Bericht

SteFanS

Strategie
für lokal-emissionsfreie Fahrzeuge
auf nicht elektrifizierten Strecken

Karlsruhe, Dezember 2022

Transport Technologie - Consult Karlsruhe GmbH

komobile

in Zusammenarbeit mit AXEL KÜHN

Bericht

SteFanS

Strategie für lokal-emissionsfreie Fahrzeuge auf nicht elektrifizierten Strecken

Auftraggeber:
NVBW – Nahverkehrsgesellschaft Baden-Württemberg mbH
Wilhelmsplatz 11
70182 Stuttgart

Auftragnehmer:
TransportTechnologie-Consult Karlsruhe GmbH (TTK)
Durlacher Allee 73, D-76131 Karlsruhe;
Komobile GmbH
A-1070 Wien, Schottenfeldgasse 51/17

Bearbeiter:
Dipl.-Ing. Pierre-Alain Boeswillwald (TTK)
Dr.-Ing. Kilian Berthold (TTK)
M.Sc. Annmarie Jensen (TTK)
Dipl.-Ing. Margarethe Staudner (komobile)
Dr.-Ing. Romain Molitor (komobile)
M.Sc. Sebastian Reimann
Dipl.-Ing. (FH) Axel Kühn

Karlsruhe, Dezember 2022

Transport Technologie - Consult Karlsruhe GmbH

komobile

in Zusammenarbeit mit AXEL KÜHN

Inhaltsverzeichnis

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis 9

Glossar 17

Quellen 20

1 Kurzfassung Studienergebnisse 21

2 Einleitung/Aufgabenstellung 26

3 Grundlagenermittlung 31

3.1 Blick in die Genehmigungs- und Normenwelt 31

3.1.1 Genehmigungsaspekte 31

3.1.2 Normen und Vorschriften 33

3.2 Literaturauswertung 33

3.3 Hintergrundrecherchen/Kontaktierungen 34

4 Stand der Technik / Technologietrends im Bereich „alternative Antriebe“ 36

4.1 Grundsätzliches zur Technologieeignung 36

4.1.1 Reichweitendiskussion 36

4.1.2 Fahrzeuggewicht 37

4.1.3 Betriebliche Flexibilität 38

4.1.4 Wirkungsgrade 39

4.2 Technologiekomponenten „alternativer Antriebe“ 40

4.2.1 BEMU-Technologie 40

4.2.2 HEMU-Technologie 50

4.3 Nachhaltigkeitsaspekte (Rohstoffe, Herstellung, …) 62

4.3.1 Batterien 62

4.3.2 Brennstoffzellen und Elektrolyseure 63

4.3.3 Stromerzeugung und Wasserstoffproduktion 63

4.3.4 Wasserbedarf und Wasserstoffproduktion 63

5 Fahrzeugmarkt EMU / BEMU / HEMU / Sonstige 64

5.1 EMU-Fahrzeuge 65

5.2 BEMU-Fahrzeuge 66

5.3 HEMU-Fahrzeuge 69

5.4 Diesel-Hybrid-Fahrzeuge 72

5.5 Markttrend für SPNV-Fahrzeuge 73

5.6 Lokomotiventwicklungen mit alternativen Antrieben 74

6 Projekte und Projektüberlegungen im Themenfeld „alternative Antriebe“ 76
6.1 BEMU-Projektanwendungen 76
6.1.1 XMU-Netz Schleswig-Holstein 76
6.1.2 Ortenaunetz Baden-Württemberg 78
6.1.3 Pfalznetz 79
6.1.4 Batteriezüge Leipzig-Chemnitz (VMS) 80
6.1.5 Niederrhein-Münsterland-Netz (VRR/ZWL) 81
6.1.6 Weitere deutsche Projekte bzw. Projektansätze 82
6.1.7 Internationale Projekte 83
6.2 HEMU-Projektanwendungen 85
6.2.1 LNVG Elbe-Weser (EVB) 85
6.2.2 RMV Taunusbahn 86
6.2.3 Heidekrautbahn 88
6.2.4 Schwarzatal-Projekt Thüringen 89
6.2.5 Mühldorfer Stern (BEG) 91
6.2.6 Weitere deutsche Projekte bzw. Projektansätze 92
6.2.7 Internationale Projekte 93
7 Grundsätzliche Festlegungen für die Studie 96
7.1 Unterscheidung Machbarkeit / Wirtschaftlichkeit 96
7.2 Berücksichtigung von Förderungsaspekten 96
7.3 Grundbedingung „grüne Energieversorgung“ 97
7.4 Umwelt- und Emissionsdiskussion 97
7.5 Von Einzelstrecken zu regionalen Teilnetzen 98
7.6 Weitere Festlegungen / untersuchte Technologien 99
7.7 Einbeziehung qualitativ / strategischer Aspekte 100
7.8 Methodik für Betriebssimulationen und Energieflussberechnungen 100
7.8.1 Bemessungsfahrzeuge 100
7.8.2 Iterative Betrachtung (Infrastrukturszenarien) 101
7.8.3 Betriebliche Simulation (Open Track) 102
7.8.4 Excel-Tool 103
7.8.5 Betriebskonzepte und Fahrzeugbedarfe 103
7.8.6 Energieverbrauch / Festlegungen für Simulation 105
7.9 Methodik für Infrastrukturbetrachtungen 107
7.9.1 Elektrifizierung und Elektrifizierungskomplexität 107
7.9.2 Unterschiede in der Betrachtung EMU, BEMU und HEMU 109

7.10 Methodik für die Ermittlung des Fahrzeugbedarfs 110
7.10.1 Betriebs- und Instandhaltungsreserve 110
7.10.2 Unterschiede in der Betrachtung EMU, BEMU, HEMU 110
7.10.3 Achslastbetrachtung und Passagierkapazität 110
7.11 Methodik für Wirtschaftlichkeitsbetrachtung 112
7.11.1 Grundsätzliches 112
7.11.2 Betrachtungszeitraum 114
7.11.3 Restwertbetrachtung für Elektrifizierungsmaßnahmen 114
7.11.4 TCO-Vorgehensweise 114
8 Kostenparameter und Festlegungen für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung 116
8.1 Investitionskosten 116
8.1.1 Infrastruktur für den Bahnbetrieb 116
8.1.2 Fahrzeugkosten 121
8.2 Betriebskosten 123
8.2.1 Betriebskosten Fahrzeuge 123
8.2.2 Betriebskosten aufgrund Komponententausch 125
8.2.3 Betriebskosten Infrastruktur 125
8.3 Energiekosten 126
8.3.1 Stromkosten 127
8.3.2 Wasserkosten 129
8.3.3 Resultierender Wasserstoffpreis für SteFanS-Studie 129
8.3.4 Transportkosten Wasserstoff 130
8.4 Kostenentwicklung über die Zeit 130
9 Strecken- und Teilnetz-Analyse 132
9.1 Teilnetz 1 „Nagoldtalbahn“ (TCO 1) 132
9.1.1 Infrastrukturszenarien 134
9.1.2 Linie Pforzheim-Horb 135
9.1.3 Linie Pforzheim-Nagold 138
9.1.4 Betriebsstatistik Teilnetz 139
9.1.5 Infrastruktur- und Fahrzeugbedarf Teilnetz 139
9.1.6 Ergänzende Betrachtungen zum Teilnetz 140
9.2 Teilnetz 2 „Donautalbahn Plus“ (TCO 2) 141
9.2.1 Strecke Ulm-Herbertingen-Sigmaringen-Tuttlingen 143
9.2.2 Strecke Aulendorf – Sigmaringen 151
9.2.3 Betriebsstatistik Teilnetz 153
9.2.4 Infrastruktur- und Fahrzeugbedarf Teilnetz 154

9.2.5 Ergänzende Betrachtungen zum Teilnetz 155
9.2.6 Zusätzliche Streckenbetrachtungen (nur BEMU) 156
9.3 Teilnetz 3 „RS Bodensee-Oberschwaben“ (TCO 3) 167
9.3.1 Infrastrukturszenarien 168
9.3.2 Linie Friedrichshafen-Aulendorf-Kißlegg-Leutkirch 169
9.3.3 Linie Aulendorf-Kißlegg-Wangen 170
9.3.4 Betriebsstatistik Teilnetz 171
9.3.5 Infrastruktur- und Fahrzeugbedarf Teilnetz 172
9.3.6 Ergänzende Betrachtungen zum Teilnetz 172
9.4 Teilnetz 4 „Westfrankenbahn“ (TCO 4) 173
9.4.1 Strecke Miltenberg-Lauda/Königshofen-Crailsheim 175
9.4.2 Strecke Miltenberg-Seckach 180
9.4.3 Betriebsstatistik Teilnetz 182
9.4.4 Infrastruktur- und Fahrzeugbedarf Teilnetz 183
9.4.5 Ergänzende Betrachtungen zum Teilnetz 184
9.5 Teilnetz 5 „Hohenlohebahn“ (TCO 5) 185
9.5.1 Infrastrukturszenarien 186
9.5.2 Linie Heilbronn-Schwäbisch Hall/Hessental 186
9.5.3 Linie Öhringen-Schwäbisch Hall/Hessental 188
9.5.4 Betriebsstatistik Teilnetz 188
9.5.5 Infrastrukturbedarf und Fahrzeugbedarf Teilnetz 189
9.5.6 Ergänzende Betrachtungen zum Teilnetz 189
9.6 Teilnetz 6 „Raum Stuttgart“ (TCO 6) 190
9.6.1 Strecke / Linie Korntal-Weissach („Strohgäubahn“) 191
9.6.2 Strecke / Linie Kirchheim/Teck-Oberlenningen („Teckbahn“) 192
9.6.3 Strecke Nürtingen-Neuffen („Tälesbahn“) 194
9.6.4 Betriebsstatistik Teilnetz 195
9.6.5 Infrastrukturbedarf und Fahrzeugbedarf Teilnetz 196
9.6.6 Ergänzende Betrachtungen zum Teilnetz 196
9.7 Zusammenfassende Betrachtungen 197
9.7.1 Energieverbrauch im Streckenvergleich 197
9.7.2 Einfluss zeitlicher Aspekte 200
9.7.3 Relevanz Reaktivierungsstrecken 201
9.7.4 Relevanz Güterverkehr 204
9.7.5 Synergieeffekte 204
9.7.6 Fahrzeugbeschaffung / Werkstattstandorte 207

10 Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung 210
10.1 Teilnetz 1 „Nagoldtalbahn“ (TCO 1) 210
10.1.1 Betrachtung „Standard“ 210
10.1.2 Betrachtung „Spezial 1“ 211
10.1.3 Betrachtung „Spezial 2“ 211
10.1.4 Betrachtung „Spezial 3“ 212
10.1.5 Betrachtung „Spezial 4 („BEMU light“)“ 213
10.1.6 Betrachtung „Spezial 4 („HEMU günstig“)“ 214
10.1.7 Empfehlung 215
10.2 Teilnetz 2 „Donautalbahn Plus“ (TCO 2) 215
10.2.1 Betrachtung „Standard“ 215
10.2.2 Betrachtung „Spezial 1“ 216
10.2.3 Betrachtung „Spezial 3“ 216
10.2.4 Empfehlung 217
10.3 Teilnetz 3 „RS Bodensee-Oberschwaben“ (TCO 3) 217
10.3.1 Betrachtung „Standard“ 217
10.3.2 Betrachtung „Spezial 1“ 218
10.3.3 Betrachtung „Spezial 3“ 219
10.3.4 Empfehlung 219
10.4 Teilnetz 4 „Westfrankenbahn“ (TCO 4) 219
10.4.1 Betrachtung „Standard“ 220
10.4.2 Betrachtung „Spezial 1“ 220
10.4.3 Betrachtung „Spezial 3“ 221
10.4.4 Empfehlung 221
10.5 Teilnetz 5 „Hohenlohebahn“ (TCO 5) 222
10.5.1 Betrachtung „Standard“ 222
10.5.2 Betrachtung „Spezial 1“ 222
10.5.3 Betrachtung „Spezial 3“ 223
10.5.4 Betrachtung „Spezial 4“ („Langläufer“) 223
10.5.5 Empfehlung 224
10.6 Teilnetz 6 „Raum Stuttgart“ (TCO 6) 224
10.6.1 Betrachtung „Standard“ 224
10.6.2 Betrachtung „Spezial 1“ 225
10.6.3 Betrachtung „Spezial 3“ 225
10.6.4 Empfehlung 226
11 Erweiterung der TCO-Empfehlungen zu einer Gesamtempfehlung 227

12 Zusammenfassung / Gesamtempfehlung 231

13 Literatur 237

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abb. 1: Elektrifizierungskonzept Baden-Württemberg (Kartenübersicht) 26

Abb. 2: Untersuchungsgebiet und zu untersuchende Strecken (Stand 7/2021) 27

Abb. 3: RB-Linien Ostbrandenburg – elektrifizierte / nicht elektrifizierte Abschnitte 28

Abb. 4: Dieselbetrieb auf elektrifizierten Teilstrecken 28

Abb. 5: Gesamtkostenvergleich ÖBB / alternative Antriebe auf Dieselstrecken 29

Abb. 6: Genehmigungsaspekte einer Wasserstofftankstelle (Thüringen) 32

Abb. 7: Reichweiten DMU-BEMU-HEMU im Vergleich zur Tagesfahrleistung 36

Abb. 8: Vergleich von Batterieparametern bei BEMU/HEMU-Fahrzeugen 38

Abb. 9: Wirkungsgradvergleiche Wasserstoff vs. andere 39

Abb. 10: Energieeffizienz Batterie PV Europa vs. Wasserstoff PV Nordafrika 40

Abb. 11: Batteriefahrzeuge im historischen Kontext 41

Abb. 12: Batterietechnologien und Gewichtsverhältnisse 41

Abb. 13: Vergleich von Kenndaten historischer / aktueller Batteriefahrzeuge 41

Abb. 14: Batteriekennwerte im Vergleich 42

Abb. 15: Lithium-Ionen Batterien (Untergruppen) 43

Abb. 16: Vergleich der Kennwerte von NMC- und LTO-Batterien 43

Abb. 17: Multikriterienanalyse zum Vergleich von LFP, NMC und LTO-Batterien 44

Abb. 18: Eingesetzte Batterietechnologien 44

Abb. 19: Kenndaten von „High Power“- und „High Energy“-Batterien 45

Abb. 20: Mittelfristige Entwicklungstendenzen im Batteriesektor (Gewicht<>Kapazität) 46

Abb. 21: Zusammenhang zwischen DoD, Ladezyklen und C-Koeffizient 46

Abb. 22: Zusammenhang zwischen DoD und Ladezyklen 47

Abb. 23: Bahnstromversorgungsalternativen für Oberleitungsinseln 48

Abb. 24: VOLTAP-Ladestation – Test in Pfäffingen mit Flirt Akku-Prototyp 49

Abb. 25: Stationäre Ladeeinrichtungen (Elektranten, Zugvorheizanlagen) 49

Abb. 26: Vivarail-Konzept für Schnellladestationen 50

Abb. 27: Vivarail-Ladestation: Stromschiene im Gleisbereich 50

Abb. 28: Effizienz einer Brennstoffzelle (Systemebene) 51

Abb. 29: Mireo+H – Reichweite für 2-teiliges Fahrzeug 52

Abb. 30: Kapazitäten und Gewichte von Wasserstofftanks 52

Abb. 31: Dachposition der Wasserstofftanks beim Siemens Mireo+H-Fahrzeug 53

Abb. 32: Nichtlineare Abhängigkeit Tankinhalt <> Druck 53

Abb. 33: 500 bar Wasserstoffspeicher für Tankstelle Infraserv Höchst 54

Abb. 34: MEGC-Container mit Typ IV Druckbehältern 54

Abb. 35: Dieseltankstelle der EVB im erweiterten Bahnhofsbereich (Bremervörde) 55

Abb. 36: Beispieldarstellung einer Wasserstoff-Schienentankstelle 55
Abb. 37: Wasserstofftankstelle Bremervörde (Bauzustand) 56
Abb. 38: Standorte von Dieseltankstellen in Baden-Württemberg (nur DB-Tankstellen) 57
Abb. 39: Gefahrguteinstufung Wasserstoff nach ADR 58
Abb. 40: Untersuchung zum Schienentransport von Wasserstoff 58
Abb. 41: Effizienzen und Lebensdauern der unterschiedlichen Elektrolysemethoden 59
Abb. 42: Sylizer 300 Produktbeschreibung 60
Abb. 43: HyLizer-1000 Elektrolyseur – technische Daten 60
Abb. 44: Systemlayout einer 5 MW-PEM-Elektrolyseanlage 61
Abb. 45: Brandverhalten von Wasserstoff und Benzin im Vergleich 62
Abb. 46: Grundsätzliche Antriebskonzepte für den SPNV 64
Abb. 47: Übersicht zu marktgängigen EMU-, BEMU- und HEMU-Fahrzeugen 65
Abb. 48: Talent 3-Prototypfahrzeug von Alstom (ex Bombardier) 66
Abb. 49: Cityjet Eco-Prototypfahrzeug auf Desiro ML-Basis 66
Abb. 50: Flirt Akku-Prototypfahrzeug 66
Abb. 51: Batteriefahrzeug auf Coradia Continental-Basis für VMS-Netz 67
Abb. 52: Stadler Flirt Akku-Konzept für Schleswig-Holstein 67
Abb. 53: CAF-Civity-BEMU-Konzeptüberlegungen 68
Abb. 54: CAF-Civity-Lieferkonzept VRR 68
Abb. 55: Absichtserklärungen von vier Bundesländern 2014 69
Abb. 56: CAF-Konzept mit „Antriebsmodul“ für HEMU-Fahrzeuge auf Civity-Basis 71
Abb. 57: Stadler Flirt H2 für San Bernardino 71
Abb. 58: Bi-modale französische Fahrzeugkonzepte 73
Abb. 59: Marktentwicklung BEMU <> HEMU 2017-2022 73
Abb. 60: Studie „Innovatives Triebfahrzeug“ (2020) 74
Abb. 61: Kernergebnisse der BMVI-Studie „Innovatives Triebfahrzeug“ 74
Abb. 62: Alstom H3 – erste Lithium-Ionen Hybrid Lokomotive Europas 75
Abb. 63: FLXDRIVE Batterielokomotive 75
Abb. 64: Brennstoffzellenlokomotive von PESA 75
Abb. 65: Akku-Netz Schleswig-Holstein 77
Abb. 66: Ortenaunetz als potenzieller Wasserstoff-Pilot 2016 78
Abb. 67: Pfalznetz (Los 1) mit Darstellung der geplanten Oberleitungsinseln 80
Abb. 68: Netz der Mitteldeutschen Regionalbahn (MRB) 80
Abb. 69: Niederrhein-Münsterland-Netz (VRR/ZWL) 81
Abb. 70: ÖBB-Markterkundung für Batteriefahrzeuge 83
Abb. 71: COP26 Glasgow – Prince Charles besichtigt das Vivarail-Batteriefahrzeug 85
Abb. 72: Wasserstoffprojekt im EVB-Netz 85

Abb. 73: Das hessische Taunusbahn-Netz 87
Abb. 74: Linienverlauf und Netzeinbindung der Heidekrautbahn 88
Abb. 75: Teilprojekte und Partner im Projekt Heidekrautbahn 89
Abb. 76: Übersichtskarte Eisenbahnnetz Thüringen 90
Abb. 77: Pressemitteilung zu bayrischen Wasserstoffplänen im SPNV (2019) 91
Abb. 78: Ausschreibungsnetz Mühldorfer Stern 91
Abb. 79: Onlinebericht zur BEG-Ausschreibung Mühldorfer Stern 2021 92
Abb. 80: Co2-Emissionen Diesel-EMU/BEMU-HEMU bezogen auf Strommix 97
Abb. 81: Vorgehensweise zur Betrachtung der Batteriekapazität 105
Abb. 82: Simulationsergebnisse zu Diesel- und Wasserstoffverbrauch 106
Abb. 83: Beispiel eines für eine Elektrifizierung ungeeigneten Bestandstunnels 107
Abb. 84: Beispiel einer für eine Elektrifizierung ungeeigneten Bestands-Straßenbrücke 107
Abb. 85: Beispiel für Anhebung einer Brücke im Zuge einer Elektrifizierung 108
Abb. 86: Spezifische Kosten von Oberleitungsanlagen (ein-/zweigleisig, Topografie) 108
Abb. 87: Vergleich Desiro <> Mireo (ohne <> mit Jacobs-Drehgestellen) 111
Abb. 88: Fahrzeugkonfigurationen und Streckenklassen bzw. Reichweiten 111
Abb. 89: Dynamische Betrachtung Energie / Komponenten (Beispiel) 112
Abb. 90: Vorgehensweise bei einer Kapitalwertmethode 113
Abb. 91: Standortsuche Wasserstofftankstelle Rottenbach / Thüringen 116
Abb. 92: Umrichterwerk Niederbiegen auf der Südbahn 118
Abb. 93: Unterwerk Eutingen 118
Abb. 94: Künftige Oberleitungsinsel Pirmasens Nord im Rahmen des Pfalznetzes 119
Abb. 95: Flächenbedarf Wasserstofftankstelle Bremervörde 120
Abb. 96: Kostenansätze Elektrolyseur/Tankstelleninfrastruktur 120
Abb. 97: Kostenansätze Elektrolyseur/Tankstelleninfrastruktur 120
Abb. 98: Bestellung eines 1 MW-Elektrolyseurs (2020) 121
Abb. 99: Vergleich Fahrzeugpreise 2017 und 2021 (TU Dresden) 122
Abb. 100: Kostentrend EMU <> BEMU von 2017 nach 2021 122
Abb. 101: Kostentrend EMU <> HEMU von 2017 nach 2021 123
Abb. 102: Kostenanteile der HEMU-Technologiekomponenten 124
Abb. 103: Ökostrom im Nahverkehr Baden-Württemberg 127
Abb. 104: Einfluss von Technologie- und Kostenentwicklung auf den Wasserstoffpreis 128
Abb. 105: Konservatives Energiepreisszenario (IZT 2020) 130
Abb. 106: Erwartete Kostentrends im Wasserstoffbereich 2020-2050 130
Abb. 107: Batteriepreisentwicklung 131
Abb. 108: Aktualisierte Strecken mit Untersuchungsmethodik 132
Abb. 109: Strecke und Linienabschnitte der Nagoldtalbahn 133

Abb. 110: Höhenprofil von Pforzheim nach Horb 134
Abb. 111: Infrastrukturszenario 0 Pforzheim – Horb 135
Abb. 112: Infrastrukturszenario 3a Pforzheim – Horb 135
Abb. 113: Auszug Fahrplan Pforzheim - Horb 136
Abb. 114: Auszug Fahrplan Horb – Pforzheim 136
Abb. 115: Übersicht Machbarkeit Infrastrukturszenarien 137
Abb. 116: SOC Pforzheim – Horb (BEMU-RE, Infrastrukturszenario 3a Plus) 137
Abb. 117: Energiebedarf Pforzheim–Horb (HEMU-RB) 137
Abb. 118: SOC Pforzheim – Nagold (BEMU-RB, Infrastrukturszenario 3a) 138
Abb. 119: Energiebedarf Pforzheim–Nagold (HEMU-RB) 138
Abb. 120: Fahrleistung pro Fahrzeug der Nagoldtalbahn 139
Abb. 121: Donautalbahn und Strecke Aulendorf-Sigmaringen 142
Abb. 122: Höhenprofil von Ulm nach Tuttlingen 142
Abb. 123: Höhenprofil von Aulendorf nach Sigmaringen 143
Abb. 124: Infrastrukturszenario 0 Ulm – Tuttlingen 143
Abb. 125: Infrastrukturszenario 9a Ulm – Tuttlingen 144
Abb. 126: Auszug Fahrplan Ulm – Tuttlingen 145
Abb. 127: Auszug Fahrplan Tuttlingen – Ulm 146
Abb. 128: SOC-Verlauf Ulm – Blaubeuren (BEMU RB, Infrastrukturszenario 0 bzw. 9a) 147
Abb. 129: Energiebedarf Ulm–Blaubeuren (HEMU-RB) 147
Abb. 130: SOC-Verlauf Ulm – Munderkingen (BEMU RB, Infrastrukturszenario 9a) 148
Abb. 131: Energiebedarf Ulm–Munderkingen (HEMU-RB) 148
Abb. 132: SOC Ulm–Tuttlingen (BEMU-RE, Infrastrukturszenario 9a) 149
Abb. 133: Übersicht Machbarkeit Infrastrukturszenarien 149
Abb. 134: Energieverbrauch Ulm–Tuttlingen (HEMU-RE) 150
Abb. 135: SOC Ehingen–Herbertingen (BEMU RB, Infrastrukturszenario 9a) 150
Abb. 136: Energiebedarf Herbertingen – Ehingen (HEMU RE) 151
Abb. 137: Infrastrukturszenario 0 Aulendorf – Sigmaringen 151
Abb. 138: Infrastrukturszenario 9a Aulendorf – Sigmaringen 151
Abb. 139: Fahrplan Aulendorf – Sigmaringen 152
Abb. 140: Fahrplan Sigmaringen – Aulendorf 152
Abb. 141: SOC Aulendorf – Sigmaringen (BEMU RB, Infrastrukturszenario 9a) 152
Abb. 142: Energiebedarf Aulendorf – Sigmaringen (HEMU RB) 153
Abb. 143: Fahrleistung pro Fahrzeug der „Donautalbahn Plus“ 153
Abb. 144: Teilstrecken Tuttlingen-Immendingen-Blumberg („Ringzugkonzept“) 156
Abb. 145: Infrastrukturszenario 0 Tuttlingen – Blumberg-Riedöschingen 157
Abb. 146: SOC Tuttlingen-Immendingen (BEMU RB, Infrastrukturszenario 0) 157

