, z.B. weil die Fahrzeuge entsprechend unzuverlässig sind.
- Die für eine Reaktivierung notwendigen Investitionen für Elektranten in Döbeln und/oder die Elektrifizierungsinsel in Rochlitz machen Investitionen von über 50 Mio. EUR nötig.

Dagegen ist auf der Strecke **Leipzig – Gera** der wirtschaftliche Vorsprung des BEMU vor dem DMU im Trendszenario schneller aufgebraucht, beispielsweise

- wenn zwei zusätzliche BEMU-Fahrzeuge notwendig würden, beispielsweise für eine überschlagende Wende, oder
- sich der Investitionsbedarf einer Inseloberleitung von 3,9 auf 9,0 Mio. EUR erhöhen würde.

Dagegen bleibt beim Verbrauch der Vorsprung der BEMU-Technologie auch hier beim Faktor 2,5.

#### Wann würde der HEMU am wirtschaftlichsten?

Die Voraussetzungen dafür, dass der HEMU auf der **S1** die wirtschaftlichste Antriebsalternative wird, sind ein Wasserstoffpreis von 4,00 EUR/kg und die Erhöhung des Wirkungsgrades der Brennstoffzelle um 15%. Um auf der Strecke **Leipzig – Gera** am kostengünstigsten zu werden, braucht es für den HEMU einen Wasserstoff-Zielpreis von 5,00 EUR/kg.

Die Voraussetzungen, dass Wasserstoff die wirtschaftlichste Antriebsalternative wird, sind allerdings sehr hoch. Wasserstoffpreise von 4 – 5 EUR/kg setzen u.E. voraus, dass die Kosten für Elektrolyseure um den Faktor 10 gegenüber dem Status quo sinken. Dies ist aus technologischer Sicht zwar nicht auszuschließen. Jedoch muss rückblickend festgestellt werden, dass trotz größerer Leistungsmengen von Elektrolyseuren eine nachhaltige Kostendegression bislang nicht realisiert werden konnte. Dabei sind die für die Herstellung

von grünem Wasserstoff vorgesehenen Befreiungen des Stroms von Netzentgelten und der EEG-Umlage bereits in den Berechnungen berücksichtigt. Vielmehr erscheinen diese Maßnahmen erforderlich, um überhaupt grünen Wasserstoff für den heutigen Tankstellenpreis von 8,00 EUR/kg (netto) marktfähig zu machen, denn bislang ist auch dieser Wasserstoff weitgehend grau (Erdgastreformation).

#### 4.6 Fazit

Die Wirtschaftlichkeitsbewertung kommt also zu dem Fazit, dass von den beiden alternativen Antriebsarten der BEMU mit sehr großer Wahrscheinlichkeit zu geringeren Aufwendungen für die SPNV-Aufgabenträger führt als der HEMU. Diese Aussage gilt für den heutigen Stand des Wissens und der in der nahen Zukunft im Rahmen der dann durchzuführenden Vergabeverfahren. Für die Zukunft ausdrücklich nicht ausgeschlossen ist, dass es beispielsweise infolge einer verstärkten Förderung der H<sub>2</sub>-Technologie zu deutlich günstigeren Marktbedingungen für HEMU kommen kann.

## 5. Arbeitspaket Nr. 05 - Umweltaspekte

### 5.1 Zusammenfassung

Im Vergleich der vier Aspekte Schadstoff-, Treibhausgas- und Lärmemissionen sowie der regionalen Einordnung lässt sich Folgendes zusammenfassend feststellen (der Vorteil eines Antriebs wird durch zunehmende Pfeildicke repräsentiert):

<b>Aspekt</b>	
<b>BEMU</b>	<p><b>Schadstoffemissionen:</b> In 2025 sind marginale Vorteile des BEMU-Einsatzes ggb. den HEMUs (WtSt und WtW) zu verzeichnen, die jedoch in 2035 weitgehend ausgeglichen sind. Grund ist der zunehmende Anteil von erneuerbarem Strom. Im Vergleich zur Dieselreferenz haben beide Technologien signifikante Vorteile (Ausnahmen NO<sub>x</sub> und SO<sub>2</sub>).</p>
	<p><b>THG-Emissionen:</b> In 2025 betragen die THG-Emissionen (WtW) der HEMUs mehr als das Doppelte der BEMU, WtSt etwas weniger als das Doppelte. WtSt schrumpft dieser Vorteil in 2035 jedoch nahezu auf Null, während BEMU auf Basis der WtW-Analyse noch einen Vorteil von ca. 40% vor den HEMUs haben. Beide Technologien sind jedoch in 2035 signifikant (WtW-Faktor 4-6) THG-emissionsärmer als der Dieselantrieb.</p>
	<p><b>Lärmemissionen:</b> Auch ohne breit verfügbare Messwerte lässt sich bereits heute feststellen, dass kein signifikanter Unterschied zwischen den Lärmemissionen von BEMU und HEMU bestehen wird. Lärmemissionen der CGH<sub>2</sub>-Tankstellen für HEMU (Verdichter) lassen sich durch geeignete Lärmschutzmaßnahmen vermeiden.</p>
	<p><b>Regionale Einordnung:</b> Im Hinblick auf die (erneuerbare) Strombereitstellung unterscheiden sich BEMU und HEMU kurzfristig nicht voneinander, langfristig bietet jedoch Wasserstoff als Kraftstoff systeminhärente Vorteile bei Transport und Speicherung<sup>55</sup>. Wegen der strategischen Positionierung der Wasserstoffenergie-technik im Chemiedreieck Leuna-Bitterfeld-Wolfen dürften sich infrastrukturell/wirtschaftlich besondere Chancen entwickeln.</p>
	<b>HEMU</b>

Zusammenfassend lässt sich daher aus dem Vergleich umweltspezifischer Wirkungen der beiden alternativen Antriebstypen (BEMU, HEMU) ableiten, dass sie beide erhebliche Vorteile bei Schadstoff-, Treibhausgas- und Lärmemissionen im Vergleich zu den heute eingesetzten Dieselnügen aufweisen, insbesondere, wenn ein erneuerbarer Strommix zugrunde gelegt wird. Aus Sicht der begrenzten und eher kurzfristigen Sicht des Betreibers<sup>56</sup> hat ein Batteriebetrieb der Triebwagen daher bei zentraler Wasserstoffversorgung (aus Strommix) deutliche Vorteile geringerer THG-Emissionen im Vergleich mit einem Brennstoffzellenantrieb. Die Vorteile schrumpfen jedoch von 2025 bis 2035 und sind bei lokaler Wasserstoff-Produktion auf Basis erneuerbaren Stroms aus Umweltwirkungsperspektive gar nicht mehr relevant.

<sup>55</sup> ‚Langfristig‘ ist aus Sicht des SPNV auch die erwartete Lebensdauer der zu beschaffenden Triebwagen.

<sup>56</sup> Mit Bezug auf das gesamte Energiesystem bzw. auf den Beschaffungszeitraum der betroffenen Strecken.

Bei einer mittelfristig zunehmend erneuerbaren Stromversorgung tritt dann der Ressourcendruck, also die bessere Nutzung der erneuerbaren Strompotenziale durch die Batteriezüge in den Vordergrund. Aber auch dieser Vorteil der Batteriezüge schrumpft weiter, wenn man die Notwendigkeit zur saisonalen Großenergiespeicherung in einem künftig dominierten EE-Energiesystem mitberücksichtigt. Analysen [ADAC 2019] konnten zeigen, dass sich die Gesamtsystemeffizienz (und damit die Ausnutzung der REG-Potenziale) von brennstoffzellenbetriebenen und batteriebetriebenen Pkw für diesen Fall annähern, was sich ebenso auch auf den Schienenverkehr übertragen lässt. In Verbindung mit den lokalen Wertschöpfungspotenzialen einer Wasserstoffversorgung des Schienenverkehrs könnten aus systemischer Sicht daher brennstoffzellenangetriebene Triebwagen mittel- und langfristig ebenfalls eine sinnvolle Option darstellen.

### 5.1.1 Hintergrund und Vorgehen

Um eine fundierte Aussage über die nachhaltige Verbesserung der regionalen Ökobilanz durch alternativ angetriebene Schienenfahrzeuge zu ermöglichen, sind relevante Umweltaspekte des Fahrzeugbetriebs und der Energiebereitstellung im Rahmen einer Well-to-Wheel (WtW) Analyse zu untersuchen (siehe Abbildung 55 und Abbildung 56).

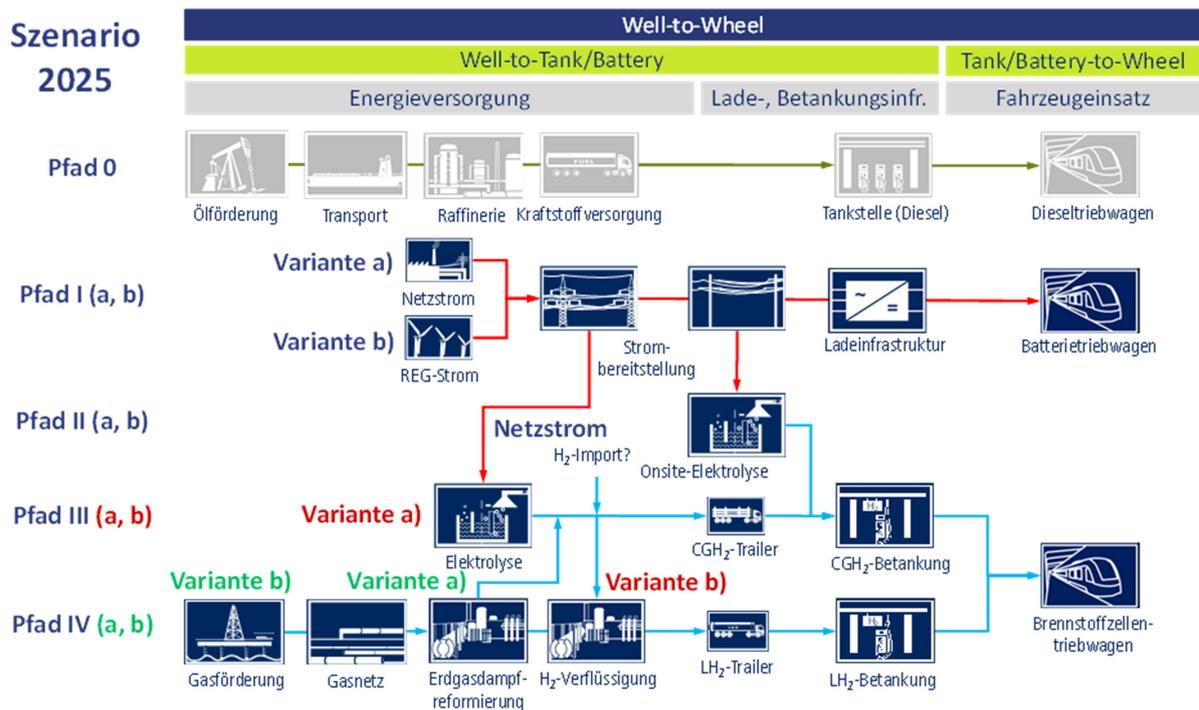


Abbildung 55 Übersicht über die Energieversorgungspfade der unterschiedlich angetriebenen Fahrzeuge des SPNV in 2025

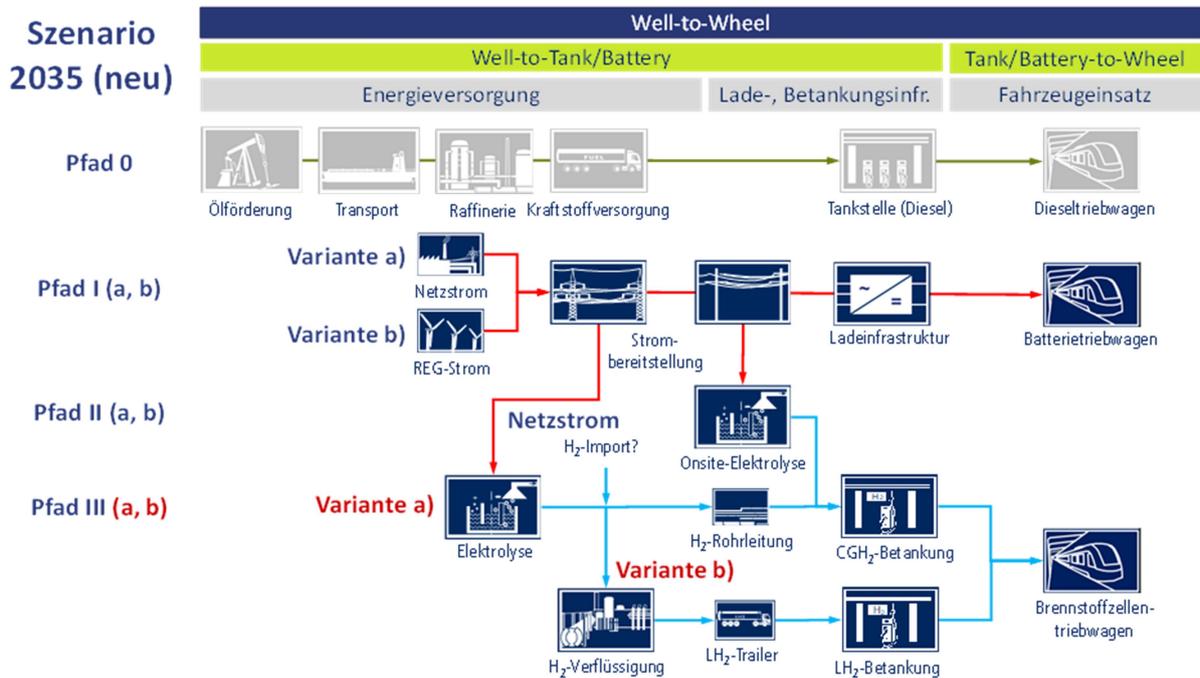


Abbildung 56 Übersicht über die Energieversorgungspfade der unterschiedlich angetriebenen Fahrzeuge des SPNV in 2035

Die im Rahmen dieser Studie durchgeführten WtT-Analysen umfassen die Betrachtung von lokalen Schadstoffemissionen (Kap. 5.2.1) sowie Treibhausgasen (Kap. 5.2.4). Zusätzlich werden Lärmemissionen (Kap. 5.3) betrachtet. Der Einfluss regionaler Besonderheiten auf die Ergebnisse der Untersuchung wird in Kap. 5.4 analysiert und diskutiert, Kap. 5.5 fasst die Ergebnisse in einer Gesamtschau zusammen und stellt diese grafisch dar.



Der Energiebedarf und die Treibhausgasemissionen für die Bereitstellung von Rohöl wurde aus [Exergia et al. 2015] entnommen. Darin wird der mittlere Versorgungsmix der EU mit Rohöl ermittelt. Diese Daten sind auch in die Entwicklung der überarbeiteten EU-Richtlinie für Erneuerbare Energien eingegangen und werden zudem in der nächsten Aktualisierung der JRC/EUCAR/CONCAWE „Well-to-Wheel Study“ [JEC 2014] berücksichtigt. Der Energieaufwand und die Treibhausgasemissionen der Rohölraffinerie und der Kraftstoffverteilung basieren ebenfalls auf aktuellen Arbeiten zur Aktualisierung von [JEC 2014]. Tabelle 30 zeigt die resultierenden Treibhausgasemissionen für die Bereitstellung von Diesel aus Rohöl.

Prozessschritt	gCO <sub>2</sub> -Äquivalent / MJ <sub>Diesel</sub>
Rohölproduktion	10,0
Rohöltransport	0,8
Rohölraffination	7,2
Dieseltransport	0,5
Dieseltankstelle	0,4
<b>Well-to-Tank gesamt</b>	<b>18,9</b>

Tabelle 30 Treibhausgasemissionen von Diesel aus Rohöl

Die Verbrennung von Rohöl basierendem Diesel in Fahrzeugen (Tank-to-Wheel) ist mit Treibhausgasemissionen in Höhe von 73,2 g CO<sub>2</sub> je MJ Diesel verbunden. Mit der Bereitstellung und Verbrennung von Diesel (EU-Mix) werden entsprechend 92,1 g CO<sub>2</sub>-Äquivalent je MJ Diesel emittiert.

### Strom für batterie-elektrische Antriebe

Für die Bereitstellung von Strom für batterie-elektrische Triebzüge werden zwei Varianten angenommen:

- **Ia:** Strom aus Strommix Deutschland in 2025 und 2035
- **Ib:** Strom aus erneuerbaren Energiequellen

Der Strommix für Deutschland für 2025 (Abbildung 58) und 2035 (Abbildung 59) wurde aus [Öko-Institut & Prognos 2019] entnommen.

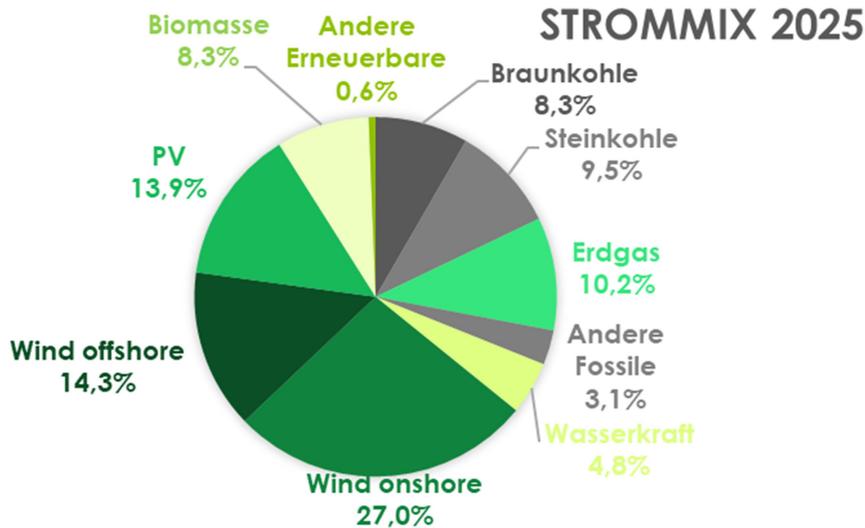


Abbildung 58 Strommix Deutschland in 2025 [Öko-Institut & Prognos 2019]

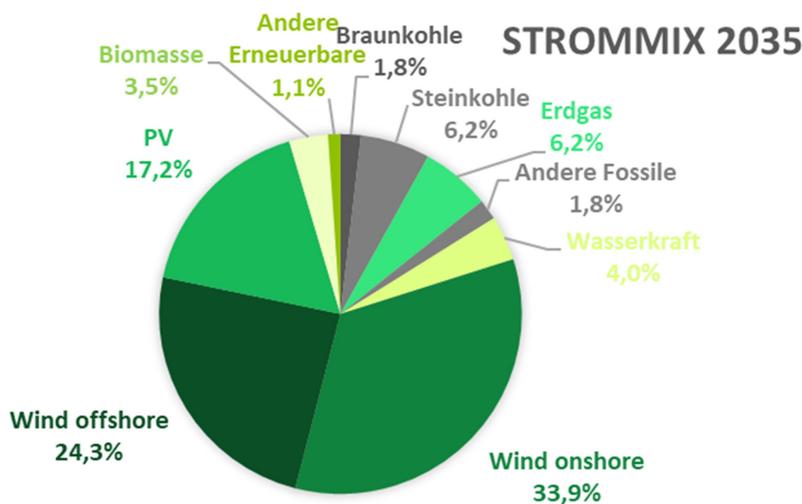


Abbildung 59 Strommix Deutschland in 2035 [Öko-Institut & Prognos 2019]

Der Anteil erneuerbarer Energien an der Stromgestehung beträgt somit etwa 69% in 2025 und etwa 84% in 2035. Im Vergleich dazu soll nach den Zielen der Bahn AG der Anteil erneuerbarer Energien am Bahnstrommix mindestens 80% im Jahr 2030 betragen [Bundestag 2019], was sich in etwa mit den hier angenommenen Szenarien für den Strommix Deutschland deckt. Über die Zusammensetzung des verbleibenden Anteils nicht erneuerbarer Energien im Bahnstrommix gibt es keine Angaben.

Der Strom wird über das Hochspannungs- und Mittelspannungsnetz zu den Ladestationen transportiert. Zur Vermeidung von Lastspitzen wird an der Ladestation ein Batteriesystem installiert. Der Wirkungsgrad des Batteriesystems wird nach [Tesla 2017] mit 89% angenommen. Es wird angenommen, dass 50% des Ladestroms über das Batteriesystem geführt wird. Bei Einsatz von Strom aus erneuerbaren Energiequellen wird darüber hinaus noch ein Batteriesystem am Standort der Stromerzeugung angenommen. Der Wirkungsgrad der Ladestation wird mit 90% angenommen.

### Druckwasserstoff (CGH<sub>2</sub>) über Wasserelektrolyse vor Ort an der Tankstelle

Für die Bereitstellung von Strom für die Wasserelektrolyse werden zwei Varianten angenommen:

- **Ila:** Strom aus Strommix Deutschland in 2025 und 2035
- **Ilb:** Strom aus erneuerbaren Energiequellen

Der Strom wird über das Hochspannungs- und Mittelspannungsnetz zu den CGH<sub>2</sub>-Tankstellen transportiert. Die Elektrolyse befindet sich dabei vor Ort an der H<sub>2</sub>-Tankstelle, so dass dort der Wasserstoff erzeugt, gespeichert, verdichtet und abschließend an die Brennstoffzellen-Triebzüge abgegeben wird.

Tabelle 31 zeigt Stromverbrauch und Wirkungsgrad für die Wasserelektrolyse auf Basis von Angaben in [DLR et al. 2015].

**Tabelle 31 Technische Daten der H<sub>2</sub>-Produktion mittels Wasserelektrolyse**

	Einheit	2020	2030
Stromverbrauch	kWh/Nm <sup>3</sup>	5,08	4,22
	kWh/kg	56,4	46,9
	kWh/kWh <sub>Hi</sub>	1,693	1,407
Wirkungsgrad H <sub>i</sub>	-	59,1%	71,1%
Wirkungsgrad H <sub>s</sub>	-	69,8%	84,0%

In dieser Studie beziehen sich die Ergebnisse für die Emissionen auf den unteren Heizwert.

Die CGH<sub>2</sub>-Tankstelle ist auf die Betankung von Drucktanks mit einem maximalen Druck von 35 MPa ausgelegt. Der Wasserstoff wird von 2 MPa (Ausgang Elektrolyseanlage) auf einen Druck von 45 MPa komprimiert, um kurze Betankungszeiten zu erreichen und nach der Betankung einen Druck von 35 MPa bei 15°C zu sicherzustellen. Der Stromverbrauch beträgt etwa 1,7 kWh pro kg Wasserstoff (0,051 kWh pro kWh Wasserstoff bezogen auf den unteren Heizwert).

Darüber hinaus wurden der Ölwechsel und der Wechsel des Kühlmittels für die Kompressoren berücksichtigt.

Eine energieintensive Vorkühlung des Wasserstoffs (wie zum Beispiel bei der Betankung von 70 MPa Brennstoffzellen-Pkw) wird nach Expertenangaben für die Betankung von Schienenfahrzeugen mit 35 MPa Tanksystem voraussichtlich nicht benötigt [LBST et al. 2016].

### Druckwasserstoff (CGH<sub>2</sub>) und verflüssigter Wasserstoff (LH<sub>2</sub>) mittels Wasserelektrolyse zentral

Für die Bereitstellung des Stroms für die zentrale Wasserelektrolyse wurde Strom aus dem Strommix Deutschland angenommen. Es wurden zwei Varianten berechnet:

- **IIla:** Druckwasserstoff (CGH<sub>2</sub>), Anlieferung über CGH<sub>2</sub>-Trailer in 2025 über eine Entfernung von 100 km (einfach) und über ein H<sub>2</sub>-Pipeline-Netz in 2035

- **IIIb:** Verflüssigter Wasserstoff (LH<sub>2</sub>), Anlieferung über LH<sub>2</sub>-Trailer über eine Entfernung von 500 km (einfach).

Für den Strombedarf der Wasserelektrolyse wurden die gleichen Annahmen getroffen wie für Pfad II (siehe Tabelle 31).

Bei Pfad IIIa wird der Wasserstoff zunächst auf 10 MPa komprimiert und in entsprechend groß dimensionierten Röhrenspeichern gespeichert, um einen netzdienlichen Betrieb der Elektrolyseanlage zu ermöglichen. Der Strombedarf dafür liegt bei etwa 0,67 kWh pro kg Wasserstoff (0,020 kWh pro kWh bezogen auf den unteren Heizwert). Für den Transport von Wasserstoff über CGH<sub>2</sub>-Trailer wird ein Druckniveau von maximal 50 MPa angenommen. Der Strombedarf für die Befüllung der CGH<sub>2</sub>-Trailer liegt bei etwa 1,78 kWh pro kg (0,053 kWh pro kWh Wasserstoff bezogen auf den unteren Heizwert). 2030 wird bei Pfad IIIa der Wasserstoff über ein H<sub>2</sub>-Pipeline-Netz zur Tankstelle transportiert. Nach [Krieg 2012] liegt der Stromverbrauch für ein hypothetisches H<sub>2</sub>-Pipeline-Netz für Deutschland bei etwa 0,6 kWh pro kg Wasserstoff (0,018 kWh pro kWh Wasserstoff bezogen auf den unteren Heizwert).