Abb. 147: SOC Immendingen-Tuttlingen (BEMU RB, Infrastrukturszenario 0) 158
Abb. 148: SOC Immendingen-Blumberg/Riedöschingen (BEMU RB, Infrastrukturszenario 0) 158
Abb. 149: SOC Blumberg/Riedöschingen-Immendingen (BEMU RB, Infrastrukturszenario 0) 158
Abb. 150: SOC Tuttlingen-Blumberg/Riedöschingen (BEMU RB, Infrastrukturszenario 0) 159
Abb. 151: SOC Blumberg/Riedöschingen-Tuttlingen (BEMU RB, Infrastrukturszenario 0) 159
Abb. 152: Strecke der Ablachtalbahn 160
Abb. 153: Infrastrukturszenario 0 Mengen-Radolfzell („Ablachtalbahn“) 161
Abb. 154: SOC Mengen-Stockach (BEMU RB, Infrastrukturszenario 0) 161
Abb. 155: SOC Stockach-Mengen (BEMU RB, Infrastrukturszenario 0) 161
Abb. 156: SOC Mengen-Radolfzell (BEMU RB, Infrastrukturszenario 0) 162
Abb. 157: SOC Radolfzell-Mengen (BEMU RB, Infrastrukturszenario 0) 162
Abb. 158: SOC Radolfzell-Meßkirch (BEMU-RB, Infrastrukturszenario 0) 162
Abb. 159: SOC Meßkirch-Radolfzell (BEMU-RB, Infrastrukturszenario 0) 163
Abb. 160: Strecke Hechingen – Sigmaringen 164
Abb. 161: Höhenprofil von Hechingen nach Sigmaringen 165
Abb. 162: Fahrplan Hechingen-Sigmaringen 165
Abb. 163: Fahrplan Sigmaringen-Hechingen 165
Abb. 164: Infrastrukturszenario 0 Hechingen – Sigmaringen 166
Abb. 165: Hechingen-Gammertingen (BEMU RB, Infrastrukturszenario 0) 166
Abb. 166: Hechingen-Sigmaringen (BEMU RB, Infrastrukturszenario 0) 166
Abb. 167: Strecken bzw. Linien der RS Bodensee-Oberschwaben 167
Abb. 168: Höhenprofil von Friedrichshafen nach Leutkirch 168
Abb. 169: Höhenprofil von Aulendorf nach Wangen 168
Abb. 170: Infrastrukturszenario 0 Leutkirch – Friedrichshafen Stadt 168
Abb. 171: Infrastrukturszenario 0 Aulendorf – Kißlegg – Wangen 169
Abb. 172: Fahrplan Leutkirch-Friedrichshafen 169
Abb. 173: Fahrplan Friedrichshafen–Leutkirch 170
Abb. 174: SOC Leutkirch–Friedrichshafen (BEMU-RE, Infrastrukturszenario 0) 170
Abb. 175: Fahrplan Wangen-Aulendorf 171
Abb. 176: Fahrplan Aulendorf-Wangen 171
Abb. 177: SOC Wangen-Aulendorf (BEMU RB, Infrastrukturszenario 0) 171
Abb. 178: Fahrleistung pro Fahrzeug der RS Bodensee-Oberschwaben 172
Abb. 179: Strecken der Westfrankenbahn 174
Abb. 180: Höhenprofil von Crailsheim nach Miltenberg 175
Abb. 181: Höhenprofil von Miltenberg nach Seckach 175
Abb. 182: Auszug Fahrplan Crailsheim-Miltenberg 176
Abb. 183: Auszug Fahrplan Miltenberg-Crailsheim 177

Abb. 184: Infrastrukturszenario 0 Miltenberg-Crailsheim („Taubertalbahn“) 178
Abb. 185: Infrastrukturszenario 3b Miltenberg-Crailsheim („Taubertalbahn“) 178
Abb. 186: SOC Miltenberg-Crailsheim (BEMU-RE, Infrastrukturszenario 3b) 179
Abb. 187: Energiebedarf Miltenberg–Crailsheim (HEMU-RE) 179
Abb. 188: Fazit Infrastrukturszenarien Miltenberg–Crailsheim 180
Abb. 189: Energiebedarf Tauberbischofsheim-Bad Mergentheim (HEMU-RB) 180
Abb. 190: Fahrplan Miltenberg-Seckach 181
Abb. 191: Fahrplan Seckach-Miltenberg 181
Abb. 192: Infrastrukturszenario 0 Miltenberg-Seckach („Madonnenlandbahn“) 181
Abb. 193: SOC Miltenberg-Seckach (BEMU-RB, Infrastrukturszenario 0) 182
Abb. 194: Energiebedarf Miltenberg–Seckach (HEMU-RB) 182
Abb. 195: Fahrleistung pro Fahrzeug der Westfrankenbahn 183
Abb. 196: Strecke und Linien der Hohenlohebahn 185
Abb. 197: Höhenprofil von Heilbronn nach Schwäbisch Hall/Hessental 186
Abb. 198: Infrastrukturszenario 0 Heilbronn-Schwäbisch Hall-H‘tal „Hohenlohebahn“ 186
Abb. 199: Auszug Fahrplan Schwäbisch Hall/Hessental-Heilbronn 187
Abb. 200: Auszug Fahrplan Heilbronn-Schwäbisch Hall/Hessental 187
Abb. 201: SOC Heilbronn–Schwäbisch Hall/H‘tal (BEMU RB, Infrastrukturszenario 0) 187
Abb. 202: SOC Öhringen-Schwäbisch Hall/H‘tal (BEMU RB, Infrastrukturszenario 0) 188
Abb. 203: Fahrleistung je Fahrzeug der Hohenlohebahn 189
Abb. 204: Strecken der Strohgäubahn, der Teckbahn und der Tälesbahn 190
Abb. 205: Infrastrukturszenario 0 der Strohgäubahn 191
Abb. 206: Infrastrukturszenarien 3 der Strohgäubahn 191
Abb. 207: Infrastrukturszenarien Strohgäubahn 192
Abb. 208: SOC Korntal-Weissach (BEMU-RB, Infrastrukturszenario 3) 192
Abb. 209: SOC Weissach-Korntal (BEMU-RB, Infrastrukturszenario 3) 192
Abb. 210: Infrastrukturszenario 0 Kirchheim/Teck-Oberlenningen („Teckbahn“) 193
Abb. 211: Infrastrukturszenario 1 Kirchheim/Teck-Oberlenningen („Teckbahn“) 193
Abb. 212: SOC Kirchheim/Teck-Oberlenningen (BEMU-RB, Infrastrukturszenario 1) 193
Abb. 213: SOC Oberlenningen-Kirchheim/Teck (BEMU-RB, Infrastrukturszenario 1) 194
Abb. 214: Infrastrukturszenario 0 Nürtingen-Neuffen („Tälesbahn“) 194
Abb. 215: SOC Nürtingen-Neuffen (BEMU-RB, Infrastrukturszenario 0) 195
Abb. 216: SOC Neuffen-Nürtingen (BEMU-RB, Infrastrukturszenario 0) 195
Abb. 217: Vergleich Mehrverbrauch BEMU vs EMU 198
Abb. 218: Haltabstand vs Fahrgeschwindigkeit Untersuchungsstrecken 199
Abb. 219: Streckencharakteristika vs Mehrverbrauch (BEMU vs EMU) 199
Abb. 220: Vergleich Mehrverbrauch BEMU vs HEMU 199

Abb. 221: Verfahrensablauf und Zeitbedarf für das XMU-Netz in Schleswig-Holstein 201
Abb. 222: Potenzialanalyse zu Reaktivierungen in Baden-Württemberg 202
Abb. 223: Reaktivierungskorridor Kirchheim/Teck-Göppingen-Schwäbisch Gmünd 203
Abb. 224: Hydrogen hub Groningen 205
Abb. 225: Jülich - Beispiel für den Aufbau einer regionalen Wasserstoffwirtschaft 205
Abb. 226: Kosten EMU-BEMU-HEMU (TCO 1, Nagoldtalbahn, Standard) 211
Abb. 227: Kosten EMU-BEMU-HEMU (TCO 1, Nagoldtalbahn, Spezial 1) 211
Abb. 228: Kosten EMU-BEMU-HEMU (TCO 1, Nagoldtalbahn, Spezial 2 ohne Restwert) 212
Abb. 229: Kosten EMU-BEMU-HEMU (TCO 1, Nagoldtalbahn, Spezial 2 mit Restwert) 212
Abb. 230: Kosten EMU-BEMU-HEMU (TCO 1, Nagoldtalbahn, Spezial 3) 213
Abb. 231: Kosten EMU-BEMU-HEMU (TCO 1, Nagoldtalbahn, Spezial 4) 214
Abb. 232: Kosten EMU-BEMU-HEMU (TCO 1, Nagoldtalbahn, Spezial 4 „HEMU günstig“) 214
Abb. 233: Kosten EMU-BEMU-HEMU (TCO 1, Nagoldtalbahn, Spezial 4 „HEMU günstig“) 215
Abb. 234: Kosten EMU-BEMU-HEMU (TCO 2, Donautalbahn Plus, Standard) 216
Abb. 235: Kosten EMU-BEMU-HEMU (TCO 2, Donautalbahn Plus, Spezial 1) 216
Abb. 236: Kosten EMU-BEMU-HEMU (TCO 2, Donautalbahn Plus, Spezial 3) 217
Abb. 237: Kosten EMU-BEMU (TCO 3, RS Bodensee-Oberschwaben, Standard) 218
Abb. 238: Kosten EMU-BEMU (TCO 3, RS Bodensee-Oberschwaben, Spezial 1) 218
Abb. 239: Kosten EMU-BEMU (TCO 3, RS Bodensee-Oberschwaben, Spezial 3) 219
Abb. 240: Kosten EMU-BEMU-HEMU (TCO 4, Westfrankenbahn, Standard) 220
Abb. 241: Kosten EMU-BEMU-HEMU (TCO 4, Westfrankenbahn, Spezial 1) 221
Abb. 242: Kosten EMU-BEMU-HEMU (TCO 4, Westfrankenbahn, Spezial 3) 221
Abb. 243: Kosten EMU-BEMU (TCO 5, Hohenlohebahn, Standard) 222
Abb. 244: Kosten EMU-BEMU (TCO 5, Hohenlohebahn, Spezial 1) 223
Abb. 245: Kosten EMU-BEMU (TCO 5, Hohenlohebahn, Spezial 3) 223
Abb. 246: Kosten EMU-BEMU (TCO 6 „Raum Stuttgart“, „Standard“) 225
Abb. 247: Kosten EMU-BEMU (TCO 6, Raum Stuttgart, Spezial 1) 225
Abb. 248: Kosten EMU-BEMU (TCO 6, Raum Stuttgart, Spezial 3) 226
Abb. 249: Entwicklung der TCO-Empfehlung zu einer Gesamtempfehlung 232
Abb. 250: Zusammenfassung profitierender SPNV-Linienlängen und des Elektrifizierungsbedarfs 233
Abb. 251: CO2 und NOx-Emissionen des Verkehrs in Deutschland 2010-2035 234
Abb. 252: Erwartete Marktentwicklung im Wasserstoff- bzw. Brennstoffzellensegment 234

Tabelle 1: Übersicht zu durchführten Informationsgesprächen 35
Tabelle 2: Zusammenfassung von Strecken/Linien zu Teilnetzen 98
Tabelle 3: Überblick untersuchte Technologien 99
Tabelle 4: Bemessungsfahrzeuge 101
Tabelle 5: Vergleich von Ansätzen verschiedener Studien 124
Tabelle 6: Preisentwicklung pro Jahr 131
Tabelle 7: BEMU-Infrastrukturszenarien Nagoldtalbahn 134
Tabelle 8: Strecken- bzw. Liniencharakteristika der Linie Pforzheim – Horb 135
Tabelle 9: Strecken- bzw. Liniencharakteristika der Linie Pforzheim – Nagold 138
Tabelle 10: BEMU-Infrastrukturszenarien Ulm-Herbertingen-Sigmaringen-Tuttlingen 144
Tabelle 11: Strecken- bzw. Liniencharakteristika der Linie Ulm - Blaubeuren 146
Tabelle 12: Strecken- bzw. Liniencharakteristika der Linie Ulm - Munderkingen 147
Tabelle 13: Strecken- bzw. Liniencharakteristika der Linie Ulm - Tuttlingen 148
Tabelle 14: Strecken- bzw. Liniencharakteristika der Linie Herbertingen – Ehingen 150
Tabelle 15: Strecken- bzw. Liniencharakteristika der Linie Aulendorf – Sigmaringen 152
Tabelle 16: Strecken- bzw. Liniencharakteristika der Ringzug-Teilstrecken 157
Tabelle 17: Strecken- bzw. Liniencharakteristika der Ablachtalbahn 160
Tabelle 18: Strecken-/Liniencharakteristika der Zollernalbbahn 164
Tabelle 19: Strecken- bzw. Liniencharakteristika der Linie Friedrichshafen-Leutkirch 169
Tabelle 20: Strecken- bzw. Liniencharakteristika der Linie Aulendorf-Wangen 170
Tabelle 21: Strecken- bzw. Liniencharakteristika Miltenberg-Lauda/Königshofen-Crailsheim 176
Tabelle 22: BEMU-Infrastrukturszenarien Westfrankenbahn 178
Tabelle 23: Strecken- bzw. Liniencharakteristika Miltenberg – Seckach 180
Tabelle 24: Strecken- bzw. Liniencharakteristika Heilbronn – Schwäbisch Hall/Hessental 186
Tabelle 25: Charakteristika der Linie Öhringen – Schwäbisch Hall/Hessental 188
Tabelle 26: Strecken- bzw. Liniencharakteristika der Strohgäubahn 191
Tabelle 27: Strecken- bzw. Liniencharakteristika der Teckbahn 193
Tabelle 28: Strecken- bzw. Liniencharakteristika der Tälesbahn 194
Tabelle 29: Fahrzeugbedarf der Strohgäubahn, Teckbahn und Tälesbahn 195
Tabelle 30: Streckenspezifische Energieverbräuche 197
Tabelle 31: Betriebsaufnahmen für Untersuchungsstrecken gemäß Vergabekalender 200
Tabelle 32: Angesetzte Parameter für TCO-Vergleich LTO vs. NMC 213

Glossar

ABB	Schweizerisches Industrieunternehmen (Asea Brown Boveri), u.a. auch Batterie-Hersteller
ADR	Europäisches Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße („Accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par route“)
AEG	Allgemeines Eisenbahn-Gesetz
AGC	Triebwagen mit hoher Kapazität („Autorail à Grande Capacité“), Bombardier-Plattform für den französischen Markt
Akasol	deutscher Batteriehersteller
AKN	Altona-Kaltenkirchen-Neumünster Eisenbahn
ALK	Alkalische Elektrolyse
Alstom	Fahrzeughersteller (Hauptsitz: Frankreich)
ARRIVA	SPNV-Betreibergesellschaft
ARROW	Projektname des Redlands-Projektes in San Bernardino / Kalifornien
Ballard	Brennstoffzellenhersteller (Hauptsitz: USA)
BEG	Bayrische Eisenbahn Gesellschaft, Aufgabenträger
BEMU	Batterieelektrischer Triebwagen (Battery-Electric-Multiple-Unit)
Benex	SPNV-Betreibergesellschaft
BoL	Beginn des Lebenszyklus (Begin-of-life)
BMDV	Bundesministerium für Digitales und Verkehr
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (seit 2021: BMDV)
Bombardier	Fahrzeughersteller (ehemals kanadisch; jetzt Teil von Alstom)
CAF	Fahrzeughersteller (Hauptsitz: Spanien)
CAPEX	Investitionskosten („Capital expenditure“)
Civity	Fahrzeugplattform CAF
Coradia	Fahrzeugplattform (Meta) Alstom
CRRC	Fahrzeughersteller (Hauptsitz: China)
DB	Deutsche Bahn
Desiro	Fahrzeugplattform Siemens
DLR	Deutsches Zentrum für Luft - und Raumfahrt e.V
DoD	Entladetiefe („Depth-of-Discharge“)
DOW	US-Chemieunternehmen (DOW Chemical)
EBA	Eisenbahnbundesamt
EcoTrain	Markenname für ein (ehemaliges) Diesel-Hybrid-Projekt der DB
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EMU	Elektrischer Triebwagen (Electric-Multiple-Unit)
EoL	Ende der Lebenszyklus (End-of-life)
ESWE	Verkehrsbetrieb in Wiesbaden
EÜ	Abkürzung für Eisenbahnüberführung
EVB	Elbe-Weser Verkehrsbetriebe
Fahma	Fahrzeugmanagementgesellschaft des RMV
FCEMU	Brennstoffzellen-Triebwagen („Hydrogen-Electric-Multiple-Unit“)
Flirt	Fahrzeugplattform Stadler

FNM	Regionale Bahngesellschaft in Italien („Ferrovie Nord Milano“)
GVFG	Gemeinde-Verkehrs-Finanzierungs-Gesetz
HEMU	Brennstoffzellen-Triebwagen („Hydrogen-Electric-Multiple-Unit“)
H2MU	Brennstoffzellen-Triebwagen („Hydrogen-Electric-Multiple-Unit“)
HEXAGON PURUS	Hersteller, insbesondere Wasserstofftanks
HLB	Hessische Landesbahn
HzL	Hohenzollersche Landesbahn
Hoppecke	deutscher Batteriehersteller
iLint	Fahrzeugplattform Alstom
Infraserv	deutsches Chemieunternehmen; eines der Nachfolgeunternehmen der Höchst AG
Intilion	deutscher Batteriehersteller (Hoppecke Gruppe)
LCC	Lebenszykluskosten („Life-Cycle-Costs“)
Leclanché	Batteriehersteller (Hauptsitz Schweiz)
LFP	Lithium-Eisen-Phosphat (Batterietyp innerhalb der Lithium-Obergruppe)
Linde	deutsches Industrieunternehmen
Lint	Fahrzeugplattform Alstom
Lkw	Lastkraftwagen
LMO	Lithium-Mangan-Oxid (Batterietyp innerhalb der Lithium-Obergruppe)
LNVG	Landes-Nah-Verkehrs-Gesellschaft Niedersachsen (Aufgabenträger)
LTO	Lithium-Titanat-Oxid (Batterietyp innerhalb der Lithium-Obergruppe)
MEGC	Gascontainer mit Einzelelementen („Multiple-Element Gas Container“)
Mireo	Fahrzeugplattform Siemens
MRB	Mitteldeutsche Regionalbahn
NBE	Nordbahn Eisenbahngesellschaft
NEB	Niederbarnimer Eisenbahn-Betriebsgesellschaft
NMC	(Lithium-)Nickel-Mangan-Cobalt (Batterietyp innerhalb der Lithium-Obergruppe)
NOW	Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie
NPROXX	Hersteller, insbesondere Wasserstofftanks
NRW	Nordrhein-Westfalen
NVBW	Nah-Verkehrs-Gesellschaft Baden-Württemberg (Aufgabenträger)
ÖBB	Österreichische Bundes-Bahnen
OHE	Osthannoversche Eisenbahnen
OLG	Oberlandesgericht
OLIA	Oberleitungs-Insel-Anlage
OPEX	Betriebsausgaben („Operational expenditure“)
PEM	Protonenaustauschmembran („Protone-Exchange-Membrane“)
Polyvalent	Alstom-Fahrzeugplattform unter Coradia-Dach (französischer Markt), im Rahmen der Bombardier-Übernahme an CAF übertragen
PRIMOVE	Markenname eines Batteriekonzepts, entwickelt von Bombardier
Proton	deutsches Industrieunternehmen (Proton Motor Fuel Cell GmbH)
PV	Abkürzung für Photovoltaik
RB	Abkürzung für Regionalbahn (Bedienungsklassifizierung im SPNV)
RE	Abkürzung für Regionalexpress (Bedienungsklassifizierung im SPNV)
Renfe	Spanische Staatsbahn („Red Nacional de los Ferrocarriles Españoles”)

RMV	Rhein-Main-Verkehrsverbund (Aufgabenträger)
RPS	Rail Power Systems, Hersteller/Dienstleister SPNV-Stromversorgung
RRX	Akronym für Rhein-Ruhr-Express
Saft	Batteriehersteller (Hauptsitz: Frankreich)
SBCTA	Verbundorganisation in Kalifornien („San Bernardino County Transit Agency“)
Shift2Rail	Forschungsprojekt / Lobbyinitiative
Siemens	Fahrzeughersteller (Hauptsitz: Deutschland)
SNCB	Belgische Staatsbahn („Société Nationale des Chemins de fer Belge“)
SNCF	Französische Staatsbahn („Société Nationale des Chemins de fer Français“)
SOC	Ladezustand Batterie („State of charge”)
SOEC	Festoxid-Hochtemperatur-Elektrolyse („Solid Oxid“)
SPNV	Schienen-Personen-Nahverkehr
Stadler	Fahrzeughersteller (Hauptsitz: Schweiz)
SteFanS	Strategie für lokal-emissionsfreie Fahrzeuge auf nicht elektrifizierten Strecken
Stream	Alstom-Fahrzeugplattform unter Coradia-Dach (italienischer Markt)
SWEG	Südwestdeutsche Landesverkehrs-GmbH (Nichtbundeseigene Bahngesellschaft
Talgo	Fahrzeughersteller (Hauptsitz: Spanien)
TCO	Gesamtkosten des Betriebs („Total Cost of Ownership“)
Toshiba	Batteriehersteller (Hauptsitz: Japan)
TSI	Technische Spezifikationen für die Interoperabilität
Tyzcka	Wasserstoffhersteller und -vertreiber
VBB	Verkehrsverbund Berlin-Brandenburg
VDB	Verband der Bahnindustrie in Deutschland
VDE	Verband der Elektrotechnik / Elektronik / Informationstechnik
Vittal	Fahrzeugplattform Talgo
VLEXX	Markenname eines SPNV-Betreibers
VMS	Verkehrsverbund Mittelsachsen
VRR	Verkehrsverbund Rhein-Ruhr (Aufgabenträger)
VTT	Verkehrsverbund Tirol
Wabtec	US-Industrieunternehmen, u.a. auch Hersteller von Lokomotiven
Wystrach	Hersteller im Bereich Wasserstofftechnologie (v.a. Tankinfrastruktur)
XMU	X-Multiple Unit (Fahrzeug mit nicht spezifiziertem, alternativen Antrieb)
ZAB	Zollern-Alb-Bahn

Quellen

Quellen im nachfolgenden Studienbericht lassen sich grundsätzlich in fünf Kategorien unterscheiden:

- Eigene Darstellungen des Gutachterteams erfolgen ohne Quellenangabe unter den jeweiligen Abbildungen oder Tabellen; alle Abbildungen dieser Art sind urheberrechtlich Eigentum des Gutachterteams „TTK-komobile-Axel Kühn“.

- Eigene Darstellungen des Gutachterteams, die sich an Darstellungen anderer Urheber anlehnen oder Daten aus anderen Studien zugrunde legen, sind als „eigene Darstellung, in Anlehnung an …“ bezeichnet, wobei die jeweilige Quelle angegeben ist und ein Bezug zum Literaturverzeichnis (siehe Kapitel 13) hergestellt wird.

- Darstellungen anderer Autoren; diese sind in der jeweiligen Bildunterschrift als Quelle angegeben und für diese wurde eine Zustimmung zur Veröffentlichung in dieser Form eingeholt bzw. lag vor (z.B. aus dem Gutachterteam). Diese Quellen sind nicht grundsätzlich Bestandteil des Literaturverzeichnisses.

- Studien, Präsentationen, Broschüren o.ä., die im Rahmen der Bearbeitung gesichtet wurden und von grundsätzlichem Interesse erschienen, sind im Literaturverzeichnis aufgeführt; soweit auf diese im Text inhaltlich Bezug genommen wird, finden sich dort entsprechende Quellenbezüge.

- In Ausnahmefällen wird auf Quellen, z.B. in Form von Internet-Links, nur im Text hingewiesen.

1 Kurzfassung Studienergebnisse[1]

Das Land Baden-Württemberg und regionale Partner haben im Sommer 2021 eine Studie zur Elektrifizierung von Bahnstrecken und alternativen Antrieben von Fahrzeugen beauftragt. Die Bearbeitung wurde an eine Bietergemeinschaft aus TransportTechnologie-Consult Karlsruhe GmbH (TTK), komobile GmbH (Wien) und weiteren Partnern vergeben und von der Nahverkehrsgesellschaft Baden-Württemberg (NVBW) in Zusammenarbeit mit dem Ministerium für Verkehr betreut.

Die SteFanS-Studie - Strategie für lokal-emissionsfreie Fahrzeuge auf nicht elektrifizierten Strecken – befasst sich mit insgesamt 16 Strecken von über 500 Kilometern Gesamtlänge, die heute noch mit Dieselfahrzeugen betrieben werden. Ziel war die Erarbeitung von Strategieempfehlungen für das Land, ohne damit aber vorzugeben, dass es nur eine Technologie für alle Strecken geben dürfe.

Gegenübergestellt wurden in einer technischen, betrieblichen und (volks-)wirtschaftlichen Betrachtung die Alternativen klassische Oberleitungselektrifizierung (EMU-Betrieb), Betrieb mit Batteriefahrzeugen (BEMU) und ein Betrieb mit Brennstoffzellenfahrzeugen (HEMU). Dabei wurde im Rahmen der wirtschaftlichen Bewertung eine Methodik entwickelt, die unterschiedlichen Lebensdauern von Oberleitungsinfrastruktur und Fahrzeugen in die Betrachtung einzubeziehen, d.h. die längere Lebensdauer von Oberleitungsinfrastruktur besser zu berücksichtigen. Die Herangehensweise des Gutachters beinhaltete darüber hinaus, die rein wirtschaftliche Betrachtung unter Berücksichtigung auch strategischer, zum Teil qualitativer Aspekte zu einer abgewogenen Gesamtempfehlung zu entwickeln.

Zunächst erfolgte eine streckenbezogene Betrachtung zum Einsatz der drei Technologiealternativen, im Weiteren eine Zusammenfassung zu insgesamt 6 Teilnetzen[2], die nachstehend einschließlich der gutachterlichen Empfehlung kurz beschrieben sind:

Teilnetz 1: Nagoldtalbahn

Das Teilnetz umfasst die Strecke Pforzheim-Horb, der nicht elektrifizierte Abschnitt zwischen Pforzheim und Hochdorf ist 53 km lang und das Betriebskonzept sieht zwei überlagerte Verbindungen Pforzheim-Nagold und Pforzheim-Horb jeweils im 60 Minuten-Takt vor. Berührungspunkte zu elektrifizierten Strecken bestehen in Pforzheim sowie mit dem Abschnitt Hochdorf-Eutingen-Horb.