Bei Pfad IIIb wird der Wasserstoff verflüssigt. Der Strombedarf für die H<sub>2</sub>-Verflüssigung wurde auf Basis von [Haberstroh 2019] für 2025 mit etwa 11,9 kWh pro kg und für 2030 mit etwa 7,5 kWh pro kg angenommen. Der H<sub>2</sub>-Verlust liegt im einstelligen Prozentbereich. Es wurde ein H<sub>2</sub>-Verlust von 5% angenommen.

2025 wird die H<sub>2</sub>-Produktion über Wasserelektrolyse zur Bereitstellung von CGH<sub>2</sub> regional in Sachsen erfolgen. Bei CGH<sub>2</sub> wurde daher eine relativ kurze Transportentfernung von 100 km angenommen. Große Anlagen zur Produktion von Wasserstoff, wie sie 2035 realisiert werden könnten, dürften jedoch bevorzugt an Standorten mit hohem Aufkommen an Wind- und Solarstrom errichtet werden (z.B. an der Küste oder in PV-Hybrid-Kraftwerken in ehemaligen Braunkohletagebauegebieten in der Lausitz).

Für LH<sub>2</sub> wurde eine Transportentfernung von 500 km gewählt, da davon ausgegangen werden kann, dass große Anlagen zur H<sub>2</sub>-Produktion über Wasserelektrolyse und nachgeschalteter H<sub>2</sub>-Verflüssigung bevorzugt an Standorten mit hohem Aufkommen an Wind- und Solarstrom installiert werden.

Tabelle 32 zeigt die technischen Daten für einen CGH<sub>2</sub>-Trailer nach [DeliverHy 2013] und einen LH<sub>2</sub>-Trailer nach [Weber 1994].

**Tabelle 32 Transport von Wasserstoff mit Lkw-Trailern**

	Einheit	CGH <sub>2</sub> -Trailer	LH <sub>2</sub> -Trailer
Druck (max.)	MPa	52,5	1,10
Geometrisches Volumen	l	30.884	53.100
H <sub>2</sub> -Transportkapazität (netto)	kg	965	3.500

Die Trailer werden von einer Sattelzugmaschine gezogen. Der Kraftstoffverbrauch der Zugmaschine wird analog zu [JEC 2014] mit etwa 31 l Diesel pro 100 km angenommen.

Im Fall der H<sub>2</sub>-Anlieferung über CGH<sub>2</sub>-Trailer beträgt der Stromverbrauch der CGH<sub>2</sub>-Tankstelle etwa 0,2 kWh pro kg Wasserstoff (etwa 0,007 kWh pro kWh bezogen auf den unteren Heizwert).

Im Fall der H<sub>2</sub>-Anlieferung über Pipeline wird ein Vordruck von 2 MPa angenommen. Der Stromverbrauch der Tankstelle liegt daher auf dem gleichen Niveau wie bei der H<sub>2</sub>-Produktion vor Ort an der Tankstelle (etwa 1,7 kWh pro kg Wasserstoff, siehe Kapitel 0).

Auf Basis von Herstellerangaben (Linde) liegt bei der Betankung der Schienenfahrzeuge mit LH<sub>2</sub> der Stromverbrauch mit etwa 0,01 kWh pro kg Wasserstoff sehr niedrig. Er resultiert aus dem Betrieb der Krypumpen (2,2 kW für 50 l/min).

### Druckwasserstoff (CGH<sub>2</sub>) und verflüssigter Wasserstoff (LH<sub>2</sub>) mittels Erdgasdampfreformierung zentral

Die Bereitstellung von CGH<sub>2</sub> und LH<sub>2</sub> mit Wasserstoff aus Dampfreformierung wurde nur für den Zeithorizont 2025 betrachtet.

Es wurden zwei Varianten angenommen:

- **IVa:** Druckwasserstoff (CGH<sub>2</sub>), Anlieferung mittels CGH<sub>2</sub>-Trailern über eine Entfernung von 100 km (einfach)
- **IVb:** Verflüssigter Wasserstoff (LH<sub>2</sub>), Anlieferung mittels LH<sub>2</sub>-Trailern über eine Entfernung von 100 km (einfach).

Das für die Dampfreformierung eingesetzte Erdgas wird aus Russland über eine Transportentfernung von 5.000 km über Pipeline nach Deutschland geliefert. Dort wird es über das Hochdrucknetz zu industriellen Verbrauchern über eine mittlere Transportentfernung von 500 km verteilt.

In [AFW 2017] wurden verschiedene Konzepte von Dampfreformieranlagen ohne und mit CCS beschrieben. Tabelle 33 zeigt die technischen Daten einer Dampfreformieranlage ohne CCS nach [AFW 2017].

Tabelle 33 H<sub>2</sub>-Produktion mittels Dampfreformierung von Erdgas

Parameter	Wert
H <sub>2</sub> -Produktionskapazität	100.000 Nm <sup>3</sup> /h
<b>Input</b>	
Erdgas	1,3157 kWh <sub>Hi</sub> /kWh <sub>H2, Hi</sub>
<b>Output</b>	
Wasserstoff	1,000 kWh <sub>H2, Hi</sub>
Überschussstrom	0,03306 kWh/kWh <sub>H2, Hi</sub>
<b>Emissionen</b>	
CO <sub>2</sub>	261 g/kWh <sub>H2, Hi</sub>
NO <sub>x</sub>	0,082 g/kWh <sub>H2, Hi</sub>
CO	0,079 g/kWh <sub>H2, Hi</sub>

Für den Transport von Wasserstoff mittels CGH<sub>2</sub>-Trailern (Pfad IVa) wird ein Druckniveau von maximal 50 MPa angenommen. Der Strombedarf für die Befüllung der CGH<sub>2</sub>-Trailer liegt bei etwa 1,78 kWh pro kg (0,053 kWh pro kWh Wasserstoff bezogen auf den unteren Heizwert).

Bei Pfad IVb wird der Wasserstoff verflüssigt. Der Strombedarf für die H<sub>2</sub>-Verflüssigung wurde auf Basis von [Haberstroh 2019] für 2025 mit etwa 11,9 kWh pro kg und für 2030 mit

etwa 7,5 kWh pro kg angenommen. Der H<sub>2</sub>-Verlust liegt im einstelligen Prozentbereich. Es wurde ein H<sub>2</sub>-Verlust von 5% angenommen.

Denkbar ist dabei die Nutzung existierender Dampfpreformieranlagen am Raffineriestandort Leuna. Daher wurde sowohl für CGH<sub>2</sub>, als auch für LH<sub>2</sub> eine relativ kurze Transportentfernung von 100 km angenommen.

Für die CGH<sub>2</sub>-Tankstellen wurden die gleichen Annahmen getroffen wie bei Pfad IIIa und IIIb (Kapitel 0).

Für 2030 wurde dieser Pfad nicht betrachtet, da die Klimaziele von Paris durch eine fossile H<sub>2</sub>-Produktion ohne CCS nicht erreicht werden können. Anlagen mit CCS sind jedoch nur an Küstenstandorten möglich, da die Einlagerung von CO<sub>2</sub> an Land in vielen europäischen Staaten keine Akzeptanz findet, so auch nicht in Deutschland.

### 5.2.3 Schadstoffemissionen

Luftschadstoffe haben verschiedene Wirkungen auf Umwelt und Gesundheit:

- **NMVOG:** Verschiedene Umweltwirkungen (großräumig über Bildung von Photooxidantien, lokal als Geruchsbelästigung oder als krebserregende Substanzen (z.B. Benzol). Allein aus der Gesamtemission kann nicht auf Wirkungspotenzial geschlossen werden, zusammen mit NO<sub>x</sub> Bildung von bodennahem Ozon (z.B. „Sommersmog“).
- **NO<sub>x</sub>:** Wesentliche Vorläufersubstanz für die Bildung bodennahen Ozons und von Feinstaub, Reizgas mit geringer Wasserlöslichkeit, das nach Inhalation zu Funktionsstörungen und entzündlichen Prozessen im Atemtrakt des Menschen führen kann (Kurz- als auch für Langzeitwirkungen). NO<sub>x</sub> führt darüber hinaus zur Versauerung („saurer Regen“), der u.a. zu Waldschäden führt.
- **SO<sub>2</sub>:** Reizgas mit individueller Empfindlichkeit der Atemwege (vor allen Dingen Asthmatiker), verstärkt durch Schwebstaubbelastung. SO<sub>2</sub> führt darüber hinaus zur Versauerung („saurer Regen“), der u.a. zu Waldschäden führt.
- **CO:** Beeinträchtigt O<sub>2</sub>-Aufnahme von Menschen und Tieren, starkes Atemgift mit Wirkung auf das Zentralnervensystem.
- **Partikel & Staub:** In Luft verteilte Feststoffe (Unterschied in Größe, Form, chemisch-physikalische Eigenschaften). Große Partikel mit geringer Atemwegswirkung. Kritisch ist Feinstaub (≤10 µm = PM10), der in Atemwege eindringt (vor allem PM ≤2,5 µm = PM2,5) mit mechanischen Reizungen als Folge (Herz-Kreislauf-Erkrankungen) bereits bei geringen Konzentrationen.

#### Antriebstechnologien (TtW)

Als Referenz wird ein Dieseltriebzug heutiger Bauart angenommen. Der Endenergieverbrauch der Triebzüge wurde aus [IFB 2020] entnommen.

Mit Ausnahme von SO<sub>2</sub> wurden für den Dieseltriebzug die Schadstoffemissionen berechnet aus dem in [LfULG 2012] angegebenen Emissionsfaktoren pro Energieeinheit Diesel

multipliziert mit dem Dieserverbrauch nach [IFB 2020]. Die SO<sub>2</sub>-Emissionen wurden aus dem Schwefelgehalt des Kraftstoffs berechnet (Schwefelgehalt Dieseldieselkraftstoff 10 ppm).

Es wurden zwei Fahrstrecken sowie Einfach- und Mehrfach-Traktion betrachtet. Die zwei Fahrstrecken sind:

- Leipzig – Grimma – Döbeln
- Leipzig – Gera

Tabelle 34 zeigt den Endenergieverbrauch (Diesel, Strom, Wasserstoff) für einen Triebzug mit Einfachtraktion für die Strecke Leipzig – Grimma – Döbeln.

**Tabelle 34 Endenergieverbrauch und Emissionen (Tank-to-Wheel) für Triebwagen auf der Strecke Leipzig – Grimma – Döbeln (Einfachtraktion)**

Parameter	Einheit	Diesel	BEMU	HEMU
Endenergieverbrauch	l Diesel/km	1,55	-	-
	kg/km	-	-	0,28
	kWh/km	15,48	6,70	9,33
	MJ/km	55,7	24,1	33,6
Emissionen				
NMVOG	g/km	1,30	0	0
NO <sub>x</sub>	g/km	46,80	0	0
SO <sub>2</sub>	g/km	0,03	0	0
CO	g/km	4,04	0	0
Rußpartikel	g/km	0,57	0	0
PM10 aus Abrieb	g/km	3,03	3,03	3,03

**Tabelle 35 Endenergieverbrauch und Emissionen Tank-to-Wheel Triebzüge für die Strecke Leipzig – Gera (Einfachtraktion)**

Parameter	Einheit	Diesel	BEMU	HEMU
Endenergieverbrauch	l Diesel/km	1,23	-	-
	kg/km	-	-	0,24
	kWh/km	12,28	5,30	8,00
	MJ/km	44,2	19,1	28,8
Emissionen				
NMVOG	g/km	1,04	0	0
NO <sub>x</sub>	g/km	37,14	0	0
SO <sub>2</sub>	g/km	0,02	0	0
CO	g/km	3,21	0	0
Rußpartikel	g/km	0,45	0	0
PM10 aus Abrieb	g/km	3,03	3,03	3,03

Der batterie-elektrische Triebwagenzug (BEMU) und der Triebwagenzug mit Brennstoffzellen (HEMU) ist frei von jeglichen Schadstoffemissionen.

Bei den HEMU entstehen lediglich Wasserdampfemissionen. Sie betragen für die Strecke Leipzig – Grimma – Döbeln etwa 2,5 kg pro km und auf der Strecke Leipzig - Gera etwa 2,14 kg pro km. Der Anfall von Wasserdampf ist zwar höher als bei Diesel (2,5 kg/km versus 0,45 kg/km bzw. 2,14 kg/km versus 0,36 kg/km), ist aber im Vergleich zum natürlichen Regenaufkommen in der Region vernachlässigbar.

Bei Mehrfachtraktion verdoppeln sich Verbrauch und Emissionen. Das Verhältnis der Verbrauchswerte der Antriebssysteme untereinander bleibt gleich.

### Vorketten der Energiebereitstellung (WtSt)

Abbildung 60 und Abbildung 61 zeigen die Emission von Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffen (NMVOC) für die Szenarien 2025 und 2035.

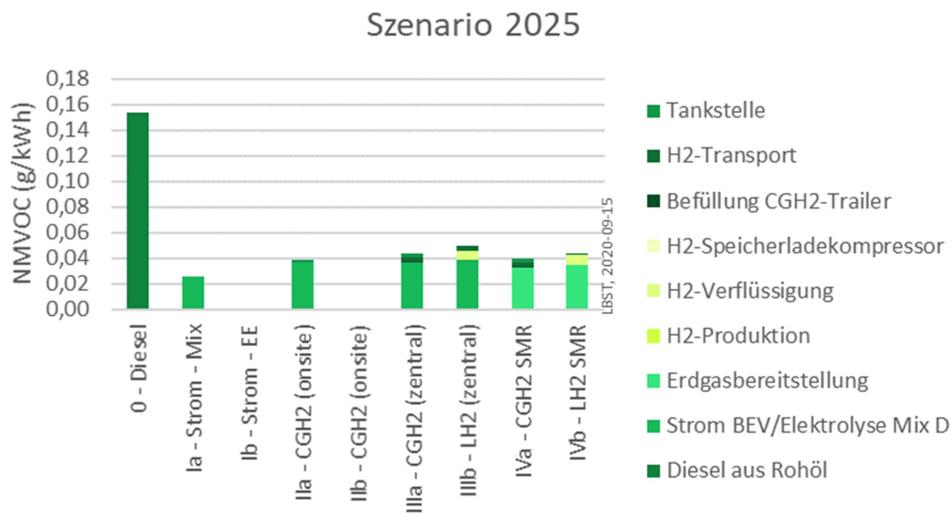


Abbildung 60 NMVOC-Emissionen WtSt Szenario 2025

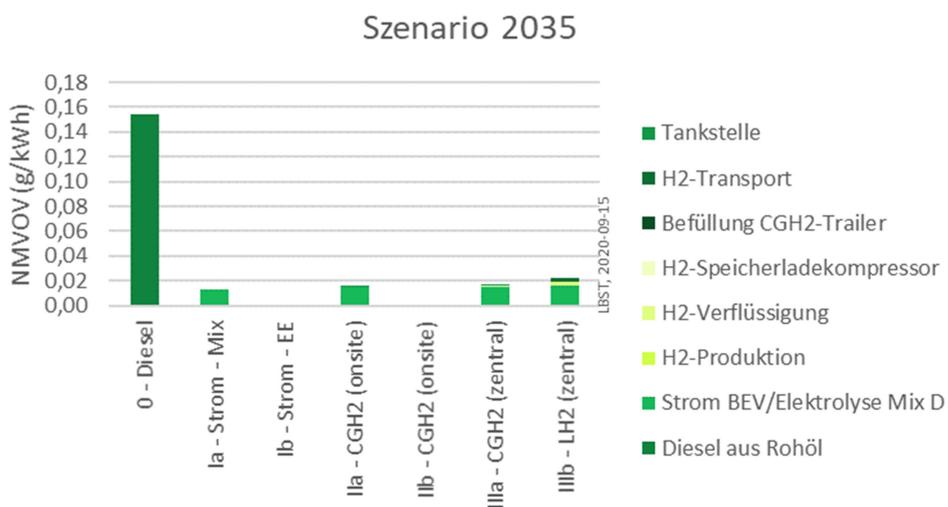


Abbildung 61 NMVOC-Emissionen WtSt Szenario 2035

Durch den wachsenden Anteil erneuerbarer Energien am Strommix Deutschland in 2035 sinken die NMVOC-Emissionen für die Pfade Ia (Strom für batterie-elektrische Triebzüge), IIa (CGH<sub>2</sub> über Wasserelektrolyse vor Ort an der Tankstelle und Strom aus Strommix), IIIa (CGH<sub>2</sub> über zentrale Elektrolyse), und IIIb (LH<sub>2</sub> über zentrale Elektrolyse) erheblich.

Abbildung 62 und Abbildung 63 zeigen die Stickoxidemissionen (NO<sub>x</sub>) für die Szenarien 2025 und 2035.

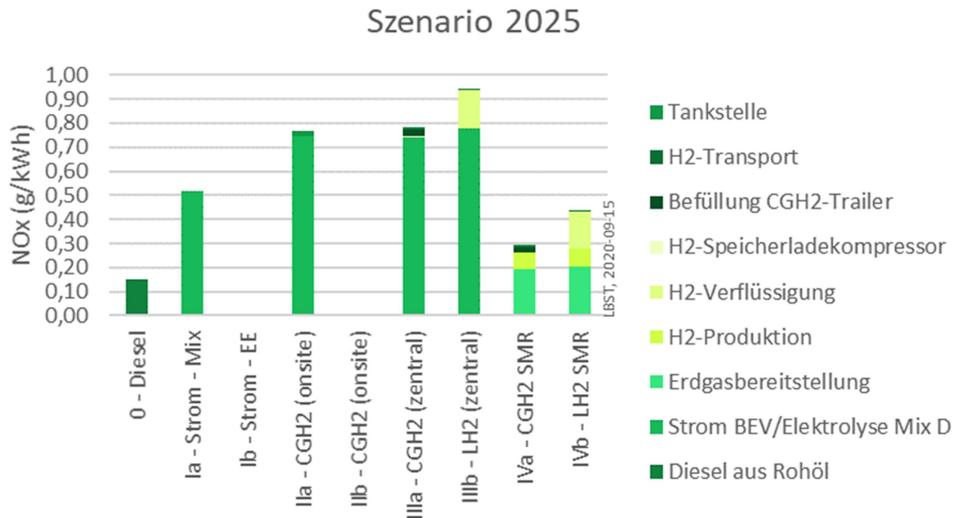


Abbildung 62 NO<sub>x</sub>-Emissionen WtSt Szenario 2025

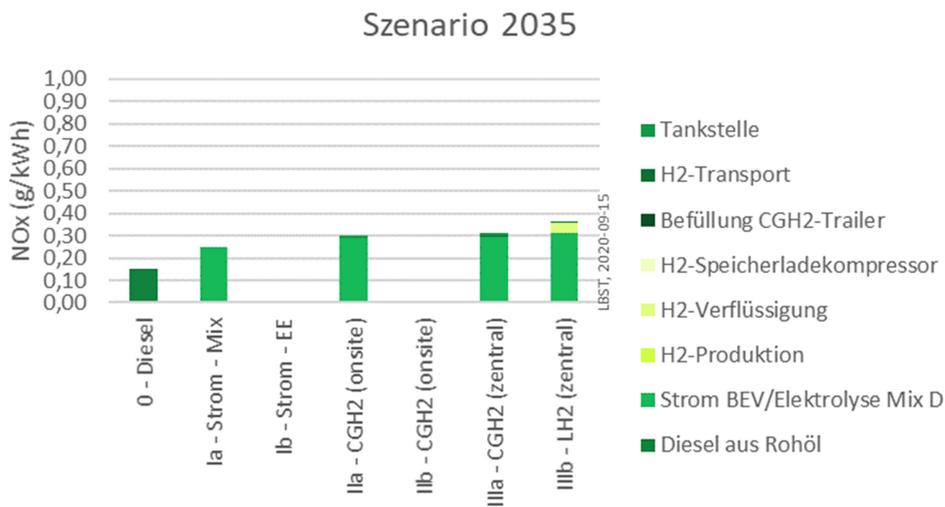


Abbildung 63 NO<sub>x</sub>-Emissionen WtSt Szenario 2035

Bezogen auf die Strom- und Kraftstoffbereitstellung zeichnet sich selbst Pfad Ia für batterieelektrische Triebzüge (Battery electric multiple unit - BEMU) durch den verbleibenden Kohlestromanteil noch in 2035 durch höhere NO<sub>x</sub>-Emissionen aus als die Dieselreferenz.

Abbildung 64 und Abbildung 65 zeigen die Emission von Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>) für die Szenarien 2025 und 2035.

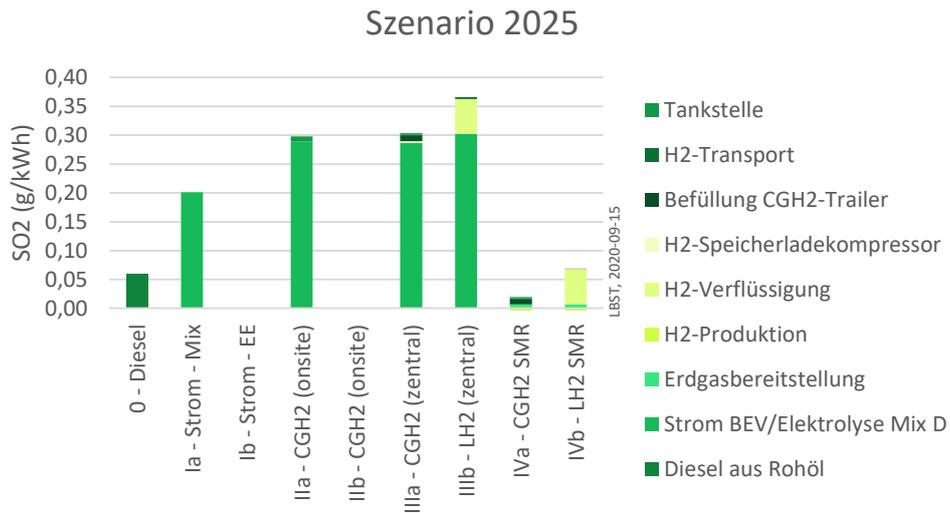


Abbildung 64 SO<sub>2</sub>-Emissionen WtSt Szenario 2025

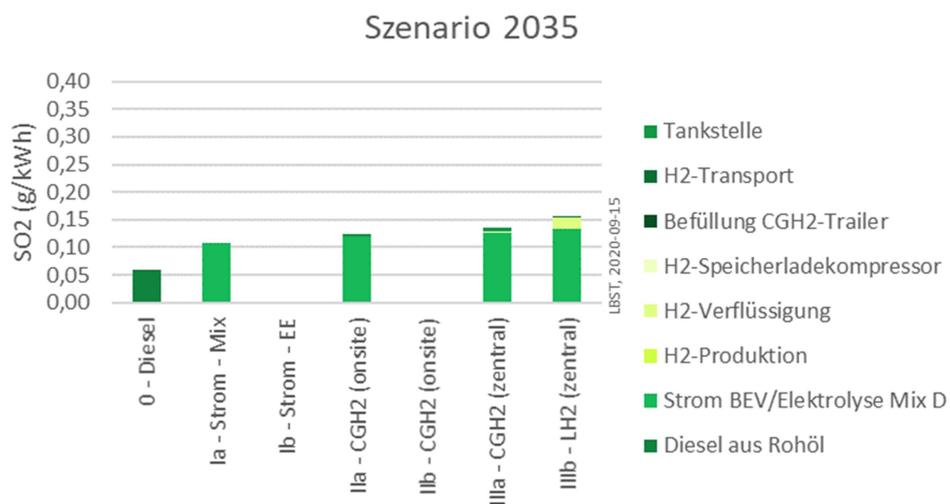


Abbildung 65 SO<sub>2</sub>-Emissionen WtSt Szenario 2035

Bezogen auf die Strom- und Kraftstoffbereitstellung zeichnet sich selbst Pfad Ia für batterieelektrische Triebzüge (BEMU) durch den verbleibenden Kohlestromanteil noch in 2035 durch höhere SO<sub>2</sub>-Emissionen aus als die Dieselreferenz.

Abbildung 66 und Abbildung 67 zeigen die Emission von Kohlenmonoxid (CO) für die Szenarien 2025 und 2035.