Gesamtempfehlung: BEMU

Begründung:

- Deutliche Kostenvorteile für BEMU.
- Bei Gesamt-Elektrifizierung zwar Lückenschluss im elektrifizierten Netz, Nutzbarkeit im Güterverkehr aber stark eingeschränkt.
- Hoher Anpassungsbedarf für Gesamt-Elektrifizierung (insbesondere Tunnelsanierungen, absehbar erst Anfang der 2030er Jahre verfügbar[3]).
- Überschaubarer BEMU-Infrastrukturbedarf.

[1] Die Kurzfassung kann nicht alle Zusammenhänge erschöpfend darstellen, zu einigen Sachverhalten erfolgen Verweise zu entsprechenden Kapiteln.
[2] Ausführliche Begründung und Vorgehensweise siehe Kapitel 7.5
[3] Siehe Kapitel 9.1.6.3

- Synergien mit BEMU-Betrieb im Ortenaunetz und auf der Hermann-Hesse-Bahn erkennbar (Berührungspunkt Calw)[4].

Teilnetz 2: Donautalbahn Plus

Dieses große Teilnetz umfasst neben der Donautalbahn Ulm-Sigmaringen-Tuttlingen insbesondere auch die Strecke Aulendorf-Sigmaringen. Beide nicht elektrifizierten Strecken mit einer Länge von 118 bzw. 44 km weisen gemeinsame Streckenabschnitte auf, die bei der Schaffung neuer Infrastruktur für einen Betrieb mit alternativen Antrieben Synergien erwarten lassen bzw. eine gemeinsame Betrachtung erfordern. Das zugrunde gelegte Betriebskonzept sieht neben der Bedienung der Gesamtstrecken auch Linien auf Teilstrecken vor (Ulm-Blaubeuren bzw. Munderkingen, Herbertingen-Ehingen), alle jeweils im 60 min-Takt bedient. Berührungspunkte zu elektrifizierten Strecken bestehen in Ulm, Tuttlingen und Aulendorf.

Gesamtempfehlung: BEMU

Begründung:

- Aufgrund der stark diversifizierten Betriebskonzepte mit mehreren Endpunkten erfordert ein BEMU-Konzept erhöhten Elektrifizierungsaufwand, der den Kostenvorteil gegenüber einer Gesamtelektrifizierung (EMU) insbesondere bei einer Restwertbetrachtung reduziert.
- Elektrifizierungsmaßnahmen für BEMU-Betrieb eröffnen Synergien für mehrere Strecken[5].
- Gesamtnetz mit hohem Elektrifizierungsaufwand (Streckenlänge), keine echte Lückenschlussfunktion bzw. nur auf Teilstrecken.
- Erhöhte Elektrifizierungskomplexität auf Teilstrecken[6].

Teilnetz 3: RS Bodensee-Oberschwaben

Dieses Teilnetz bildet das neue Konzept einer Regio-S-Bahn Bodensee-Oberschwaben ab. Kern des Netzes ist die nicht elektrifizierte, 30 km lange Strecke Aulendorf-Kißlegg, die künftig von zwei SPNV-Linien, Friedrichshafen-Aulendorf-Kißlegg-Leutkirch und Aulendorf-Wangen, im 60 bzw. 120 min-Takt, genutzt werden soll. Da Brennstoffzellenfahrzeuge keinen Oberleitungsbetrieb zulassen[7], in diesem Teilnetz aber größere elektrifizierte Streckenabschnitte befahren werden (Friedrichshafen-Aulendorf, Kißlegg-Leutkirch / Wangen) lag der Studienfokus hier allein auf der Gegenüberstellung einer Elektrifizierung („Lückenschluss“) und eines Batteriebetriebs.

Gesamtempfehlung: EMU

Begründung:

- Sehr geringe Kostenunterschiede zwischen EMU und BEMU.
- BEMU-Betrieb zwar grundsätzlich ohne zusätzliche Elektrifizierungsmaßnahmen machbar, für das Betriebskonzept sind aber Infrastrukturmaßnahmen erforderlich (Zeitfaktor).
- Kurze Elektrifizierungsstrecke, geringe Elektrifizierungskomplexität.

[4] Siehe Kapitel 9.1.6.1
[5] Die endgültige Festlegung für Elektrifizierungsabschnitte ermöglicht ggf. auch einen rein elektrischen Betrieb für Teil-Linien (z.B. Ulm – Blaubeuren).
[6] Insbesondere bzw. ausschließlich im Abschnitt Tuttlingen-Sigmaringen.
[7] Grundlage der Aussage sind die auf dem deutschen Markt angebotenen Fahrzeuge (siehe Kapitel 5.3).

- Hohe Lückenschlussfunktion (Güterverkehr, Umleitungen), damit auch Erhöhung der Flexibilität bei der Gestaltung künftiger Verkehrskonzepte.
- RE-Konzept mit BEMU-Fahrzeugen bedingt betriebliche Mehrkosten aufgrund langer EMU-tauglicher Abschnitte.

Teilnetz 4: Westfrankenbahn

Die Westfrankenbahn existiert bereits als Marke eines DB RegioNetzes; das betrachtete Netz umfasst die nicht elektrifizierten Strecken Crailsheim-Lauda/Königshofen-Wertheim-Miltenberg (128 km) und Miltenberg-Seckach (39 km). Teile dieser Strecken liegen auf bayrischem Gebiet und Elektrifizierungsüberlegungen des bayrischen Aufgabenträgers BEG für die Strecke Aschaffenburg-Miltenberg bilden eine Rahmenbedingung. Das Betriebskonzept sieht drei Linien vor: Crailsheim-Miltenberg, Tauberbischofsheim-Bad Mergentheim und Miltenberg-Seckach (jeweils 60 min-Takt). Berührungspunkte zu elektrifizierten Strecken bestehen in Crailsheim, Lauda/Königshofen und Seckach.

Gesamtempfehlung: BEMU (EMU auf Teilstrecke)

Begründung:

- Deutliche Kostenvorteile für BEMU-Betrieb.
- Gesamtnetz mit hohem Elektrifizierungsaufwand (Streckenlänge).
- Keine echte Lückenschlussfunktion bzw. nur auf Teilstrecken.
- Erhöhte Tunnel- / Bauwerksdichte auf Teilstrecken, erhöhte Komplexität bei Gesamt-Elektrifizierung.
- Erweiterte Oberleitungsinsel Tauberbischofsheim-Bad Mergentheim erlaubt EMU-Betrieb auf Teilstrecke.

Teilnetz 5: Hohenlohebahn

Im Kern umfasst dieses Teilnetz nur den nicht elektrifizierten Streckenabschnitt Öhringen / Cappel-Schwäbisch Hall / Hessental (32 km), die zugrunde gelegten Betriebskonzepte betreffen aber auch den Gesamtabschnitt von Heilbronn nach Schwäbisch Hall (beide 60 min Takt). Da Brennstoffzellenfahrzeuge keinen Oberleitungsbetrieb zulassen[8], in diesem Teilnetz aber größere elektrifizierte Streckenabschnitte befahren werden (Heilbronn-Öhringen) lag der Studienfokus hier allein auf der Gegenüberstellung einer Elektrifizierung („Lückenschluss“) und eines Batteriebetriebs.

Gesamtempfehlung: EMU

Begründung:

- Sehr geringe Kostenunterschiede zwischen EMU und BEMU.
- Hohe Lückenschlussfunktion (Güterverkehr, Umleitungen), durchgängig zweigleisige Strecke, damit auch Erhöhung der Flexibilität bei der Gestaltung künftiger Verkehrskonzepte.
- RE-Konzept mit BEMU-Fahrzeugen bedingt betriebliche Mehrkosten aufgrund langer EMU-tauglicher Abschnitte.
- Stadtbahnverlängerung gemäß Machbarkeitsstudie Hohenlohe liefert zusätzliche Elektrifizierungsargumentation.

Teilnetz 6: Raum Stuttgart

[8] Grundlage der Aussage sind die auf dem deutschen Markt angebotenen Fahrzeuge (siehe Kapitel 5.3).

Das Teilnetz 6 fasst die drei nicht elektrifizierten Einzelstrecken im Raum Stuttgart: Korntal-Weissach (Strohgäubahn, 22 km), Kirchheim/Teck-Oberlenningen (Teckbahn, 11 km) und Nürtingen-Neuffen (Tälesbahn, 9 km) zusammen. Trotz einer räumlichen Trennung und unterschiedlicher Eigentums- und Aufgabenträger-Zuständigkeiten empfahl sich hier eine gemeinsame, strategische Betrachtung. Eigenständige und ggf. unterschiedliche Technologieentscheidungen sind hier angesichts der jeweiligen geringen Projektgröße (auch Fahrzeugbedarf!) aus gutachterlicher Sicht kaum zu rechtfertigen. Aufgrund sehr kurzer Strecken und vorhandenen Berührungspunkten zu elektrifizierten Strecken lag eine starke Ausprägung zugunsten der Alternativen EMU und BEMU vor, die eine HEMU-Betrachtung nicht zielführend erscheinen ließ[9]. Zugrunde gelegte Betriebskonzepte sehen für alle Strecken einen 30 min-Takt vor. Berührungspunkte zu elektrifizierten Strecken bestehen für alle drei Strecken jeweils an einem Strecken- bzw. Linienende (Nürtingen, Kirchheim/Teck, Korntal).

Gesamtempfehlung: EMU

Begründung:

- Sehr geringe Kostenunterschiede zwischen EMU und BEMU.
- Eher kurze Einzelstrecken mit größerer Instandhaltungsproblematik für Fahrzeuge mit alternativen Antrieben[10].
- Eignung marktgängiger BEMU-Fahrzeuge für derartige Nebenstrecken zu hinterfragen[11], TramTrain-Fahrzeuge ggf. als Alternative denkbar.
- Teckbahn / Tälesbahn ohnehin mit räumlicher Nähe zu RSB Neckar-Alb, für Teckbahn ggf. auch Zusammenhang mit Reaktivierungskorridor Schwäbisch Gmünd-Göppingen-Kirchheim gegeben.
- Für die Strohgäubahn sollten mögliche Synergien mit der Reaktivierung Markgröningen (Schwieberdingen) geprüft werden.

Die gutachterlichen Empfehlungen im Rahmen der SteFanS-Studie sehen aktuell keinen Einstieg in einen Betrieb mit Brennstoffzellen-Fahrzeugen vor und liegen damit im Trend aktueller Projektentscheidungen und Fahrzeugbestellungen in anderen Bundesländern. Dies bedeutet aber keinesfalls eine grundsätzliche Ablehnung der Wasserstofftechnologie in Bezug auf SPNV-Anwendungen[12]. Die grundsätzliche Marktreife von Brennstoffzellenfahrzeugen kann als gegeben angenommen werden; Fahrzeuge wurden und werden umfangreich getestet und erste Serienfahrzeuge nehmen aktuell den Betrieb auf.

Unbestreitbar ist aber auch, dass Wasserstoff unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten aktuell noch keine attraktive Alternative darstellt. Dies umso weniger, wenn die Verwendung von „grünem“ Wasserstoff gefordert wird, dessen Produktion auf nachhaltig erzeugter elektrischer Energie beruht. Die Rahmenbedingungen können sich mittelfristig positiver darstellen, wenn die generelle Marktumsetzung weiter fortschreitet und ein SPNV-Projekt im Zusammenspiel mit anderen Projektinitiativen deutliche Unterstützung erfährt, d.h. in gewissem Sinne „mitfahren“ kann, nicht aber die Bürde der Etablierung einer Wasserstoffproduktion oder des Wasserstofftransportes zunächst weitgehend allein tragen muss. Derartige Voraussetzungen, d.h. der Aufbau einer regionalen Wasserstoffwirtschaft („Sektorkopplung“), die ein SPNV-Projekt einbinden kann (Beispiel: Heidekrautbahn in Berlin / Brandenburg) liegen in Baden-Württemberg aktuell nur ansatzweise vor, wozu die Problematik nachhaltiger Stromerzeugung beiträgt.

[9] Siehe ausführlichere Begründung in Kapitel 7.6
[10] Siehe Kapitel 9.6.5.3
[11] Siehe Kapitel 9.7.6
[12] Siehe ausführliche Begründung in Kapitel 12

Der Spielraum für Einzelentscheidungen, z.B. im Zusammenhang mit Reaktivierungsstrecken, die ggf. in ihrem regionalen Umfeld günstigere Rahmenbedingungen vorweisen können, soll mit dieser Empfehlung aber keinesfalls eingeschränkt werden.

Die Empfehlung des Gutachters zu weiteren Elektrifizierungen, seien es Lückenschlüsse wie bei den Strecken Öhringen-Schwäbisch Hall/Hessental oder Aulendorf-Kißlegg, oder punktuelle Ergänzungen auf anderen Strecken, beinhaltet eine erhebliche zeitliche Komponente, was die Planungs- und Realisierungszeit derartiger Vorhaben angeht. Die beschriebenen Teilnetze weisen gemäß Ausschreibungskalender unterschiedliche Zieldaten für die Vergabe neuer Verkehrsverträge auf, einige liegen zeitlich noch weiter entfernt (z.B. Anfang der 2030er Jahre), einige deutlich näher. Gerade für letztere wird es eine Aufgabe der nächsten Monate sein, die Strategien zur Schaffung benötigter Infrastruktur und geplanter Verkehrsvergaben zu harmonisieren.

2 Einleitung/Aufgabenstellung

Aufbauend auf eine Nutzen-Kostenuntersuchung (Verkehrswissenschaftliches Institut Stuttgart VWI, 2013) wurde für das Eisenbahnnetz in Baden-Württemberg ein Elektrifizierungskonzept entwickelt, das im Wesentlichen mit vier Streckenkategorien arbeitet:

1. Elektrifizierte Strecken
2. Elektrifizierte Strecken in Bau oder Planung (Schritt 1)
3. Vordringlicher Bedarf / Lückenschluss (Schritt 2)
4. Langfristiger Bedarf / fahrzeugseitige Lösungen (Schritt 3)

Quelle: Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg

Abb. 1: Elektrifizierungskonzept Baden-Württemberg (Kartenübersicht)

Aufgrund des dargestellten Elektrifizierungskonzepts werden in Baden-Württemberg nach derzeitigem Stand noch für viele Jahre nicht elektrifizierte Strecken Bestandteil des SPNV-Netzes sein. Diese Strecken werden aktuell mit Diesel-Fahrzeugen bedient, es sollen aber künftig keine Neufahrzeuge mit Dieselantrieb mehr beschafft werden. Damit besteht mittelfristig der Bedarf, neue Fahrzeuge mit alternativen Antrieben auf diesen nicht elektrifizierten Stecken einzusetzen.

Hierfür stehen aktuell zwei Technologievarianten zur Verfügung:

- der Einsatz von Wasserstoff-Hybrid-Fahrzeugen (H2MU oder HEMU),
- von Oberleitungs-/Batterie-Hybridzügen (BEMU)

Im Frühjahr 2021 erfolgte seitens der Nahverkehrsgesellschaft Baden-Württemberg die Ausschreibung einer *Studie zur technischen Umsetzbarkeit und Wirtschaftlichkeit alternativer und konventioneller Antriebstechnologien im SPNV auf nicht elektrifizierten Strecken in Baden-Württemberg*[13]. Die als Untersuchungsgegenstand hinterlegten, nicht elektrifizierten Strecken entstammten ganz überwiegend Kategorie 4, es sind aber auch Strecken aus Kategorie 3 enthalten, für welche noch kein konkretes Elektrifizierungsprojekt in Planung ist. Abb. 2 gibt einen Überblick der zunächst beauftragten Untersuchungsstrecken in Baden-Württemberg.

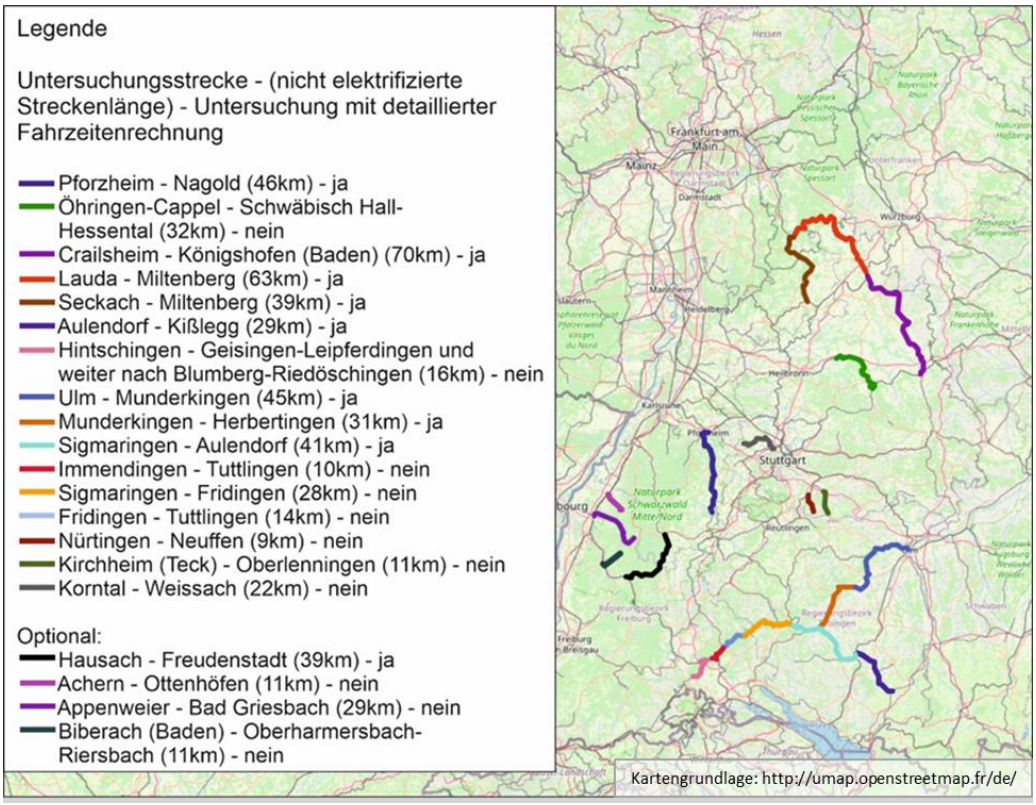


Abb. 2: Untersuchungsgebiet und zu untersuchende Strecken (Stand 7/2021)

Die optional dargestellten Strecken des Ortenau-Netzes, für die bereits eine BEMU-Technologieentscheidung getroffen wurde und Fahrzeuge bestellt sind, wurden nicht untersucht, dafür wurden im Verlauf der Studie zwei andere Strecken zusätzlich beauftragt (Hechingen-Gammertingen-Sigmaringen und die Reaktivierungsstrecke Ablachtalbahn)[14].

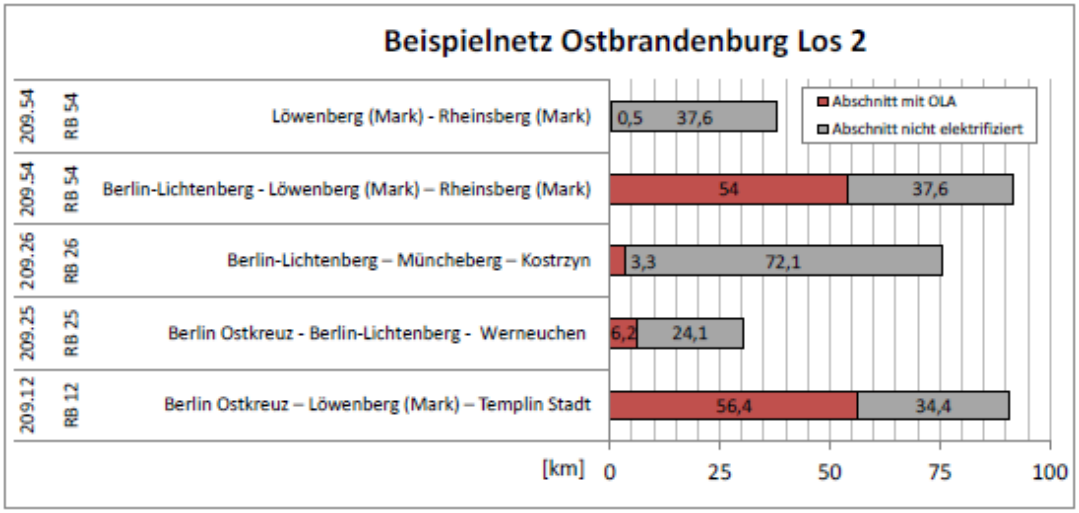
Die Betrachtung der Untersuchungskorridore macht deutlich, dass es sich zum Teil um Einzelstrecken handelt (z.B. Pforzheim-Nagold oder Öhringen-Schwäbisch Hall), Ansätze zu Netzstrukturen sind nur im Raum Lauda bzw. Sigmaringen erkennbar.

Ein sehr wichtiger Gesichtspunkt im Rahmen der Bearbeitung von Fragestellungen zum Einsatz alternativer Antriebe ist darin zu sehen, dass die reine Betrachtung der nicht

[13] Studientitel ab 12/2021 SteFanS (Strategie für lokal-emissionsfreie Fahrzeuge auf nicht elektrifizierten Strecken)

[14] Die Entscheidung wurde nach Vorliegen der Technologieempfehlung für BEMU in Teilnetz 2 getroffen, es ging in beiden Fällen allein darum, eine Einschätzung zu gewinnen, ob die geplanten/notwendigen Teilelektrifizierungen bzw. Lademöglichkeiten auch Synergien für die Bedienung dieser Strecken bieten.

elektrifizierten Streckenabschnitte nicht zielführend sein kann. Entscheidend sind letztlich die zugrunde zulegenden Betriebskonzepte, d.h. die SPNV-Linien. Deren Linienweg kann im Einzelfall genau mit der nicht elektrifizierten Strecke übereinstimmen, in anderen Fällen umfasst er mehrere Streckenabschnitte, die zum Teil ggf. auch bereits elektrifiziert zur Verfügung stehen (siehe Abb. 3).



Quelle: DLR

Abb. 3: RB-Linien Ostbrandenburg – elektrifizierte / nicht elektrifizierte Abschnitte

Quelle: Axel Kühn

Abb. 4: Dieselbetrieb auf elektrifizierten Teilstrecken

Der Ersatz von Dieselfahrzeugen durch lokal emissionsfreie Fahrzeuge betrifft also zwei Streckentypen:

- Nicht elektrifizierte Strecken im Dieselbetrieb,
- Elektrifizierte Streckenabschnitte im Linienweg dieselbetriebener Linien.

Der letztgenannte Streckentyp bietet grundsätzlich perfekte Voraussetzungen für einen lokal emissionsfreien Betrieb, die es bei der Ausgestaltung alternativer Antriebskonzepte in einem möglichst hohen Maße zu nutzen gilt. Dies bedeutet u.a., dass bei Konstel-

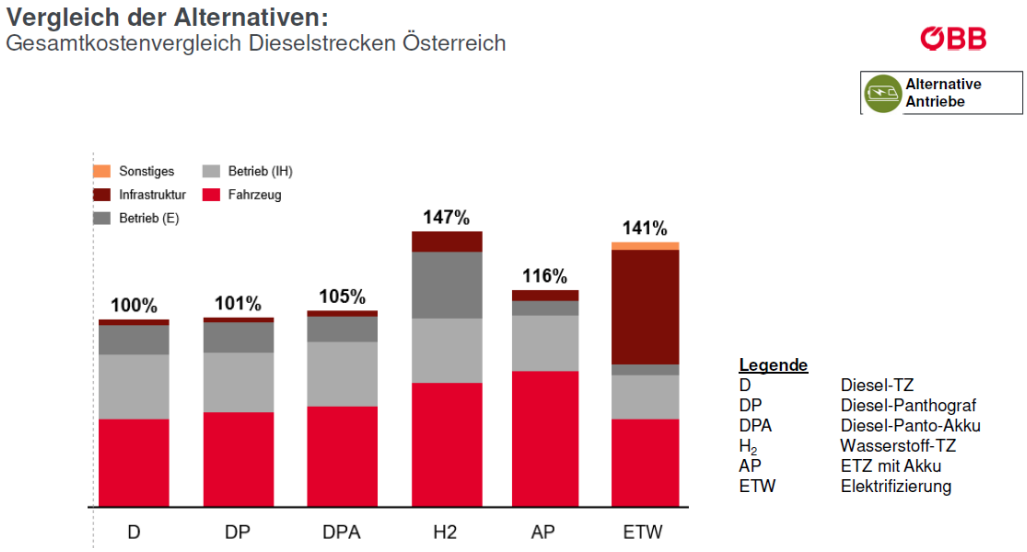
lationen mit dominanten Anteilen vorhandener elektrischer Infrastruktur Brennstoffzellenfahrzeuge erhebliche Nachteile aufweisen, da diese[15] wie Dieselfahrzeuge den angebotenen Strom aus der Oberleitung nicht nutzen können. Diese Betrachtung führte letztlich dazu, dass die HEMU-Alternative in einigen Teilnetzen frühzeitig ausgeschieden wurde (siehe 7.6).

Die Einbeziehung von im Rahmen des Reaktivierungskonzepts Baden-Württemberg (PTV Transport Consult GmbH, 2020) in der Prüfung befindlichen Streckenreaktivierungen in Baden-Württemberg war zunächst nicht explizit vorgesehen. Eine zumindest kursorische Betrachtung erfolgte aber dort, wo dies im Zusammenhang sinnvoll erschien, um mögliche Synergieeffekte aufgrund erweiterter Netzpotenziale zumindest sensitiv berücksichtigen zu können (siehe 9.7.3).