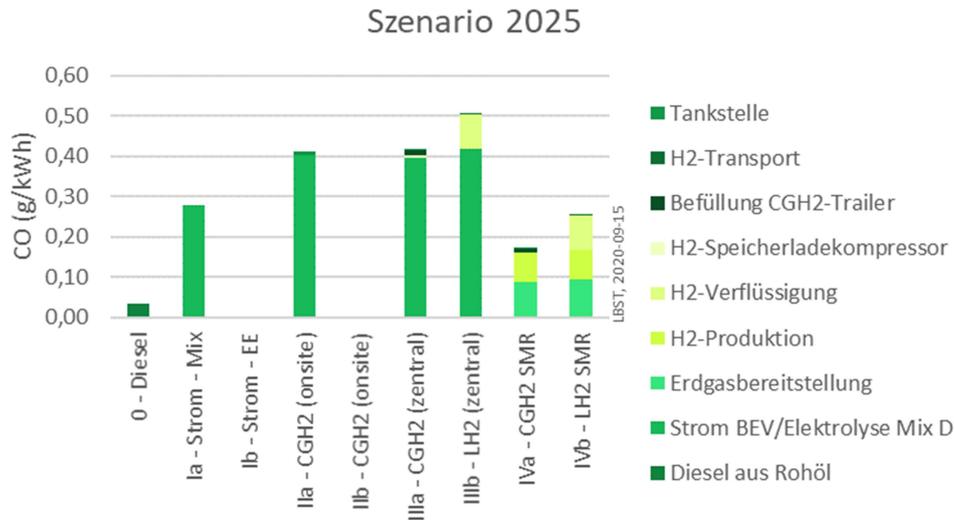


Abbildung 66 CO-Emissionen WtSt Szenario 2025

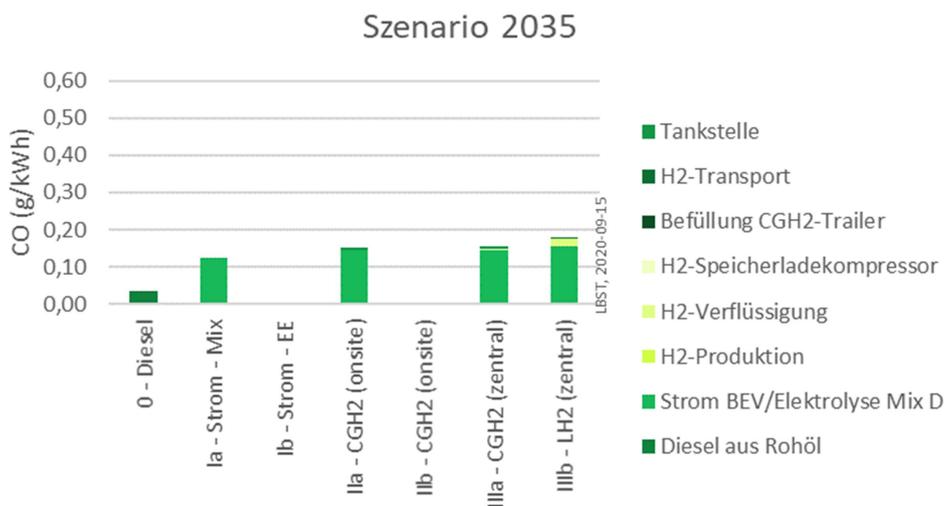


Abbildung 67 CO-Emissionen WtSt Szenario 2035

Bezüglich der Bereitstellung von Strom und Kraftstoff sind die CO-Emissionen für Ia, IIa, IIIa, IIIb in 2025 aber auch in 2035 so dominant, dass sie die CO-Emissionen aus der Dieselpflege weit übertreffen. Auch die erdgasbasierten Pfade sind ungünstig.

Abbildung 68 und Abbildung 69 zeigen die Emission von Staub und Partikeln für die Szenarien 2025 und 2035.

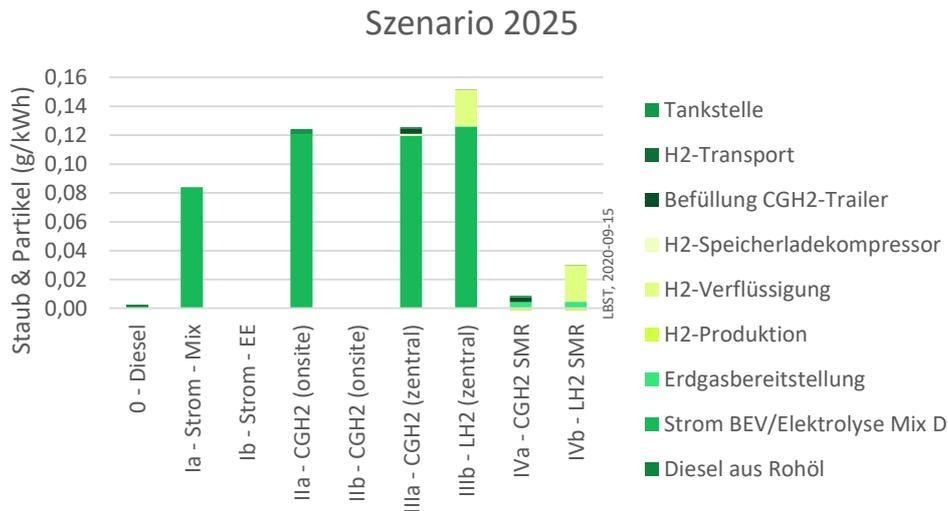


Abbildung 68 Emission von Staub und Partikeln WtSt Szenario 2025

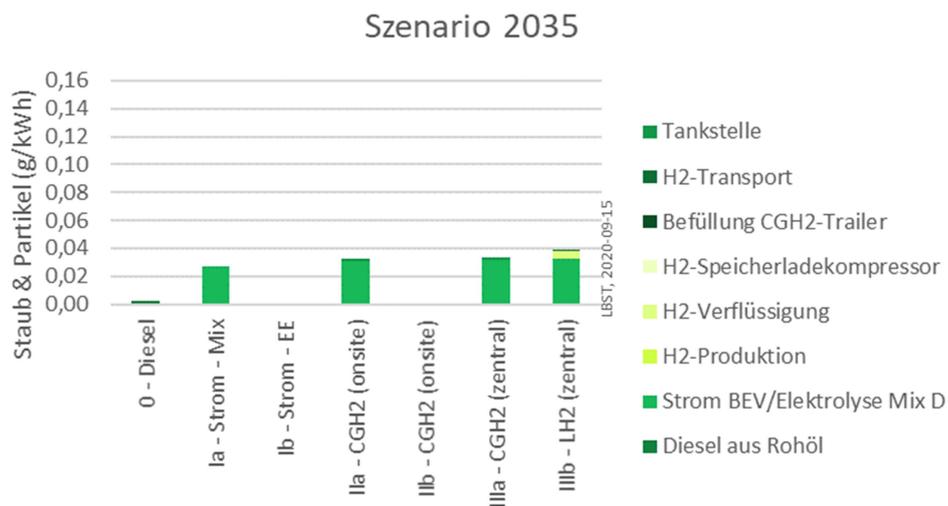


Abbildung 69 Emission von Staub und Partikeln WtSt Szenario 2035

Der Strommix führt in Ia, IIa, IIIa, und IIIb zu massiven Partikelemissionen im Vergleich zur Referenz in der Vorkette (WtSt), sowohl in 2025 als auch in 2035. Eine große Unsicherheit besteht allerdings noch bei den Emissionen von Staub- und Rußpartikeln aus der Rohölbereitstellung.

### Schadstoffemissionen für vollständige Versorgungskette (WtW)

In diesem Kapitel werden die WtW-Ergebnisse für die Emission von Luftschadstoffen für die Einfachtraktion und die Fahrstrecke Leipzig – Grimma – Döbeln dargestellt.

Abbildung 70 und Abbildung 71 zeigen die Emission von Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffen (NMVOC) „Well-to-Wheel“ (WtW) für die Szenarien 2025 und 2035.

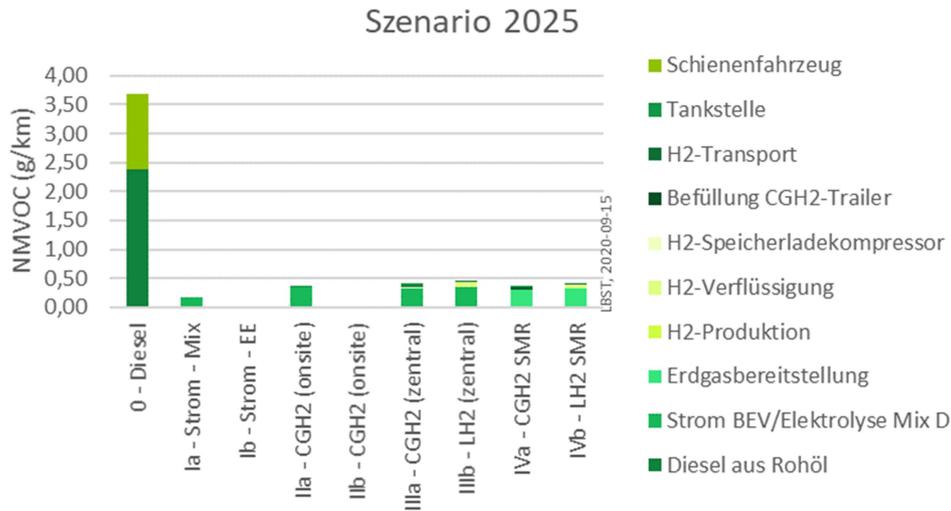


Abbildung 70 NMVOC-Emissionen WtW für Szenario 2025

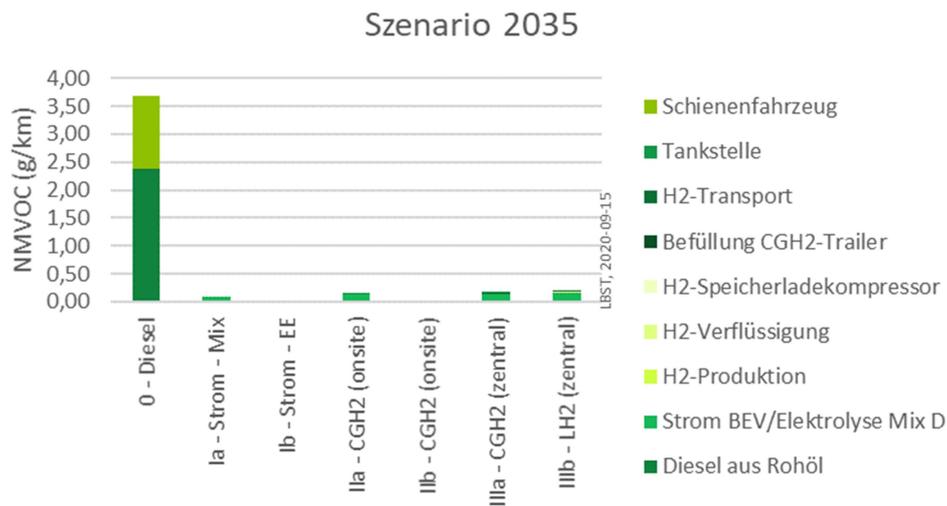


Abbildung 71 NMVOC-Emissionen WtW für Szenario 2035

Bezogen auf WtW haben die NMVOC-Emissionen aller Pfade im Vergleich zur Dieselreferenz keine Bedeutung, da die Rohölbereitstellung und das Fahrzeug dominieren. Aufgrund des steigenden Anteils erneuerbarer Energien in der Stromerzeugung sinken die NMVOC-Emissionen aller Pfade, die Strom aus dem Strommix Deutschland beinhalten.

Abbildung 72 und Abbildung 73 zeigen die Emission von Stickoxiden (NO<sub>x</sub>) „Well-to-Wheel“ (WtW) für die Szenarien 2025 und 2035.

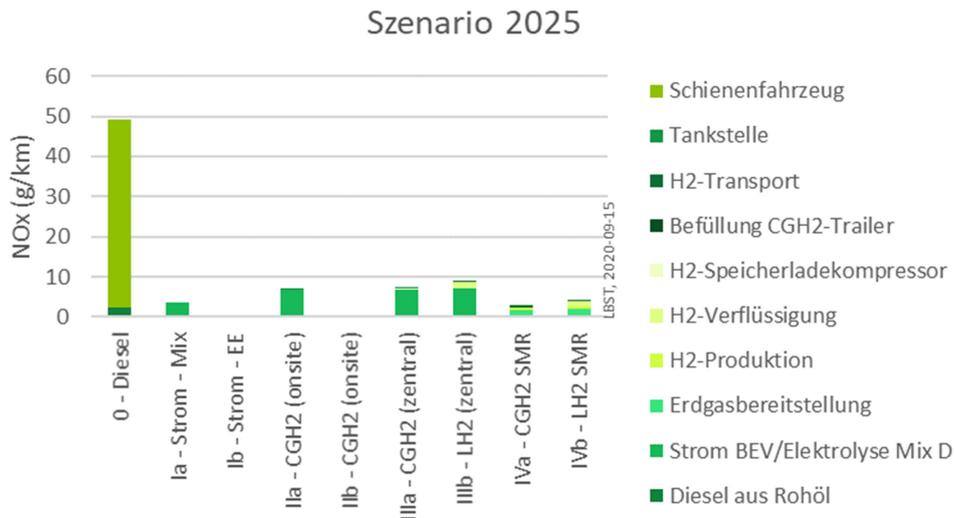


Abbildung 72 NO<sub>x</sub>-Emissionen WtW für Szenario 2025

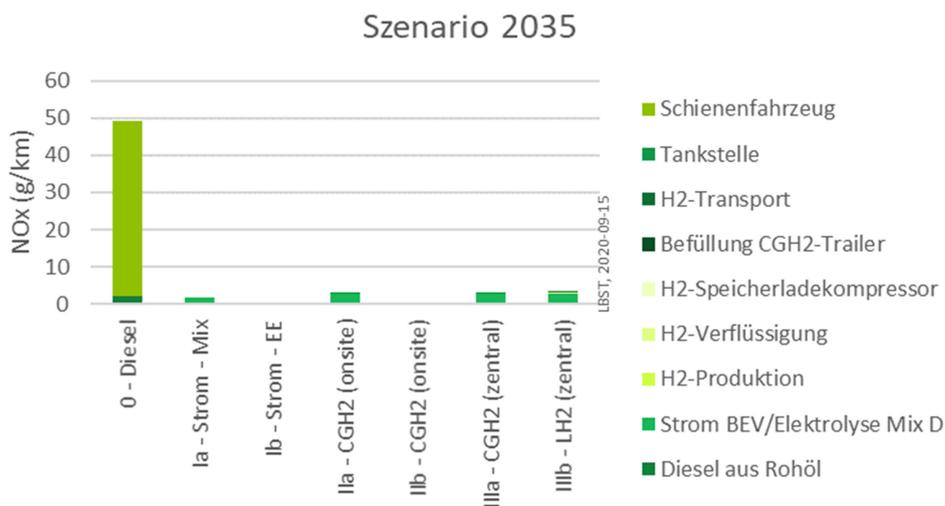


Abbildung 73 NO<sub>x</sub>-Emissionen WtW für Szenario 2035

Bezogen auf WtW haben die NO<sub>x</sub>-Emissionen aller Pfade im Vergleich zur Dieselferenz keine Bedeutung, da das Fahrzeug dominiert. Aufgrund des steigenden Anteils erneuerbarer Energien in der Stromerzeugung sinken die NO<sub>x</sub>-Emissionen aller Pfade, die Strom aus dem Strommix Deutschland beinhalten.

Abbildung 74 und Abbildung 75 zeigen die Emission von Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>) „Well-to-Wheel“ (WtW) für die Szenarien 2025 und 2035.

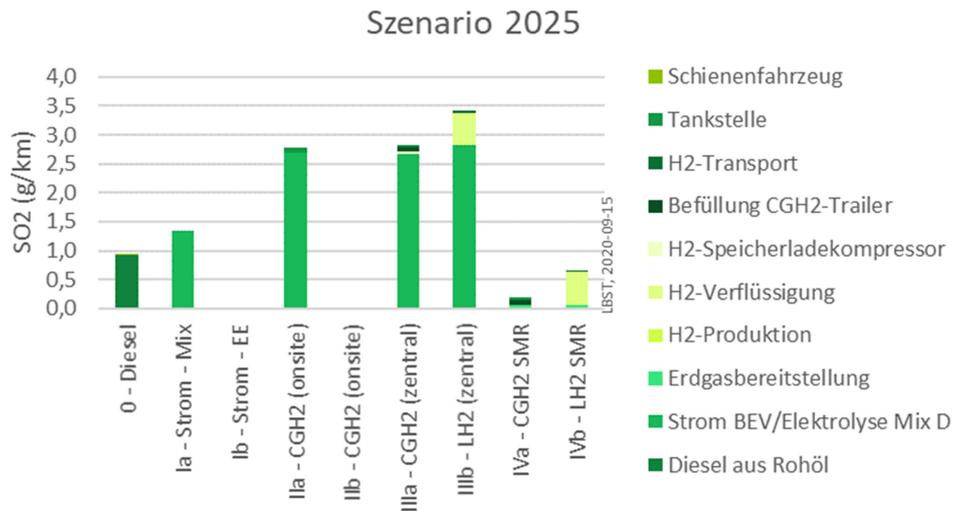


Abbildung 74 SO<sub>2</sub>-Emissionen WtW für Szenario 2025

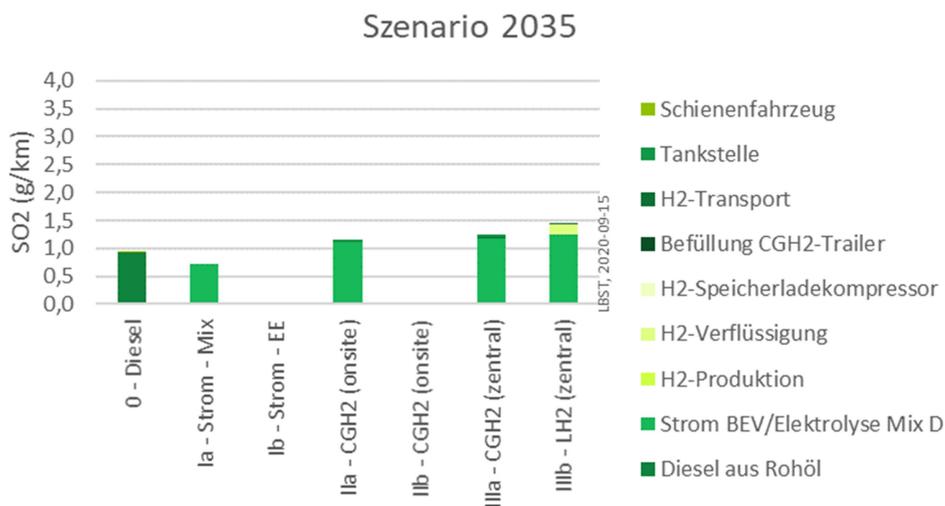


Abbildung 75 SO<sub>2</sub>-Emissionen WtW für Szenario 2035

Im Hinblick auf die WtW-Ergebnisse haben die Pfade IIa, IIIa, und IIIb höhere SO<sub>2</sub>-Emissionen als die Dieselreferenz, Ia) etwas niedrigere SO<sub>2</sub>-Emissionen für den Zeithorizont 2035. Eine große Unsicherheit gibt es jedoch bei den SO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Rohölförderung, da diese wie auch die anderen Schadstoffemissionen in [Exergia et al. 2015] nicht angegeben wurden. Die Emissionen von NMVOC, NO<sub>x</sub> und CO wurden aus [ETSU 1996] abgeleitet aus dem Verhältnis der Emission des jeweiligen Schadstoffs zur Emission von CO<sub>2</sub>. Die Emission von Partikel wurde in [ETSU 1996] ebenfalls nicht angegeben und die SO<sub>2</sub>-Emissionen mit null angegeben.

Abbildung 76 und Abbildung 77 zeigen die Emission von Kohlenmonoxid (CO) „Well-to-Wheel“ (WtW) für die Szenarien 2025 und 2035.

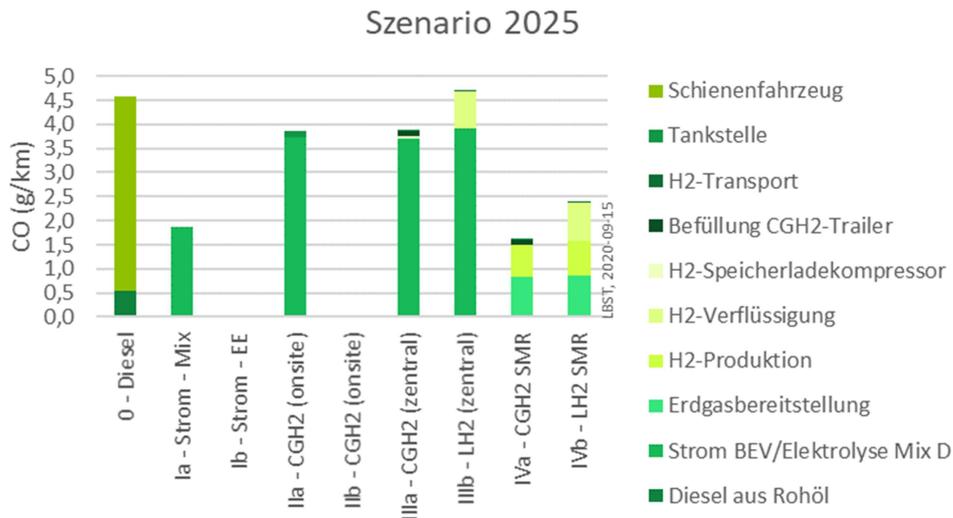


Abbildung 76 CO-Emissionen WtW für Szenario 2025

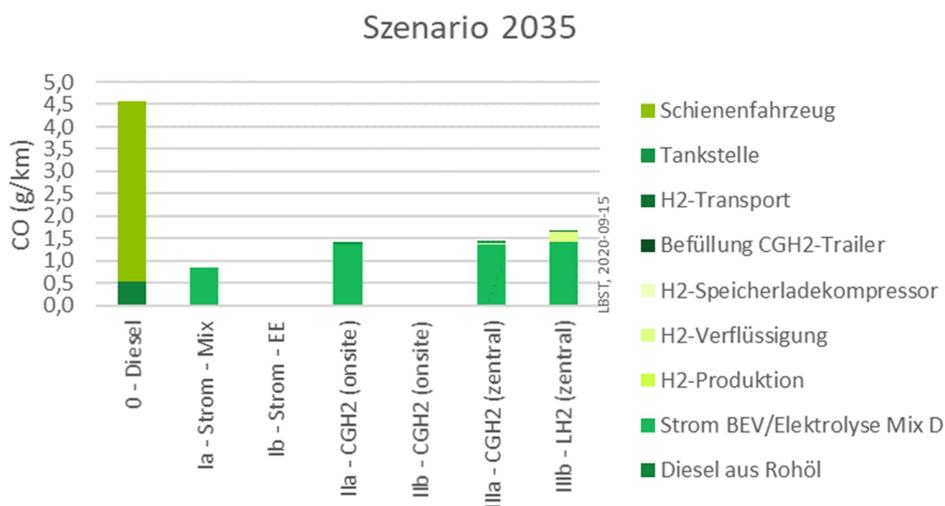


Abbildung 77 CO-Emissionen WtW für Szenario 2035

Mit Blick auf die WtW-Analyse sind die CO-Emissionen in 2025 für IIIb geringfügig höher als Dieselantrieb, entstehen aber nicht am Ort des Kraftstoffeinsatzes. In 2035 sind sie dann auch bei Pfad IIb in Summe geringer als beim Dieselpfad.

Abbildung 78 und Abbildung 79 zeigen die Emission von Staub und Partikeln inklusive des Abriebs aus Rädern, Schienen und Bremsen „Well-to-Wheel“ (WtW) für die Szenarien 2025 und 2035.

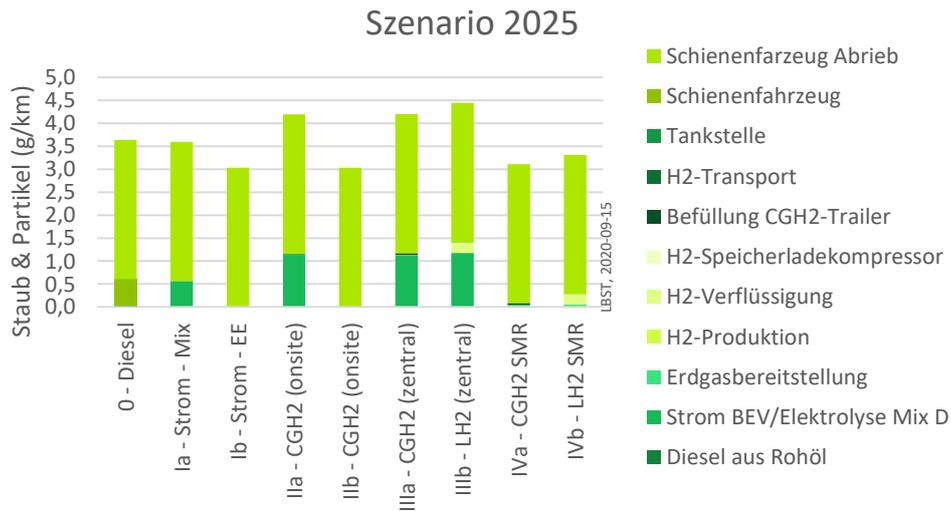


Abbildung 78 Emissionen von Staub und Partikeln WtW für Szenario 2025

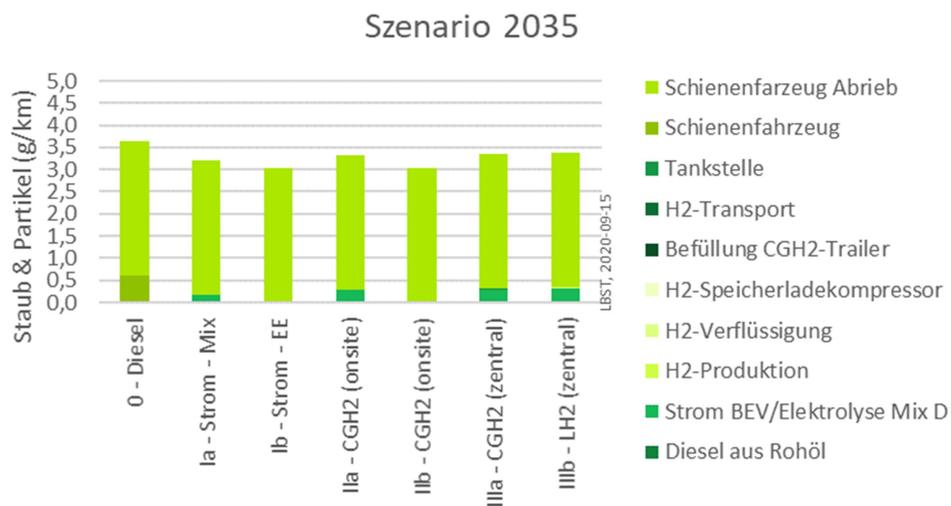


Abbildung 79 Emissionen von Staub und Partikeln WtW für Szenario 2035

Die Partikelemissionen aus dem Fahrbetrieb des Schienenpersonennahverkehrs (SPNV) stellen alle Vorkettenemissionen sowohl für 2025 als auch für 2035 in den Schatten, nahezu unabhängig vom Antrieb. Eine Reduktion der Partikelemissionen aufgrund Bremsenergie-rückgewinnung ist wahrscheinlich, wurde jedoch nicht berücksichtigt.

### 5.2.4 Klimagasemissionen

Die Berechnung von Treibhausgasemissionen erfolgt auf Basis von JRC/EUCAR/ CONCAWE [JEC 2014] und der EU-Richtlinie für Erneuerbare Energien [EU-RED 2018]. Der Energieaufwand und die damit verbundenen Treibhausgasemissionen aus der Herstellung von Energieerzeugungsanlagen, Strom- und Gasnetzen, Anlagen zu Kraftstoffproduktion sowie Fahrzeugen („grauen Emissionen“) werden dementsprechend in dieser Studie nicht betrachtet.

Die Treibhausgaswirkung der verschiedenen Treibhausgase wird durch Wirkungsfaktoren berücksichtigt. Tabelle 36 zeigt die Treibhausgas-Wirkungsfaktoren nach dem Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 4<sup>th</sup> Assessment Report (AR4) [IPCC 2007] und dem IPCC 5<sup>th</sup> Assessment Report (AR5) [IPCC 2013, Table 8.A.1] zum Vergleich.

**Tabelle 36 Treibhausgas-Wirkungsfaktoren ausgewählter Treibhausgase nach IPCC**

Treibhausgas	AR4 (g CO <sub>2</sub> -Äquivalent/g)	AR5 (g CO <sub>2</sub> -Äquivalent/g)
CO <sub>2</sub>	1	1
CH <sub>4</sub>	25	30
N <sub>2</sub> O	298	265

Für die THG-Wirkungsfaktoren wird analog zu RED II noch der IPCC 4<sup>th</sup> Assessment Report (AR4) [IPCC 2007] zugrunde gelegt.

### Antriebstechnologien (TtW)

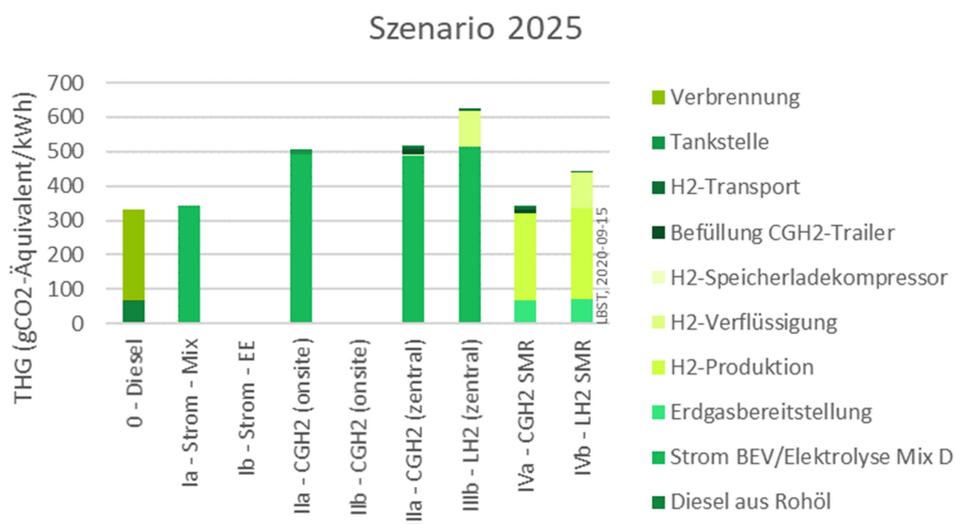
Als Referenz wird ein Dieseltriebzug heutiger Bauart angenommen. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Dieseltriebzugs ergeben sich aus dem CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor aus der Verbrennung des Dieselmotors (263,69 g/kWh bzw. 73,2 g/MJ) multipliziert mit dem Kraftstoffverbrauch in

Tabelle 34 und Tabelle 35 (15,48 kWh/km oder 55,7 MJ/km bzw. 12,28 kWh/km oder 44,2 MJ/km). Daraus ergeben sich für den Diesel-Triebzug CO<sub>2</sub>-Emissionen von 4.081 g/km bzw. 3.238 g/km.

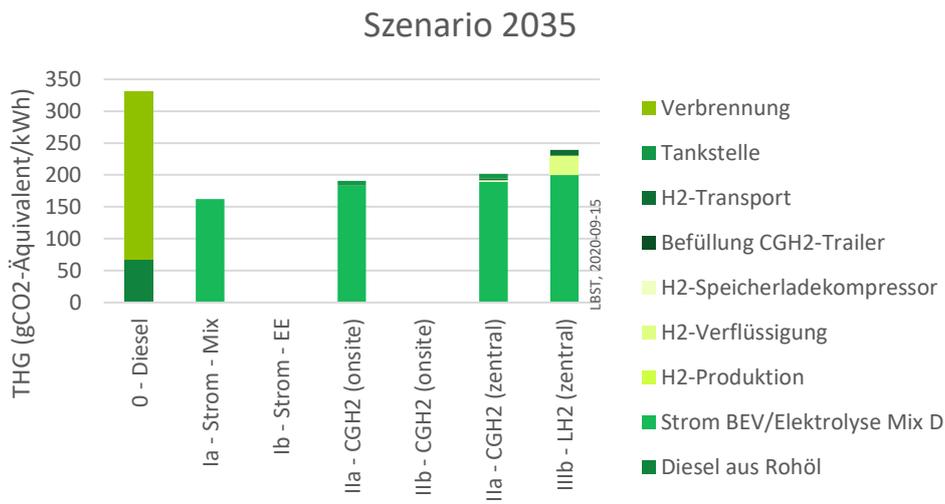
Der batterie-elektrischen Triebzug (BEMU) und der Triebzug mit Brennstoffzellen (HEMU) ist frei von jeglichen Treibhausgasemissionen.

### Vorketten der Energiebereitstellung (WtSt)

Abbildung 80 und Abbildung 81 zeigen die Treibhausgasemissionen für die Bereitstellung (WtSt) und Nutzung (Verbrennung des Kraftstoffs) für Szenario 2025 und 2035.



**Abbildung 80 Treibhausgasemissionen aus der Bereitstellung (WtSt) und Nutzung (Verbrennung) für Szenario 2025**



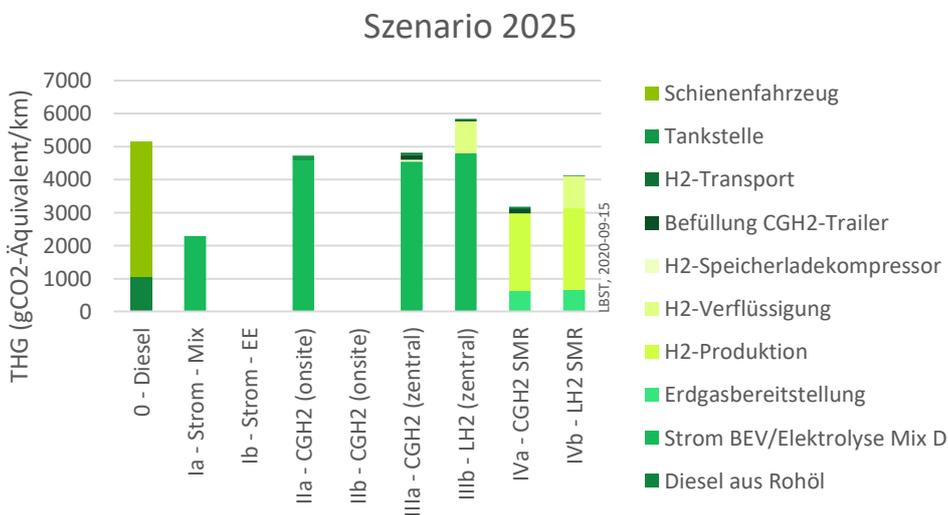
**Abbildung 81 Treibhausgasemissionen aus der Bereitstellung (WtSt) und Nutzung (Verbrennung) für Szenario 2035**

Durch die Nutzung erneuerbarer Energien in der Stromerzeugung und Effizienzsteigerungen (Elektrolyse, H<sub>2</sub>-Verflüssigung) sind alle Alternativen in 2035 besser als die Dieselreferenz.

### Klimagasemissionen für vollständige Versorgungskette (WtW)

#### Fahrstrecke Leipzig – Grimma – Döbeln, Einfachtraktion

Abbildung 82 und Abbildung 83 zeigen die Treibhausgasemissionen „Well-to-Wheel“ (WtW) für Szenario 2025 und 2035.



**Abbildung 82 Treibhausgasemissionen WtW für Szenario 2025 (Leipzig–Grimma–Döbeln)**

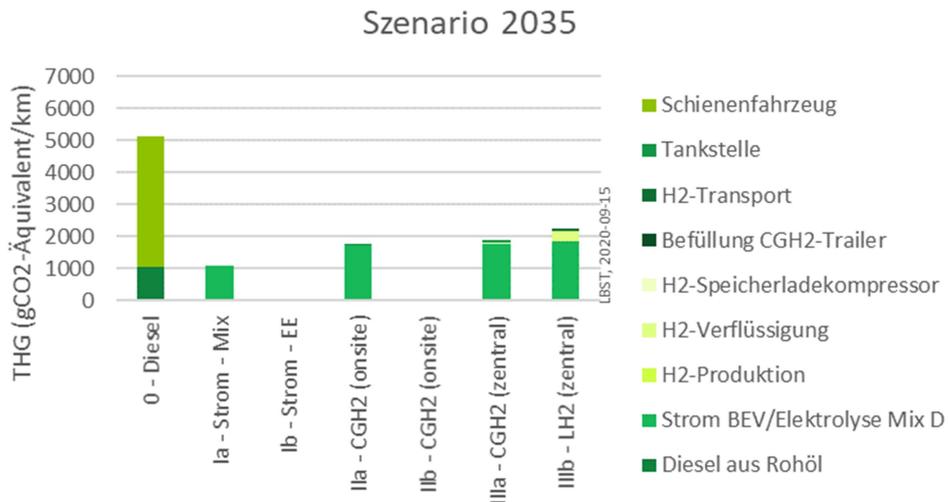


Abbildung 83 Treibhausgasemissionen WtW für Szenario 2035 (Leipzig–Grimma–Döbeln)

Der hohe THG-Emissionsunterschied zwischen BEMU und HEMU schrumpft von Faktor 2,5 in 2025 bis 2035 auf Faktor 2. Die Bereitstellung von Wasserstoff aus Erdgasdampfpreformierung führt nur zu einem geringen THG-Vorteil in 2025. Aufgrund des steigenden Anteils erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung in Deutschland sinken die Treibhausgasemissionen für die Alternativen erheblich.

### Fahrstrecke Leipzig – Gera, Einfachtraktion

Abbildung 84 und Abbildung 85 zeigen die Treibhausgasemissionen „Well-to-Wheel“ (WtW) für Szenario 2025 und 2035.

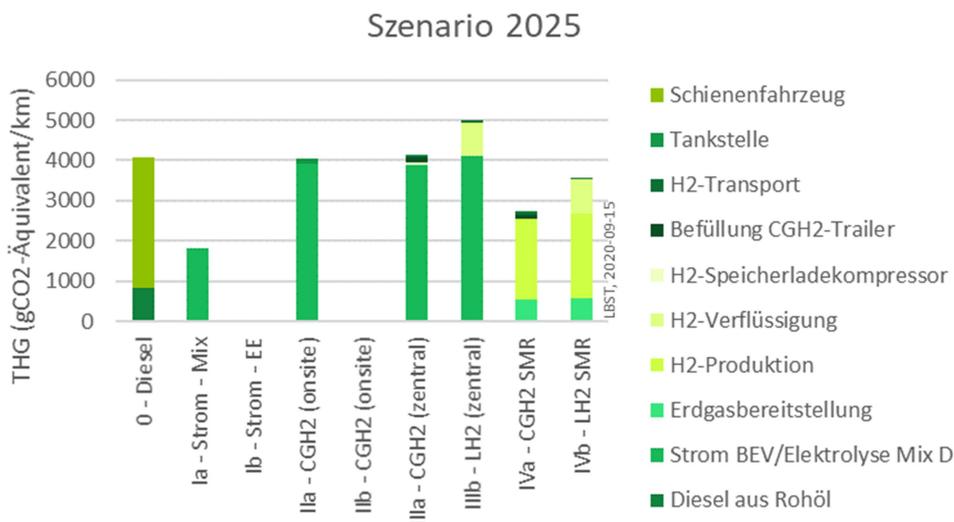
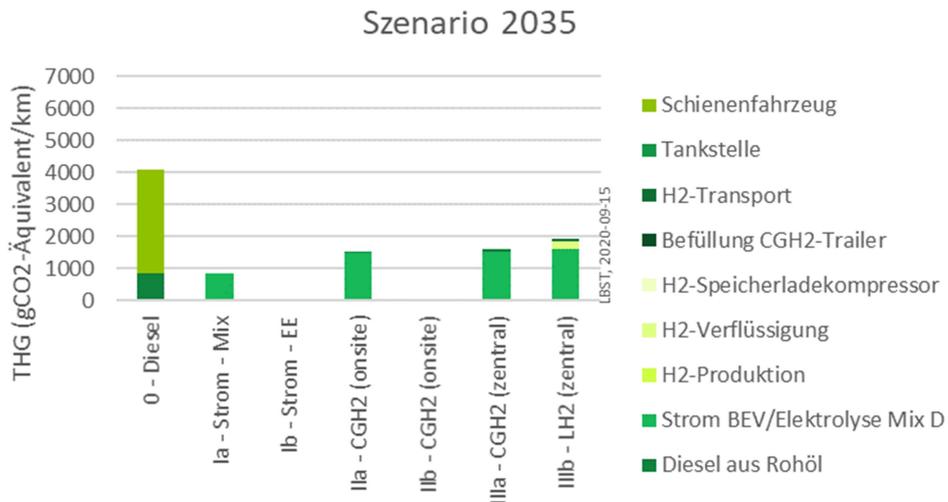


Abbildung 84 Treibhausgasemissionen WtW für Szenario 2035 (Leipzig-Gera)



**Abbildung 85 Treibhausgasemissionen WtW für Szenario 2035 (Leipzig–Gera)**

Die Treibhausgasemissionen sind für die Strecke Leipzig - Gera geringfügig niedriger als für die Strecke Leipzig – Grimma – Döbeln, das Verhältnis der Pfade zueinander ändert sich jedoch kaum. 2025 weist der HEMU für Pfad IIIa geringfügig höhere Treibhausgasemissionen aus als der Diesel-Triebzug. Bei der Strecke Leipzig – Grimma – Döbeln weist der HEMU hingegen für Pfad IIIa geringfügig niedrigere Treibhausgasemissionen aus als der Diesel-Triebzug.

### 5.2.5 Zusammenfassung Emissionen

Tabelle 37 und Tabelle 38 zeigen eine Zusammenfassung der Emissionen „Well-to-Wheel“ für den Zeithorizont 2025 für zwei verschiedene Strecken.

**Tabelle 37 Emissionen WtW Leipzig – Grimma – Döbeln (Einfachtraktion) 2025**

	0 - Diesel	Ia - Strom - Mix	Ib - Strom - EE	IIa - CGH <sub>2</sub> (onsite) Mix	IIb - CGH <sub>2</sub> (onsite) EE	IIIa - CGH <sub>2</sub> (zentral)	IIIb - LH <sub>2</sub> (zentral)	IVa - CGH <sub>2</sub> SMR	IVb - LH <sub>2</sub> SMR
THG	5.131	2.294	0	4.725	1	4.820	5.841	3.185	4.128
NMVOc	3,69	0,17	0,00	0,36	0,01	0,41	0,47	0,36	0,40
NO <sub>x</sub>	49,12	3,48	0,00	7,18	0,01	7,30	8,82	2,76	4,08
SO <sub>2</sub>	0,95	1,35	0,00	2,78	0,01	2,83	3,41	0,13	0,59
CO	4,58	1,87	0,00	3,85	0,00	3,89	4,71	1,62	2,37
Staub & Partikel ohne Abrieb	0,60	0,56	0,00	1,16	0,00	1,17	1,41	0,06	0,26
Staub & Partikel - Abrieb	3,03	3,03	3,03	3,03	3,03	3,03	3,03	3,03	3,03

**Tabelle 38 Emissionen WtW Leipzig – Gera (Einfachtraktion) 2025**

	0 - Diesel	Ia - Strom - Mix	Ib - Strom - EE	Ila - CGH <sub>2</sub> (onsite) Mix	Ilb - CGH <sub>2</sub> (onsite) EE	Illa - CGH <sub>2</sub> (zentral)	IIIb - LH <sub>2</sub> (zentral)	IVa - CGH <sub>2</sub> SMR	IVb - LH <sub>2</sub> SMR
THG	4.072	1.815	0	4.050	1	4.131	5.007	2.730	3.539
NMVOG	2,93	0,14	0,00	0,31	0,01	0,35	0,40	0,31	0,34
NO <sub>x</sub>	38,98	2,75	0,00	6,15	0,01	6,26	7,56	2,36	3,49
SO <sub>2</sub>	0,75	1,07	0,00	2,38	0,00	2,43	2,93	0,11	0,50
CO	3,64	1,48	0,00	3,30	0,00	3,33	4,03	1,39	2,03
Staub & Partikel ohne Abrieb	0,48	0,45	0,00	0,99	0,00	1,00	1,21	0,05	0,22
Staub & Partikel - Abrieb	3,03	3,03	3,03	3,03	3,03	3,03	3,03	3,03	3,03

Tabelle 39 und Tabelle 40 zeigen eine Zusammenfassung der Emissionen „Well-to-Wheel“ für den Zeithorizont 2035 für zwei verschiedene Strecken.

**Tabelle 39 Emissionen WtW Leipzig – Grimma – Döbeln (Einfachtraktion) 2035**

	0 - Diesel	Ia - Strom - Mix	Ib - Strom - EE	Ila - CGH <sub>2</sub> (onsite) Mix	Ilb - CGH <sub>2</sub> (onsite) EE	Illa - CGH <sub>2</sub> (zentral)	IIIb - LH <sub>2</sub> (zentral)
THG	5.131	1.086	0	1.777	1	1.881	2.233
NMVOG	3,69	0,09	0,00	0,15	0,01	0,16	0,21
NO <sub>x</sub>	49,12	1,68	0,00	2,82	0,01	2,92	3,41
SO <sub>2</sub>	0,95	0,72	0,00	1,16	0,00	1,26	1,46
CO	4,58	0,84	0,00	1,42	0,00	1,45	1,67
Staub & Partikel ohne Abrieb	0,60	0,18	0,00	0,30	0,00	0,31	0,36
Staub & Partikel – Abrieb	3,03	3,03	3,03	3,03	3,03	3,03	3,03

**Tabelle 40 Emissionen WtW Leipzig – Gera (Einfachtraktion) 2035**

	0 - Diesel	Ia - Strom - Mix	Ib - Strom - EE	Ila - CGH <sub>2</sub> (onsite) Mix	Ilb - CGH <sub>2</sub> (onsite) EE	Illa - CGH <sub>2</sub> (zentral)	IIIb - LH <sub>2</sub> (zentral)
THG	4.072	859	0	1.523	1	1.613	1.914
NMVOG	2,93	0,07	0,00	0,13	0,01	0,14	0,18
NO <sub>x</sub>	38,98	1,33	0,00	2,42	0,01	2,51	2,92
SO <sub>2</sub>	0,75	0,57	0,00	0,99	0,00	1,08	1,25
CO	3,64	0,66	0,00	1,22	0,00	1,24	1,43
Staub & Partikel ohne Abrieb	0,48	0,14	0,00	0,26	0,00	0,27	0,31
Staub & Partikel – Abrieb	3,03	3,03	3,03	3,03	3,03	3,03	3,03

Die Emissionen sind für die Strecke Leipzig - Gera geringfügig niedriger als für die Strecke Leipzig – Grimma – Döbeln, das Verhältnis der Pfade zueinander ändert sich jedoch kaum. Bei den Treibhausgasemissionen fällt der Vorteil der HEMU gegenüber Diesel für die Strecke Leipzig - Gera in 2035 niedriger aus als für die Strecke Leipzig – Grimma – Döbeln. Der Vorteil der BEMU gegenüber Diesel fällt bei beiden Strecken in etwa gleich aus.

## 5.3 LÄRMEMISSIONEN

### 5.3.1 Grundlegendes

Im vorliegenden Dokument wird der Vergleich zwischen Triebzügen mit konventionellem Dieselantrieb und mit alternativen Antrieben in Bezug auf die Schallemissionen unter Berücksichtigung der folgenden anerkannten Regeln der Technik aufgezeigt. Dieses Kapitel wurde durch den TÜV-SÜD Rail eigenverantwortlich und ohne Einfluss Dritter erstellt.

#### Verwendete Literatur

Für die Erarbeitung der Ergebnisse in dieser Studie wurde die Literatur aus Tabelle 41 verwendet.

Tabelle 41 Verwendete Literatur

Nr.	Schrift	Titel
[R01]	TSI NOI	Verordnung (EU) Nr. 1304/2014 der Kommission, vom 26. November 2014 über die technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Fahrzeuge - Lärm“
[R02]	VDV 1541	VDV-Mitteilung 1541 Geräusche von Eisenbahnfahrzeugen in der Fahrzeugabstellung

#### Abkürzungen

In der Diskussion und Darstellung der Ergebnisse wurden die in Tabelle 42 gezeigten Abkürzungen verwendet.

Tabelle 42 Abkürzungen

Abkürzung	Definition
BEMU	Battery Electric Multiple Unit
dB	Dezibel
HEMU	Hydrogen Electric Multiple Unit

### 5.3.2 Dokumente

Es wurden die zur Verfügung stehenden Unterlagen zur akustischen Fahrzeugabnahme mehrerer Fahrzeuge ausgewertet. Aus Gründen der Geheimhaltungsverpflichtungen des TÜV SÜD Rail sind die vorliegenden Messwerte der unterschiedlichen Fahrzeugtypen anonymisiert und zudem gemittelt worden.

Es lagen die Werte von insgesamt 6 dieselgetriebenen Fahrzeugen und 2 alternativ angetriebenen Fahrzeugen vor.

### 5.3.3 Gegenstand der Betrachtung

#### Beschreibung

Die Daten der verschiedenen Fahrzeuge der Antriebsvarianten Diesel, Batterie (BEMU) und Brennstoffzelle/Wasserstoff (HEMU) entstammen den akustischen Abnahmen nach TSI NOI [R01], welche den Autoren vorliegen. Die Daten werden unter „Diesel“ und „Alternativ“ (BEMU/HEMU) zusammengefasst sowie gemittelt.

Die Betriebszustände sind:

- Stillstand
- Anfahrt
- Vorbeifahrt
- Innengeräusch Fahrerstand (siehe Ergänzende Betrachtung)

**Ergänzende Betrachtung:**

Die nur den Autoren vorliegenden Daten beinhalten niedrige Werte der Triebzüge mit alternativen Antrieben im Stillstand. Diese Werte werden ergänzend mit dem Grenzwert der VDV 1541 [R02] für Abstellung verglichen.

**5.3.4 Datenvergleich**

**Allgemeine Methodik**

Die zur Verfügung stehenden Daten wurden je Betriebszustand gemittelt und sind nachfolgend tabellarische aufgezeigt und zur Verdeutlichung in einem Diagramm erfasst.