Studiengegenstand war auch, die genannten alternativen Antriebstechnologien dem klassischen Einsatz von elektrischen Fahrzeugen mit Oberleitungselektrifizierung gegenüberzustellen. In diesem Sinne beinhaltet die Untersuchung auch eine ggf. vorzunehmende Aktualisierung und Anpassung des bisherigen Elektrifizierungskonzeptes.

Ziel der Studie war die Erarbeitung von Strategieempfehlungen für das Land, ohne damit aber vorzugeben, dass es nur eine Technologie für alle Strecken geben dürfe. Um dies zu ermöglichen, erfolgte zunächst eine streckenbezogene Betrachtung, im Weiteren, soweit möglich bzw. sinnvoll, eine Zusammenfassung zu Teilnetzen.

Wesentlicher Inhalt auf dem Weg zu einer Gesamtempfehlung war dabei der wirtschaftliche Vergleich der Technologiealternativen. Siehe nachstehend ein Beispiel aus dem Nachbarland Österreich:



Quelle: ÖBB

Abb. 5: Gesamtkostenvergleich ÖBB / alternative Antriebe auf Dieselstrecken[16]

Für Systementscheidungen können neben der rein wirtschaftlichen Betrachtung auch sonstige strategische Überlegungen und Intentionen eine große Rolle spielen. Dabei

[15] Zumindest bei den in Deutschland aktuell angebotenen Fahrzeugkonzepten, siehe 5.3

[16] Erkennbar handelt es sich hier um Durchschnittswerte über das gesamte Dieselnetz, die sich auf Einzelstrecken oder -netzen auch abweichend darstellen können.

kann es sich um Synergieeffekte mit lokaler Industrie, spezifische Ambitionen zur Förderung innovativer, „grüner“ Technologie oder besondere, lokale Projektrahmenbedingungen handeln, die ggf. besonders günstige Rahmenbedingungen für eine Technologie schaffen.

Dementsprechend bestand auch grundlegende Einigkeit zwischen Auftraggeber und Gutachter, dass es nicht zielführend sein kann, eine grundsätzliche Systementscheidung auf Bundesland-Ebene vorzunehmen. Dies heißt im Umkehrschluss aber keinesfalls, dass im nächsten Schritt dann auch auf Ebene von Einzelstrecken Systementscheidungen zu treffen sind; im Gegenteil kommen hier Netzüberlegungen, d.h. eine sinnvolle Clusterung im Sinne von Ausschreibungsverfahren und Flottengrößen ins Spiel. Ein Flickenteppich nach dem Motto „eine Technologie hier, eine Technologie dort“ konnte im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit anschließender Fahrzeugbeschaffungen ebenso wenig ein Ziel sein.

3 Grundlagenermittlung

Die Grundlagenermittlung des Gutachters umfasste neben einer Sichtung der Genehmigungsrahmenbedingungen und der Normenwelt (siehe 3.1) zum einen ein sehr weitgehendes Literaturstudium deutscher und internationaler Quellen (siehe 3.2 und Literaturverzeichnis), zum anderen eine Vielzahl von Informationsgesprächen und Gedankenaustauschen (siehe 3.3).

3.1 Blick in die Genehmigungs- und Normenwelt

Die Genehmigungs- und Normenwelt bzw. allgemeiner technische und betriebliche Vorschriften stellen im Kontext alternative Antriebe derzeit noch eine besondere Herausforderung dar. Entsprechende Veröffentlichungen erfolgten zumindest teilweise zu einer Zeit, als alternative Antriebe noch kein Thema waren.

3.1.1 Genehmigungsaspekte

Die erforderliche Infrastruktur für den BEMU-Betrieb, d.h. im Wesentlichen die Elektrifizierung von Streckenabschnitten und ggf. ergänzende Unterwerke und/oder Umrichterwerke, ist weitestgehend identisch mit dem klassischen EMU-Betrieb. Die Genehmigung entsprechender Infrastrukturmaßnahmen erfolgt überwiegend im Rahmen von Planfeststellungsverfahren nach §18 AEG.

Eine Maßnahmenbeschleunigung lässt sich ggf. über das Planungsbeschleunigungsgesetz sowie das Gesetz zur Beschleunigung von Investitionen (InvBeG) begründen, welche Elektrifizierungsmaßnahmen explizit einschließen und entsprechende Anpassungen des AEG nach sich gezogen haben. Die Machbarkeit einer Verfahrensvereinfachung (z.B. Verzicht auf ein Planfeststellungsverfahren) hängt dabei insbesondere von der Notwendigkeit einer Umweltverträglichkeitsprüfung ab.

Infrastrukturmaßnahmen im Zusammenhang mit HEMU-Projekten, z.B. der Bau einer Wasserstofftankstelle oder eines Elektrolyseurs, unterliegen neben einer Genehmigung nach dem AEG auch noch weiteren Vorschriften (z.B. Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG)) und profitieren aktuell nicht von den Bestrebungen zur Beschleunigung von Planungen und Investitionsmaßnahmen.

Im Zusammenhang mit dem Schwarzatal-Projekt in Thüringen (Bauhaus Universität Weimar, 2019) wurden Genehmigungsaspekte für ein Wasserstoffprojekt ausführlich analysiert (siehe Abb. 6).

Im Rahmen der vorwiegend strategischen Betrachtung konnte nicht detaillierter auf Detailfragestellungen zu Wasserstoffinfrastrukturen eingegangen werden. Darauf hinzuweisen ist, dass die SEVESO III-Richtlinie und die zu deren Umsetzung in Deutschland eingeführte Störfallverordnung relevante Vorgaben liefern. Ein wesentlicher Grenzwert in diesem Zusammenhang ist die Lagermenge an Wasserstoff. Hier würde das Überschreiten der 5000 kg-Grenze für eine deutliche Erschwernis (organisatorisch und finanziell) sorgen.

Siehe dazu z.B. die Hytrail Studie, Österreich (HyCenta; EVT; Energieinstitut JKU Linz; Synergesis Consult; TU Graz;, 2017)[17].

Diese Problematik ist für reine Wasserstofftankstellen wie in Bremervörde in der Regel noch in den Griff zu bekommen, könnte aber für Wasserstoffproduktionsanlagen bzw. kombinierte Anlagen, gerade wenn Netze mit mehreren Teilstrecken versorgt werden müssen, sehr relevant sein; umso mehr, wenn ggf. auch noch sonstige Nutzer mitversorgt werden müssen.

Selbst bei Unterschreiten des Grenzwertes sind aber Abstandswerte einzuhalten, die regelmäßig eine Separierung von Standorten, d.h. Anordnung außerhalb enger bebauter Gebiete, Bahnhofsbereichen etc., erfordern werden.

Bezüglich des Wasserstofftransports ist der Gefahrgutstatus zu beachten, siehe dazu Ausführungen in Kapitel 4.2.2.5.

<table>
<tr><td></td><td rowspan="3">Relevante Rechtsgrundlagen
(Behörden-Bearbeitungsfrist in Monaten)</td><td colspan="5">Bereitstellungsoptionen des Wasserstoffs</td></tr>
<tr><td colspan="3">Liefer-Tankstelle
ohne On-Site-Elektrolyse
nach H_2-Lagerungsmengen vor Ort</td><td colspan="2">Komplett-Tankstelle
mit On-Site-Elektrolyse
nach H_2-Lagerungsmengen vor Ort</td></tr>
<tr><td>< 3 Tonnen</td><td>≥ 3 & ≤ 30 Tonnen</td><td>> 30 Tonnen</td><td>≤ 30 Tonnen</td><td>> 30 Tonnen</td></tr>
<tr><td>Anlagen zur Betankung von Fahrzeugen im Schienenverkehr</td><td>Allgemeines Eisenbahngesetz AEG</td><td colspan="5">Planfeststellungsverfahren mit formeller Konzentrationswirkung nach § 18 AEG in Verbindung mit §§ 72 – 78 VwVfG für eine Serviceeinrichtung nach § 2 Absatz 9 AEG, ggf. mit wasserrechtlicher Erlaubnis nach § 19 Absatz 3 WHG
(in der Regel 7 Monate für Anhörungsverfahren, ohne Erörterung 5,5 Monate)
Gemäß VwVfG Abschnitt 2 Planfeststellungsverfahren sind sämtliche bundes- und landesrechtlichen Genehmigungsvoraussetzungen für eine Wasserstofftankstelle zu beachten. Da eine formelle aber keine materielle Konzentrationswirkung gegeben ist, sind die materiell rechtlichen Regelungen der verdrängten Genehmigungsverfahren nach BetrSichV, Landes-BauO (hier ThürBO) und BImSchG maßgebliche Entscheidungsgrundlage.</td></tr>
<tr><td rowspan="5">Anlagen zur Betankung von Fahrzeugen im Straßenverkehr</td><td rowspan="2">Bundesimmissionsschutzgesetz BImSchG</td><td>---</td><td colspan="4">Genehmigung erforderlich nach § 4 BImSchG</td></tr>
<tr><td>---</td><td>Genehmigungsverfahren nach § 19 BImSchG ohne Öffentlichkeitsbeteiligung (3, max. + 3)</td><td>Genehmigungsverfahren nach § 10 BImSchG mit Öffentlichkeitsbeteiligung (7, max. + 3)</td><td>Genehmigungsverfahren nach § 19 BImSchG ohne Öffentlichkeitsbeteiligung (3, max. + 3)</td><td>Genehmigungsverfahren nach § 10 BImSchG mit Öffentlichkeitsbeteiligung (7, max. + 3)</td></tr>
<tr><td colspan="4">Für die Genehmigung ist ein Sachverständigengutachten nach der 9. BImSchV erforderlich. Die für das Gutachten erforderlichen Unterlagen sind nach LASI LV 49/2017 Anhang 3, Antragsunterlagen für Gasfüllanlagen, zu erstellen.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Betriebssicherheitsverordnung BetrSichV</td><td>Erlaubnispflicht nach §18 Satz 1 Nummer 3 BetrSichV für Errichtung und Betrieb einer Füllanlage zur Betankung von Fahrzeugen mit entzündbaren Gasen (3; nach Ablauf der Frist gilt Betriebserlaubnis als erteilt bei fehlendem Widerspruch der Behörde)</td><td colspan="4">---</td></tr>
<tr><td>Nach §18 Satz 3 BetrSichV ist ein Prüfbericht einer zugelassenen Überwachungsstelle zu erbringen. Die erforderlichen Unterlagen für die Prüfung sind nach LASI LV 49/2017 Anhang 3, Antragsunterlagen für Gasfüllanlagen, zu erstellen.</td><td colspan="4">---</td></tr>
<tr><td colspan="5">Prüfung der H_2-Anlage vor Inbetriebnahme nach § 15 BetrSichV & wiederkehrende Prüfung nach § 16 BetrSichV
(Ermittlung von Prüffristen seitens Betreiber zur Gefährdungsbeurteilung innerhalb von 6 Monaten nach Inbetriebnahme)</td></tr>
<tr><td>Landesbauordnungen (hier ThürBO)</td><td>Genehmigungspflicht nach ThürBO §60 Satz 1 Absatz 6 a für Behälter mit einem Brutto-Rauminhalt > 6 m³ (3, max. +2)</td><td colspan="4">Einholung einer separaten Baugenehmigung nicht erforderlich aufgrund der Konzentrationswirkung des BImSchG.</td></tr>
</table>

Quelle: H2BZ Pilotprojekt Thüringen / Bauhaus Universität Weimar

Abb. 6: Genehmigungsaspekte einer Wasserstofftankstelle (Thüringen)

Ein kurzer Exkurs zum Sicherheitsempfinden der Öffentlichkeit in Sachen Wasserstoff findet sich in Kapitel 4.2.2.7.

[17] Auch der Erläuterungsbericht zum Planfeststellungsverfahren nach §18 AEG für die Wasserstofftankstelle Bremervörde weist explizit darauf hin, dass selbst bei ungünstigster Konstellation mit zwei vollbetankten Zügen (532 kg), vollen Druckspeichern (2.338 kg) und zwei vollen Wasserstofftrailern (je 930 kg) maximal eine Gesamtmenge von 4.900 kg resultieren kann.

3.1.2 Normen und Vorschriften

Defizite im Normen- und Vorschriftenbereich betreffen dabei insbesondere das BEMU-Segment, wo weder im rechtlichen noch im technischen Regelwerk Anforderungen und Spezifikationen auf Fahrzeuge mit Traktionsbatterie ausgelegt sind (UIC, 2019).

Eine Herausforderung im Zusammenhang mit der Batterieaufladung stellt z.B. der maximale Ladestrom im Stillstand dar. Dieser ist bei Wechselstrom (AC)- und Gleichstrom (DC)-Systemen normativ beschränkt, damit der Strom an der Schnittstelle Oberleitung <> Pantograph nicht zu groß wird. Bei AC-Systemen sind das zum Beispiel 80 A (siehe DIN EN 50367). Ein höherer Strom würde automatisch zu mehr Ladeleistung und damit zu einer schnelleren Ladung führen. Technisch wäre mithilfe unterschiedlicher Vorgehensweisen bzw. Modifikationen ein höherer Strom möglich. Hierzu laufen Forschungsarbeiten, u.a. der TU Dresden (UIC, 2019).

Alternativ kann an Linienendpunkten auch eine Aufladung über „smarte“ Elektranten, d.h. über Steckverbindungen, in Frage kommen. Diese waren bislang in ihrer Ladeleistung eher begrenzt, da die Themenstellung eben nicht eine Batterieladung in kurzen Zeiträumen war, sondern nur Kleinverbraucher versorgt werden mussten. Die neugefasste DIN EN 50546 erweitert hier den Spielraum erheblich (siehe auch 4.2.1.3). Die Fragestellung einer leistungsfähigen Fremdstromversorgung an Endhalten ist auch nicht allein auf BEMU-Fahrzeuge beschränkt, wie z.B. der iLint-Testbetrieb in Baden-Württemberg in der Winterperiode gezeigt hat[18]. Aktuelle Einschätzung seitens DB Energie ist, dass Elektranten auch hier gegenüber klassischen Zugvorheizanlagen deutliche Kostenvorteile bieten (Wittig, 2021).

Eine weitere Herausforderung ist im Zusammenhang mit dem Betrieb von Oberleitungsinseln zu erkennen, insbesondere, wenn deren Beginn und Ende auf freier Strecke unabhängig von Systemhalten positioniert ist. Hier besteht für BEMU-Fahrzeuge die Notwendigkeit den Stromabnehmer auch während der Fahrt anheben zu können („aufzubügeln“), was eine Anpassung klassischer Vorschriften erfordert. Hier gab es zwischenzeitlich Einschränkungen seitens DB Netz bezüglich des Traktionswechsels während der Fahrt (z.B. nur bei bestimmten Signalkonfigurationen), eine Wiederzulassung des uneingeschränkten Traktionswechsels ist aber absehbar.

Weitere relevante Normen:

DIN EN 62864-1:	behandelt die verschiedenen Möglichkeiten für serielle Hybride; u.a. wird der prinzipielle Aufbau eines BEMU- als auch eines HEMU-Fahrzeugs dargestellt.
DIN EN 50591:	beinhaltet simulative Vorgaben zur Bestimmung des Energieverbrauchs.

3.2 Literaturauswertung

Die Literaturauswertung zeigte zum Teil sehr unterschiedliche Herangehensweisen und Bearbeitungstiefen, einige Quellen aber auch eine durchaus deutliche „Zweckbestimmung“. Das breit angelegte, internationale Quellenstudium hat die Beurteilungsqualität ohne Frage merklich erhöht. Sehr deutlich wurde auch die „Schnelllebigkeit“, die für

[18] Hier zeigte sich der Hilfsenergiebedarf während längerer Standzeiten als kritischer Faktor, da dieser über die Brennstoffzelle abgedeckt werden musste und den Wasserstoffverbrauch damit deutlich erhöhte.

neue Technologien zwar erwartbar ist, in diesem Maße aber doch überraschend war. So haben sich Annahmen und Aussagen bereits in dem kurzen Zeitraum seit 2016, seitdem das Thema alternative Antriebe intensiver diskutiert wird, zum Teil deutlich verändert. Dies gilt allgemein für den Stand der Technik in Bezug auf technische Angaben, empfohlene Herangehensweisen, die Regulatorik, aber auch für Kostenbetrachtungen. Der Gutachter hat „ältere“ Quellen deswegen aber nicht komplett beiseitegeschoben. Sie sind unverändert nützlich zum Verständnis der Entwicklungen und Zusammenhänge, sozusagen der Historie der Überlegungen zu alternativen Antrieben.

Die Auswertung mündete in einem ersten Schritt in einen „Parameterworkshop“ mit dem Auftraggeber, in welchem diesem die wesentlichen Parametergruppen und Einzelparameter ausführlich dargestellt und diese diskutiert wurden. Erkennbar war eine zum Teil sehr große Parameterbandbreite, die ergänzt durch eigene Einschätzungen und Erfahrungswerte, ergänzt durch Beiträge des Auftraggebers und aus den Informationsgesprächen in einen Parameterkatalog überführt wurde (siehe Kapitel 8).

3.3 Hintergrundrecherchen/Kontaktierungen

Im Rahmen der Bearbeitung wurden eine Vielzahl von Informationsgesprächen (per Videokonferenz, insgesamt ca. 60) durchgeführt (siehe Tabelle 1).

Die Kontakte umfassten:

- die Fahrzeugindustrie (5 Hersteller),
- Komponentenhersteller (Batterien, Brennstoffzellen, Wasserstofftanks),
- Infrastrukturunternehmen wie DB Energie,
- Entwickler von Ladestationen,
- Wasserstoffhersteller bzw. -händler,
- Aufgabenträger, die bereits in vergleichbaren Projektrealisierungen sind und Fahrzeuge bestellt haben,
- andere Gutachter und Forschungseinrichtungen,
- Sonstige.

Sehr intensiv war beispielsweise der Austausch im Bereich Batterietechnologie, wo Gespräche mit insgesamt 6 Herstellern erfolgten.

Die Erkenntnisse aus allen diesen Gesprächen sicherten dem Gutachter einen guten Einblick in Vorgehensweisen, Problematiken und Trends.

Neben diesen Kontakten, die überwiegend der Phase der Grundlagenermittlung zuzuordnen waren, führte der Gutachter im weiteren Projektverlauf und insbesondere während der Endredaktion des Studienberichts noch zahlreiche weitere Gespräche zur Klärung von Detailfragestellungen und zur Qualitätssicherung.

Tabelle 1: Übersicht zu durchführten Informationsgesprächen

Kontakte im Rahmen der Grundlagenermittlung	
Organisation	**Thema / Fragestellung**
Landkreis Calw	Hermann-Hesse-Bahn, BEMU-Konzept, Ladeinfrastruktur/Elektrifizierung Calw
Midttrafik	Situation in Dänemark zum Thema BEMU/HEMU, Pilotprojekt Lemvigbanen
DB Energie	Oberleitungsinseln, Wasserstofftankstellen, Bahnstromversorgung
Siemens Stuttgart / Erlangen	Kooperation DB Regio-Siemens, Mireo H-Test Nagoldtalbahn, Fahrzeugkonzept Mireo
Infraserv	Industriepartner (Wasserstoff) für hess. Wasserstoffprojekt
Stadtwerke Tübingen	Austausch zu VOLTAP-Schnellladestation für BEMU
Provincie Groningen	Austausch zu Studien/Strategien Friesland/Groningen
Netze BW	Austausch zu technischen Themen (Anbindung Landesnetz bzw. lokale Energieversorger)
Straßenbau Niedersachsen	Wasserstofftankstelle Bremervörde, Planfeststellungsverfahren
Wystrach GmbH, Weeze	Austausch zu technischen Themen; u.a. WyRefueler-Tankstelle
Hitachi/ABB	Austausch zu technischen Themen; u.a. Batterieladung BEMU
Enertrag/NEB	Austausch zu Heidekrautbahn, insbesondere Sektorkopplung, Synergien, Wasserstoffherstellung
LNVG, Hannover	Austausch zu Pilotprojekt Niedersachsen, Fz-Bestellung, "grüner" Wasserstoff
NAH.SH, Kiel	Austausch zu BEMU-Strategie SH, insbesondere Oberleitungsinseln/Ladeinfrastruktur
BMVI	Studie zu Elektrifizierung vs. Alternative Antriebe (PTV / TU Dresden)
e-mobilBW	Austausch zur Wasserstoffstrategie BW ("Roadmap")
I-SME	Austausch zum Projekt Schwarzatalbahn/Thüringen, h.i. Sektorkopplung
ÖBB	ÖBB Testbetriebe Desiro Ecojet und iLint
DLR	Austausch zu DLR-Studien und Einschätzungen zu BEMU/HEMU
Stadlerrail, Bussnang/Berlin	Fahrzeugkonzepte BEMU/HEMU
Zillertalbahn	Austausch zum Wasserstoffprojekt Zillertalbahn
AKASOL	Austausch zu Batterietechnologie (AKASOL NMC Batterielieferant für iLint)
Leclanché	Austausch zu Batterietechnologie (Leclanché aktiv mit LTO-Batterien (Bombardier bzw. SNCF))
CAF, Besain/München	Fahrzeugkonzepte BEMU/HEMU (insbesondere CIVITY BEMU, aber auch Schönbuchbahn NEXIO EMU)
Ballard	Austausch zur Brennstoffzellentechnologie (Ballard Brennstoffzellenlieferant)
KCW	Studie zu alternativen Antrieben für VOR, Nachfragen
Toshiba	Austausch zur Batterietechnologie / hybriden Lokomotiventwicklungen (Toshiba u.a. Batterielieferant Mireo)
Zugpool	Austausch zum Fahrzeugkonzept NEXIO Schönbuchbahn ("Nebenstrecken EMU")
SPNV Nord	Austausch zum geplanten Pilotbetrieb BEMU/HEMU des SPNV Nord
Alstom München / Salzgitter	Fahrzeugkonzepte BEMU/HEMU
Hinicio	Austausch zu Perspektiven des HEMU-Einsatzes in Frankreich
RMV (FAHMA)	Austausch iLint-Bestellung / Hessisches Wasserstoffprojekt
Nahverkehrsberatung Südwest	Austausch zu SPNV Nord-Studie
Westfrankenbahn	Informationsaustausch Rahmenbedingungen Westfrankenbahn
BEG	Austausch zu bayrischen Sichtweisen im BEMU/HEMU-Zusammenhang
Vivarail	Austausch zu Batterietechnologie/Batterieschnellladung und Fahrzeugretrofit (Diesel > Batterie)
Proton-Motor	Austausch zur Brennstoffzellentechnologie
ABB	Austausch zu Batterietechnologie (ABB u.a. Batterielieferant für Stadler)
Talgo	Austausch zu geplantem Wasserstofffahrzeug - Talgo-Konzept VITTAL ONE
Rail Power Systems	Austausch zu Ladestationen
SAFT	Austausch zu Batterietechnologie
Tyczka	Austausch zu Verfügbarkeit/Preis grüner Wasserstoff
Intilion	Austausch zu Batterietechnologie (u.a. Lieferant für AkkuFlirt-Prototyp und Vivarail)
Hexagon Purus	Austausch zu Wasserstofftanks

4 Stand der Technik / Technologietrends im Bereich „alternative Antriebe“

4.1 Grundsätzliches zur Technologieeignung

Veröffentlichungen aus den frühen Jahren der Entwicklung der Technologiealternativen Batterieantrieb und Brennstoffzellenantrieb zeichnen bei der Darstellung von Vorteilen und Nachteilen der Technologien teilweise ein widersprüchliches Bild.

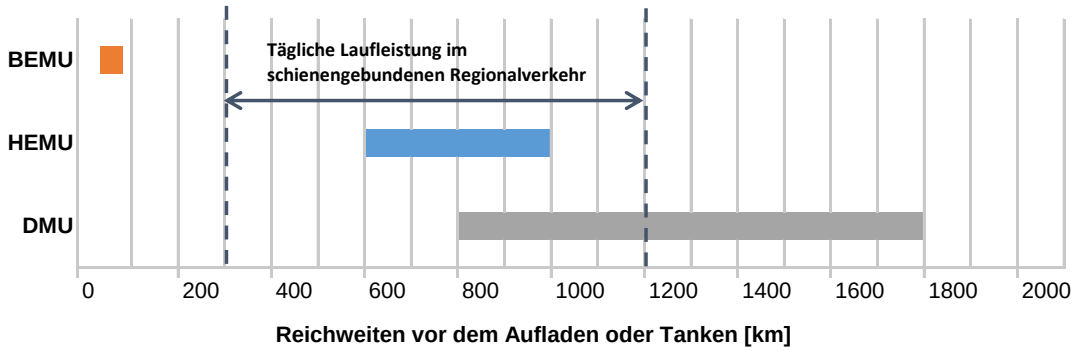
So wurden in der H2-Schienenverkehr Mitteldeutschland Studie den jeweiligen Fahrzeugen[19] unterschiedliche Nutzungsprofile zugeschrieben, dem Batterieantrieb die Überbrückung kurzer nicht elektrifizierter Streckenabschnitte, dem Brennstoffzellenantrieb lange nicht elektrifizierte Streckenabschnitte (Ludwig Bölkow Systemtechnik; Alstom; TÜV SÜD, 2018). Diese Darstellung spiegelte sich in der oben zitierten Quelle dann auch in den Angaben zu einigen wichtigen Themen bzw. Parametern wider:

- der Reichweite ohne Nachladen/Tanken,
- dem Gesamtgewicht,
- der betrieblichen Flexibilität,
- der Infrastruktur,
- den Umweltwirkungen.

Einige dieser Aspekte und einige weitere werden nachstehend etwas näher betrachtet.

4.1.1 Reichweitendiskussion

In der Diskussion über die Eignung von Batterie- bzw. Brennstoffzellenfahrzeugen für den SPNV-Regionalverkehr finden sich unverändert Darstellungen, die BEMU-Fahrzeugen eine kurze Reichweite und HEMU-Fahrzeugen eine lange Reichweite zuschreiben. Nachstehende Abbildung zeigt ein typisches Schaubild, wie es in diesem Zusammenhang häufig so oder ähnlich verwendet wird.



Quelle: Eigene Darstellung, in Anlehnung an NOW GmbH, 2020

Abb. 7: Reichweiten DMU-BEMU-HEMU im Vergleich zur Tagesfahrleistung

Der Gutachter empfindet diese Diskussion als irreführend. Richtig ist zunächst, dass die derzeitige Reichweite von Batteriefahrzeugen, wenn man die unter besonderen Rahmenbedingungen stattgefundene Rekordfahrt des Stadler Flirt Akku für den Eintrag ins

[19] In dieser Zeit (2018) bestand ein Konkurrenzkampf der Produkte Talent 3-BEMU-Prototyp und iLint-HEMU-Vorserienfahrzeug der Hersteller Bombardier und Alstom.

Guinness-Buch der Rekorde[20] einmal ausklammert, in einer Größenordnung von 60-80 km liegt. Wie bei HEMU-Fahrzeugen auch, beeinflusst die Topografie, Streckengeschwindigkeiten, Haltemuster und klimatische Bedingungen (Sommer-Winter, Thema Hilfsenergie, siehe 7.8.6.2) die Reichweite und bei schwierigen Bedingungen kann diese Reichweite auch niedriger sein, im Einzelfall vielleicht auch einmal höher.

In manchen Fällen können diese 60-80 km eine Fahrtrichtung betreffen, wenn nämlich an beiden Enden eine Lademöglichkeit besteht. In anderen Fällen wird diese Reichweite ggf. auf eine Stichstrecke anzuwenden sein, wo am Endpunkt aufgrund der örtlichen Rahmenbedingungen keine Lademöglichkeit vorgesehen werden kann oder nur mit großem Aufwand geschaffen werden könnte und man mit einer Batterieladung dann auch wieder zum Ausgangspunkt zurückkehren können müsste.

Die vom Hersteller Alstom propagierte Reichweite von 1000 km für das iLint-HEMU-Fahrzeug, die in obiger Abbildung ihren Niederschlag fand, stellt aus Sicht des Gutachters eine Momentaufnahme dar; auch diese Reichweite basiert selbstverständlich auf bestimmten Rahmenbedingungen im Zusammenspiel von Tankkapazität und Wasserstoffverbrauch (siehe 4.2.2.2). Andere Hersteller gehen mit dem Reichweitenthema anders um und nennen Werte in einer Bandbreite von 600-800 km.

Wichtig und richtig in obiger Abbildung ist der Hinweis auf übliche Tageslaufleistungen von Fahrzeugen im SPNV-Regionalverkehr, die hier in der Größenordnung von 300-1200 km angegeben werden und die Realsituation ganz gut abbilden.

Über die Betrachtung dieser theoretischen Reichweiten hinausgehend, ist es ein entscheidender Punkt im Rahmen der Eignungsbeurteilung einer Technologie, ob die Tageslaufleistungen im jeweiligen Betriebskonzept mit einem Fahrzeug, d.h. im Ganztagesbetrieb, abgedeckt werden können. Ist dies nicht der Fall, ergibt sich hieraus ein Fahrzeugmehrbedarf.

Eine dem BEMU-Fahrzeug ggf. zugeschriebene Reichweitenproblematik liegt zwar zunächst auch auf der Fahrzeugseite begründet („Batteriekapazität“), sie kann aber mit entsprechendem Aufwand infrastrukturseitig kompensiert werden, so dass Nachladevorgänge während des laufenden Betriebs stattfinden können. Die „kleine“ Reichweite eines BEMU-Fahrzeuges kann dann unbedeutend sein, wenn Infrastrukturmaßnahmen es erlauben, einen Ganztagesbetrieb abzuwickeln.

Umgekehrt nützt die „große“ Reichweite des HEMU-Fahrzeuges dann wenig, wenn Fahrzeuge, z.B. auf langen SPNV-Linien, nicht den Tagesumlauf bewältigen können. Letztere Problematik liegt nahezu allein fahrzeugseitig bei der Tankkapazität und ließe sich infrastrukturell nur abmildern, wenn ein sehr dichtes Netz an Wasserstofftankstellen vorhanden wäre und Tankvorgänge auch während des laufenden Betriebs, d.h. während Wendezeiten, abgewickelt werden könnten (siehe 4.2.2.2).

4.1.2 Fahrzeuggewicht

Die Gegenüberstellung der Fahrzeuggewichte in einigen Quellen, z.B. in der genannten Mitteldeutschland-Studie (Ludwig Bölkow Systemtechnik; Alstom; TÜV SÜD, 2018), erweckt, vereinfacht gesagt, den Eindruck „BEMU schwer, HEMU leicht“.

[20] 224 km Berlin Gesundbrunnen – Warnemünde am 10.12.2021

Beide Fahrzeugtypen weisen jedoch gegenüber rein elektrischen EMU-Fahrzeugen Zusatzkomponenten auf, die das Gewicht dieser Fahrzeuge erhöhen. Diese sind:

- BEMU-Fahrzeug: Traktionsbatterie („größer“)
- HEMU-Fahrzeug: Pufferbatterie („kleiner“), Brennstoffzelle, Wasserstofftank

Untenstehende Abbildung aus einer frühen VDE-Veröffentlichung (VDE, 2018) stellt u.a. Batteriegewichte der Fahrzeuge iLint, Talent 3 Prototyp, Mireo+H und Mireo+B gegenüber.

Tab 01 **Specifications of multiple unit batteries from different manufacturers**

Train manufacturer	Alstom	Bombardier	Siemens	Siemens
Name	Coradia iLINT	Talent 3 battery MU	Mireo hybrid MU	Mireo battery MU
Type	Fuel cell + dynamic battery	Battery MU with pantograph	Fuel cell + dynamic battery	Battery MU with pantograph
Battery type	Akaystem 18 AKM NMC-NANO	PRIMOVE Battery 50	Actia special development	Actia special development
Battery manufacturer	AKASOL	PRIMOVE (Bombardier)	Cell manufacturer Toshiba	Cell manufacturer Toshiba
Battery technology	NMC-NANO	NCM/C	NCM/LTO	NCM/LTO
Traction battery - total capacity	220 kWh	300/440 kWh	~200 kWh	~700 kWh
Traction battery - total weight	~2.6 t	7.5 t	~9 t (FC+batt)	9.5 t
DTE (distance to empty)	600–1,000 km	40–100 km	600–1,000 km	80–120 km

Quelle: VDE

Abb. 8: Vergleich von Batterieparametern bei BEMU/HEMU-Fahrzeugen

Die Werte für die beiden Siemens Mireo-Fahrzeuge liegen dabei in identischer Größenordnung, beim HEMU-Fahrzeug findet sich der Hinweis, dass das Gewicht die Brennstoffzelle beinhaltet[21]. Der vergleichsweise niedrige Wert beim iLint bezieht sich allein auf die kleinere Pufferbatterie des HEMU-Fahrzeugs. Eine Vertiefung zu den einzelnen Komponenten findet sich nachstehend in den Kapiteln 4.2 und 4.2.2. Zusammenfassend lässt sich aber festhalten, dass das resultierende Gesamtgewicht der alternativen Antriebskomponentenbei BEMU und HEMU in ähnlicher Größenordnung und deutlich über dem eines EMU-Fahrzeugs liegt (siehe auch unter Bemessungsfahrzeuge in 7.8.1).

4.1.3 Betriebliche Flexibilität

Die in der Mitteldeutschland-Studie (Ludwig Bölkow Systemtechnik; Alstom; TÜV SÜD, 2018) vermittelte Einschätzung einer „hohen“ Flexibilität eines HEMU-Fahrzeuges und einer „geringen“ Flexibilität des BEMU-Fahrzeuges hing ohne Zweifel direkt mit der oben thematisierten Reichweitenbetrachtung zusammen, d.h. hohe Reichweite implizierte hohe Flexibilität und geringe Reichweite eine geringe Flexibilität. Zu hinterfragen ist an dieser Stelle die Definition einer „betrieblichen Flexibilität“ und ihre Notwendigkeit bzw. Bedeutung im SPNV-Alltagsbetrieb. Sicher ist „betriebliche Flexibilität“ eine berechtigte Zuschreibung für einen Privat-PKW, den der jeweilige Eigentümer von seinem Wohnort aus mit einer Tankfüllung „überall hin“ steuern kann (und will). Im SPNV geht es aller-

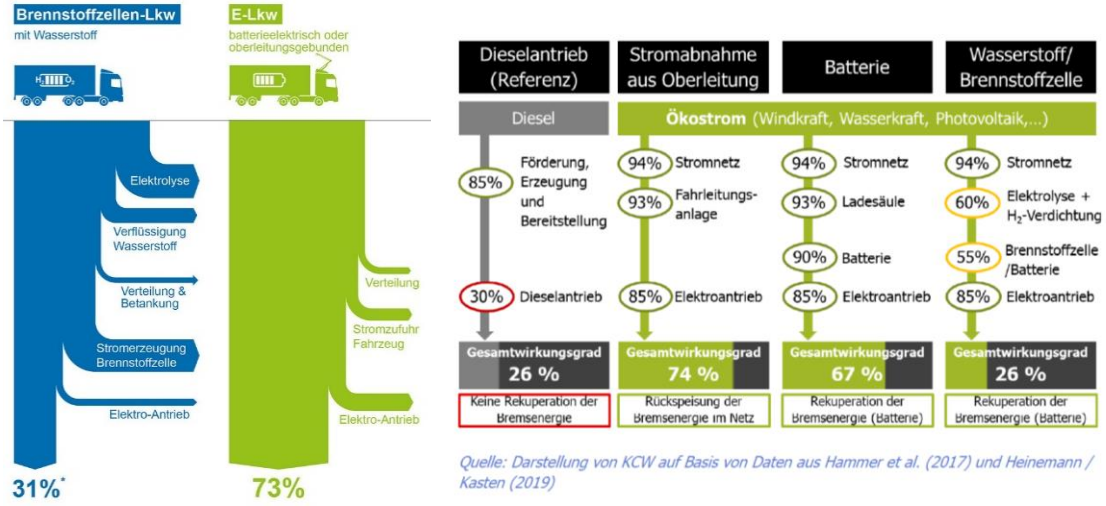
[21] Es ist anzunehmen, dass dieses Gewicht auch den Wasserstofftank beinhaltet.

dings fast ausschließlich darum, klar definierte Betriebsmuster (von A nach B und zurück nach A, und dies im Prinzip über einen Tag) abzuwickeln. Die betriebliche Flexibilität einer Tankfüllung, die dann ggf. erlaubt, anstatt nach B plötzlich ins deutlich weiter entfernte C zu fahren, muss im SPNV-Zusammenhang hinterfragt werden. Viel wichtiger erscheint die oben beschriebene Thematik der Tageslaufleistungen.

4.1.4 Wirkungsgrade

Die Wirkungsgraddiskussion ist regelmäßig Bestandteil von Technologievergleichen, wobei es wichtig ist, dabei jeweils die komplette Produktionskette der jeweiligen Energieform und nicht nur den Wirkungsgrad im Antriebsstrang, d.h. „nach dem Tanken“ zu betrachten. Gegenstand einer kritischen Betrachtung ist dabei regelmäßig die Wasserstofftechnologie, die bei ihrer Anwendung im SPNV-Bereich eine zweimalige Umwandlung erfordert: im „landseitigen“ Elektrolyseur von Strom zu Wasserstoff und in der fahrzeugseitigen Brennstoffzelle von Wasserstoff zurück zu Strom – sozusagen der Preis für die Speicherfähigkeit der Energieform.

Je nach Literaturquelle finden sich für den Einsatz von Brennstoffzellenfahrzeugen Wirkungsgrade von ca. 26-31 %, im Vergleich dazu liegen Elektrofahrzeuge, die den erzeugten Strom direkt aus der Oberleitung beziehen bei ca. 73-74 %, Batteriefahrzeuge bei ca. 67 %. Ein Brennstoffzellenantrieb läge damit in ähnlicher Größenordnung wie der Dieselantrieb.



Quelle: Öko-Institut e.V. / CC BY (links), (adaptiert) / KCW (rechts)

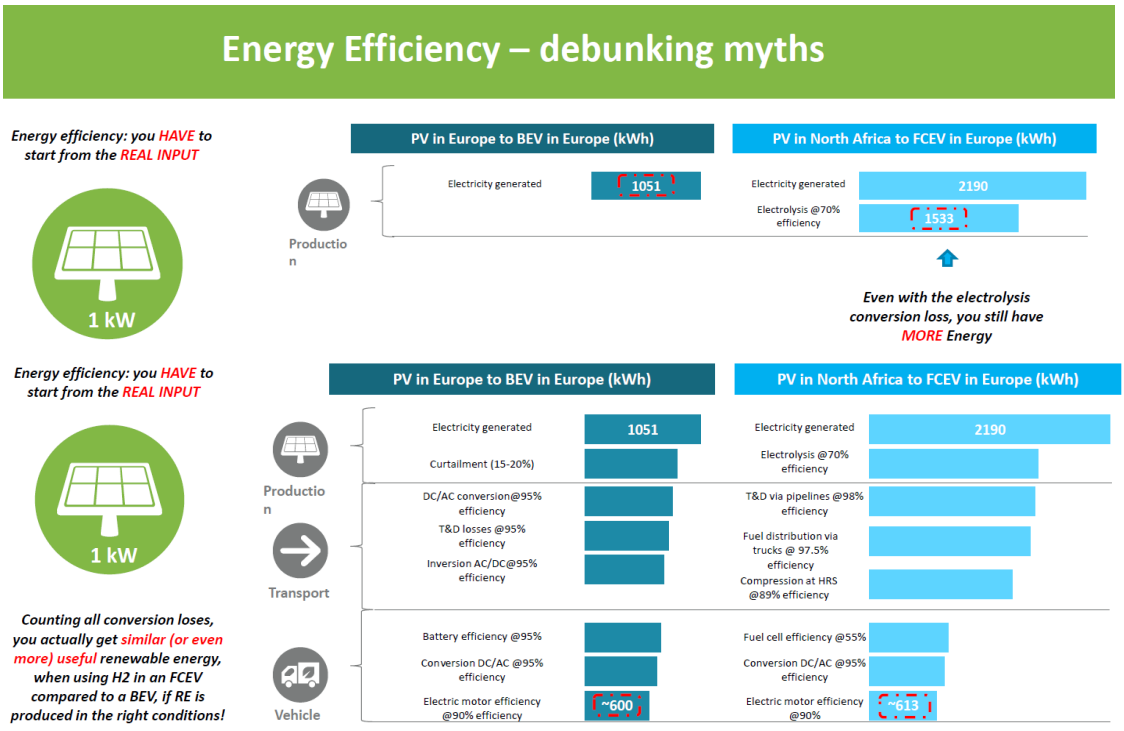
Abb. 9: Wirkungsgradvergleiche Wasserstoff vs. andere

Abb. 9: Wirkungsgradvergleiche Wasserstoff vs. andere zeigt Vergleiche, die sich auf Lkws bzw. Busse und die Verhältnisse bei Schienenfahrzeugen beziehen.

Ein Gegenargument lässt sich anhand von Abb. 10 erläutern. „Hydrogen Europe“ argumentiert hier mit der relativen Ineffizienz einer Photovoltaik basierten Stromproduktion in Europa[22], bedingt durch die zahlreichen Dunkelphasen, wogegen diese z.B. in Nordafrika eine deutlich höhere Effizienz aufwiese. Die Mehrproduktion an Strom würde dann die Verluste bei der Produktion und beim Einsatz von Wasserstoff kompensieren. Die Argumentation hat sicher ihre Berechtigung, setzt aber eine geeignete Transportlösung

[22] Aus diesem Grund werden für Konzepte zur Stromversorgung von Elektrolyse-Standorten häufig Kombinationen von Windkraft und Photovoltaik vorgesehen (Redundanz).

(Pipeline) für den Transport größerer Wasserstoffmengen voraus und blendet die trotzdem bestehende Frage des Preises bzw. der Preisunterschiede aus.



Quelle: Hydrogen Europe

Abb. 10: Energieeffizienz Batterie PV Europa vs. Wasserstoff PV Nordafrika

4.2 Technologiekomponenten „alternativer Antriebe“

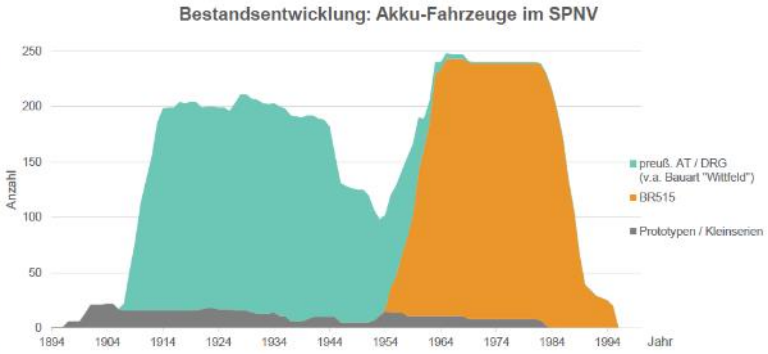
Nachstehend erfolgt eine Diskussion wesentlicher Technologiekomponenten des BEMU- und HEMU-Ansatzes, sowohl fahrzeug- als auch infrastrukturseitig. Hierbei wird zumindest kursorisch auch auf Technologiealternativen, Vor- und Nachteile, aktuelle Trends und erwartbare Entwicklungen eingegangen. Fahrzeugkonzepte im engeren Sinn werden in Kapitel 5 diskutiert, Kostenbetrachtungen bleiben Kapitel 8 vorbehalten.

4.2.1 BEMU-Technologie

Über eine rein historische Betrachtung hinaus, ist es zum Verständnis der aktuellen Entwicklungen hilfreich, sich vor Augen zu führen, dass Batteriefahrzeuge im SPNV bis in die 1990er Jahre präsent waren (siehe Abb. 11), bevor sie dann für ca. 20 Jahre „pausierten“. Nachdem ein „oberleitungsloser Betrieb“ im Straßenbahnbereich ab den 2000er Jahren immer intensiver diskutiert wurde, wenn auch mit etwas anderen Intentionen, setzte die Entwicklung im SPNV, mit Hilfe neuerer Batterietechnologie, ab Mitte der 2010er Jahre verstärkt ein.

Diese neue Generation von Batteriefahrzeugen wurde durch die Entwicklung der bei vergleichbarer Batteriekapazität deutlich leichteren Lithium-Ionen-Batterien möglich, während die historischen Fahrzeuge noch von „schweren“ Batterien auf Blei-Säure-Basis abhängig waren (siehe Abb. 12). Die neue Batterietechnologie erlaubt damit deutlich günstigere „kg/kWh“-Verhältnisse, wie in Abb. 12 und Abb. 13 erkennbar.

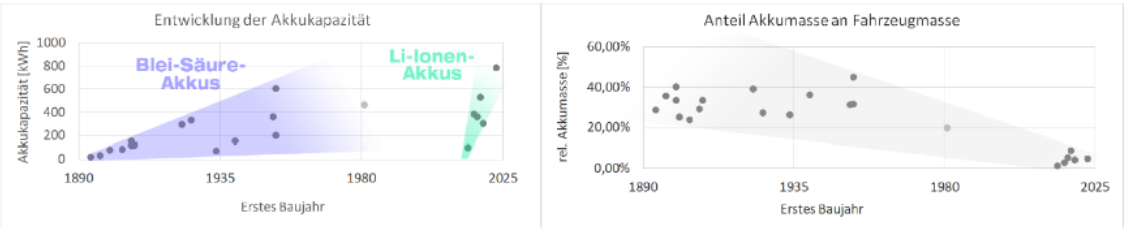
Alternative Antriebe im historischen Kontext



Quelle: Benjamin Ebrecht/TU Berlin (BBI)

Abb. 11: Batteriefahrzeuge im historischen Kontext

Evolution der Akkufahrzeuge im SPNV



- Entwicklungstand der Batteriezelltechnik bestimmt Fahrzeug-Rahmenbedingungen
  - 1909: 134 kg/kWh (AT3 / 09 „Wittfeld“)
  - 1949: 64 kg/kWh (ETA 178)
  - 1981: 40 kg/kWh (ETLO 528)
  - 2020: < 10 kg/kWh (BEMU, NMC-Technologie)
- 1981: „ETLO 528“ als baureife Fahrleitungs-Akku-Hybrid-Entwicklung verworfen

Quelle: Benjamin Ebrecht/TU Berlin (BBI)

Abb. 12: Batterietechnologien und Gewichtsverhältnisse

	ÖBB-Cityjet ECO	Talent 3 BEMU	Mireo	ETA 515 1. BS	ETA 515 5. BS
Quelle	[68], [73]	[69]	[69]	[70], [71]	
Kapazität der Traktions-batterie in kWh	528	300	700	390	520
Batterietyp	NCM/LTO	NCM/C	NCM/LTO	Bleibatterie	
Reichweite im Batteriebe-trieb in km	80	35 - 40	80 - 120	200 – 350	
Batteriegewicht in kg	14.000*	7.500**	9.500**	17.000**	22.600**
Vmax	120	140	-	100	
Gewichtsbezogene Kapazität kg/kWh	26,5	17 - 25	13,6	43,6	43,5

*) Gewicht der Batterie plus zusätzliche, notwendige Ausrüstung zur Nutzung der Batterien
**) reines Batteriegewicht

Quelle: Thomas Künzel, Dissertation TU Berlin (adaptiert)

Abb. 13: Vergleich von Kenndaten historischer / aktueller Batteriefahrzeuge

Aktuell lassen sich für NMC und LTO, die zwei innerhalb der Metatechnologie „Lithium Ionen“ am häufigsten eingesetzten Batterietypen (siehe nachstehende Erläuterungen), Werte von ca. 9 bzw. 14 kg/Kwh erreichen (siehe nachstehende Diskussion sowie Bemessungsfahrzeuge in 7.8.1).

Die PRIMOVE[23]-Batterieparameter des Talent 3-BEMU-Prototyps zeigen mit 300 kWh Batteriekapazität bei 7,5 t Gewicht ein mit 25 kg/kWh sehr ungünstiges Verhältnis (Bombardier, 2017), das sich mit aktuellen Batterieentwicklungen deutlich günstiger darstellt (siehe 4.1.2). Dementsprechend ist auch davon auszugehen, dass in dem aktuellen Projekt eines Umbaus von Talent 3-EMU- zu BEMU-Fahrzeugen für den Einsatz im Saarland eine aktuellere Batterietechnologie zum Einsatz kommt (siehe 5.2).

4.2.1.1 Batterietechnologie

Nachstehende Tabellenübersicht (siehe Abb. 14) gibt einen Überblick über wesentliche, den Einsatz von Batterien bestimmenden Kennwerte wie

- Zellspannung
- Spezifische Energie
- Energiedichte
- Leistungsdichte
- Maximale Endladerate
- Nutzbare Endladetiefe („Depth of Discharge“, DoD)

für Bleisäure-, Nickel-basierte und Lithium-Ionen-Technologien.

Table 4.1: Comparison of different battery cell chemistries

Applications	Unit of Measurement	Lead Acid	NiCd	NiMH	Lithium-ion
Cell Voltage	Volts	2	1.2	1.2	2.4-3.8
Specific Energy	Wh/kg	30-40	35-80	55-110	100-300
Energy Density	Wh/l	50-90	50-70	160-420	125-600+
Power Density	W/kg	100-200	100-150	100-500	500-5000
Maximum Discharge	Rate	6-10C	20C	15C	80C
Useful Capacity	Depth of Discharge %	50	50	50-80	>80
Charge Efficiency	%	60-80	60-80	70-90	>95
Self-Discharge	%Month	3-4	15-20	15-30	2-3
Temperature Range	◦C	-40 to 60	-20 to 70	-20 to 65	-30 to 70
Cycle Life	Number of cycles	200-400	300-1000	500-1000	>2000
Memory Effect		No	Yes	Yes (<NiCd)	No
Micro-Cycle Tolerance		Deteriorates	Deteriorates	Yes	Yes
Robustness (Over/Under Voltage)		Yes	Yes	Yes	Needs BMS

Source: Johnson Matthey Battery Systems 3rd Edition 2017 | Our Guide to Batteries

Quelle: Mott McDonald / SBCTA (adaptiert)

Abb. 14: Batteriekennwerte im Vergleich

[23] Das PRIMOVE-Batteriekonzept wurde zunächst eher für Straßenbahnanwendungen entwickelt, um bessere Rekuperation und oberleitungsloses Fahren auf kurzen Strecken zu ermöglichen.

Name	LCO	LNO	NCA	NMC	LMO	LFP	LTO
Items	Lithium Cobalt Oxide	Lithium Nickel Oxide	Lithium Nickel Cobalt Aluminium Oxide	Lihium Nickel, Manganese Cobalt Oxide	Lithium Manganese Spinel	Lithium Iron Phosphate	Lithium Titanate
Cathode	LiCoO2	LiNiO2	Li(Ni0,85Co0,1 Al0,05)O2	Li(Ni0,33Mn0,3 3Co0,33)O2	LiMn2O4	LiFePO4	e.g.: LMO, NCA, ...
Anode	Graphite	Graphite	Graphite	Graphite	Graphite	Graphite	Li4Ti5O12
Cell voltage	3,7 - 3,9V	3,6V	3,65V	3,8 - 4,0V	4,0V	3,3V	2,3 – 2,5V
Energy density	150mAh /g	150Wh/kg	130Wh/kg	170Wh/kg	120Wh/kg	130Wh/kg	85Wh/kg
Power	+	o	+	o	+	+	++
Safety	-	o	o	o	+	++	++
Lifetime	-	o	+	o	o	+	+++
Cost	--	+	o	o	+	+	o

TABLE 2. **The major components of lithium-ion batteries and their properties.**
(Source: Daimler analysis, Nationale Plattform Eletromobilität, 2010).