Bei der Betrachtung der gemessenen Parameter wird deutlich, dass auch im Stand die schallerzeugenden Komponenten von alternativen Antrieben, wie z.B. zusätzliche Lüfter der Brennstoffzellenanlage, in den Messungen erfasst wurden. Das betrifft auch die Kompressoren der Druckluftherzeugung. Die datenspezifische Gegenüberstellung berücksichtigt somit das gesamte relevante Schallspektrum der Fahrzeuge.

Die Grenzwerte der TSI NOI und der VDV1541 lassen zudem eine höhere Lärmemission von Dieseltriebzügen im Vergleich zu Elektrotriebzügen/alternativen Antrieben zu. Die gemittelten Lärmemissionsdaten sind in Tabelle 43 aufgeführt.

**Tabelle 43 Gemittelte Lärmemissionswerte Dieseltriebzug [dB]**

Bewegungszustand	Wert [dB]
Stillstand	67
Anfahrt	82
Vorbeifahrt	80
Fahrerstand	70

Die Grenzwerte gemäß TSI NOI sind für den Dieseltriebzug:

- Stillstand – 72 dB
- Anfahrt – 82 dB
- Vorbeifahrt – 81 dB
- Fahrerstand – 78 dB

Die gemittelten Lärmemissionen alternativer Antriebe sind in Tabelle 44 dargestellt.

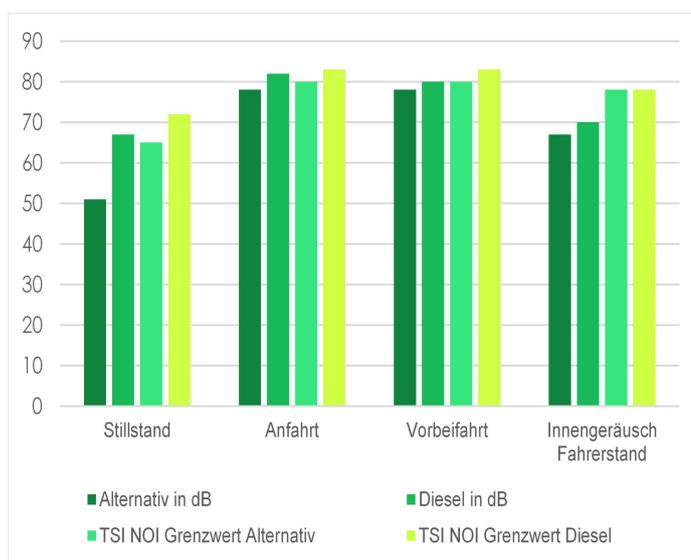
**Tabelle 44 Gemittelte Lärmemissionswerte für alternative Antriebe [dB]**

Bewegungszustand	Wert [dB]
Stillstand	51
Anfahrt	78
Vorbeifahrt	78
Fahrerstand	67

Die Grenzwerte gemäß TSI NOI betragen für den alternativ angetriebenen Zug:

- Stillstand: – 65 dB
- Anfahrt: – 80 dB
- Vorbeifahrt: – 80 dB
- Fahrerstand: – 78 dB

Die oben aufgeführten Werte sind in Abbildung 86 grafisch dargestellt.



**Abbildung 86 Lärmemissionen unterschiedlich angetriebener Triebwagen nach Bewegungszustand [dB]**

**Ergänzende Betrachtung:**

Da die Stillstandswerte der alternativ angetriebenen Züge im Mittel mit 51 dB sehr niedrig sind, werden diese mit dem Wert für Abstellung nach VDV 1541 verglichen.

Dabei wird deutlich, dass die alternative Antriebstechnik eine besonders niedrige Lärmemission in der Abstellung aufweist (siehe Abbildung 87).

- gemittelter Wert Stillstand: – 51 dB
- Grenzwert Abstellung nach VDV 1541: – 52 dB

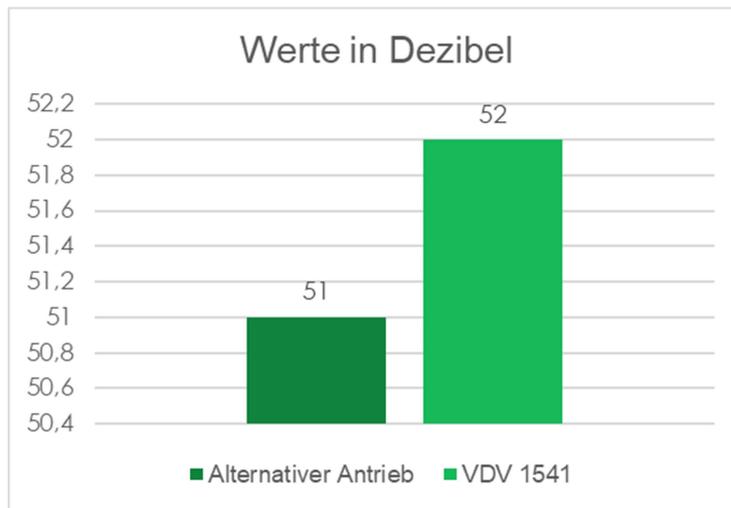


Abbildung 87 Lärmemission und Grenzwert alternativer Antriebe [dB]

### Bewertung der Ergebnisse

Alle vorliegenden Werte liegen innerhalb der ausgehend von den Regularien fixierten spezifischen Grenzwerte. Die Werte der alternativen Antriebe liegen hierbei vollumfänglich unterhalb der Werte der Dieselantriebe.

Die Lärmemission der alternativen Antriebe für den Fahrzeugstillstand liegt dabei noch unter dem Grenzwert eines abgestellten Fahrzeugs nach VDV 1541. Diese Fahrzeuge sind also bereits in Bahnhöfen während des Fahrgastwechsel leiser, als sie bei der Fahrzeugabstellung laut Regulatorik sein müssen.

Die Betriebszustände Stillstand und Anfahrt treffen für die Bahnhofsbereiche zu. Hier sind Personen in besonderem Maße den Lärmemissionen ausgesetzt, schon bedingt durch die räumliche Nähe zum Fahrzeug.

Die alternative Antriebstechnik kann hier durch die geringeren Lärmemissionen klare Vorteile gegenüber den dieselgetriebenen Fahrzeugen bieten.

### 5.3.5 Zusammenfassung

In Zeiten der wachsenden Sensibilität der Bevölkerung, insbesondere zu Lärmentwicklung in der Mobilität, kann eine Lärmreduzierung einen deutlichen Beitrag zur Akzeptanz des Schienenverkehrs bzw. des Fahrzeugeinsatzes leisten.

Unabhängig vom Schadstoffausstoß eines Dieseltriebzugs, welcher bei Fahrgastwechsel und bei Anfahrt besonders auf umstehende Personen einwirkt, wird die Lärmreduzierung von alternativen Antrieben positive Auswirkungen haben.

Lärmemissionsmessdaten für BEMU sind noch nicht in aussagefähiger Quantität vorhanden. Dennoch werden die Ergebnisse für BEMU & HEMU voraussichtlich als nahe beieinander liegend eingeschätzt, obwohl sie nicht völlig gleich sein werden (Schwankungen ca. +/-2 dB, mit Einfluss der Messumgebung).

Hinsichtlich des Themas Dekarbonisierung der Mobilität können alternative Antriebstechniken ein sinnvolles oberleitungsunabhängiges Substitut für Dieselantriebe darstellen und hierbei den Kostenfaktor einer Neuelektrifizierung von Strecken mittels Oberleitungen in einer Systembetrachtung entfallen lassen.

## 5.4 REGIONALE ASPEKTE

### 5.4.1 Einführung

Regionale Besonderheiten und Rückkopplungen durch die angestrebte ganzheitliche Energiewende Deutschlands haben eine hohe Bedeutung für die Lebensqualität und nachhaltigen Wohlstand. Regionale Strategien können bzw. sollen auch komplementär zur globalen Energiestrategien eingesetzt werden. Die Einführung des neuen Triebzugkonzeptes soll sich unter anderem auch an den übergeordneten Zielen der Energiewende im Verkehr orientieren. Der Verkehrssektor in Deutschland soll im Jahr 2050 weitgehend treibhausgasemissionsfrei werden (Koalitionsvertrag der Bundesregierung März 2018). Vor dem Hintergrund der langen Nutzungsdauer der Züge ergibt sich daher die Erfordernis vorausschauender Planung, die unter der Einbeziehung der THG-Minderungsziele erfolgt.

In dieser Teilaufgabe werden die Besonderheiten der Bedienung der Strecken Leipzig – Grimma – Döbeln (Kursbuchstrecke (KBS) 506) sowie die Strecke Leipzig – Zeitz – Gera (KBS 550) (siehe Abbildung 88) mit alternativen Antriebstechnologien ermittelt. Im Vordergrund steht hierbei der mögliche Einfluss individueller örtlicher Gegebenheiten (Transportentfernung, genutzte Infrastrukturen und Energiequellen, geplanter Infrastrukturausbau, Taktfrequenz, etc.) auf die Ökobilanz in Bezug auf die spezifischen Treibhausgasemissionen sowie Lärmemissionen. Diese Besonderheiten werden hier mit der bundesweiten Energiewende abgeglichen.

### 5.4.2 Charakterisierung der Strecken 2020

Die betrachteten Strecken KBS 506 sowie die Strecke KBS 550 liegen im Planungsgebiet des Zweckverbandes für den Nahverkehrsraum Leipzig (ZVNL) in der Europäischen Metropolregion Mitteldeutschland (siehe Abbildung 88).

Die aktuell mit Dieselfahrzeugen bedienten Strecken sollen im Zuge der Klimaschutzziele auf einen fossilfreien Betrieb ausgerichtet werden. Die Strecke KBS 506 ist als prioritär zu betrachten, da sie ab 12/2025 in den City-Tunnel Leipzig eingebunden werden soll. Eine Fortsetzung des Dieselbetriebs ist insbesondere aus brandschutztechnischen Gründen auszuschließen. Eine Neubestellung von Verkehrsleistungen in Dieseltraktion dient darüber hinaus nicht der Verkehrswende, weder global noch regional.

2014 betrug die Verkehrsleistung des SPNV im ZVNL 533 pkm/Jahr\*EW. Bei einem Durchschnittswert von 362 pkm/Jahr\*EW im Freistaat Sachsen verfügt der ZVNL damit über einen Spitzenwert bei der SPNV-Nachfrage. Für 2025 ist mit einem deutlichen Bevölkerungsanstieg von über 11% im Nahverkehrsraum Leipzig zu rechnen. Auch strukturelle Entwicklungen wie beispielsweise die Entstehung von Arbeitsplätzen in regionalen Bevölkerungsklustern sind zu erwarten. In diesem Zusammenhang sind steigende Auspendlerzahlen aus Leipzig möglich, was einen Einfluss auch auf die Taktung der betrachteten Strecken haben könnte.

Die tägliche Fahrleistung aller Züge auf den betroffenen Strecken beträgt ca. 12.000 km. Die spezifischen Fahrzeugenergiebedarfe der betrachteten Strecken liegen aktuell bei 1,55 l Diesel pro km (Strecke Leipzig – Grimma – Döbeln,

Tabelle 34), was etwas über dem Vergleichswert 1,36 l Diesel pro km [LBST et al. 2016] liegt und 1,23 l Diesel pro km (Strecke Leipzig – Gera, Tabelle 35). Eine hohe Taktfrequenz resultiert in hohen Beschleunigungsanforderungen der Triebzüge. Der Verbrauch hängt stark

vom Abstand der Haltestellen und damit der Anzahl an Beschleunigungsvorgängen, der Geschwindigkeit sowie den Geländeprofilen (Steigungen) ab.

Der erwartete Bevölkerungszuwachs im Raum Leipzig kann zur Steigung bei der SPNV-Nachfrage führen, was ggf. zu einer höheren Taktung führen kann. Dies kann den spezifischen Fahrzeugbedarf und dementsprechend die THG- und Schadstoffemissionen zusätzlich erhöhen. Die Verbrennung von auf Rohöl basierendem Diesel in Fahrzeugen (Tank-to-Wheel) ist mit Treibhausgasemissionen in Höhe von 73,2 g CO<sub>2</sub> je MJ<sub>Diesel</sub> verbunden (Tabelle 30).

Züge, die beide anvisierte Strecken bedienen, werden heute am Bahnhofsvorfeld in unmittelbarer Nähe zum Hauptbahnhof Leipzig an einer Tankstelle der DB Energie mit Diesel betankt.

Der Elektrifizierungsgrad der betrachteten Strecken mit 32,3% bzw. 15,9% liegt unter dem Durchschnitt im Netz der Deutschen Bahn (60%). Demgegenüber weisen die deutschen Diesellinien im Mittel einen Elektrifizierungsgrad von 23% auf. Die KBS 506 liegt 40% über und die Strecke 550 31% unter diesem Wert.

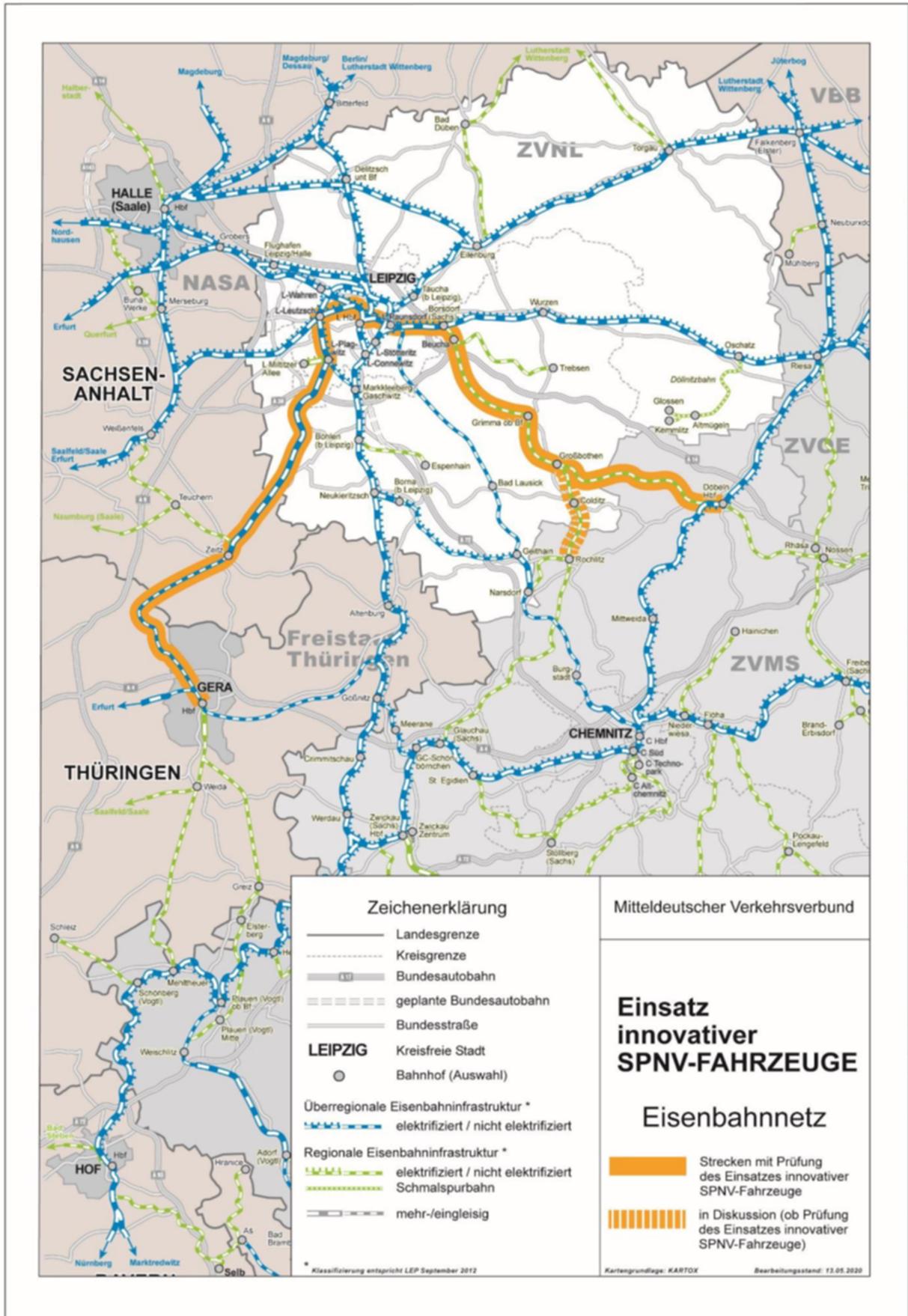


Abbildung 88 Streckenverlauf [Quelle: Funktionale Leistungsbeschreibung Anlage G, S. 2]

### 5.4.3 Charakterisierung der Strecken 2025/2035

Der Betrieb der Züge wird auf den alternativen Antrieb umgestellt werden. Unabhängig vom Triebzugkonzept werden auf der einen Referenzstrecke (Leipzig – Grimma – Döbeln) zusammen täglich 9.841 km gefahren, auf der anderen Referenzstrecke (Leipzig - Gera) zusammen täglich 2.886 km.

Es ist festzuhalten, dass der batterie-elektrische Triebwagenzug (BEMU) und der Triebwagenzug mit Brennstoffzellen (HEMU) frei von jeglichen Schadstoffemissionen im Betrieb ist. Bei den HEMU entstehen lediglich Wasserdampfemissionen. Sie sind zwar höher als bei Diesel, dies ist aber im Vergleich zum natürlichen Regenaufkommen in der Region vernachlässigbar gering (siehe 0). Ebenso in Bezug auf die Lärmemissionen bietet die alternative Antriebstechnik, sowohl BEMU als auch HEMU, durch die geringeren Geräuschentwicklungen klare Vorteile gegenüber den dieselgetriebenen Fahrzeugen (siehe Kap. 5.3 ). Somit ist mit beiden Triebzug-Konzepten BEMU und HEMU eine lokale Emissionsvermeidung bzw. Reduktion in Fahrzeugbetrieb gewährleistet und wird sich positiv in der nachhaltigen Entwicklung der Region auswirken. Dieses Ergebnis gilt auch für andere Regionen und kann auf die anderen Strecken übertragen werden.

Sowohl der spezifische Wasserstoffverbrauch (8 bis 9,33 kWh/km) als auch der spezifische Stromverbrauch (5,30 - 6,70 kWh/km) hängen stark vom Abstand der Haltestellen und damit der Anzahl der Beschleunigungsvorgänge, der Geschwindigkeit sowie dem Geländeprofil (Steigungen) ab. Angesichts des zu erwarteten, steigenden Verkehrsaufkommens ist ein steigender Energiebedarf zu erwarten. Allerdings hat der alternative Verkehr prinzipiell geringen Einfluss auf die regionalen THG- und Schadstoffemissionen. Die lokalen Emissionen im Fahrzeugbetrieb werden dadurch nicht maßgeblich beeinflusst.

Jedoch können die Energiequellen (Strommix, Erdgas) sowie die vorhandenen und genutzten Infrastrukturen (Stromleitungen, Gaspipelines) einen deutlichen Einfluss sowohl auf die regionale Ökobilanz als auch auf die globalen Emissionen haben.

Die in Kapitel 5.2 analysierten Pfade werden nachfolgend aus der Perspektive der regionalen Ressourcenverfügbarkeit, Infrastrukturverfügbarkeit sowie Systemdienlichkeit betrachtet.

### 5.4.4 Regionale Energiequellen und Infrastrukturen

#### Dieselsbereitstellung 2020

Die Bereitstellung von Rohöl basierendem Diesel bis zur Dieseltankstelle (Well-to-Tank) ist mit Treibhausgasemissionen in Höhe von 18,9 g<sub>CO<sub>2</sub>-Äquivalent</sub> je MJ<sub>Diesel</sub> verbunden und wird von den örtlichen Gegebenheiten, wie beispielsweise die Entfernung zwischen der Raffinerie und der Tankstelle nicht maßgeblich beeinflusst. Die Verbrennung von Rohöl basierendem Diesel in Fahrzeugen (Tank-to-Wheel) ist mit Treibhausgasemissionen in Höhe von 73,2 g<sub>CO<sub>2</sub></sub> je MJ<sub>Diesel</sub> verbunden. Mit der Bereitstellung und Verbrennung von Dieselmotorkraftstoff (EU-Mix) werden in Summe entsprechend 92,1 g<sub>CO<sub>2</sub>-Äquivalent</sub> je MJ<sub>Diesel</sub> emittiert.

#### Strombereitstellung 2025/2035

Für die Erzeugung von Strom für batterie-elektrische Triebzüge (Pfad I) als auch die Wasserstoffproduktion mittels Elektrolyse und ggf. Verflüssigung (Pfade II und III) wurden die folgenden Varianten angenommen:

- Strommix Deutschland in 2025 (69%EE) und 2035 (84% EE ~ Bahnstrom 2030)
- Strom aus EE

Der Strom wird über das Hochspannungs- und Mittelspannungsnetz zu den Ladestationen transportiert.

Standortunabhängig gilt, dass der Einsatz alternativer Antriebstechnologien mit steigendem EE-Anteil im Strommix zunehmend klimaneutraler wird.

Anzumerken ist, dass das Land Sachsen aktuell einen ~75%-Anteil von Braunkohle an der Nettostromerzeugung aufweist. Mit dem lokalem Strommix Sachsens würden auf Grund des heute hohen Braunkohleanteils die lokal bilanzierten THG-Emissionen sehr hoch sein. Der EE-Ausbau muss daher vorangetrieben werden. Im Hinblick auf eine lokale Grünstromversorgung bieten insbesondere auslaufende EEG-geförderte Anlagen entlang der Streckenverläufe ein mögliches Potenzial. Es gilt daher zu eruieren, ob solche Anlagen als potenzielle Grünstromversorger des Bahnsystems zur Verfügung stehen und unter welchen Bedingungen. Sowohl globale als auch lokale Emissionen können durch den Direkt-Grünstrombezug reduziert werden. Ist eine lokale Grünstromversorgung nicht möglich, so ist ein 100% EE-Strombezug bilanziell durch „Grünstromtarife“ eine alternative Option, Treibhausgas- und Schadstoffemissionen zu senken, womit jedoch ein Teil der angestrebten lokalen Wertschöpfung ausfallen würde.

### **Wasserstoff aus Dampfreformierung 2025**

Die Bereitstellung von  $\text{CGH}_2$  und  $\text{LH}_2$  aus Dampfreformierung (SMR) wurde nur für den Zeithorizont 2025 betrachtet (Pfad IV). Erdgas wird aus Russland per Pipeline nach Deutschland transportiert (Raffineriestandort Leuna). Über 2025 hinaus wird dieser Pfad nicht mehr berücksichtigt, da sie ohne weitere Dekarbonisierungsmaßnahmen (CCS) nicht zur Erzielung der aktuellen Klimaziele beitragen können.

Eine Möglichkeit für die Emissionsreduktion stellt die Wasserstoffproduktion mittels SMR mit anschließender  $\text{CO}_2$ -Speicherung (Carbon Capture and Storage (CCS)) dar. Allerdings verfügen die CCS-Technologien für ihre Umsetzung über eine nicht ausreichende öffentliche Akzeptanz in Deutschland. Somit sind Anlagen mit CCS nur an Küstenstandorten oder Binnenstandorten mit kostengünstiger  $\text{CO}_2$ -Infrastruktur (z.B. entlang schiffbarer Binnengewässer) zum Abtransport und Deponie an Standorten außerhalb Deutschlands (z.B. Norwegen) denkbar. Für Sachsen wird dieser Pfad daher (SMR mit CCS) als nicht relevant eingestuft.

### **Wasserstoff mittels Elektrolyse 2025/2035**

Eine Alternative zum Wasserstoff aus Dampfreformierung stellt die  $\text{H}_2$ -Produktion mittels Wasserelektrolyse dar (Pfad II, III). Wenn die Elektrolyse vor Ort an der  $\text{H}_2$ -Tankstelle stattfindet, so beeinflusst das die Ökobilanz positiv (Pfad II versus Pfad III). Allerdings hat die Transportentfernung<sup>57</sup> einen viel geringeren Einfluss auf die Ökobilanz (unter 4%) als der EE-Anteil des für die  $\text{H}_2$ -Herstellung eingesetzten Stromes.

So können in 2035 alternativ große Anlagen zur Produktion von Wasserstoff an der Küste oder in PV-Hybrid-Kraftwerken in ehemaligen Braunkohletagebauegebieten in der Lausitz

---

<sup>57</sup> Anlieferung über  $\text{LH}_2$ -Trailer über eine Entfernung von 500 km (einfach) wurde mitberücksichtigt

realisiert werden und der dort systemdienlich erzeugte Wasserstoff auch nach Mitteleuropa transportiert und in den BZ-Zügen auf den betrachteten Strecken eingesetzt werden. Die Nutzung des Wasserstoffes aus diesen Anlagen kann die Gesamtsystemeffizienz positiv beeinflussen.

Auch in Verbindung mit den HYPOS-Aktivitäten (siehe Abbildung 89) sind eine Reihe von H<sub>2</sub>-Produktionsanlagen in der Region geplant.



Abbildung 89 HYPOS – Region (keine Bildrechte)

Die im HYPOS initiierten Vorhaben reichen von der Wasserstoffproduktion über Transport und Speicherung bis hin zur Wasserstoffverwendung. Dazu werden regionale Wasserstoffinfrastrukturen errichtet. Des Weiteren soll deren Nutzung synergetisch für die Bedienung verschiedener Märkte verbessert werden. Die Logistik der Wasserstoffbereitstellung für die Betankung von H<sub>2</sub>BZ-Triebwagen könnte eine wichtige Aufgabe sein, diesbezügliche Synergien könnten also ökonomische Vorteile erzielen. Eine (Mit)Nutzung der HYPOS-Infrastrukturen kann einen Mehrwert für das Energiesystem sowie eine nachhaltige Entwicklung der Region mit sich bringen.

Der generell höhere spezifische Energiebedarf der HEMU im Vergleich mit der BEMU kann zukünftig durch die systemdienlichen Vorteile der HEMU ausgeglichen werden. Die Notwendigkeit der saisonalen Großenergiespeicherung in einem künftig dominierten EE-Energiesystem, die Erhöhung der Auslastung zukünftig regional vorhandener H<sub>2</sub>-Erzeugungs- und Transportinfrastrukturen sind einige der systemdienlichen Vorteile beim Einsatz von brennstoffzellenbetriebenen Triebzügen.

#### 5.4.5 Zusammenfassung

Mit beiden Triebzugkonzepten BEMU und HEMU wird lokale Emissionsvermeidung sowie Lärmreduzierung in Fahrzeugbetrieb gewährleistet und wird sich positiv in der nachhaltigen Entwicklung der Region auswirken. Dieses Ergebnis gilt auch für andere Regionen und kann auf die anderen Strecken übertragen werden.

Standortunabhängig gilt auch, dass der Einsatz alternativer Antriebstechnologien mit steigendem EE-Anteil im Strommix zunehmend klimaneutraler wird. Dazu ist festzustellen,

dass auf Basis des aktuellen lokalen Strommixes in Sachsen wegen des hohen Braunkohleanteils dessen THG-Emissionen sehr hoch sind. Ist eine lokale Grünstromversorgung nicht möglich, so ist ein 100%iger EE-Strombezug bilanziell durch „Grünstromtarife“ eine Alternativoption, Treibhausgas- und Schadstoffemissionen gleichermaßen zu senken, womit jedoch ein Teil der angestrebten lokalen Wertschöpfung ausfallen würde.

Wegen der intensiven Entwicklungen der Wasserstofftechnik im nahegelegenen Chemiedreieck Leuna-Bitterfeld-Wolfen bieten sich die infrastrukturellen Bedingungen zur Lieferung von kostengünstigem Wasserstoff aus Dampfreformierung kurzfristig (2025) an. Obwohl fossil basiert, tragen diese bereits kurzfristig kostengünstig zu einer graduellen THG-Emissionsreduktion bei.

Nach 2025 stellt die H<sub>2</sub>-Produktion mittels Wasserelektrolyse eine Alternative zum Wasserstoff aus Dampfreformierung dar. Der generell höhere spezifische Energiebedarf der HEMU im Vergleich zu BEMU kann zukünftig durch die systemdienlichen Vorteile der HEMU ausgeglichen werden.

Die geographische Nähe beider Strecken zur HYPOS - Region mit geplanten Wasserstoffproduktionsanlagen und H<sub>2</sub>-Infrastrukturausbau stellt ein relevantes Kriterium dar, um die Bemühungen um den systemdienlichen Einsatz von Wasserstoff in der Mobilität, also z.B. auch z.B. im Schienenverkehr zu begründen.

## 5.5 Gesamtauswertung

### 5.5.1 Aufgabenstellung

Aufgabe von Los 5 war die umweltspezifische Bewertung des Einsatzes von batterie- oder brennstoffzellenbetriebenen Schienenfahrzeugen (BEMU bzw. HEMU) für den Einsatz auf den zwei auszuschreibenden Strecken im Umfeld von und mit Auswirkungen auf den SPNV im Raum Leipzig miteinander und im Vergleich zu den bisher eingesetzten dieselgetriebenen Schienenfahrzeugen. Aufgabe dieses Zwischenberichtes ist die Zusammenfassung der Hauptergebnisse zu den beauftragten Umweltwirkungen, die im Folgenden kurz zusammengefasst werden.

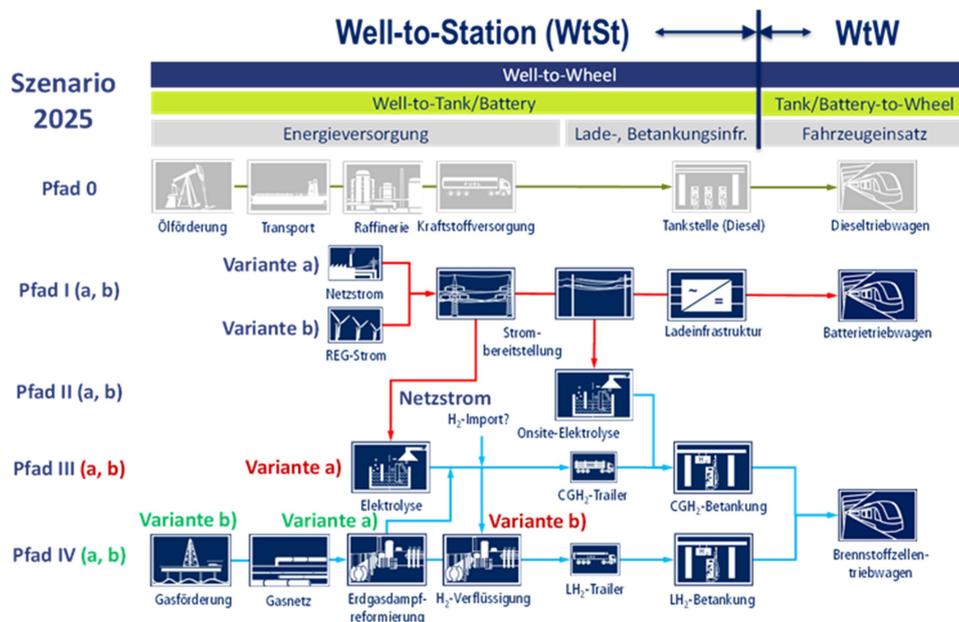


Abbildung 90 Analytierte Strom-, Wasserstoff- und Dieselkraftstoff-Versorgungspfade

Die Abbildung zeigt die im Team ausgewählten Pfade für 2025, wobei diese sich für 2035 hauptsächlich durch die dann nicht mehr betrachtete Wasserstoff-Produktionsoption der Erdgas-Dampfreformierung sowie die Substitution von Trailer- zu Rohrleitungstransport unterscheiden.

### Schadstoffemissionen

Bei Beurteilung der Schadstoffemissionen wurden folgende Emittenten berücksichtigt: NMVOC, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO sowie Partikel & Staub. Außerdem wurden die Strom-/Wasserstoff-Bereitstellungsketten unterteilt in Well-to-Station (WtSt) und Well-to-Wheel (WtW). Für die WtSt-Analysen zeigte sich, dass die NO<sub>x</sub>-, SO<sub>2</sub>-, CO- und Staub-/Partikelemissionen von BEMU/HEMU in 2025 z.T. signifikant höher sind als die der Dieselreferenz (Ursache: Emissionen aus den Vorketten: fossil dominierter Strommix), dafür jedoch nicht am Ort des Energieverbrauches anfallen. Das Gleiche lässt sich auch für 2035 feststellen mit schrumpfenden Differenzen<sup>58</sup>.

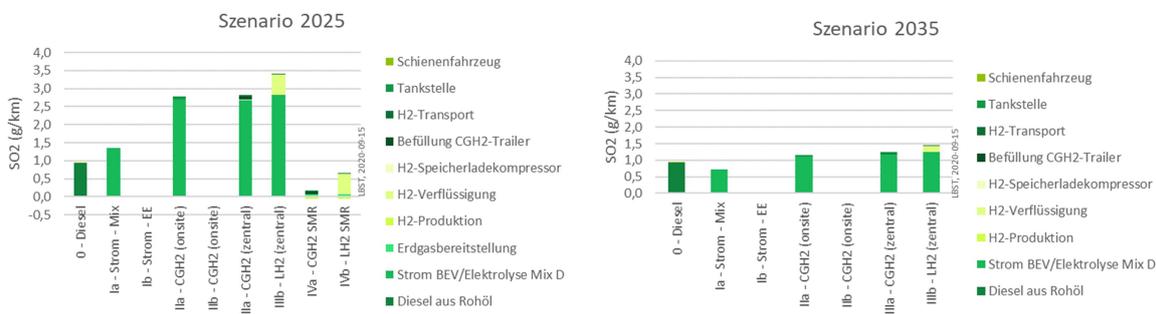


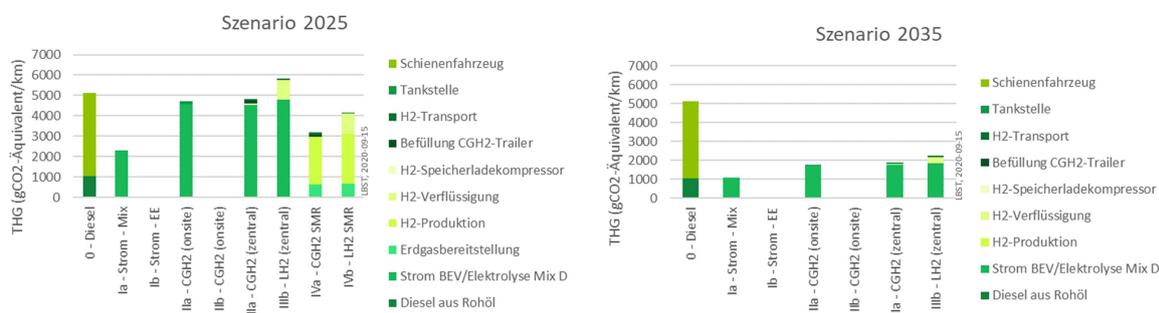
Abbildung 91 Vergleich der Schadstoffemissionen unterschiedlicher Antriebskonzepte für 2025 und 2035 am Beispiel SO<sub>2</sub>-Emissionen (WtW)

<sup>58</sup> Eine gewisse Datenunsicherheit besteht noch bei den SO<sub>2</sub>- und Staub-/Partikelemissionen der Dieselkraftstoffbereitstellung, da die Energieunternehmen keine detaillierten Annahmen machen.

Bezüglich WtW übertreffen alle Diesel-Schadstoffemissionen die der BEMU/HEMU signifikant bereits in 2025, mit Ausnahme der SO<sub>2</sub>- (Ursache: Vorkette Strommix mit hohem Kohleverstromungsanteil) und Staub-/Partikelemissionen (Ursache: Dominanz fahrbetriebsspezifischer Emissionen ‚Abrieb‘). Das gilt noch mehr für 2035. Da jedoch die meisten Schadstoffemissionen anders als beim Dieselantrieb in der Vorkette entstehen, führt der Einsatz von BEMU/HEMU dennoch zu Entlastungen für die SPNV-Nutzer, und zwar unabhängig ob BEMU oder HEMU.

### Klimagasemissionen

Zur Bilanzierung der Treibhausgasemissionen (THG) wurde die gleiche Methodik wie für die Schadstoffemissionen gewählt, wobei aber darauf hingewiesen wird, dass die sogenannten grauen Emissionen<sup>59</sup> nicht berücksichtigt werden konnten. Diese dürften für die BEMU (Batterieherstellung) deutlich höher ausfallen als für die HEMU.



**Abbildung 92 Vergleich der THG-Emissionen unterschiedlicher Antriebskonzepte für 2025 und 2035 (WtW)**

In 2025 sind bezogen auf WtSt die THG-Emissionen für BEMU (höhere Effizienz Vorkette mit Antrieb) & HEMU (CGH<sub>2</sub> aus Erdgas) ähnlich wie die der Dieselreferenz. Die anderen Optionen führen zu höheren THG-Emissionen (50-100%), mit Ausnahme der HEMU-Option mit H<sub>2</sub>-Erzeugung vor Ort (EE-Strom), die bereits in 2025 zu 0'-THG-Emissionen führt. In 2035 sind die THG-Emissionen aller Optionen dann niedriger als die der Dieselreferenz. BEMU und HEMU unterscheiden sich dann aber noch um ≤ 25% voneinander. Die LH<sub>2</sub>-Optionen sind mit heutigen Annahmen (Effizienz Verflüssigung) THG-emissionsintensiver als die CGH<sub>2</sub>-Optionen.

In 2025 (WtW) übertrifft nur die LH<sub>2</sub>-Elektrolyse-Option die THG-Emissionen des Dieselantriebs marginal, alle anderen Optionen bezogen auf die Dieselreferenz darunter (BEMU: -50%, HEMU-CGH<sub>2</sub> (aus Erdgas): -39%, HEMU-LH<sub>2</sub> (aus Erdgas): -20%) oder sind in etwa gleich (HEMU-CGH<sub>2</sub> (onsite/zentral)). In 2035 sind die THG-Emissionen aller Alternativpfade signifikant niedriger als die der Diesel-Referenz (BEMU: -78%; HEMU-CGH<sub>2</sub> (onsite/zentral) -64% und HEMU-LH<sub>2</sub>: -59%).

Die THG-Emissionen (WtW) sind dabei für die Strecke Leipzig-Gera um ca. 21% (Diesel, BEMU) bzw. ca. 14% (HEMU) geringer als für die Strecke Leipzig-Grimma-Döbeln.

<sup>59</sup> Graue Emissionen fallen bei Herstellung von Anlagen & Fahrzeugen entlang der Wertschöpfungskette an. Diese sind schwer zu ermitteln und selbst für den Automobilssektor liegen bisher nur wenige Analysen vor.

## Lärmemissionen

Die anonymisierte Auswertung gemittelter Messwerte zeigt, dass beide BEMU und HEMU<sup>60</sup> gegenüber Dieselantrieben in allen Betriebszuständen leiser sind. Besonders ausgeprägt sind die Vorteile im Betriebszustand ‚Stillstand‘ mit einer Differenz von 16 dB<sup>61</sup> (maßgeblich beim Fahrgastwechsel im Bahnhofsbereich). Ein Dieseltriebzug würde also im Stillstand als ungefähr dreimal lauter empfunden werden als ein BEMU/HEMU-Triebzug.

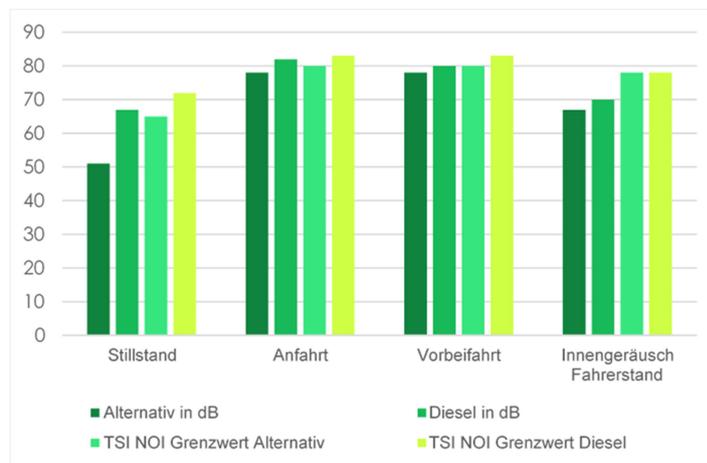


Abbildung 93 Lärmemissionsvergleich elektrischen mit dieseltreibenden Triebwagen

Grundsätzlich liegen alle Antriebsarten innerhalb der zugelassenen Grenzwerte, wobei beide alternativen Antriebstechniken die Werte der Dieselantriebe z.T. deutlich unterschreiten<sup>62</sup>.

## Regionale Besonderheiten, Rückkopplungen Energiewende

Regionale (Verkehrs-)Strategien sollten vorteilhaft komplementär bzw. systemdienlich für und sektorkoppelnd zu globalen Energie- und Transportstrategien entwickelt werden. So wirkt sich ein hoher (Teil-)Elektrifizierungsgrad positiv auf die Erfüllung der Bundesziele (Reduktion von THG- und Schadstoffemissionen) aus. Jedoch ist der EE-Anteil im Strommix bis 2035, der einen dominierenden Einfluss auf THG- und Schadstoffemissionen von HEMU/BEMU-Betrieb hat<sup>63</sup>, im ZVNL-Gebiet nicht wie erforderlich absehbar<sup>64</sup>. Die geographische Auswahl von Strecken nahe den geplanten großtechnischen Wasserstoffindustrieprojekten kann langfristig einen systemdienlichen Zusatznutzen darstellen (Synergien der H<sub>2</sub>-Infrastruktur).

Der spezifische Energieverbrauch der betroffenen Strecken ist marginal höher als der deutsche Vergleichsmittelwert aber stark abhängig von den örtlichen Gegebenheiten und Randbedingungen und damit nicht direkt auf andere Regionen übertragbar. Für andere Strecken in der Region ist jeweils individuell zu prüfen, ob die Wahl der Antriebe im Einklang mit den bundesweiten Entwicklungen steht.

<sup>60</sup> Daten für BEMU sind noch nicht in aussagefähiger Quantität vorhanden. Dennoch ist davon auszugehen, dass die Ergebnisse für BEMU & HEMU voraussichtlich als nahe beieinander liegend eingeschätzt, obwohl sie nicht völlig gleich sein werden (Schwankungen ca. +/-2 dB, mit Einfluss der Messumgebung).

<sup>61</sup> Eine Änderung um 10 dB wird als Verdoppelung/Halbierung der Lautstärke empfunden.

<sup>62</sup> Die alternativen Antriebe unterschreiten beim Fahrgastwechsel (Stillstand) sogar die Anforderungen der VDV1541 für Abstellung.

<sup>63</sup> Die Bereitstellung von Strom- und Wasserstoff haben dagegen einen anteilig geringen Einfluss.

<sup>64</sup> Bilanziell bezogener EE-Strom ist. ggfs. eine alternative Option zum lokalen EE-Bezug.

## 5.6 Fazit

Im Vergleich der vier Aspekte Schadstoff-, Treibhausgas- und Lärmemissionen sowie der regionalen Einordnung lässt sich Folgendes zusammenfassend feststellen (der Vorteil eines Antriebs wird durch zunehmende Pfeildicke repräsentiert):

<b>Aspekt</b>	
<b>BEMU</b>	<b>Schadstoffemissionen:</b> In 2025 sind marginale Vorteile des BEMU-Einsatzes ggb. den HEMUs (WtSt und WtW) zu verzeichnen, die jedoch in 2035 weitgehend ausgeglichen sind. Grund ist der zunehmende Anteil von erneuerbarem Strom. Im Vergleich zur Dieselreferenz haben beide Technologien signifikante Vorteile (Ausnahmen NO <sub>x</sub> und SO <sub>2</sub> ).
	<b>THG-Emissionen:</b> In 2025 betragen die THG-Emissionen (WtW) der HEMUs mehr als das Doppelte der BEMU, WtSt etwas weniger als das Doppelte. WtSt schrumpft dieser Vorteil in 2035 jedoch nahezu auf Null, während WtW BEMU noch einen Vorteil von ca. 40% vor den HEMUs haben. Beide Technologien sind jedoch in 2035 signifikant (WtW-Faktor 4-6) THG-emissionsärmer als der Dieselantrieb.
	<b>Lärmemissionen:</b> Auch ohne breit verfügbare Messwerte lässt sich bereits heute feststellen, dass kein signifikanter Unterschied zwischen den Lärmemissionen von BEMU und HEMU bestehen wird. Lärmemissionen der CGH <sub>2</sub> -Tankstellen für HEMU (Verdichter) lassen sich durch geeignete Lärmschutzmaßnahmen vermeiden.
	<b>Regionale Einordnung:</b> Im Hinblick auf die (erneuerbare) Strombereitstellung unterscheiden sich BEMU und HEMU kurzfristig nicht voneinander, langfristig bietet jedoch Wasserstoff als Kraftstoff systeminhärente Vorteile bei Transport und Speicherung <sup>65</sup> . Wegen der strategischen Positionierung der Wasserstoffenergietechnik im Chemiedreieck Leuna-Bitterfeld-Wolfen dürften sich infrastrukturell/wirtschaftlich besondere Chancen entwickeln.
	<b>HEMU</b>

Zusammenfassend lässt sich daher aus dem Vergleich umweltspezifischer Wirkungen der beiden alternativen Antriebstypen (BEMU, HEMU) ableiten, dass sie beide erhebliche Vorteile bei Schadstoff-, Treibhausgas- und Lärmemissionen im Vergleich zu den heute eingesetzten Dieselnügen aufweisen, insbesondere, wenn ein erneuerbarer Strommix zugrunde gelegt wird. Aus Sicht der begrenzten und eher kurzfristigen Sicht des Betreibers<sup>66</sup> hat ein Batteriebetrieb der Triebwagen daher bei zentraler Wasserstoffversorgung (aus Strommix) deutliche Vorteile geringerer THG-Emissionen im Vergleich mit einem Brennstoffzellenantrieb. Die Vorteile schrumpfen jedoch von 2025 bis 2035 und sind bei lokaler H<sub>2</sub>-Produktion des Wasserstoffs auf Basis erneuerbaren Stroms aus Umweltwirkungsperspektive gar nicht mehr relevant.

Bei einer mittelfristig zunehmend erneuerbaren Stromversorgung tritt dann der Ressourcendruck, also die bessere Nutzung der erneuerbaren Strompotenziale durch die Batteriezüge in den Vordergrund. Aber auch dieser Vorteil der Batteriezüge schrumpft weiter, wenn man die Notwendigkeit zur saisonalen Großenergiespeicherung in einem künftig dominierten EE-Energiesystem mitberücksichtigt. Analysen [ADAC 2019] konnten zeigen,

<sup>65</sup> ‚Langfristig‘ ist aus Sicht des SPNV auch die erwartete Lebensdauer der zu beschaffenden Triebwagen.

<sup>66</sup> Im Bezug auf das gesamte Energiesystem bzw. auf den Beschaffungszeitraum der betroffenen Strecken

dass sich die Gesamtsystemeffizienz (und damit die Ausnutzung der REG-Potenziale) von brennstoffzellenbetriebenen und batteriebetriebenen Pkw für diesen Fall annähern, was sich ebenso auch auf den Schienenverkehr übertragen lässt. In Verbindung mit den lokalen Wertschöpfungspotenzialen einer Wasserstoffversorgung des Schienenverkehrs könnten aus systemischer Sicht daher brennstoffzellenangetriebene Triebwagen mittel- und langfristig ebenfalls eine sinnvolle Option darstellen.