Quelle: TU Berlin / Daimler (adaptiert)

Abb. 15: Lithium-Ionen Batterien (Untergruppen)

Für das Verständnis aktueller Batteriefahrzeug-Entwicklungen im SPNV-Bereich ist es sinnvoll, einen kurzen Blick auf die unterschiedlichen Typen von Lithium-Ionen-Batterien zu werfen – die AbbildungenAbb. 15 undAbb. 16 liefern hierzu einen Überblick[24]. Wie bereits angesprochen, sind NMC und LTO die aktuell bevorzugten Batterietechnologien für SPNV-Fahrzeuge. Argumentationen für bzw. gegen diese beiden Batterietechnologien finden sich in einer Vielzahl von Quellen (Beispiele siehe Abb. 15 und Abb. 16); als Vorteil der NMC-Technologie wird dabei insbesondere die deutlich höhere Energiedichte und der günstigere Preis angeführt, andererseits werden der LTO-Technologie bessere Laderaten, eine deutlich höhere Lebensdauer und je nach Quelle auch eine höhere Sicherheit zugeschrieben.

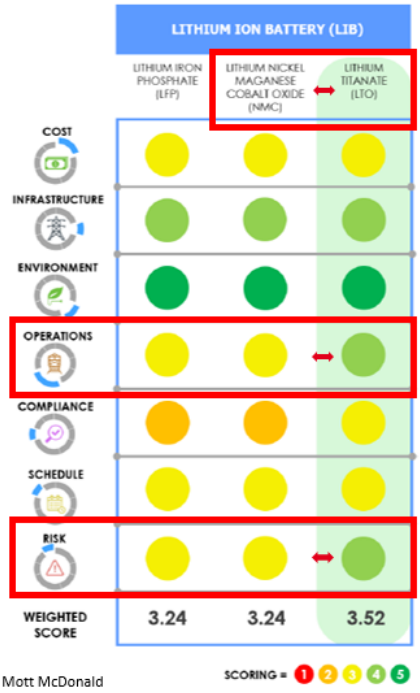
	Loodzuur	Nikkel-Cadmium	Nikkel-metaal-waterstof	Lithium Grafiet/ NMC		Lithium Titanaat Oxide
Energiedichtheid	40 Wh/kg	45-60 Wh/kg	80 Wh/kg	120-200 Wh/kg	–	70-80 Wh/kg
Cycli	200-300	1.000-1.500	300-500	500-3.000	–	15.000-20.000
Laadvermogen	--	+-	+-	+-		++
Ontladingsvermogen	++	++	++	++		++
rendement	--	+-	+-	++		++
Nominale celspanning	2,0 V	1,2 V	1,2 V	3,6 V		2,3 V
Charge-rate	0.1C	0.2C	0.2-1C	1-2C	–	4-8C
Prijs € per kWh (cell)[4]	257	400	350	200	–	600-800

Quelle: Ricardo / Arcadis (adaptiert)

Abb. 16: Vergleich der Kennwerte von NMC- und LTO-Batterien

Nachstehende Abb. 17 führt die Diskussion von Vorteilen und Nachteilen der beiden Batterietechnologien in einer Multikriterienanalyse zusammen.

[24] Zu beachten ist, dass Leistungsdaten nicht dem heutigen Stand entsprechen.



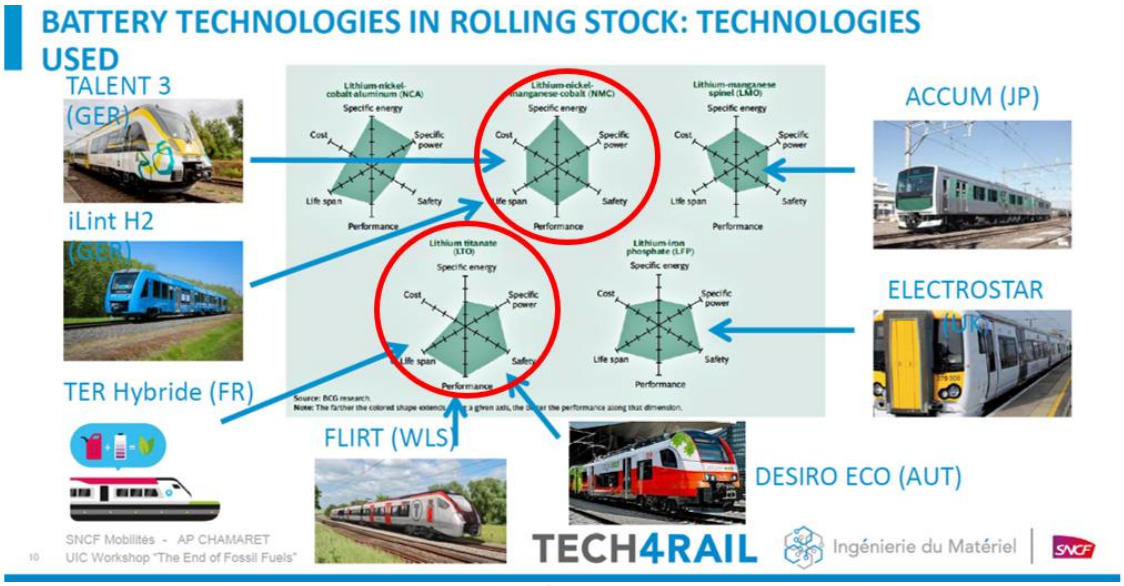
Quelle: Mott McDonald

Quelle: Mott McDonald / SBCTA (adaptiert)

Abb. 17: Multikriterienanalyse zum Vergleich von LFP, NMC und LTO-Batterien

Einen Überblick, welche Batterietechnologie für bestimmte Fahrzeuge eingesetzt wurde bzw. eingesetzt werden soll, gibt nachstehende Vortragsfolie. Die Konzentration auf NMC und LTO wird auch hier sehr deutlich. Alternative Batterietechnologien wie LMO und LFP wurden bisher eher vereinzelt eingesetzt.

Wie ebenfalls erkennbar, unterscheiden sich die Batterietechnologien z.B. deutlich in ihren zugeschriebenen Eigenschaften, so der Lebensdauer und Sicherheit, insbesondere aber auch in ihrer Energie- bzw. Leistungsdichte. So wird z.B. deutlich, dass NMC-Batterien bei der Energiedichte besser abschneiden.



Quelle: André-Philippe Chamaret, SNCF / UIC-workshop, Zürich, 11/2019

Abb. 18: Eingesetzte Batterietechnologien

Eine hohe Energiedichte unterstützt dabei die Reichweite, eine hohe Leistungsdichte die Beschleunigungsfähigkeit. Historisch, d.h. vor der Verfügbarkeit der Lithium-Ionen-

Batterietechnologie, waren Batterien im Bereich der Leistungsdichte sehr schwach, was dann z.B. in der Diskussion um Lösungen für das oberleitungslose Fahren im Straßenbahnbereich auch zu Konzepten geführt hat, die Batterien und Superkondensatoren kombinierten. Letztere kompensierten dann die Schwäche der Batterien.

Das Anforderungsprofil für eine allein für die Traktion verantwortliche Batterie im BEMU-Einsatz unterscheidet sich daher vom Anforderungsprofil einer Pufferbatterie im HEMU-Einsatz, wo die Brennstoffzelle für eine kontinuierliche Energiezufuhr sorgt, gleichzeitig aber Leistungsspitzen eher nicht „schätzt“. Hier kommt der Batterie dann eher eine Leistungsaufgabe zu.

	High-Power		High-Energy		
Parameter	**Xs Yp**	**6s 6p** (max. Konfig)	**Xs Yp**	**6s 6p** (max. Konfig)	**Einheit**
Nennspannung	X * 133,2	799,2	X 132,1	792,6	V
Nennkapazität [1) 2)]	Y * 46	276	Y * 70	420	Ah
Nenn-Energiegehalt [1) 2)]	X * Y * 6,1	220	X * Y * 9,2	332, 8	kWh
Kont. Entladestrom	Y * 138	828	Y * 138	828	A
Max. Entladestrom	Y * 460 (<20s)	2760 (<20s)	Y * 210 (<10s)	1260 (<10s)	A
Kont. Ladestrom	Y * 138	828	Y * 70	420	A
Kont. Entladeleistung [3)]	X * Y * 18,3	661	X * Y * 18,2	656	kW
Max. Entladeleistung [3)]	X * Y * 61,2 (<20s)	2205 (<20s)	X * Y * 27,7 (<10s)	998 (<10s)	kW
Kont. Ladeleistung [3)]	X * Y * 18,3	661	X * Y * 9,2	332	kW

Quelle: Intilion (adaptiert)

Abb. 19: Kenndaten von „High Power“- und „High Energy“-Batterien

Die Möglichkeiten, die sich in der Batteriekonfiguration zwischen der Energie- und der Leistungsorientierung bieten, werden auch beim Blick auf das Intilion-Portfolio deutlich (siehe Abb. 19).

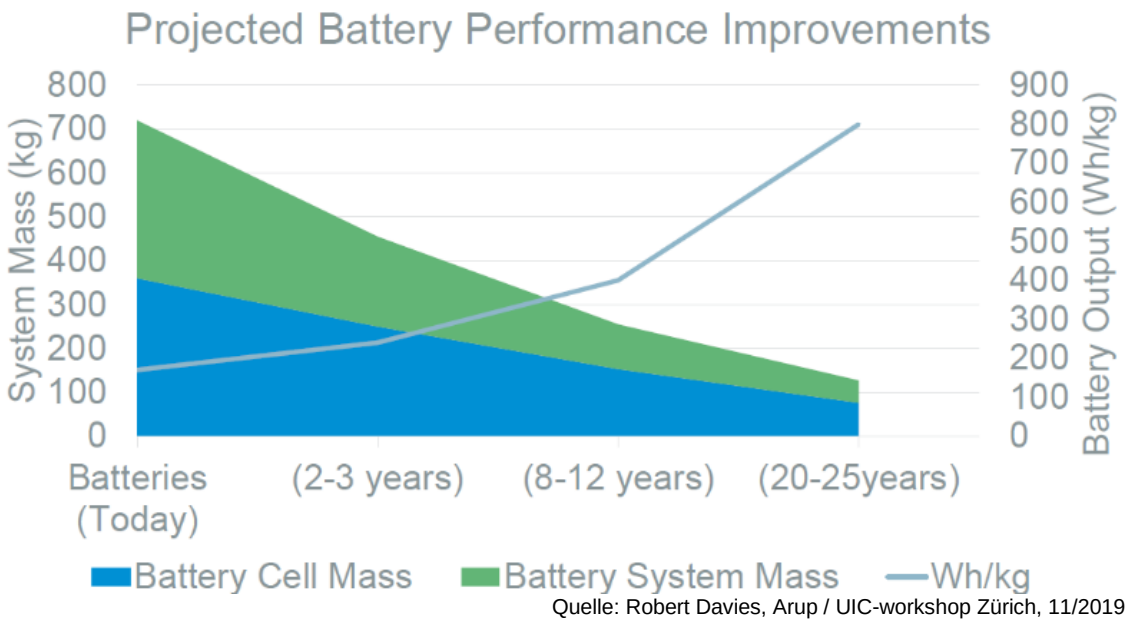
Dieses bietet eine „High Power“ und eine „High Energy“-Batterievariante an. Demgemäß wurde der Flirt Akku-Prototyp, für den eine Batteriekapazität von 880 kWh berichtet wurde, offenbar mit 4 „High Power“-Batterien ausgestattet[25].

Die Leistungsdaten von Lithium-Ionen-Batteriezellen wurden im Verlauf der letzten Jahre immer weiter verbessert. Als Beispiel sei hier die LTO-Batteriezellentwicklung von 20 Ah über 23 Ah zu 26 Ah bei Toshiba genannt (siehe: global.toshiba/ww/products-solutions/battery/scib/next/High-Energy-type26Ah). Die Gegenüberstellung dort zeigt bei gleichbleibenden Abmessungen eine leichte Gewichtszunahme von ca. 515 g über ca. 550 g zu ca. 560 g (+ 9%), gleichzeitig aber einen deutlichen Anstieg der Energiedichte von 89 Wh/kg über 96 Wh/kg zu 106 Wh/kg (+ 19%).

Im Sinne der Austauschbarkeit der Zellen ist dabei insbesondere wichtig, dass die Abmessungen identisch bleiben, die leichte Gewichtszunahme ist zu verschmerzen.

Es wird erwartet, dass die Entwicklungen im Batteriesektor noch auf absehbare Zeit zu weiteren Verbesserungen der Einsatzparameter führen werden, sei es in Form einer Reduzierung der Zell- und Systemgewichte als auch der Batteriekapazität bezogen auf das Batteriegewicht (siehe Abb. 20).

[25] Dies erstaunt auf den ersten Blick, da das Fahrzeug ja u.a. durch seinen Reichweitenrekord Schlagzeilen gemacht hat (siehe 4.1.1), weswegen man grundsätzlich ja einen Fokus auf die Energiedichte erwarten würde.



Quelle: Robert Davies, Arup / UIC-workshop Zürich, 11/2019

Abb. 20: Mittelfristige Entwicklungstendenzen im Batteriesektor (Gewicht<>Kapazität)

Vergleichbare Entwicklungsperspektiven finden sich auch in Leclanché-Quellen (siehe (Leclanché, 2021)). So basiert das Leclanché M3 Powermodul (Leclanché, 2021) bereits auf LTO-Batteriezellen mit 34 Ah, denen eine maximale Lebensdauer von 20 Jahren zugeschrieben wird.

Dies bestätigt Siemens-Angaben zur Batterielebensdauer des Mireo+B-Fahrzeugs von 15 Jahren, ebenfalls auf LTO-Basis (siehe entsprechende Annahme des Gutachters in 8.2.2.1). Demgegenüber wird die Lebensdauer von NMC-Batteriezellen aktuell mit ca. 8 Jahren angesetzt[26].

In beiden Fällen werden die effektiven Betriebsbedingungen Einfluss auf die resultierende Lebensdauer haben.

Depth of discharge	Discharge cycles (NMC / LiPO4) @1C	Cycles @1C (LTO) *Xalt	Cycles @4C (LTO) *Leclanche
100% DoD	~300 / 600	60,000	15,000
80% DoD	~400 / 900	90,000	21,000
60% DoD	~600 / 1,500	135,000	29,000
40% DoD	~1,000 / 3,000	?	?
20% DoD	~2,000 / 9,000	?	?
10% DoD	~6,000 / 15,000	?	?

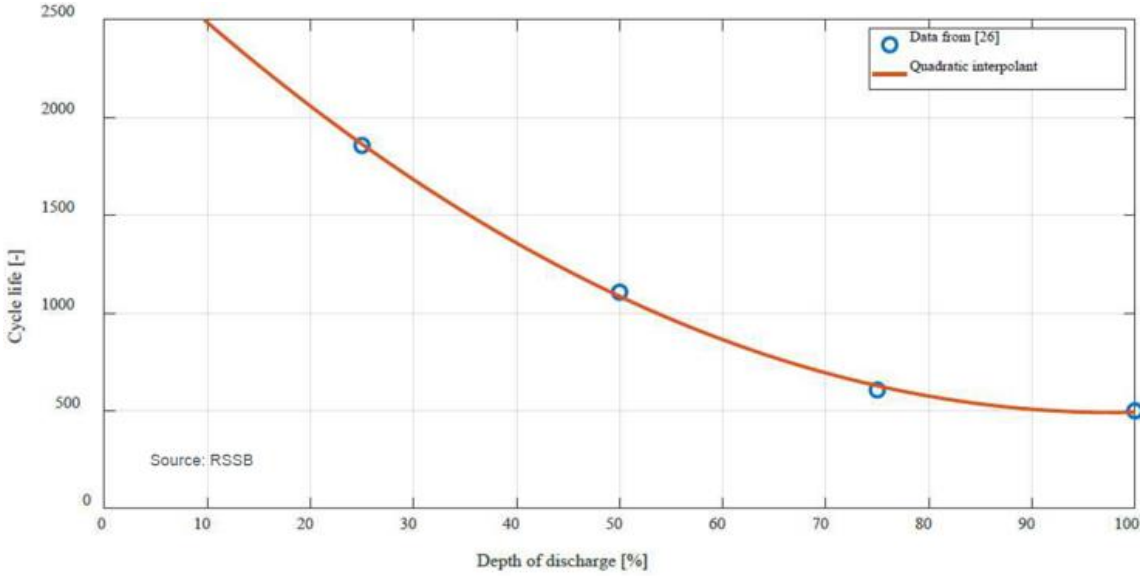
Quelle: Ricardo / Arcadis (adaptiert)

Abb. 21: Zusammenhang zwischen DoD, Ladezyklen und C-Koeffizient

Entladetiefe („Depth of discharge“, DoD) und Ladezyklen sind zwei weitere bestimmende Kenngrößen in der Beurteilung von Batteriekonzepten. Hier spielt dann auch der sogenannte C-Koeffizient eine entscheidende Rolle (siehe Abb. 21). Ein Koeffizient von 1C bedeutet dabei, dass eine Batterie innerhalb von einer Stunde komplett ge- oder entladen wird, ein Koeffizient von 4C bedeutet eine komplette Ladung bzw. Entladung innerhalb von 15 Minuten. Insbesondere die Schnellladefähigkeit von Batterien, z.B. während eines Haltestellenaufenthalts an einem als Oberleitungsinsel eingesetzten Kreuzungsbahnhof oder während einer Wendezeit, ist eine wesentliche Bedingung für das Funktionieren von BEMU-Betriebskonzepten.

[26] Der Gutachter hat die beiden Batterietechnologien, die sich auch preislich deutlich unterscheiden, in einer Vergleichsrechnung (siehe 10.1.5) gegenübergestellt.

Es ist nachvollziehbar, dass Batterien unter 4C-Bedingungen eine geringere Anzahl an Be- und Entladevorgängen „vertragen“. Die Entladetiefe ist dann eine weitere bestimmende Einflussgröße (siehe dazu auch 7.8.6.1). Abb. 22 macht deutlich, dass der Zusammenhang zwischen DoD und Zyklenzahl nicht linear ist.



Quelle: Robert Davies, Arup / UIC-workshop Zürich, 11/2019

Abb. 22: Zusammenhang zwischen DoD und Ladezyklen

Ein Blick auf aktuell in Deutschland angebotene BEMU-Fahrzeuge lässt eine Bandbreite verwendeter Batteriekapazitäten von ca. 600-900 kWh erkennen, wobei sich die jeweilige Auslegung stark an den jeweiligen Strecken- bzw. Netzerfordernissen orientiert. Zu beachten ist, dass sowohl verfügbare Einbauräume als auch Gewichtslimits (Achslasten!) keine beliebige Steigerung der Batteriekapazitäten zulassen.[27]

Damit ist zwangsläufig auch das Thema Reichweite nicht frei verhandelbar (siehe 4.1.1). Die Gutachter haben für die Konfiguration der Bemessungsfahrzeuge 600 kWh und 800 kWh als Parameter verwendet (siehe 7.8.1).

4.2.1.2 Oberleitungsinseln

Unter Oberleitungsinseln bzw. Oberleitungsinselanlagen (OLIA) versteht man punktuell, d.h. ohne Anschluss an bestehende, elektrifizierte Strecken, angeordnete Elektrifizierungsabschnitte, die es Batteriefahrzeugen erlauben, ihre Batterien ganz oder teilweise aufzuladen. Diese können grundsätzlich auf freier Strecke oder in Bahnhofsbereichen angeordnet werden. Letztere Variante wurde in den bisherigen Projekten des BEMU-Segments bevorzugt (siehe 6.1), da hier die Haltestellenaufenthaltszeiten, ggf. an Kreuzungsbahnhöfen auch entsprechend verlängert, genutzt werden können. Je nach Streckengeschwindigkeit würden bei Oberleitungsinseln auf freier Strecke erhebliche Längen erforderlich sein, um ausreichende Ladezeiten zu gewährleisten.

In Bahnhofsbereichen errichtete Oberleitungsinseln weisen, je nach örtlichen Rahmenbedingungen, üblicherweise Längen im Bereich von ca. 500 m – 3000 m auf.

[27] Zumindest nicht bei aktuellen Batterietechnologien.

Derartige punktuelle Oberleitungsinseln erfordern, da keine Verbindung zum Bahnstromnetz bzw. elektrifizierten Strecken besteht, eine spezifische Anbindung an das örtliche/regionale Hoch- ggf. auch Mittelspannungsnetz. Hier muss gewährleistet sein, dass entsprechende Strommengen kontinuierlich zur Verfügung gestellt werden können. Der technische Aufwand für derartige Anbindungen kann im Einzelfall sehr unterschiedlich sein.

Quelle: DB Energie GmbH

Abb. 23: Bahnstromversorgungsalternativen für Oberleitungsinseln

In diesem Zusammenhang ist auch zu prüfen, ob eine Oberleitungsinsel zwingend mit („deutschem“) Bahnstrom, d.h. 15 kV 16,7 Hz, zu betreiben ist oder ggf. direkt mit 25 kV 50 Hz (siehe Abb. 23), was eine deutliche Vereinfachung auf der Infrastrukturseite bedeutet (zu fahrzeugseitigen Aspekten siehe 5.2).

Gerade in der Abwägung zwischen einer Vollelektrifizierung und der Errichtung einer Oberleitungsinsel kann dieser Aspekt sehr entscheidend sein, da die Vollelektrifizierung aufgrund ihrer Lückenschlussfunktion diese zusätzliche Anbindung in der Regel nicht benötigt (Ausnahme: lange Strecken mit hohem Kapazitätsbedarf). Dies ist ebenfalls zu beachten, wenn über die BEMU-Technologie als Zwischenlösung bis zu einer späteren Vollelektrifizierung nachgedacht wird.

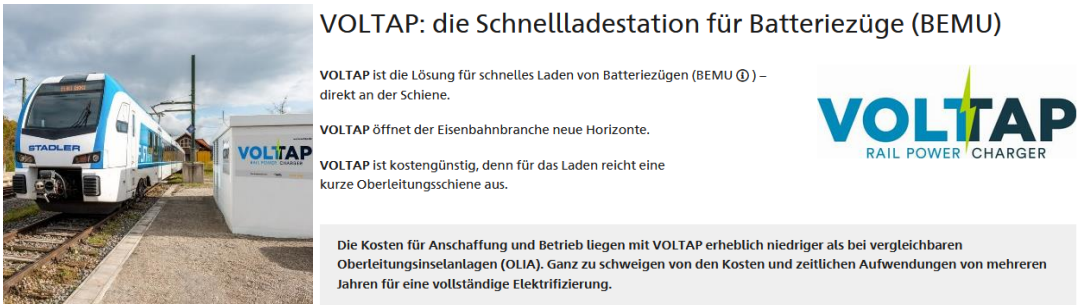
Bei der Betrachtung von Infrastrukturszenarien (siehe 7.8.2) ist daher regelmäßig die Errichtung einer Oberleitungsinsel mit der Verlängerung bestehender elektrifizierter Abschnitte hinsichtlich der energetischen Wirksamkeit zu vergleichen (siehe Kapitel 9).

4.2.1.3 Ladestationen / Elektranten

Ladestationen sind als technische Alternative zu Oberleitungsinseln zu sehen, insbesondere mit der Zielsetzung einer einfacheren Abwicklung und geringerer Kosten.

Während Oberleitungsinseln als klassische Bahninfrastruktur zu sehen sind und damit zwingend einer Planungs- und Bauabwicklung über DB Netz / DB Energie bedürfen (Ausnahme NE-Infrastruktur), werden Ladestationen seitens des EBA als Serviceeinrichtungen klassifiziert, die auch von Dritten erstellt/betrieben werden können. Ob diese Option im Einzelfall und im Gesamtzusammenhang eines größeren Projektes sinnvoll einsetzbar ist, muss im Einzelfall geprüft werden.

Die grundsätzlich vorhandene Option hat in jedem Fall dazu geführt, dass private Anbieter auf diesen Markt drängen (siehe Abb. 24).



Quelle: VOLTAP (Stadtwerke Tübingen / Furrer & Frey)

Abb. 24: VOLTAP-Ladestation – Test in Pfäffingen mit Flirt Akku-Prototyp

Das unter dem Markennamen VOLTAP vorgestellte Produkt ist eine Gemeinschaftsinitiative der Stadtwerke Tübingen und des Schweizer Unternehmens Furrer & Frey, letzteres seit vielen Jahren mit der Thematik der Bahnstromversorgung befasst. Der Prototyp einer derartigen Ladestation wurde im Oktober 2021 in Pfäffingen mit dem Stadler Flirt Akku-Prototypfahrzeug (siehe 5.2) erfolgreich getestet.

Auch hier wird auf den „Umweg“ 16,7 Hz des deutschen Bahnstroms verzichtet, eine Ladung erfolgt mit 15 kV oder 25 kV jeweils mit 50 Hz. Ein Anschluss an das lokale oder regionale Mittelspannungsnetz (10 kV oder 20 kV) ist ausreichend.

Ein ähnliches Produkt wird von der Firma RPS (Rail Power Systems) vorangetrieben, die aber auch mit der Erstellung „klassischer“ Ladeunterwerke für DB Energie befasst ist (u.a. für das X[28]MU-Netz Schleswig-Holstein, siehe 6.1.1) und im Februar 2022 dazu einen Rahmenvertrag unterzeichnet hat.

Einen weiteren Baustein für die lokale Stromversorgung bieten Elektranten und Zugvorheizanlagen, die über eine Steckverbindung eine Stromversorgung zulassen. Diese Vorgehensweise bleibt aber auf Endhalte mit längeren Standzeiten beschränkt.

Neben dem Aspekt der Batterieladung steht dabei insbesondere die Möglichkeit im Vordergrund, Nebenverbraucher während Standzeiten nicht über die Traktionsbatterie versorgen zu müssen. Diese Problematik besteht im Übrigen auch für Brennstoffzellenfahrzeuge und kann dort durchaus kritischen Einfluss auf den Wasserstoffverbrauch haben (siehe 5.3 und 7.8.6.2).