## 5.7 Literaturverzeichnis

- [ADAC 2019] U. Bünger, St. Nicolai, J. Zerhusen, C. Monsalve, S. Kharboutli, J. Michalski, St. Ruhe, U. Albrecht: Infrastrukturbedarf E-Mobilität – Analyse eines koordinierten Infrastrukturaufbaus zur Versorgung von Batterie- und Brennstoffzellen-Pkw in Deutschland. Bericht zum Forschungsprojekt der Ludwig-Bölkow-Stiftung gefördert durch die ADAC Stiftung, Juni 2019, [https://stiftung.adac.de/app/uploads/2019/06/IBeMo\\_Abschlussbericht\\_final\\_190625\\_LBST\\_Zerhusen.pdf](https://stiftung.adac.de/app/uploads/2019/06/IBeMo_Abschlussbericht_final_190625_LBST_Zerhusen.pdf).
- [AFW 2017] Amec Foster Wheeler; IEAGHG: Techno-Economics of Deploying CCS in a SMR Based Hydrogen Production using NG as Feedstock/Fuel; IEAGHG Technical Report 2017-02, February 2017
- [Bundestag 2019] Deutscher Bundestag: Antwort der Bundesregierung auf die kleine Anfrage der Abgeordneten Matthias Gastel, Lisa Badum, Dr. Julia Verlinden, weiterer Abgeordneter und der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN – Drucksache 19/8817: Erneuerbare Energien im Bahnstrommix; Drucksache 19/10121, 14.05.2019
- [DeliverHy 2013] DeliverHy: Impact of high capacity CGH<sub>2</sub>-trailers; Deliverable 6.4; project co-financed by European funds from the Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking under FCH-JU-2009-1 Grant Agreement Number 278796; October 2013; [http://www.fch.europa.eu/sites/default/files/project\\_results\\_and\\_deliverables/Recommendations%20to%20industry%20%28ID%202849587%29.pdf](http://www.fch.europa.eu/sites/default/files/project_results_and_deliverables/Recommendations%20to%20industry%20%28ID%202849587%29.pdf)
- [ETSU 1996] Gover, M. P.; Collings, S. A.; Hitchcock, G. S.; Moon, D. P.; Wilkins, G. T.: Alternative Road Transport Fuels - A Preliminary Life-cycle Study for the UK, Volume 2; A study co-funded by the Department of Trade and Industry and the Department of Transport; ETSU, Harwell March 1996
- [EU-RED 2018] DIRECTIVE (EU) 2018/2001 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast); Official Journal of the European Union, 21.12.2018
- [Exergia 2015] Exergia; E3M-lab; COWI: Study on actual GHG data for diesel, petrol, kerosene and natural gas; Final Report, Work Order: ENER/C2/2013-643; July 2015; European Commission DG ENER Framework Service Contract SRD MOVE/ENER/SRd.1/2012-409-LOT 3-COWI

- [Haberstroh 2019] Haberstroh, Chr. (TU Dresden): personal communication (e-mail) to Bünger, U. (LBST); 9 January 2019
- [IFB 2020] Institut für Bahntechnik: Systemkosten LMIA-DDE LL-UG; 7 September 2020
- [IPCC 2007] Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.): Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.;  
[https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ar4\\_wg1\\_full\\_report-1.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ar4_wg1_full_report-1.pdf)
- [IPCC 2013] Stocker, Th., F.; Qin, D.; Plattner, G-K.; Tignor, M.; Allen, S., K.; Boschung, J.; Nauels, A.; Xia, Y.; Bex, V.; Midgley, P., M. (eds.): Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp, see <http://ipcc.ch/report/ar5/>
- [JEC 2014] JEC – Joint Research Centre-EUCAR-CONCAWE collaboration: Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context; Version 4.a; Report EUR 26237 EN, April 2014; ISBN 978-92-79-33888-5 (pdf);  
<http://iet.jrc.ec.europa.eu/about-jec/>
- [Krieg 2012] Krieg, D.: Konzept und Kosten eines Pipelinesystems zur Versorgung des Straßenverkehrs mit Wasserstoff; Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Energie & Umwelt / Energy & Environment, Band / Volume 144, ISSN 1866-1793, ISBN 978-3-89336-800-6, 2012
- [LBST et al. 2016] Ernst & Young (EY), Ludwig-Bölkow-Systemtechnik (LBST), Becker Büttner Held, TÜV Süd, SIGNON, IFOK: Ergebnisbericht Studie Wasserstoff-Infrastruktur für die Schiene; Erscheinungsjahr 2016
- [LfULG 2012] Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) Sachsen: Emissionen des Schienenverkehrs in Sachsen; Schiftenreihe, Heft 2/2012
- [Öko-Institut & Prognos 2019] Öko-Institut e.V.; Prognos: Zukunft Stromsystem II - Regionalisierung der erneuerbaren Stromerzeugung: Februar 2019; <https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/WWF-Zukunft-Stromsystem-2.pdf>
- [Tesla 2017] Tesla, 21 March 2017; <https://www.tesla.com/powerpack>
- [Weber 1994] Weber, G., R., Gardner Cryogenics, Lehigh Valley, PA, USA; quotation 7 September 1994

## 6. AP6 Handlungsempfehlung, Zeitplan

Basierend auf den Teilergebnissen und Empfehlungen der einzelnen AP 1-5 ist für den ZVNL eine zielführende Abwägung zu treffen. Ziel ist einen Leitfaden mit den konkreten Handlungsempfehlungen für eine effiziente Implementierung alternativer Antriebe und der entsprechenden Infrastruktur für den SPNV im Nahverkehrsraum Leipzig.

Außerdem liegt unser Fokus auf der Erstellung eines praxistauglichen Projektzeitplans zur Beschaffung, Entwicklung und Aufbau der notwendigen Fahrzeuge und Infrastruktur. Dies bedingt gleichzeitig die Einbeziehung verschiedener Alternativen und Optionen innerhalb der zu planenden Prozesse. Der Entwicklungsfahrplan beinhaltet auch eine Schätzung der Aufwände für den ZVNL (Personal, Kosten).

Dieser AP umfasste ebenso die Koordinierung, Terminabstimmung zwischen ZVNL und den AP-Bearbeitern, die Moderation der Abstimmungstermine sowie die Dokumentation der Ergebnisse. AP 6 war im Projektverlauf der zentrale Ansprechpartner, Projektmanager für die Bearbeiter der einzelnen AP und Projektkoordinator für den ZVNL.

### 6.1 Handlungsempfehlung

Im folgenden Abschnitt werden die wichtigsten Ergebnisse der Arbeitspakete zusammengefasst und die spezifische Handlungsempfehlung daraus wiedergegeben.

#### *Empfehlung aus Arbeitspaket 1 - Infrastruktur*

Das Arbeitspaket 1 (AP1) welches sich mit der erforderlichen Infrastruktur für die beiden Antriebsarten (BEMU und HEMU) auseinandersetzt, kommt zu dem Schluss, dass eine konkrete Handlungsempfehlung abhängig von der betrachteten Strecke ist.

Für die Strecke **Leipzig Miltitzer Allee - VS Grimma ob.Bf - Döbeln Hbf** mit optionaler Streckenerweiterung bis **VS Rochlitz** ergibt sich eine klare Empfehlung zugunsten des Betriebs von batterieelektrischen Zügen.

Bei der Strecke **Leipzig Hbf tief - Gera Hbf** kommt es dagegen stark auf die Elektrifizierung der Strecke **Weimar-Gera-Gößnitz an**. Bei keiner oder nur verspäteter Elektrifizierung der Strecke wird der Einsatz von HEMU empfohlen, während der BEMU bei einer vorhandenen Elektrifizierung vorteilhaft ist.

#### *Empfehlung aus Arbeitspaket 2 - Energieinfrastrukturtechnologien*

Das Arbeitspaket 2 (AP2) befasste sich mit den Energieinfrastrukturtechnologien und kam zu folgenden Ergebnissen.

- Technisch und betrieblich sind beide Antriebstechnologien in der Lage, die untersuchten Strecken gemäß der gestellten Beförderungsaufgabe zu bedienen.
- Im Ergebnis der SWOT-Analyse weisen beide Antriebstechnologien systemimmanente Vor- und Nachteile auf und haben signifikante Chancen und Risiken.

- Im Betrachtungszeitraum von 12 Jahren betragen die Energiekosten des HEMU-Systems auf beiden untersuchten Strecken etwa das Doppelte der vergleichbaren Kosten des BEMU-Systems.
- Im Vergleich der Systemkosten weist das HEMU-System auf der Strecke Leipzig – Grimma – Döbeln 46% höhere Systemkosten und auf der Strecke Leipzig – Gera ca. 38% höhere Systemkosten als das BEMU auf.

Schlussendlich ergibt sich aus den genannten Erkenntnissen in AP2 eine Empfehlung für den BEMU.

### **Empfehlung aus Arbeitspaket 3 – Recht, Organisation, Sicherheit**

AP3 analysierte die rechtlichen, sicherheitsspezifischen und organisatorischen Aspekte der Antriebsarten. Die Ergebnisse sind in verschiedene Unterpunkte aufgeschlüsselt.

Bezüglich der Traktionsart wird festgestellt, dass keine hinreichenden Argumente für oder gegen eine bestimmte Antriebsart sprechen. Die erforderlichen Baumaßnahmen sind in beiden Fällen umfassend und gehen jeweils mit einem hohen Umsetzungsrisiko einher, welche nicht vom EVU sondern bestenfalls vom ZVNL übernommen werden sollten.

Konkret bedeutet das für den HEMU, dass die Neuerrichtung einer Wasserstoffversorgung/-Tankstelle im Ausschreibungsnetz unumgänglich ist. Die Unsicherheiten über die Realisierung der Erweiterungsstrecken lassen die unkompliziertere Implementierung der BEMU attraktiv erscheinen, da im Falle der Realisierung ein geringerer Integrationsaufwand der Strecken abzusehen ist. Für den Einsatz des BEMU stellt die Entbehrlichkeit eines Infrastrukturausbaus insbesondere an der Strecke **Leipzig – Grimma – Döbeln** ein gewichtiges Argument für den Einsatz von Batteriezügen dar.

Bei der Wahl des Vergabe- und Vertragsmodells wird eine Abhängigkeit von der betrachteten Strecke ausgemacht worden. Für die Strecke **Leipzig-Grimma-Döbeln** empfiehlt sich aufgrund der überschaubaren infrastrukturellen Baumaßnahmen das folgende Modell:

- Der ZVNL bestellt die Verkehre im Rahmen eines „klassischen“ Verkehrsvertrags bei einem EVU, wobei die Unsicherheiten, die aus dem Einsatz von Batteriefahrzeugen resultieren, durch geeignete vertragliche Regelungen aufgefangen werden können.
- Das EVU ist gemäß Verkehrsvertrag weiterhin dafür verantwortlich die zusätzliche Ladeinfrastruktur (sowie sämtliche Abstellanlagen als Serviceeinrichtung) bei der DB zu beauftragen.

Sollte die Abstimmung mit DB Netz AG ergeben, dass einer Umsetzung durch das EVU bestimmte Hindernisse im Wege stehen (bspw. durch notwendige Vorlaufzeiten der Beauftragung und Planung für DB-Netz), könnte der ZVNL noch frühzeitig ein stärkeres, eigenes Engagement diesbezüglich in Erwägung ziehen.

Bei der Strecke **Gera-Leipzig** ist zu beachten, dass eine Beauftragung der DB Netz AG mit der Errichtung der Infrastruktur unmittelbar durch den ZVNL gegenüber einer Beauftragung durch das EVU vorzuziehen ist. Eine frühzeitige Abstimmung mit der DB empfohlen, um mögliche Risiken abzufedern, wie das Errichten der notwendigen Stromnetzanschlüsse oder

noch zu durchlaufende Genehmigungsverfahren. Planungsfeststellungsverfahren hinsichtlich der Oberleitungsinsel sind nach aktuellem Sachstand voraussichtlich nicht zu erwarten. Plangenehmigungen könnten das Verfahren verkürzen.

Schlussendlich wurden weitere vertragliche Regelungen analysiert, die auf die Übernahme der anfallenden Risiken durch den ZVNL abzielen. Folgende Instrumente sind dabei zu prüfen:

- Das mit (innovativen) Fahrzeugbeschaffungen verbundene Marktrisiko des jeweiligen EVU kann durch erprobte Finanzierungsinstrumente seitens des Aufgabenträgers gedämpft werden.
- Risiken der Instandhaltung und der technischen Zuverlässigkeit könnte ein EVU durch einen Service-Vertrag mit dem Fahrzeughersteller abfedern. Es ist zu prüfen, inwiefern der ZVNL einen Mindestumfang an Serviceleistungen als Vorgabe verpflichtend in den Vergabeunterlagen fordern kann.
- Die Preisentwicklung der neuen Komponenten der innovativen Fahrzeuge, wie Brennstoffzelle oder Akkus, könnte aus der allgemeinen Vergütung (Euro/Zug-km) und Preisfortschreibung ausgenommen werden. Zu prüfen wäre eine Neujustierung (nach oben bzw. unten) nach Komponententausch auf Basis der bekannten Preise für diese Komponenten in der Zukunft.
- Da sich der Austausch von Brennstoffzellen / Akkus in mehrjährigen, teuren Zyklen wiederholt wäre zur Sicherung der Liquidität des EVU in diesen Kostenspitzen eine Vorgabe zur Rücklagenbildung oder eines Einbehalts eines Anteils der Vergütung durch den ZVNL zu prüfen (Instandhaltungsrücklage).
- Im Fall der Notwendigkeit einer zusätzlichen Ladestation (auf Grund der DB-Netz) für BEMU im MDSB2025plus muss der ZVNL tätig werden. Eine frühzeitige Abstimmung mit DB-Netz und schließlich ein Errichtungs-/Nutzungs-/Finanzierungsvertrag über die Ladestation/en sind hierzu unumgänglich.

Die Eisenbahninfrastruktur für die Erweiterung der Strecke **Leipzig-Grimma-Döbeln** bis **Rochlitz** bis Rochlitz müsste erst errichtet werden. Aufgrund der Eigentumsverhältnisse des Streckenabschnittes (privater Eigentümer und Kommune) ist eine Verhandlung über das Einverständnis der Reaktivierung der Strecke plus Errichtung der Infrastruktur notwendig. Zusätzlich muss erörtert werden, ob die jetzigen Eigentümer auch als Betreiber der Strecke auftreten oder ob Dritte gesucht werden müssen. Es wird empfohlen, dass der ZVNL diese Verhandlungen führt. Es sollte dabei nach den folgenden Schritten vorgegangen werden.

- Der ZVNL bestellt die Verkehre im Rahmen eines „klassischen“ Verkehrsvertrags, wobei er die Unsicherheiten, die aus dem Einsatz von Batteriefahrzeugen resultieren, durch geeignete vertragliche Regelungen auffangen kann.
- Der ZVNL beauftragt die Errichtung und den Betrieb der Eisenbahninfrastruktur auf der Strecke nach Rochlitz einschließlich einer Oberleitungsinsel mit dem Infrastruktureigentümer.

Für die Verhandlungen mit dem Eigentümer der Strecke, die Planungen, das Genehmigungsverfahren und die Umsetzung sind ausreichend Zeit, im Zweifel mehrere Jahre zu veranschlagen.

#### **Empfehlung aus Arbeitspaket 4 – Wirtschaftlichkeit**

In Arbeitspaket 4 (AP4) wurde die Wirtschaftlichkeit der alternativen Antriebe untersucht, welche zu dem Schluss gekommen ist, dass von den beiden alternativen Antriebsarten der BEMU mit sehr großer Wahrscheinlichkeit zu geringeren Aufwendungen für die SPNV-Aufgabenträger als der HEMU führt. Für die Zukunft ausdrücklich nicht ausgeschlossen ist, dass es beispielsweise infolge einer verstärkten Förderung der H2-Technologie zu deutlich günstigeren Marktkonditionen für HEMU kommen kann.

#### **Empfehlung aus Arbeitspaket 5 - Umweltaspekte**

In Arbeitspaket 5 (AP5) werden die Umweltaspekte einer Prüfung mit folgenden Ergebnissen unterzogen. Beide Antriebsarten weisen erhebliche Vorteile bei Schadstoff-, Treibhausgas- und Lärmemissionen im Vergleich zu den heute eingesetzten Dieselmotoren auf. Dabei spielt der Strommix eine relevante Rolle. Auf kürzere Sicht betrachtet weist der BEMU deutliche Vorteile bzgl. THG-Emissionen auf, welche allerdings auf langfristige Sicht (2025-2035) hin schrumpfen.

Die Ausweitung der erneuerbaren Energien bestätigt den Vorteil der effektiveren Stromnutzung der BEMU gegenüber der HEMU. Unter Berücksichtigung der erforderlichen saisonalen Großenergiespeicherung schrumpft dieser Vorteil allerdings. Die Gesamtsystemeffizienz der beiden Antriebsarten nähert sich in diesem Fall an und ist vergleichbar. Daher könnte aus systemischer Sicht die Implementierung von HEMU in der mittel bzw. langen Frist auch eine sinnvolle Option darstellen.

### 6.1.1 Abwägung der Einzelempfehlungen, Handlungsempfehlung gesamt

Folgende Tabelle 45 fasst die wichtigsten Empfehlungen der einzelnen AP nochmals zusammen.

Tabelle 45 Zusammenfassung der Handlungsempfehlungen

Arbeitspaket	Bemerkung	Empfehlung
1 – Infrastruktur	Empfehlung abhängig von der betrachteten Strecke	Tendenz BEMU
2 - Energieinfrastruktur	Höhere Energie- und Systemkosten für HEMU	BEMU
3 – Recht, Organisation, Sicherheit	kaum Unterschiede zwischen HEMU und BEMU; mögliche Genehmigungen / Verfahren beachten; Risikoübernahme ZVNL	BEMU oder HEMU
4 - Wirtschaftlichkeit	mögliche Förderung von HEMU kann Kostenvorteil verschieben	BEMU
5 - Umweltaspekte	Langfristig werden BEMU und HEMU annähernd gleich effizient	Tendenz BEMU bei kurz- bis mittelfristiger Beschaffung

Die dargestellten Empfehlungen wurden im Wesentlichen aus der Blickrichtung der einzelnen Arbeitspunkte erstellt. Ausnahme bildet AP2 welcher in eine SWOT-Analyse über die ursprüngliche Aufgabenstellung hinaus eine Abwägung vornimmt. In Anlehnung daran wurde in diesem AP6 im Sinne einer Nutzwertanalyse eine Handlungsempfehlung aus den genannten Zielen, Kriterien und Empfehlungen aus Sicht des Aufgabenträgers bzw. des Auftraggebers ZVNL erarbeitet. Diese Methodik soll der Entscheidungsfindung dienen und die Einzelempfehlungen verifizieren bzw. zusammenfassend betrachten.

## 6.2 Nutzwertanalyse

Das Ziel der Nutzwertanalyse ist es eine ausgewogene Handlungsempfehlung aussprechen zu können. Die Empfehlung basiert auf Nutzwerten für einzelne Zielbereiche, die für beide Alternativen bestimmt werden. Die Zielbereiche bilden einen Themenkomplex ab, welcher durch verschiedene Kriterien charakterisiert wird. Die Erfüllung dieser Kriterien wird für beide Alternativen verglichen und bewertet. Bei der Festlegung auf die Zielbereiche wurde sich an den verschiedenen Arbeitspaketen orientiert. Konkret wurden die Punkte *Infrastruktur und Energiebereitstellung, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte und betriebliche Umsetzbarkeit* als entscheidungsrelevant definiert.

Für jeden dieser vier Zielbereiche wurden vier Entscheidungskriterien bestimmt, die mit unterschiedlicher Relevanz in den Gesamt-Nutzwert für den Zielbereich eingehen. Die Gewichtung wird durch den Vergleich der Kriterien untereinander bestimmt. Beispielweise wurde bei dem Zielbereich Wirtschaftlichkeit dem Kriterium „Fahrzeugkosten“ die höchste Gewichtung zugewiesen, da verglichen mit den anderen Kriterien die Wirtschaftlichkeit der Alternative hauptsächlich von den Fahrzeugkosten bestimmt wird.

Im nächsten Schritt folgt die qualitative Bewertung der Alternativen durch die bestimmten Kriterien. Beiden Alternativen wird zu jedem Punkt ein Wert von 1-10 zugewiesen, der die Erfüllung des Kriteriums darstellt. 10 ist in dem Falle die beste Situation für den ZVNL bzw. den Betreiber im Vergleich zu allen möglichen Alternativen und 1 ist die schlechteste Situation.

Die folgende Tabelle zeigt die einzelnen Kriterien der Zielbereiche, deren spezifische Gewichtung für den Gesamt-Nutzwert und die Erfüllungswerte. Die Erfüllungswerte werden daraufhin mit der spezifischen Gewichtung multipliziert und am Ende für jeden Zielbereich aufaddiert. Schlussendlich ergibt sich der Nutzwert für jede Alternative, der miteinander verglichen werden kann.

Infrastruktur und Energiebereitstellung							
Ziele	Nr.	1	2	3	4	absolut	relativ
Nutzung bestehender Infrastruktur	1	1	1	3	1	3	30%
Aufwand Infrastrukturerüchtigung	2		2	3	2	2	20%
Verfügbarkeit der Energieversorgungskette	3			3	3	4	40%
Energieeffizienz	4				4	1	10%
Summe:						10	100%
Wirtschaftlichkeit							
Ziele	Nr.	1	2	3	4	absolut	relativ
Kosten Infrastruktur	1	1	2	3	4	1	10%
Energiekosten	2		2	3	2	3	30%
Fahrzeugkosten	3			3	3	4	40%
Förderungsumfang	4				4	2	20%
Summe:						10	100%
Umweltaspekte							
Ziele	Nr.	1	2	3	4	absolut	relativ
Schadstoffemissionen	1	1	1	1	1	4	40%
THG-Emissionen	2		2	2	2	3	30%
Lärmemissionen	3			3	4	1	10%
Regionale Synergien	4				4	2	20%
Summe:						10	100%
betriebliche Umsetzbarkeit							
Ziele	Nr.	1	2	3	4	absolut	relativ
Flexibilität der Fahrzeuge	1	1	2	3	4	1	10%
Instandhaltung	2		2	3	4	2	20%
Zuverlässigkeit	3			3	3	4	40%
Organisatorischer Aufwand	4				4	3	30%
Summe:						10	100%

Bevor die endgültige Handlungsempfehlung zusammengefasst wird, werden einige relevante Erfüllungswerte der Entscheidungskriterien erläutert. Begonnen wird mit **Zielbereich 1** *Infrastruktur und Energiebereitstellung*. Das höchst-gewichtete Kriterium ist hier die Verfügbarkeit der Energieversorgungskette. Diese bildet die Grundvoraussetzung dafür, ob eine alternative Antriebsart überhaupt sinnvoll zu betreiben ist. Da ein Großteil des Netzes bereits elektrifiziert ist und auch zusätzliche Verbraucher (z.B. Ladestationen) mit der aktuellen Infrastruktur bedient werden können, erhält dieses Kriterium für den BEMU einen hohen Erfüllungswert. Der HEMU hingegen benötigt Wasserstoff, welcher zwar in der Region hergestellt wird, aber erst über zusätzliche Infrastruktur zum Fahrzeug gelangen kann (Trailer-Transport, neue Tankstellen). Die Energieversorgung ist demzufolge gewährleistet, aber unter größerem Aufwand als für den BEMU, daher ist der Erfüllungswert niedriger.

Bei der Nutzung der bestehenden Infrastruktur und der Infrastrukturertüchtigung zeigen sich große Unterschiede bei den beiden Fahrzeugtypen auf. Während der BEMU auf einen Großteil der bisherigen Infrastruktur zurückgreifen kann, benötigt der HEMU umfassende Baumaßnahmen für Tankstellen und eine vollständige Ertüchtigung der vorhandenen Infrastruktur (Umrüstung der Werkstätten und Depots). Außerdem wäre die aktuelle Infrastruktur ungenutzt durch den HEMU, was diese zum Teil zu „stranded assets“ macht.

Bei dem **Zielbereich 2** bestimmen hauptsächlich die Fahrzeug- und Energiekosten die *Wirtschaftlichkeit* der beiden Fahrzeugtypen. In beiden Fällen zeigen sich Vorteile für den BEMU, welcher von deutlich geringeren Stromkosten und niedrigeren Fahrzeugkosten profitiert. Die Kosten für Strom liegen sogar unter denen für Diesel, was den höchstmöglichen Erfüllungswert rechtfertigt. Die Kosten für Wasserstoff hingegen liegen deutlich (200-300%) über den Stromkosten. Kostensenkungen für Wasserstoff in der Zukunft sind allerdings absehbar. Bezüglich des Förderungsumfangs lässt sich sagen, dass keine Unterschiede für die beiden Typen auszumachen sind. Die relevanten Förderungstöpfe „GVFG“ und das neue Programm „Richtlinie zur Förderung alternativer Antriebe im Schienenverkehr“ weisen beiden Antriebsarten die gleiche Förderungsquote zu.

Im **Zielbereich 3** der Umweltaspekte erhielten die Schadstoffemissionen die höchste Gewichtung, da diese einen direkten Einfluss auf die Umwelt und die Bevölkerung vor Ort haben. THG-Emissionen sind auch vor allem wichtig in Bezug auf Klimawandel-relevante Emissionen. Für beide Emissionsarten zeigt sich, dass der BEMU geringfügig besser abschneidet, was vor allem auf den höheren Wirkungsgrad zurückzuführen ist. Eine zukünftige grüne Strom bzw. Wasserstoffproduktion egalisiert die meisten Unterschiede. Beide Antriebsarten zeigen deutliche Vorteile gegenüber der Diesel-Alternative auf. Nicht zu vernachlässigen sind in dem Hinblick auch die potenziellen Synergien, die sich aus der geografischen Lage ergeben. Das Netz liegt mitten in der zukünftigen Wasserstoff-Region Deutschlands (Hypos-Region). Aus der räumlichen Nähe zu der Wasserstoffproduktion bietet ein HEMU-Betrieb Möglichkeiten zur Speicherung von grünem Strom beizutragen und profitiert von kurzen Transportwegen.

**Zielbereich 4** fokussiert sich auf die betriebliche Umsetzbarkeit der Fahrzeugtypen. Dabei wurde das Kriterium der Zuverlässigkeit als besonders wichtig definiert. Da für beide Antriebsarten bisher kaum Erfahrungswerte vorliegen kann keine differenzierte Aussage getroffen werden. Ähnliches gilt für die Instandhaltung der Fahrzeuge. Fehlende Erfahrungswerte können hier aber durch die Komplexität der Fahrzeugtypen approximiert werden. Der BEMU weist durch die verbaute Batterie einen höheren Komplexitätsgrad als

der EMU, aber einen geringeren als der Diesel-Zug auf. Der HEMU stellt ein sehr komplexes System dar, da er zusätzlich zu der Batterie noch eine Brennstoffzelle mitführt. Die Instandhaltung wird als relativ aufwendig für den HEMU angesehen, da er auch eine Umrüstung der Werkstätten voraussetzt. Der organisatorische Aufwand wird für beide Antriebstechnologien als relativ hoch angesehen. Fehlende Erfahrungswerte setzen voraus, dass umfassende Planung in den täglichen Einsatz, der Ermittlung von Reichweiten und der Koordinierung von Lade- bzw. Tankzeiten fließt. Außerdem müssen etwaige Risikoübernahmen, was die Zuverlässigkeit im Betrieb oder Genehmigungen von notwendigen Baumaßnahmen angeht durch den ZVNL übernommen werden. Hierbei profitiert der BEMU erneut von bereits vorhandener Infrastruktur.

Die nachstehenden Ergebnisse der Nutzwertanalyse zeigen, dass der BEMU über alle Zielbereiche hinweg einen höheren Nutzwert erreicht. **Da die zusammengefassten Ergebnisse auf den Resultaten der einzelnen Arbeitspakete basieren, kann eine klare allumfassende Handlungsempfehlung für den BEMU ausgesprochen werden.**

Tabelle 46: Erfüllungswerte und Nutzwert BEMU

**BEMU**

**Infrastruktur und Energiebereitstellung**

Ziele	Erfüllungswert	Gewicht	Kriteriengewichtung
Nutzung bestehender Infrastruktur	7	30%	2,1
Aufwand Infrastrukturertüchtigung	8	20%	1,6
Verfügbarkeit der Energieversorgungskette	8	40%	3,2
Energieeffizienz	9	10%	0,9
<b>Nutzwert:</b>			<b>7,8</b>

**Wirtschaftlichkeit**

Ziele	Erfüllungswert	Gewicht	Kriteriengewichtung
Kosten Infrastruktur	8	10%	0,8
Energiekosten	10	30%	3
Fahrzeugkosten	6	40%	2,4
Förderungsumfang	6	20%	1,2
<b>Nutzwert:</b>			<b>7,4</b>

**Umweltaspekte**

Ziele	Erfüllungswert	Gewicht	Kriteriengewichtung
Schadstoffemissionen	8	40%	3,2
THG-Emissionen	10	30%	3
Lärmemissionen	7	10%	0,7
Regionale Synergien	5	20%	1
<b>Nutzwert:</b>			<b>7,9</b>

**betriebliche  
Umsetzbarkeit**

Ziele	Erfüllungswert	Gewicht	Kriteriengewichtung
Flexibilität der Fahrzeuge	5	10%	0,5
Instandhaltung	7	20%	1,4
Zuverlässigkeit	5	40%	2
Organisatorischer Aufwand	4	30%	1,2
<b>Nutzwert:</b>			<b>5,1</b>

Tabelle 47: Erfüllungswerte und Nutzwert HEMU

**HEMU**

**Infrastruktur und Energiebereitstellung**

Ziele	Erfüllungswert	Gewicht	Kriteriengewichtung
Nutzung bestehender Infrastruktur	1	30%	0,3
Aufwand Infrastrukturertüchtigung	1	20%	0,2
Verfügbarkeit der Energieversorgungskette	5	40%	2
Energieeffizienz	4	10%	0,4
<b>Nutzwert:</b>			<b>2,9</b>

**Wirtschaftlichkeit**

Ziele	Erfüllungswert	Gewicht	Kriteriengewichtung
Kosten Infrastruktur	6	10%	0,6
Energiekosten	3	30%	0,9
Fahrzeugkosten	4	40%	1,6
Förderungsumfang	6	20%	1,2
<b>Nutzwert:</b>			<b>4,3</b>

**Umweltaspekte**

Ziele	Erfüllungswert	Gewicht	Kriteriengewichtung
Schadstoffemissionen	7	40%	2,8
THG-Emissionen	7	30%	2,1
Lärmemissionen	7	10%	0,7
Regionale Synergien	7	20%	1,4
<b>Nutzwert:</b>			<b>7</b>

**betriebliche Umsetzbarkeit**

Ziele	Erfüllungswert	Gewicht	Kriteriengewichtung
Flexibilität der Fahrzeuge	8	10%	0,8
Instandhaltung	4	20%	0,8
Zuverlässigkeit	5	40%	2
Organisatorischer Aufwand	2	30%	0,6
<b>Nutzwert:</b>			<b>4,2</b>

### 6.3 Projektentwicklungsschritte, -zeitplan

Der Aufbau der Fahrzeugflotte muss rechtzeitig vor der Inbetriebnahme des MDSB2025plus erfolgen. Unter Berücksichtigung der Produktionszeiträume und der schrittweisen Auslieferung der benötigten Fahrzeuge muss die Fahrzeugbeschaffung so früh wie möglich, aus heutiger Sicht die Bestellung im Jahr 2022 erfolgen. Damit einher geht die Vergabe der SPNV-Leistungen. Zum Zeitpunkt der Ausschreibung muss für die potenziellen Bieter Klarheit über die Modalitäten der Fahrzeugbeschaffung bestehen.

Wesentliche Verfahrensschritte bei der Umsetzung sind:

#### 6.3.1 Errichtung des Fahrzeugpools

Zunächst ist die Gründung eines Fahrzeugpools als juristische Person erforderlich. Für die Vergabe des SPNV-Netzes MDSB2025plus ist die Gründung einer Fahrzeugpoolgesellschaft in der Rechtsform einer GmbH mit dem ZVNL als alleinigem Gesellschafter sinnhaft. Der Zweckverband selbst kann die Fahrzeuge nicht in sein Vermögen aufnehmen, da kein Gewinn erzielt werden soll.

In der Prüfung weiterer Rechtsformen der juristischen Person stellt sich die GmbH als geeignetste heraus. Es wurden Eigenbetriebe, Regiebetriebe und Kapitalgesellschaften in den Vergleich einbezogen.

Der Grad der Autonomie der Betriebe unter den verschiedenen Rechtsformen gegenüber der beherrschenden Kommune bzw. dem beherrschenden Zweckverband ist von einer breiten Streuung geprägt. Während der Regiebetrieb praktisch keine Autonomie gegenüber der Kommune und der Eigenbetrieb einen allenfalls ärgere eingeschränkten Grad an Autonomie besitzt, ist der Grad Autonomie bei der Rechtsform der GmbH stark ausgeprägt und bei der Aktiengesellschaft am größten.

Die Bestimmungen zum Stammkapital, zur Kreditaufnahme und zum Jahresabschluss sind für die verschiedenen Rechtsformen unterschiedlich. Während der Regiebetrieb als integraler Bestandteil der Verwaltung kein Stammkapital aufweist sowie selbst keine Kredite aufnimmt oder Jahresabschlüsse anfertigt, hat der Eigenbetrieb bereits eine größere organisatorische Autonomie. Gemäß der Satzung kann ein Stammkapital verlangt werden. Ferner hat der Eigenbetrieb einen Kreditrahmen, innerhalb dessen er Kredite aufnehmen kann. Letztlich muss er auch einen Jahresabschluss erstellen. Detail-lierte gesetzliche Vorschriften mit Blick auf das Stammkapital, die Kreditaufnahme und den Jahresabschluss gibt es für die Rechtsform der GmbH.

Das Kommunalabgabenrecht setzt den unmittelbaren Rechtsrahmen für die Gebührenerhebung bei den Rechtsformen Regiebetrieb und Eigenbetrieb. Bei der Rechtsform GmbH ist im Innenverhältnis zwischen Kommune und GmbH das öffentliche

Preisrecht sowie das Kommunalabgabenrecht zu berücksichtigen, sofern die Gebühren bei der Trägerkommune erhoben werden.

Die verschiedenen Rechtsformen unterscheiden sich mit Blick auf das Arbeits- und Tarifrecht sowie die Mitbestimmung und den Personalübergang erheblich. Während Regie- und Eigenbetrieb als rechtlich unselbstständige Bestandteile der Kommunen mit Blick auf das Arbeitsrecht die für die Kommunen geltenden arbeits- und tarifrechtlichen Bestimmungen teilen, ist für die GmbH die Anwendung der arbeits- und tarifrechtlichen Bestimmungen unabhängig von der Trägerkommune zu prüfen. Dies gilt etwa für die Anwendung des TVöD oder auch die Dienstherrenfähigkeit. Beim Personalübergang von der Kommune in eine GmbH sind die Bestimmungen des § 613a BGB zu beachten.

Mit Blick auf die Mitbestimmung gibt es bei Regiebetrieben und Eigenbetrieben die Möglichkeit, eigene, nur für die Dienststelle oder den Eigenbetrieb zuständige Personalräte zu schaffen. Dies ist bei der GmbH immer der Fall. Bestimmte Mitbestimmungsregelungen gibt es für die Aufsichtsorgane bei der GmbH.

Haftung und Insolvenzfähigkeit sind je nach Rechtsform sehr unterschiedlich. Während bei Regie- und Eigenbetrieben sowie Zweckverbänden die Trägerkommunen unbeschränkt haften, haftet die Trägerkommune bei der GmbH nur auf ihre Einlage beschränkt. Aus der Haftungsfrage der Trägerkommune ergibt sich auch die Insolvenzfähigkeit der Unternehmen entsprechend der vorliegenden Rechtsform. Während Eigenbetriebe und Regiebetriebe nicht insolvenzfähig sind, ist die Insolvenzfähigkeit der GmbH immer gegeben.

Bei der Beurteilung des Vergaberechts ist zu unterscheiden zwischen dem Verhältnis der Trägerkommune und der Beauftragung des kommunalen Unternehmens mit den Dienstleistungen einerseits und der Beauftragung externer Dritter mit bestimmten Leistungen durch das kommunale Unternehmen andererseits. Die Anwendung des Vergaberechts bei der Beauftragung des jeweiligen kommunalen Unternehmens durch die Kommune ist beim Regiebetrieb und beim Eigenbetrieb nicht gegeben. Bei der Eigengesellschaft muss hingegen die Inhousefähigkeit derselben geprüft werden. Im Rahmen der externen Vergabe von Dienstleistungen durch das jeweilige kommunale Unternehmen ist für die Rechtsformen Regiebetrieb und Eigenbetrieb im Rahmen der bundes- beziehungsweise landesrechtlichen Regelungen das Vergaberecht einzuhalten, bei der GmbH wäre zunächst zusätzlich zu prüfen, ob diese öffentlicher Auftraggeber ist.

Unter Würdigung der rechtlichen Ausgangssituation, der zukünftigen Handlungsfähigkeit des Zweckverbandes, des Umfangs der beabsichtigten Investitionen und damit verbunden Haftungsrisiken, erscheint die Gründung einer Tochtergesellschaft in der Rechtsform einer GmbH durch den ZVNL als zielführendste Variante. Mögliche ertragsteuerliche Nachteile der Rechtsform der GmbH lassen sich aufgrund der „Übersichtlichkeit“ des Geschäftsmodells minimieren. Die Investition auf Ebene des Zweckverbandes führt unseres Erachtens aufgrund der Rahmenbedingungen (Umsatz, Struktur) zu einem sogenannten Betrieb gewerblicher Art (BgA), der im Wesentlichen steuerlich analog zur Kapitalgesellschaft behandelt wird, so dass die Transaktionskosten einer Kapitalgesellschaft gerechtfertigt sind.

### **6.3.2 Vergabeverfahren für die Verkehrsleistung**

Im Vergabeverfahren für die Verkehrsleistung Mitteldeutsches S-Bahn-Netz kann die Fahrzeugbeschaffung der BEMU erfolgen. Die Bewerber bieten diese neben den Verkehrsleistungen im Sinne eines Lieferanten an. Die Vergabeunterlagen für die

Verkehrsleistung müssen dazu detaillierte Anforderungen an die einzusetzenden BEMU-Fahrzeuge enthalten. Bezogen auf die BEMU-Fahrzeuge ist im Verkehrsvertrag die Verpflichtung des EVU zum Abschluss vorgegebener Verträge mit dem Fahrzeugpool vorzusehen (Grundlagenvereinbarung, Fahrzeuglieferungsvertrag und Pachtvertrag).

Das Vergabeverfahren für die Verkehrsleistung endet mit dem Zuschlag, der zum Abschluss des Verkehrsvertrags einschließlich der Verpflichtung zum Abschluss der genannten Verträge mit dem Fahrzeugpool führt. Der Kaufvertrag zu den BEMU wird dann direkt zwischen der Fahrzeugpool GmbH und dem Hersteller auf Basis der vom EVU angebotenen Fahrzeugkonditionen geschlossen.

Das empfohlene Vorgehen erwirkt vor allem Synergien mit der Vergabe der mit den BEMU durchzuführenden Verkehrsleistung und ist unter wirtschaftlichen und personellen Gesichtspunkten vorteilhaft.

### **6.3.3 Beschaffung Darlehensvertrag durch ZVNL für den Fahrzeugpool**

In der Gründungsphase der GmbH ermittelt der ZVNL den voraussichtlichen Finanzierungsbedarf und holt Angebote für die Finanzierung der Fahrzeuge ein. Gleichzeitig ist die avisierte Förderung mittels InvKG voranzutreiben. Dabei entsteht ein Spannungsfeld aus Höhe der Förderung, Kosten der Fahrzeuge, erforderlicher Kredit und einzubringenden Eigenmittel durch den Fördermittelempfänger. Der ZVNL muss diese vier Teilbereiche fortlaufend miteinander abwägen und kann im Grunde erst mit Eingang der Angebote die vollständige Finanzierung fixieren. Dazu sind zum Abschluss der Verträge die Fördermittelgeber, der eigene Haushalt, ein Finanzdienstleister und der Fahrzeughersteller synchron zu kontaktieren. Da dies ein tiefgreifender Prozess mit unterschiedlichen Abhängigkeiten ist, ist zu empfehlen möglichst früh und regelmäßig in Abstimmung mit Stakeholdern und Akteuren zu treten.

### **6.3.4 Abschluss Verträge zwischen Fahrzeugpool GmbH und EVU**

Im Verkehrsvertrag mit dem EVU sollte eine rechtliche Verknüpfung vorgesehen werden, wonach abgesichert wird, dass das EVU die im Vergabeverfahren um die Verkehrsleistung textlich vorgegebenen Verträge mit der Fahrzeugpool GmbH abschließt (Grundlagenvereinbarung, Fahrzeuglieferungsvertrag und Pachtvertrag). Neben dem Zuschlag zu der avisierten Verkehrsleistung, sind Verpflichtungen des EVU über den Betrieb der Fahrzeuge vertraglich festzulegen. Dies sichert den Werterhalt (Wartung, Instandhaltung, Sicherheit, Einhaltung Gesetze und Normen) der Fahrzeuge

### **6.3.5 Abschluss Darlehensvertrag mit Finanzierungsinstitut**

Nach dem Zuschlag für die Verkehrsleistung und dem Abschluss der Verträge mit dem EVU schließt die Fahrzeugpool GmbH einen Darlehensvertrag mit einem Finanzierungsinstitut zur Finanzierung der BEMU. Dabei sieht sie vorzeitige Ablösungsmöglichkeiten für den Fall von Zuwendungen des Bundes nach dem InvKG vor.

### **6.3.6 Abschluss Herstellervertrag zwischen EVU und Hersteller**

Das EVU schließt den Herstellervertrag mit dem Fahrzeughersteller nach den bereits während der Angebotsfrist für die Verkehrsleistungsvergabe ausgehandelten Bedingungen, die es dem Angebot für die Verkehrsleistung zugrunde gelegt hat. Der Herstellervertrag entspricht den Anforderungen von § 3 Abs. 1 Grundlagenvereinbarung.

### **6.3.7 Abtretung der Gewährleistungsrechte aus dem Herstellervertrag**

Im Fahrzeuglieferungsvertrag zwischen dem EVU und der Fahrzeugpool GmbH ist eine Abtretung der Gewährleistungsrechte enthalten. Diese Rechte gehen damit durch den Abschluss des Fahrzeuglieferungsvertrags ohne weitere Erklärung auf die Fahrzeugpool GmbH über, die daraus gegen den Fahrzeughersteller vorgehen kann.

### **6.3.8 Stellung von Sicherheiten durch das EVU**

Das EVU hat der Fahrzeugpool GmbH die in § 6 Abs. 1 bis 4 Grundlagenvereinbarung genannten Sicherheiten zu stellen. Umfasst sind Sicherheiten für Anzahlungen, die Vertragserfüllung durch das EVU aus der Grundlagenvereinbarung und dem Pachtvertrag, die Instandhaltung sowie für Gewährleistungsansprüche gegenüber dem Hersteller.

### **6.3.9 Fahrzeugbau**

Das EVU ist verpflichtet, den Herstellungsprozess der Fahrzeuge nach den Vorgaben des Herstellervertrags zu überwachen, §§ 3, 7 Fahrzeuglieferungsvertrag. Die Fahrzeugpool GmbH hat Teilnahme- und Kontrollrechte, § 8 Abs. 3 Fahrzeuglieferungsvertrag. Das EVU prüft die Fahrzeuge nach Fertigstellung beim Hersteller, die Fahrzeugpool GmbH hat ein Teilnahmerecht, § 11 Abs. 1 Fahrzeuglieferungsvertrag.

### **6.3.10 Direktzahlung Vergütung für Fahrzeuglieferung an Hersteller**

Die Fahrzeugpool GmbH leistet mit Mitteln aus dem beschafften Darlehen während der Bauphase unmittelbar an den Hersteller Zahlungen nach dem Zahlungsplan mit befreiender Wirkung gegenüber dem EVU, § 22 Abs. 1 Fahrzeuglieferungsvertrag. Dadurch erfüllt auch das EVU seine Zahlungsverpflichtungen gegenüber dem Hersteller.

### **6.3.11 Stellung von Sicherheiten durch Hersteller**

Der Hersteller stellt der Fahrzeugpool GmbH Bürgschaften für Anzahlungen und Gewährleistungsansprüche nach dem Herstellervertrag, diese gehen auf die Fahrzeugpool GmbH über, § 6 Abs. 1 und 2 Grundlagenvereinbarung.

### **6.3.12 Eigentumserwerb durch Fahrzeugpool GmbH und Besitz des EVU**

Die Fahrzeugpool GmbH nimmt die Fahrzeuge vom EVU ab, sofern sie mängelfrei sind, § 11 Abs. 5 Fahrzeuglieferungsvertrag. Das Eigentum an den jeweiligen Fahrzeugen geht mit Erklärung der Abnahme durch die Fahrzeugpool GmbH unmittelbar vom Hersteller auf die Fahrzeugpool GmbH über, § 12 Abs. 2 Fahrzeuglieferungsvertrag. Die Fahrzeuge gehen mit Abnahme unmittelbar in den Besitz des EVU über, § 12 Abs. 2 Fahrzeuglieferungsvertrag.

### **6.3.13 Pachtvertrag und Pachtzahlungen des EVU**

Die Pachtzeit beginnt unmittelbar nach Abnahme der Fahrzeuge durch die Fahrzeugpool GmbH, §§ 2 Abs. 3, 3 Abs. 1 Pachtvertrag. Die Pachtzahlungen nach § 5 Abs. 1 Pachtvertrag beginnen nach dem Zahlungsplan, der nicht in den vorliegenden Dokumenten enthalten ist. Es spricht viel dafür, Pachtzahlungen erst ab Betriebsaufnahme vorzusehen, damit diese aus dem Bestellerentgelt gedeckt werden können.

### **6.3.14 Verkehrsleistung**

Das EVU erbringt ab Dezember 2025 bis Dezember 2037 die Verkehrsleistung, ist Halter der Fahrzeuge, § 4 Abs. 2 Pachtvertrag, versichert sie, § 7 Grundlagenvereinbarung, und ist verantwortlich für ihre Instandhaltung, § 6 Abs. 1 Pachtvertrag.

Das EVU und die Fahrzeugpool GmbH bilden eine Controllinggruppe zur gegenseitigen Information und zur Überwachung der ordnungsgemäßen Instandhaltung, § 5 Grundlagenvereinbarung, § 13 Pachtvertrag.

Da von der Zuschlagerteilung bis zur Inbetriebnahme der Fahrzeuge ein Zeitraum von rd. 40 Monaten zu veranschlagen ist und MDSB205plus zum Fahrplanwechsel 2025 an den Start gehen soll, muss zur Zuschlagserteilung die Fahrzeugpool GmbH gegründet sein.

Bis zur Zuschlagserteilung an das in der Ausschreibung obsiegende Verkehrsunternehmen - diese sollte Anfang 2022 erfolgen, um den o.g. Zeitplan einzuhalten – sollte die Fahrzeugpool GmbH personell und materiell ausgestattet werden und mit Finanzierungsdienstleistern die Konditionen der Fremdkapitalbeschaffung vorgeklärt werden (der endgültige Kapitalbedarf wird erst mit der Zuschlagserteilung sowie nach der Entscheidung über etwaige Fördermittel klar). Lt. Sächsischer Agentur für Strukturentwicklung wird noch in 2021 abschließend geklärt, wie viel und über welchen Zeitraum (Jahrestranchen) der ZVNL Fördermittel nach dem Strukturstärkungsgesetz erhält.

Voraussetzung für eine Beschlussfassung über die Gründung eines Fahrzeugpools ist die Herstellung der satzungsmäßigen Voraussetzungen. Mit dem Beschluss 11/2020 hat der ZVNL eine Aufgabenerweiterung einschl. von Maßnahmen zur Beschaffung, Finanzierung und Veräußerung von SPNV-Fahrzeugen sowie Überlassung solcher zur Nutzung an Eisenbahnverkehrsunternehmen beschlossen. Diese bedarf zunächst des Abschlusses eines öffentlich-rechtlichen Vertrags durch die Verbandsmitglieder, der dann durch die Landesdirektion genehmigt werden muss. Ein entsprechender Entwurf ist den Verbandsmitgliedern bereits mit der Bitte um Befassung ihrer zuständigen Gremien zugegangen.

Sobald der öffentlich-rechtliche Vertrag rechtsverbindlich ist, kann darauf aufbauend eine entsprechende Satzungsänderung beschlossen werden – auch hierzu liegt den Verbandsmitgliedern schon ein Textentwurf vor, der ebenfalls der Genehmigung durch die Landesdirektion bedarf. Es ist daher anzustreben, bis zu der Verbandsversammlung, auf der die Veröffentlichung der Ausschreibung des MDSB2025plus-Netzes erfolgen soll, die Voraussetzungen für die Einrichtung des Fahrzeugpools zu schaffen.

Die Fahrzeugpool GmbH sollte zu Beginn des Jahres 2022 gegründet werden, um parallel zu den für das Jahr 2022 geplanten Zuschlag für die Verkehrsdienstleistung die Fahrzeugbeschaffung vorzubereiten. Die GmbH würde sich die zwecks Fahrzeugfinanzierung erforderlichen Kredite beschaffen und die Beschaffungskosten bei der Festlegung der Pachthöhe für die Vermietung der Fahrzeuge berücksichtigen. Sofern dann eine Förderung von dritter Seite (Strukturstärkungsgesetz etc.) erfolgt, könnten die Kredite vorzeitig abgelöst werden, wodurch sich die Pachthöhe ggfs. reduzieren würde.

Es wird empfohlen, hinsichtlich der Vereinbarkeit mit § 94a SächsGemO bzw. dem Erfordernis einer Satzungsänderung eine Auskunft bei der Landesdirektion einzuholen.

### 6.3.15 Zeitplan

In **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** sind die erforderlichen Schritte bis zur Verkehrsleistung nochmals zusammengefasst und die angegebene Zeiteinteilung beigefügt. Die einzelnen Projektschritte sind jeweils abhängig von dem Beschluss und dem Turnus der Zweckverbandversammlung

Tabelle 48 Projektzeitplan

	<b>Projektschritt</b>	<b>Geschätzte Dauer</b>	<b>Bemerkung</b>	<b>Zeitraum</b>
1	Gründung Fahrzeugpool GmbH	3-4 Wochen	Vor dem Zuschlag, Bedingung für weitere Schritte	Anfang 2022
2	Ausstattung der Fahrzeugpool GmbH	6-8 Monate	Fertig bei Zuschlag	Juni 2022
3	Vorabklärung der Fremdkapitalbeschaffung	6 Monate	inkl. Markterkundung	1. Quartal 2022
4	Zuschlag für die Verkehrsleistung	6 Monate	Bedingung für weitere Schritte	1. Quartal 2022
5	Abschluss Herstellervertrag für die Fahrzeuge	2 Monat	Bedingung für weitere Schritte	2. Quartal 2022
6	Fahrzeugpool GmbH: Kreditbeschaffung bzw. Fördermittelbescheid zur Finanzierung der Fahrzeuge	2 Monate	mit Herstellervertrag zwischen Hersteller und ZVNL	2. Quartal 2022
7	Bauzeit der Fahrzeuge	3 Jahre	Abnahme bis Betriebsbeginn	Ab Herstellervertrag bis 2025
8	Errichtung der notwendigen Infrastruktur	3 Jahre	Abnahme bis Betriebsbeginn	Ab Zuschlag bis 2025
9	Verkehrsleistung	12 Jahre	Verkehrsvertrag	Dez. 2025 – Dez. 2037

Der Zeitplan avisiert unter Berücksichtigung der einzelnen Projektschritte eine Dauer von vier Jahren ab dem notwendigen Verbandsbeschluss (November 2021).

## 6.4 Literatur

- [1] ZVNL, Sozietät Röber & Hess: Schriftsatz Mögliche Rechtsform eines Fahrzeugpools: (internes Papier)
- [2] Bünger, Ulrich; Zerhusen, Jan; Ritter, Michael; Heyn, Jürgen; Hielscher, Daniel; (2018), Machbarkeitsstudie H<sub>2</sub>-Schienenverkehr in Mitteldeutschland
- [3] Zwischenpräsentation, Ergebnisbericht der AP 1 bis 5
- [4] Vergabeunterlagen Mitteldeutsches S-Bahn-Netz
- [5] ZVNL: Marktanalyse Schienenfahrzeughersteller (internes Papier)