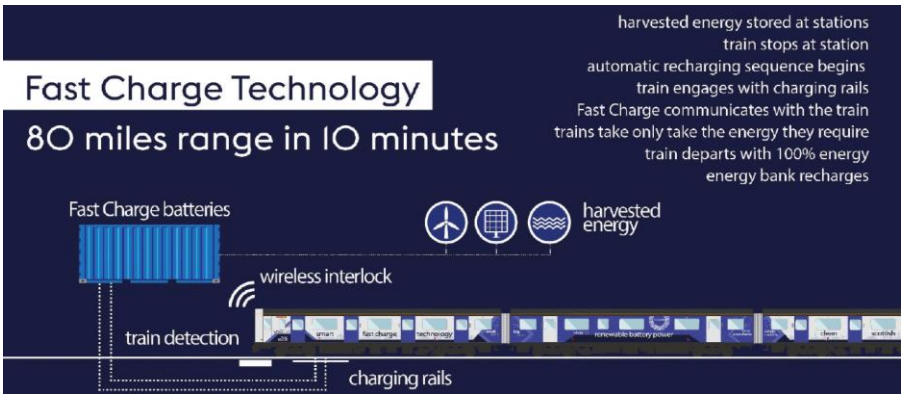
Quelle: DB Energie GmbH

Abb. 25: Stationäre Ladeeinrichtungen (Elektranten, Zugvorheizanlagen)

[28] X steht hier als Variable für zunächst noch nicht festgelegten Technologiealternativen BE bzw. HE (Batterie bzw. Wasserstoff).

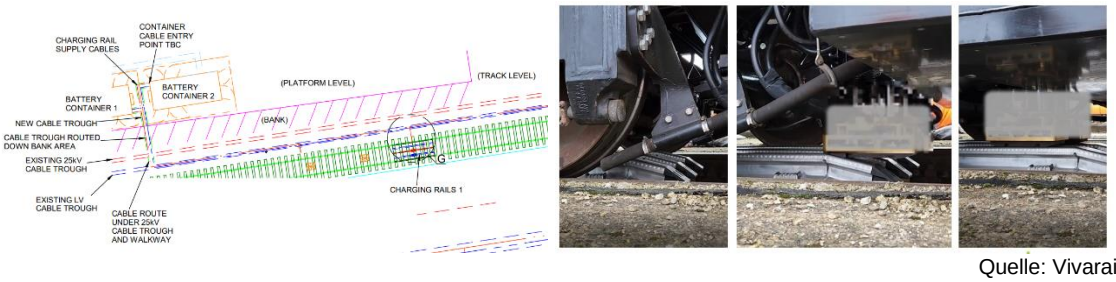
Sogenannte „smarte“ Elektranten sollen dabei, gerade für Batteriefahrzeuge wichtig, künftig, nach der Neufassung der DIN EN 50546 auch höhere Ladeleistungen zulassen (siehe Abb. 25 und (Wittig, 2021)).

In diesem Zusammenhang erwähnenswert ist auch die zunächst für den Markt in Großbritannien von der Firma Vivarail (siehe auch 6.1.7) entwickelte Schnellladetechnik (siehe Abb. 26 und Abb. 27).



Quelle: Vivarail

Abb. 26: Vivarail-Konzept für Schnellladestationen



Quelle: Vivarail

Abb. 27: Vivarail-Ladestation: Stromschiene im Gleisbereich

Anders als bei den in Deutschland propagierten, auf eine Stromaufnahme über den Stromabnehmer ausgerichteten, Ladestationen erfolgt hier die Ladung über eine Stromschiene im Gleisbereich (siehe Abb. 27), die der Zug automatisch aktiviert. Ähnlich wie bei dem von Alstom für den Straßenbahnsektor entwickelten System (Zielrichtung „oberleitungsloses Fahren“) steht die Stromschiene hier nur unter Spannung, wenn sich ein Zug darüber befindet und die Aktivierung erfolgt.

Ein flächendeckender, flexibler Einsatz dieser Lösung erfordert natürlich die entsprechende fahrzeugseitige Ausrüstung[29].

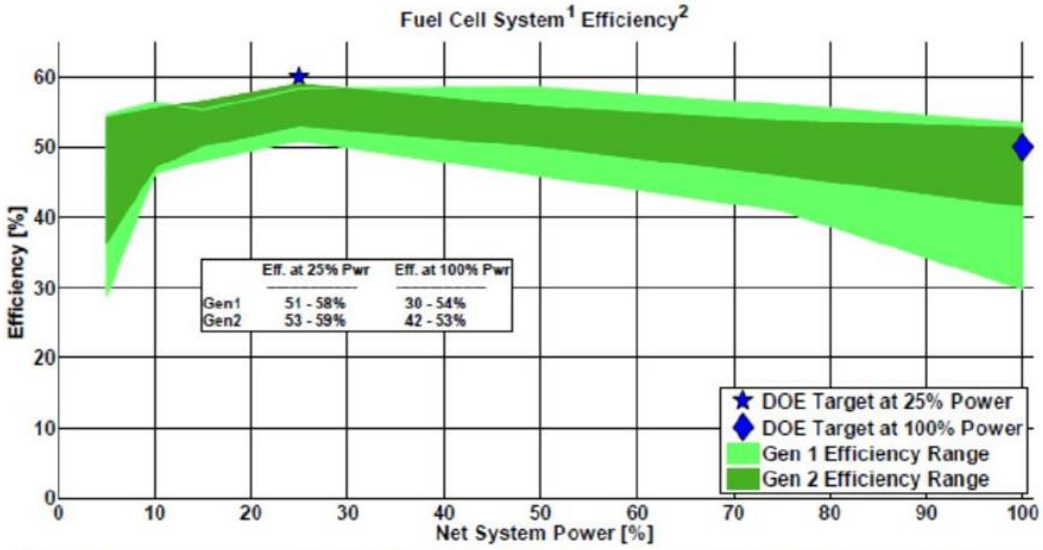
4.2.2 HEMU-Technologie

Im Vergleich zum BEMU-Ansatz, der im Vergleich nur sehr wenig Umgang mit neuen Technologiekomponenten erfordert (Batterien, ggf. noch Oberleitungsinseln / Ladestationen, siehe oben) erfordert der HEMU-Ansatz das Beschreiten von deutlich mehr „Neuland“ sowohl auf der Fahrzeug- als auch auf der Infrastrukturseite. Nicht zu unterschätzen sind auch Aspekte der Fahrzeugwartung und Sicherheitsaspekte.

[29] Im Prinzip so wie in anderen Bahnnetzen alle Fahrzeuge über einen Stromabnehmer verfügen müssen, um eine Ladestation nutzen zu können.

4.2.2.1 Brennstoffzellen

Brennstoffzellen sind elementarer Bestandteil von Brennstoffzellenfahrzeugen bzw. eines Wasserstoffbetriebs. Sie sind verantwortlich für die Rückverwandlung des an Bord der Fahrzeuge mitgeführten Wasserstoffs in elektrische Energie. Brennstoffzellen sind sozusagen „rückwärts“ wirkende Elektrolyseure, für beide findet im SPNV-Bereich die PEM-Technologie Anwendung (siehe 4.2.2.6).



Quelle: National Renewable Energy Laboratory (Wipke-Sprik-Kurtz-Ramsden) / US DoE (Garbak), 2010

Abb. 28: Effizienz einer Brennstoffzelle (Systemebene)

Der Wirkungsgrad („die Effizienz“) der Brennstoffzelle ist ein wesentlicher Faktor bei der Ermittlung des Gesamtwirkungsgrads (siehe 4.1.4) der Wasserstofftechnologie. Vereinfachend kann die Effizienz auf der Systemebene mit ca. 50 % angenommen werden (siehe Abb. 28), die Effizienz von Einzelkomponenten kann hiervon abweichen[30]. Der theoretische Heizwert von Wasserstoff liegt bei 33,3 kWh/kg (=100 %). Eine Brennstoffzelleneffizienz von 50 % erlaubt also die Erzeugung von ca. 16,7 kWh/kg[31].

Wesentliche Steigerungen der Effizienz sind nicht zu erwarten; Verbesserungen sind erwartbar im Bereich Lebensdauer und Preis (siehe 8.4).

4.2.2.2 Wasserstofftank und Tankprozess

Zur Reichweite von Brennstoffzellenfahrzeugen finden sich in den Veröffentlichungen der Fahrzeugindustrie und sonstiger Literatur sehr unterschiedliche Angaben (siehe auch Grundsatzdiskussion in 4.1.1). Der Hersteller Alstom wirbt mit 1000 km Reichweite für seine iLint-Serienfahrzeuge, während z.B. der Hersteller Siemens für seine ebenfalls zweiteiligen Mireo+H-Fahrzeuge von 600 km ausgeht (siehe Abb. 29)[32]. Auch verschiedene Angaben anderer Hersteller bzw. für andere Plattformen zeigen eher eine Tendenz in Richtung 600 km.

[30] Angaben hierzu sind nicht immer vollständig konsistent.
[31] Beim iLint-Testbetrieb in Baden-Württemberg wurde über einen Zeitraum von 7 Monaten eine Stromabgabe von 16-18 kWh gemessen (im Winter etwas niedriger).
[32] Maximal ggf. 800km; höhere Reichweiten für größere Fahrzeugeinheiten?

Quelle: Siemens

Abb. 29: Mireo+H – Reichweite für 2-teiliges Fahrzeug

Die Reichweite ist dabei keine feststehende, statische Größe, sie ist vielmehr von mehreren Faktoren abhängig:

- der Tankkapazität an Bord eines Fahrzeugs,
- den Rahmenbedingungen beim Tankprozess,
- den nicht zu unterschreitenden Mindestdruck eines Wasserstofftanks,
- des Wasserstoffverbrauchs auf spezifischen Strecken,
- den klimatischen Bedingungen,
- der Alterung der Technologiekomponenten.

Die Tankkapazität auf der Fahrzeugseite hat eine Gewichts- und Volumenkomponente, d.h. die Frage, wo in einem Fahrzeug Wasserstofftanks angeordnet werden können und wie viele ist von großer Bedeutung, umso mehr bei „kleinen“ Fahrzeugen (ca. 50 m Länge). Das Verhältnis Tankgewicht zu Tankinhalt liegt dabei in der Größenordnung von 93 % zu 7 % (siehe Abb. 30), d.h. ein Tankinhalt von z.B. 260 kg (wie beim iLint-Serienfahrzeug) würde ein Gesamtgewicht des vollen Tanks von ca. 3,7 t bedeuten[33].

Hydrogen type 4 tank information*

Hexagon Purus

	Nominal working pressure (15°C)	Outside diameter	Overall length	Tank weight	Water volume	Hydrogen capacity	Weight ratio (hydrogen weight/tank weight)	Suitable for neck mount	Approval
	MPa	mm	mm	kg	L	kg	%		
A	25	503	2342	94	350	6.3	6.7	✔	TPED
B	25	654	2413	147	581	10.4	7.1	✔	ABS/US DOT
C	25	653	4419	267	1170	21.0	7.9	✔	ABS/US DOT
D	25	653	5689	342	1544	27.8	8.1	✔	ABS/US DOT
E	30	509	2342	112	350	7.4	6.6	✔	TPED
F	31.8	503	2342	94	350	7.8	8.3	✔	TPED/ADR**
G	35	430	3190	101	312	7.5	7.4	✔	EC79/HGV2
H	35	430	2110	67	193	4.7	7.0	✔	EC79/HGV2
I	35	509	2342	112	350	8.4	7.5	✔	EC79
J	38.1	509	2342	112	350	9.0	8.0	✔	TPED/ADR**
K	50	520	2424	180	347	11.0	6.1		TPED
L	70	332	921	33	36	1.4	4.2	✔	EC79
M	70	440	1050	59	76	3.1	5.3	✔	R-134/HGV2
N	70	530	2154	188	244	9.8	5.2	✔	EC79/HGV2
O	70	705	2078	272	457	18.4	6.8	✔	R-134/ HGV2 planned
P	95	515	2783	365	254	12.4	3.4	✔	PED/US DOT

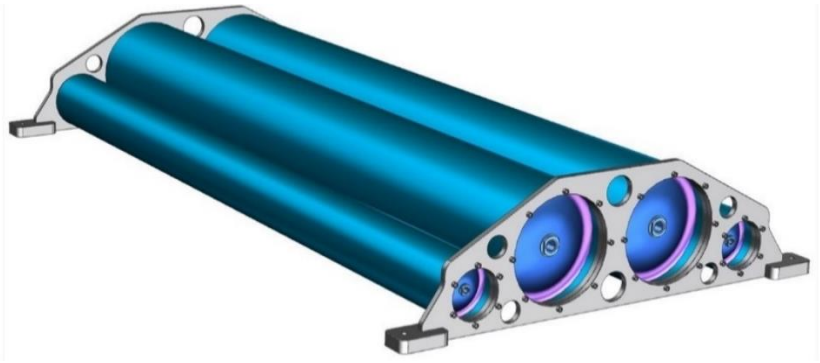
→ 7 %

Quelle: Hexagon Purus (adaptiert)

Abb. 30: Kapazitäten und Gewichte von Wasserstofftanks

[33] Dies führt u.a. dazu, dass das Komponentengewicht eines HEMU-Fahrzeuges nur geringfügig unter dem eines BEMU-Fahrzeugs liegt (Brennstoffzelle + Wasserstofftank + Pufferbatterie <> Traktionsbatterie), siehe auch 4.1.2.

Die Anordnung der Wasserstofftanks erfolgt dabei entweder im Dachbereich wie beim iLint oder Mireo+H (siehe Abb. 31) oder in einem separaten Antriebsmodul (siehe auch Kapitel 5.3).

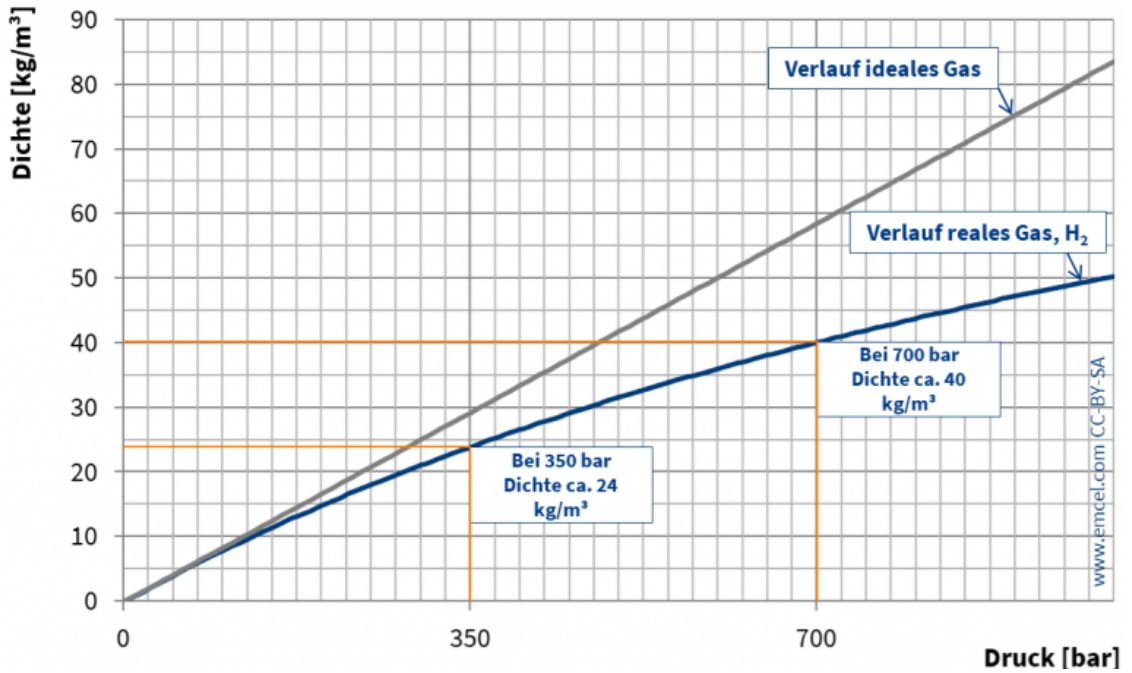


Quelle: Siemens

Abb. 31: Dachposition der Wasserstofftanks beim Siemens Mireo+H-Fahrzeug

Die Unterflurposition wird für Wasserstofftanks, anders als z.B. für Batterien, vermieden (Schotterschlag etc.). Der maximale Tankinhalt in einem aktuellen SPNV-Fahrzeug ist in der Größenordnung von ca. 300 kg zusehen; separate Antriebsmodule bieten hier grundsätzlich etwas mehr Freiraum.

Die Rahmenbedingungen beim Tankprozess manifestieren sich im Wesentlichen durch das Druckgefälle, dass an einer Wasserstofftankstelle zur Verfügung steht. Wichtig ist dabei der nichtlineare Zusammenhang zwischen Druck und Tankinhalt (siehe Abb. 32).



Quelle: Emcel / CC BY

Abb. 32: Nichtlineare Abhängigkeit Tankinhalt <> Druck

Zum Überströmen des Wasserstoffs aus dem stationären Tank in den Tank des Wasserstofffahrzeuges muss ein Druckgefälle bestehen. Die fahrzeugseitigen Tanks sind aktuell für einen Maximaldruck von 350 bar ausgelegt, auf diesen bezieht sich auch die maximale Tankkapazität. Ist die Wasserstofftankstelle mit einem 500 bar Tank ausgestattet (siehe Abb. 33) und dieser maximal gefüllt, bestehen optimale Tankbedingungen.

Modularer Aufbau und Typ IV-Behälter: Blick ins Innere eines WyCarrier-Systems von Wystrach. (Bild:

Wystrach liefert 500 bar-Speicher für Infraserv Höchst-Wasserstofftankstelle

28. April 2021 Verkehrsindustrie

Quelle: Wystrach GmbH

Abb. 33: 500 bar Wasserstoffspeicher für Tankstelle Infraserv Höchst

Verfügt der stationäre Wasserstofftank nur noch über einen Restdruck von 350 bar (oder steht ggf. überhaupt nur ein 350 bar Tank zur Verfügung), kann der fahrzeugseitige Tank nicht mehr maximal befüllt werden.

In der Praxis stehen, wie in den vorangegangenen Abbildungen erkennbar, auf beiden Seiten natürlich nicht nur ein Tank zur Verfügung, sondern die Tanks werden modular vorgehalten, d.h. sie bestehen aus mehreren Einzeltanks, die auch einzeln be- und „enttankt“ werden können. Dies erlaubt eine sogenannte „Kaskadierung“, die in Verbindung mit einem entsprechenden Betankungsmanagement eine Optimierung zulässt. Dabei kann dann z.B. ein tankstellenseitiges Tankmodul mit einem Restdruck von z.B. 350 bar dazu verwendet werden, zunächst ein fahrzeugseitiges Tankmodul mit einem Restdruck von z.B. 150 bar bis auf ca. 320 bar zu füllen, danach könnte ein anderes tankstellenseitiges Modul mit einem Restdruck von 400 bar den maximalen Füllungsgrad herstellen. Es ist nachvollziehbar, dass dieser Optimierungsprozess davon abhängt, nicht alle Segmente immer parallel zu entleeren bzw. zu befüllen.

Der Wasserstofftransport, sei es straßen- oder schienenseitig, wird heute standardmäßig im Standard-Containerformat abgewickelt (siehe Abb. 34).

Quelle: NPROXX

Abb. 34: MEGC-Container mit Typ IV Druckbehältern

4.2.2.3 Batterietechnologie (innerhalb HEMU)

Auf die grundsätzliche Darstellung zur Batterietechnologie in 4.2.1.1 wird verwiesen.

Auch bei Wasserstofffahrzeugen kommen Batterien zum Einsatz. Sie dienen zusammen mit dem Wasserstoff als Energiespeicher für den Antrieb. Die Batterie nimmt die anfallende rekuperierte Energie auf und wird zusätzlich in Zeiten, wo die Brennstoffzelle zu viel Energie für den Antrieb und die Nebenverbraucher liefert, aufgeladen. Benötigt das Fahrzeug viel Energie, unterstützt die Batterie die Brennstoffzelle beim Bereitstellen von elektrischer Leistung.

Das heißt, die Batterie hat zusätzlich zu ihrer Funktion als Traktionsbatterie (wie beim BEMU), auch die Funktion als Pufferbatterie zu wirken, da Brennstoffzellen bei häufigen Lastwechseln schneller altern.

4.2.2.4 Wasserstofftankstellen

Wasserstofftankstellen unterscheiden sich im Hinblick auf ihre technische Komplexität deutlich von Dieseltankstellen (siehe Abb. 35).

Quelle: Axel Kühn

Abb. 35: Dieseltankstelle der EVB im erweiterten Bahnhofsbereich (Bremervörde)

Die erhöhte Komplexität drückt sich zum einen in der Anzahl technischer Komponenten (siehe Abb. 36) und einem damit einhergehenden erhöhten Platzbedarf, zum anderen in höheren Sicherheitsanforderungen aus (siehe auch 3.1.1).

Quelle: DB Energie GmbH

Abb. 36: Beispieldarstellung einer Wasserstoff-Schienentankstelle

Nachstehende Abbildung zeigt sowohl den erhöhten Platzbedarf als auch die Separierung des Tankgleises vom übrigen Bahnverkehr, die in der Regel zusätzliche Gleisbaumaßnahmen erfordern wird. Dies bedeutet zwangsläufig einen erheblichen Abstand zu Bahnsteigen oder Wendegleisen, nicht zuletzt auch, da die Flächenverfügbarkeit im Nahbereich zu Bahnhöfen und Haltepunkten eher selten gewährleistet ist. Der Sachverhalt ist damit erheblich mitverantwortlich für die bisher für Wasserstoffprojekte zugrunde gelegten Tankkonzepte, die Tankvorgänge grundsätzlich außerhalb der Betriebsphase anordnen, und für die Tankfahrtenproblematik, die bei der Reichweitenbetrachtung im Zusammenhang mit Tagesumläufen zu betrachten ist (siehe 7.8.5). Zu beachten ist weiterhin, dass eine „On-site“-Elektrolyse den Flächenbedarf zusätzlich erhöht.

Die Vorgehensweisen können im Einzelfall abweichen, zumindest im Fall der dargestellten Tankstelle in Bremervörde wird diese ferngesteuert und fernüberwacht betrieben, d.h. es ergibt sich kein zusätzlicher Personalaufwand durch den Betrieb dieser Anlage. Diese Vorgehensweise wurde vom Gutachter auch für die Kostenbetrachtungen zugrunde gelegt (siehe 8.2.3.4).

Quelle: LNVG

Abb. 37: Wasserstofftankstelle Bremervörde (Bauzustand)

Bezüglich der Tankfahrtenproblematik unterscheidet sich der Wasserstoffbetrieb grundsätzlich nicht vom Dieselbetrieb. Auch bei letzterem stehen nur punktuell Dieseltankstellen zur Verfügung, die je nach Linienverlauf und Einsatzmuster der Fahrzeuge günstiger bzw. ungünstiger liegen. Nachstehende Abbildung zeigt die seitens DB Netz / DB Energie in Baden-Württemberg aktuell zur Verfügung stehenden Dieseltankstellen.

Ob alle diese Standorte grundsätzlich auch die räumlichen Möglichkeiten bieten, dort künftig Wasserstofftankstellen anzuordnen wurde nicht geprüft. Dies war auch nicht notwendig, da die Annahme, dass in absehbarer Zeit ca. 20 Wasserstoff-(Schienen-)Tankstellen in Baden-Württemberg zur Verfügung stehen könnten, ohne ein entsprechendes Förderprogramm bzw. lokale Projekte, die die Erstellung als Infrastrukturmaßnahme begründen und finanzieren, abwegig erscheint. Aber selbst, wenn diese Hürde bewältigbar sein sollte, zeigt eine einfache Prüfung, dass für die in der SteFanS-Studie zu betrachtenden Strecken eigentlich nur vier Standorte überhaupt relevant sind (Aulendorf, Crailsheim, Miltenberg und Ulm). Die Einbindung von Standorten wie Heilbronn, Tübingen oder Stuttgart wäre mit erheblichem betrieblichem Zusatzaufwand und einem Fahren unter Oberleitung (Status Quo bzw. Planung) zur Erreichung eines Tankstandortes verbunden.

Die Frage der Lage und Anzahl von Wasserstofftankstellen bleibt damit ein wesentliches Element der Betrachtungen zur HEMU-Technologie im Rahmen der SteFanS-Studie – von der Verfügbarkeit einer genügenden Anzahl von Tankstandorten im Nahbereich der betrachteten Strecken kann nicht ausgegangen werden, diese sind vielmehr zunächst

konzeptuell als Infrastrukturmaßnahme des jeweiligen Teilnetzes anzusetzen. Aufgrund der großen Strecken- bzw. Linienlängen in einzelnen Teilnetzen (insbesondere Teilnetz 2 und 4) ist für diese dann auch von zwei Tankstandorten auszugehen.

Abb. 38: Standorte von Dieseltankstellen in Baden-Württemberg (nur DB-Tankstellen)

4.2.2.5 Wasserstofftransport

Die kontinuierliche Versorgung der jeweiligen Tankstellenstandorte mit den benötigten Tagesmengen wird in einer wachsenden Wasserstoffwirtschaft ein wichtiges Thema sein – mit zunehmender Bedeutung. Es ist davon auszugehen, dass ein größerer Teil der Tankstellen, gerade in dichter werdenden Tankstellennetzen, nicht über eine lokal zugeordnete Produktion (Elektrolyse) versorgt werden kann. Aktuell ist die Lieferung über die Straße mit Tauschtrailern der Normalfall. Auch mittelfristig muss noch davon ausgegangen werden, dass Pipelinelösungen eher die Ausnahme bleiben.

Der Tagesbedarf der Wasserstofftankstelle für Bremervörde im Rahmen des LNVG / EVB-Projekts wurde mit ca. 1600 kg Wasserstoff abgeschätzt, wofür ca. 2,5 Lkw pro Tag benötigt werden[34] (Landesnahverkehrsgesellschaft Niedersachsen, 2018). Es entstehen also zum einen Transportkosten, die in der wirtschaftlichen Gesamtbilanz zu berücksichtigen sind, zum anderen wird zusätzlicher Straßenverkehr mit entsprechenden

[34] Anlieferung in der ersten Projektphase zunächst aus den Niederlanden.

Umweltwirkungen erzeugt, insbesondere dann, wenn eingesetzte Fahrzeuge zunächst noch klassische Diesel-Lkw bleiben.

Zu beachten ist dabei, dass der Transport von Wasserstoff grundsätzlich als Gefahrgut-Transport klassifiziert wird (siehe Abb. 39). Je nach Lage einer Wasserstofftankstelle können damit ggf. Zufahrtsbeschränkungen verbunden sein. Im thüringischen Wasserstoffprojekt wurde dies explizit thematisiert (Bauhaus Universität Weimar, 2019), da mehrere Autobahntunnel der Tunnelkategorie E zugeordnet sind.

Quelle: ADR2021 / Gefahrgut Brumme

Abb. 39: Gefahrguteinstufung Wasserstoff nach ADR

Im Zusammenhang mit dem in der Umsetzung befindlichen hessischen Wasserstoffprojekt wurde als Alternative der Schienentransport untersucht. Siehe dazu Abb. 40 und (DB Energie GmbH; DB Cargo BTT GmbH; Infraserv GmbH & Co. Höchst KG; NPROXX Jülich GmbH; ESWE Verkehrsgesellschaft mbH, 2020). Hierbei wurde unterstellt, dass ausgehend von der Wasserstoffproduktion und Betankung am Standort Infraserv, Höchst, eine weitere Schienentankstelle in Friedberg / Taunus sowie in Wiesbaden die ESWE-Bustankstelle zu beliefern sind.

Quelle: NPROXX

Abb. 40: Untersuchung zum Schienentransport von Wasserstoff

Die Rahmenbedingung einer zweiten Wasserstofftankstelle innerhalb eines regionalen Netzes, sei es aus Redundanzgründen, sei es zur Reduzierung der Tankfahrtenproblematik, wird regelmäßig die Befassung mit dem Transportaspekt erfordern, es sei denn, dass an beiden Tankstellenstandorten mit lokaler Produktion geplant wird.

Die genannte Studie erbrachte den Nachweis, dass ein Schienentransport grundsätzlich möglich ist und unter bestimmten Rahmenbedingungen auch wirtschaftlich mit dem Straßentransport konkurrenzfähig sein kann. Für die Umsetzung eines Wasserstofftransportkonzeptes auf der Schiene werden allerdings zusätzliche Gleisanlagen an beiden Endpunkten benötigt, d.h. der Platzbedarf wird weiter erhöht.

4.2.2.6 Wasserstoffherstellung (Elektrolyse)

Für die Produktion von Wasserstoff stehen aktuell drei Herstellungsverfahren zur Verfügung:

- Alkalische Elektrolyse (ALK)
- Protonenaustauschmembran (PEM)-Elektrolyse
- Festoxid-Hochtemperatur-Elektrolyse (SOEC)

	Alkaline (ALK)		Polymer Electrolyte Membrane (PEM)		Solid Oxide (SOEC)	
Year	Efficiency (LHV)	Stack lifetime (hours)	Efficiency (LHV)	Stack lifetime (hours)	Efficiency (LHV)[15]	Stack lifetime (hours)
2020	63%-70%	50,000-90,000	56%-63%	30,000-90,000	74%-81%	10,000-30,000[16]
2030	63%-72%	72,500-100,000	61%-69%	60,000-90,000	74%-84%	40,000-60,000
2050	70%-80%	100,000-150,000	67%-74%	100,000-150,000	77%-84%	75,000-100,000

Quelle: Guidehouse / Tractebel Impact (ASSET-Projekt)

Abb. 41: Effizienzen und Lebensdauern der unterschiedlichen Elektrolysemethoden

PEM-Elektrolyseure erscheinen aktuell als präferierte Technologie für „kleine“ Produktionsanlagen, wie sie im Bereich von Mobilitätsanwendungen benötigt werden. Sie können mit hohen Stromdichten betrieben werden und erlauben im Vergleich zur alkalischen Elektrolyse die Erzeugung von mehr Wasserstoff aus kleineren Anlagen. Dank des Hochdruckausgangs sind PEM-Elektrolyse-Technologien auch direkt mit Tankstellen kombinierbar.

Die Hochtemperatur-Elektrolyse erlaubt zwar deutlich höhere Wirkungsgrade (siehe Abb. 41), ist aber aufgrund der Arbeitsbedingungen eher für groß-industrielle Anwendungen geeignet. Die Abbildung gibt auch eine Einschätzung zur künftigen Entwicklung von Effizienz und Lebensdauer der Technologiealternativen bis 2050 wieder. Die größeren Zuwächse sind dabei im Bereich der Lebensdauern erkennbar.

Die PEM-Technologie findet reversibel auch in Brennstoffzellen Anwendung (siehe 4.2.2.1).

Nachstehend finden sich zwei Produktbeschreibungen aktueller Elektrolyseure. Der in Abb. 42 genannte Wasserverbrauch von 10 l/kg Wasserstoff bezieht sich auf deionisiertes Wasser (stöchiometrisch sind 9 l/kg erforderlich). Zur Gewinnung von 10 l deionisiertem Wasser sind je nach Wasserqualität und Filterbedarf ca. 20-30 l Trinkwasser erforderlich. Das Restwasser ist als Abwasser zu entsorgen.

Für die Produktion eines angenommenen, täglichen Wasserstoffbedarfs für eine durchschnittliche Regionalstrecke von ca. 2000 kg sind also ca. 50000 l Wasser erforderlich.

Silyzer 300

Die nächste Dimension der PEM-Elektrolyse

Großindustrielle Anwendung
Silyzer 300 ist die neueste und leistungsstärkste Produktlinie des Siemens PEM-Elektrolyse-Portfolios im zweistelligen Megawatt-Bereich.

Niedrigste Investitionskosten
Das modulare Design des Silyzer 300 nutzt in bisher einzigartiger Weise Skalierungseffekte, um niedrige Investitionskosten für großindustrielle Elektrolyseanlagen zu erreichen. Das optimierte Design führt zu sehr geringen Wasserstoffproduktionspreisen aufgrund hoher Anlageneffizienz und Verfügbarkeit.

Flexibel und dynamisch
Intelligente Systemlösungen ermöglichen eine kundenspezifisch optimierte Konfiguration durch hohe Design-Flexibilität.
Die Herausforderung, erneuerbare Energien zu integrieren, kann durch die sehr dynamische Betriebsweise des Silyzer 300 bewältigt werden.

Verlässliches Servicekonzept
Wir stellen das perfekte Paket für Ihre individuellen Bedürfnisse zusammen. Unsere Leistungen reichen von grundlegenden Instandhaltungsarbeiten bis hin zu einem umfassenden Rundumservice mit modernster Datenanalyse.

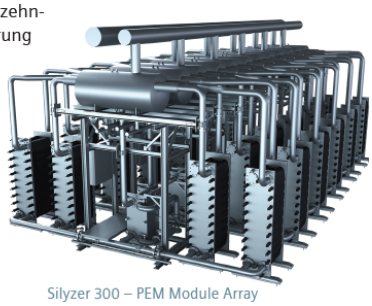
Kompetenter Partner
Von der Netzintegration bis zur innovativen Leittechnik profitieren Sie von der jahrzehntelangen Kompetenz und Innovationskraft von Siemens.

Bewährte Technologie
Die PEM-Elektrolyseure der Silyzer Generationen bewähren sich bei unseren Kunden der Industrie-, Mobilitäts- und der Energiewirtschaft sowie in zahlreichen betriebseigenen Test- und Prüfständen. Der gesamte Erfahrungsschatz jahrzehntelanger Entwicklung und Optimierung mündet im Silyzer 300.

Published by Siemens Energy 2020
New Energy Business
Freyerslebenstraße 1
91058 Erlangen
Germany

Technische Daten

Wasserstoffproduktion:
100 – 2,000 kg pro Stunde
Anlageneffizienz: > 75,5%
Anlaufzeit: < 1 Minute
Dynamik: 0 – 100% in 10% / s
Minimallast: ≥ 5%
Wasserbedarf (VE):
10 l pro kg Wasserstoff
Wasserstoffqualität:
Industriestandard 5.0



Silyzer 300 – PEM Module Array

Quelle: Siemens Energy

Abb. 42: Sylizer 300 Produktbeschreibung

TECHNICAL SPECIFICATIONS

	HyLYZER® - 1000
Operating range	5-125%
DC power consumption at stack	40 to 50 kWh/kg, 48 at nominal load (3.6 to 4.5 kWh/Nm^3, 4.3 at nominal load)
System specific consumption*	≤ 51 kWh/kg
Utilities required to operate the plant	Electrical power, demineralized water, cooling water, HVAC, instrument air, nitrogen for purge
Rectifier specifications	4.1 to 30kV 50/60 Hz, 7 MVA 97% efficiency
Auxiliary installed power	45 kVA
Demineralized Water Consumption and Recommended Water Quality	~0.8 L/Nm^3 of H_2 [9 L/kg of H_2] ASTM D1193 Type
Electrolyzer Cooling Water Requirement	Max. 2,500 LPM between 5-40°C (max ΔT: 10°C)
Total footprint (including maintenance area)	Electrolyzer dimensions (L x W) = 8.4 m x 2.3 m (27.7 x 7.5 ft) Rectifier dimensions (L x W) = 4.5 x 2.5 m (14.8 x 8.2 ft)
Installation environment	Indoors 5°C to 40°C / 41°F to 104°F

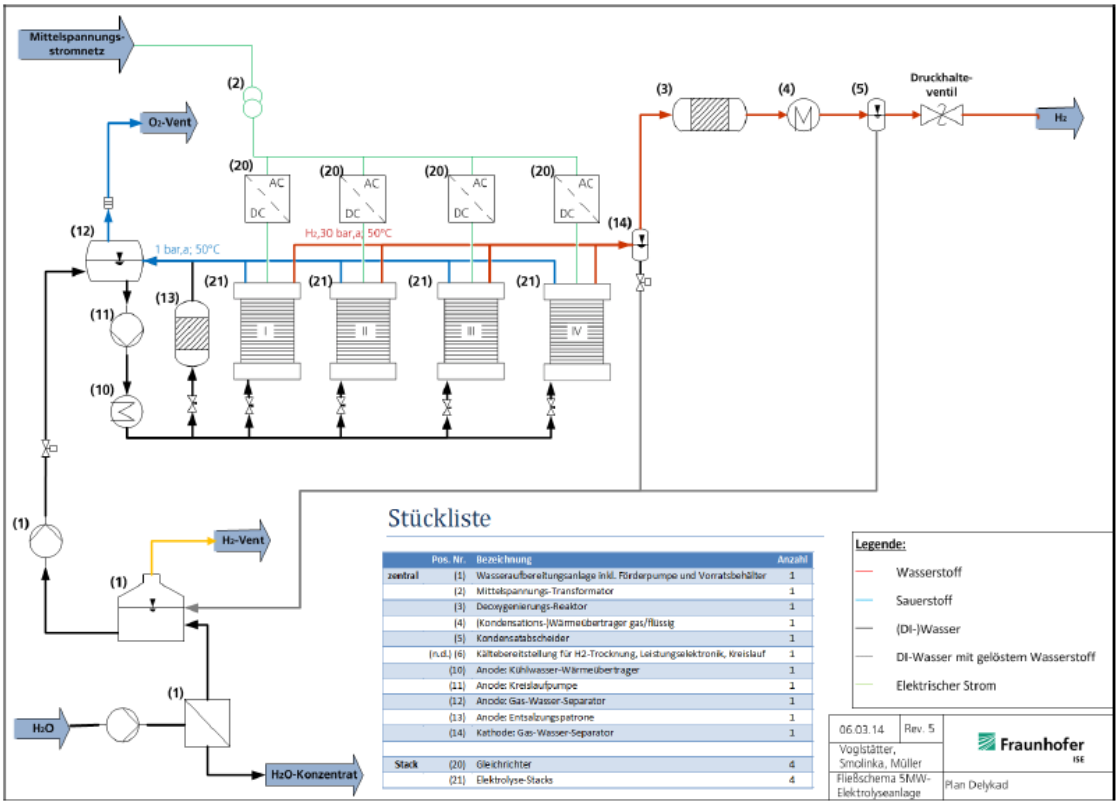
*System specific consumption considers: the standard scope of supply (refer to BOS table); 100% Load capacity; Beginning Of Life; 1% increase per annum (at ≥8500 hours operation); Range for indoor setup; HPS not included

Quelle: Cummins Inc.

Abb. 43: HyLizer-1000 Elektrolyseur – technische Daten

Der Wasserverbrauch ist ein häufig nachrangig diskutiertes Thema der Wasserstoffherstellung, der Fokus liegt regelmäßig auf dem „teuren“ Stromverbrauch und der Frage, ob der zur Herstellung verwendete Strom nachhaltig erzeugt wird. Zu beachten ist aber

auch die Komponente Wasser, insbesondere, da für die Elektrolyse Reinstwasser benötigt wird (siehe Abb. 43), d.h. Bestandteil eines Elektrolyse-Systems ist nicht nur der Elektrolyseur, sondern u.a. auch die Wasseraufbereitung (siehe Abb. 44).



Quelle: Fraunhofer ISE

Abb. 44: Systemlayout einer 5 MW-PEM-Elektrolyseanlage

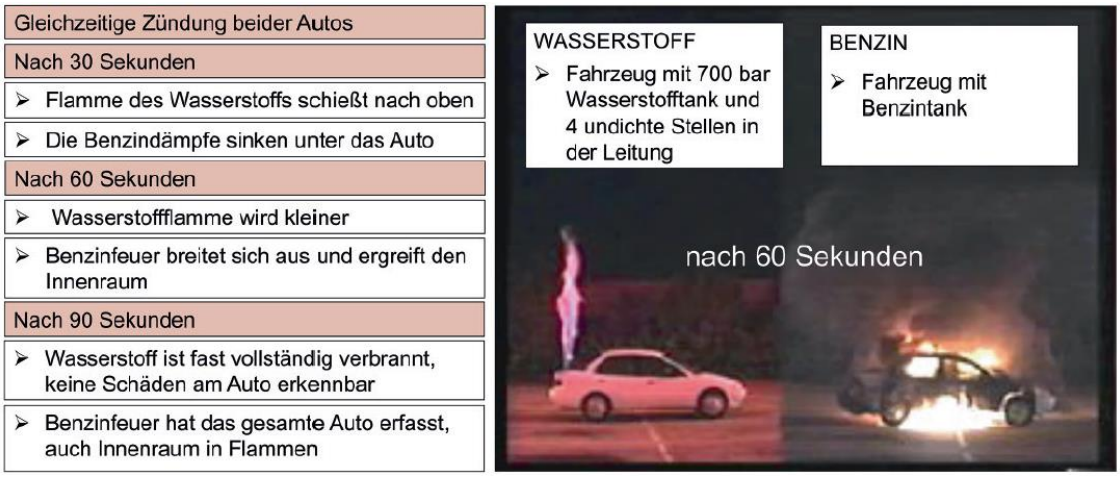
Die von der Industrie angebotenen Elektrolyse-Systeme beinhalten in der Regel alle Komponenten als Paketlösung. Wichtig ist aber die Unterscheidung der Wirkungsgrade des Gesamtsystems im Vergleich zum Wirkungsgrad des Elektrolyseurs.

4.2.2.7 Sicherheitsaspekte zum Wasserstoffeinsatz

Öffentliche Veranstaltungen zur Umsetzung von Wasserstoffprojekten haben mehrfach gezeigt, dass bei Bürgern Befürchtungen bezüglich der Sicherheit bestehen. Den offensichtlich bestehenden Assoziationen („Hindenburg", „Wasserstoffbombe“) kann zwar aus fachlicher Sicht leicht begegnet werden, es ist aber in der Umsetzung wichtig, auf derartige Fragen vorbereitet zu sein.

Nachstehende Darstellung aus dem österreichischen Zillertalprojekt stellt das Brandverhalten eines Wasserstofffahrzeugs dem eines „Benziners“ gegenüber.

Zusammenfassend und verkürzend kann ausgesagt werden, dass mit einem Wasserstoffbetrieb keine erhöhten Gefahrenpotentiale einhergehen. Dies unter der Voraussetzung, dass in den Betriebsanlagen, d.h. Tankstellen aber auch Werkstätten, und in Fahrzeugen alle notwendigen Maßnahmen zum sachgerechten Umgang mit diesem Treibstoff getroffen sind. Dies erfordert im Bereich von Bestandwerkstätten ggf. auch entsprechende Anpassungen (z.B. Lüftung).



Quelle: Zillertalbahn

Abb. 45: Brandverhalten von Wasserstoff und Benzin im Vergleich

4.3 Nachhaltigkeitsaspekte (Rohstoffe, Herstellung, …)

4.3.1 Batterien

Bei der Batteriediskussion sollte die Rohstoffthematik keinesfalls vernachlässigt werden[35]. Die aktuell diskutierten Batterien bedürfen, je nach Batterietechnologie, unterschiedlicher Metalle auf der Kathodenseite, wie z.B. Mangan, Lithium, Kobalt und Nickel, hinzu kommt Graphit auf der Anodenseite. Die benötigten Rohstoffe finden sich weltweit sehr konzentriert in wenigen Abbaugebieten, so stammt z.B. Kobalt zu 70 % aus dem Kongo, Lithium zu 52 % aus Australien, zu 22 % aus Chile und zu 13 % aus China, Nickel zu fast 50 % aus Indonesien, Russland und den Philippinen. Noch deutlich stärker ist der Konzentrationseffekt bei der Metallveredelung, wo China z.B. für 35 % der Nickelproduktion, 58 % der Lithiumproduktion, 65 % der der Kobaltproduktion und 90 % der Seltenen Erden verantwortlich zeichnet. Neben der Abhängigkeit von bestimmten Lieferländern, die spätestens mit dem aktuellen Krieg in der Ukraine in das Bewusstsein gerückt ist, muss auch die Nachhaltigkeit in der Förderung und Herstellung beachtet werden, die je nach Herkunftsland sehr unterschiedlich sein kann. (Quelle: rnd.de/e-auto-rohstoffe-der-elektroautos-fuer-batterien-und-ihre-ursprungsorte).

Es besteht aktuell eine sehr erhebliche Importabhängigkeit, sei es für Batteriezellen oder deren Rohstoffe. Es gibt zwar vereinzelte Projekte zu einer Lithiumproduktion in Deutschland, wie diese sich mengenmäßig zum künftigen Bedarf verhält und wie wirtschaftlich sie mittelfristig sein kann, bleibt abzuwarten.

Dem Recyclingaspekt kommt damit künftig eine sehr große Bedeutung zu, gleiches gilt für Batteriezweitnutzungen („Second life“).

Als Zulieferer für die Fahrzeugindustrie treten aktuell 6-8 Batteriehersteller auf, darunter auch Unternehmen, die die Batteriezellenherstellung in Europa und mit höheren Nachhaltigkeitsansprüchen betreiben. Vielfach werden Batteriezellen aber zugekauft und dann in Batteriesysteme integriert, ohne dass Lieferketten transparent sind. Der Gutachter empfiehlt, diesem Aspekt künftig deutlich stärker in Fahrzeugausschreibungen

[35] Gleiches gilt für Brennstoffzellen und Elektrolyseure, siehe 4.2.2.6.

zu betonen, auch um eine Gleichbehandlung der Technologien unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten zu gewährleisten, die Forderung nach „grünem“ Strom bzw. „grünem“ Wasserstoff, sollte auch durch „grüne“ Batterien (und Brennstoffzellen/Elektrolyseure) ergänzt werden (siehe auch Gesamtempfehlung in Kapitel 12).

4.3.2 Brennstoffzellen und Elektrolyseure

Zu beachten ist ebenfalls, dass auch Elektrolyseure (analog zu Brennstoffzellen) die Verarbeitung spezifischer Metalle erfordern, die bezüglich ihrer Förderung bzw. Herstellung ähnlich kritisch zu beurteilen sind, wie die für Lithium-Ionen-Batterien verwendeten (siehe 4.2.1.1). Hierzu zählt z.B. Iridium, ein Metall der Platingruppe, von dem weltweit aktuell pro Jahr ca. 8-9 t gefördert werden und von dem ca. 1-2 Gramm pro KW Elektrolyseleistung verbraucht werden! Für ein Hochfahren der Elektrolysekapazität auf z.B. 40 GW (Ziel für 2030) würden also ca. 20-40 Tonnen Iridium benötigt. Eine entsprechende Preisentwicklung ist zu beobachten und wird sich vermutlich fortsetzen (Quelle: heraeus.com/). Zahlreiche Forschungen befassen sich aktuell mit der Frage, wie diese Abhängigkeit von teuren Metallen reduziert werden kann.

Wie oben zu Batterien dargestellt (siehe 4.3.1) sind diese Aspekte in einer gesamthaften Nachhaltigkeitsdiskussion auch für Brennstoffzellen und Elektrolyseure zu beachten.

4.3.3 Stromerzeugung und Wasserstoffproduktion

Wie bereits angesprochen, hat die Frage der „Stromherkunft“, d.h. der Stromerzeugung, entscheidenden Einfluss auf die Nachhaltigkeit und die dekarbonisierende Wirkung eines Wasserstoff-basierten SPNV-Konzepts. Solange zur Herstellung nicht konsequent Strom aus Windkraftwerken oder Photovoltaikanlagen verwendet wird, bietet Wasserstoff zwar die Vorteile eines lokal emissionsfreien Betriebs, bedingt aber „global“ CO^2-Emissionen, die je nach Strommix keine Vorteile gegenüber dem zu ersetzenden Dieselbetrieb bieten (siehe auch 7.3).

Die Marktverfügbarkeit an nachhaltig erzeugtem, „grünen“ Wasserstoff ist in Deutschland aktuell noch sehr gering, der überwiegende Teil des verfügbaren Wasserstoffs entstammt der Chemieindustrie als Nebenproduktwasserstoff („grauer“ Wasserstoff aus Dampfreformierung). In Baden-Württemberg ist auch letzterer nur sehr eingeschränkt verfügbar (NOW GmbH; Ernst&Young; Ludwig Bölkow Systemtechnik, SIGNON; TÜV SÜD; Becker Büttner Held; IFOK;, 2016).

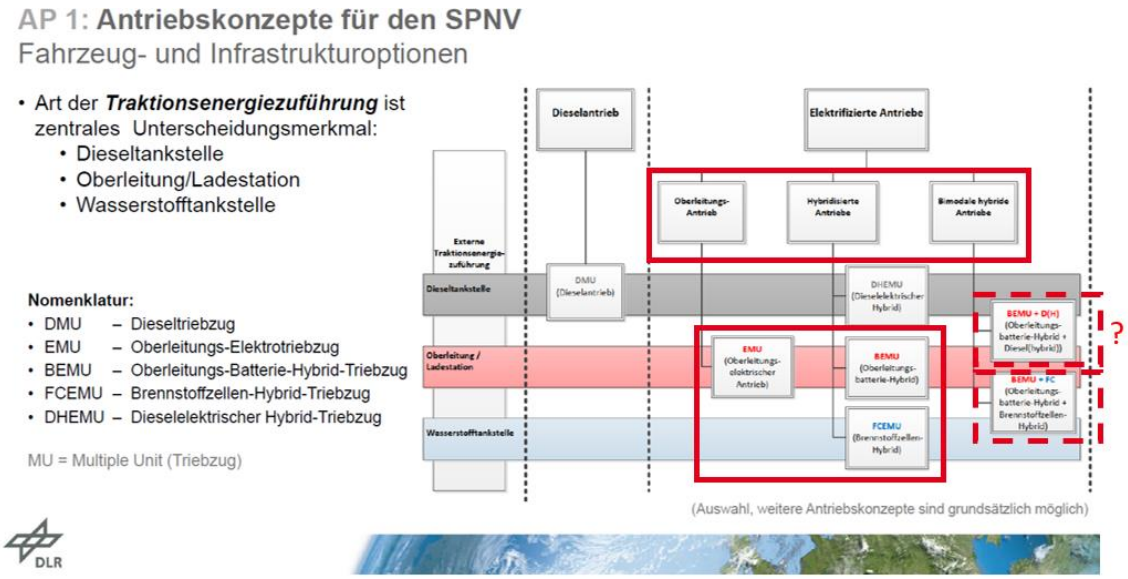
4.3.4 Wasserbedarf und Wasserstoffproduktion

Wie oben dargestellt (siehe 4.2.2.6), werden zur Wasserstoffherstellung beachtliche Mengen an Wasser benötigt.

Der Aspekt des Wasserbedarfs ist aber nicht nur bei lokaler Elektrolyse in Deutschland, sondern grundsätzlich auch im Zusammenhang mit dem Einkauf von Wasserstoff aus sonnenreichen („Photovoltaik-freundlichen“) Ländern zu beachten. Dort sind die erforderlichen Wassermengen dann regelmäßig über Meerwasserentsalzungsanlagen zu gewinnen, die zum einen zusätzlichen Energieaufwand erfordern, zum anderen bei Rückleitung des Restwassers ins Meer tendenziell die lokale Versalzung erhöhen. Diese Aspekte sind letztlich genauso bedeutsam wie ein Nachdenken über die Herkunft und Produktion von Metallen, sie sind daher im Rahmen gesamthafter Nachhaltigkeitsbetrachtungen einzubeziehen.

5 Fahrzeugmarkt EMU / BEMU / HEMU / Sonstige

Nachstehend erfolgt zunächst eine kurze Einordnung der Fahrzeugkonzepte, die sich grundsätzlich als Ersatz des Dieselbetriebs einsetzen lassen.



Quelle: DLR (adaptiert)

Abb. 46: Grundsätzliche Antriebskonzepte für den SPNV

Wie in obenstehender Abbildung dargestellt, lassen sich unter dem Oberbegriff „elektrifizierte Antriebe“ drei Untergruppen einordnen:

- der klassische Oberleitungsantrieb (EMU),
- hybridisierte Antriebe mit den drei Typen,
  - Dieselelektrischer Hybrid (DEMU),
  - Oberleitungs-Batterie-Hybrid (BEMU),
  - Brennstoffzellen-Hybrid (HEMU / FCEMU),
- bimodale-hybride Antriebe mit den zwei Typen,
  - Oberleitungs-Batterie-Hybrid + Diesel-Hybrid,
  - Oberleitungs-Batterie-Hybrid + Brennstoffzellen-Hybrid.

Theoretisch stehen für eine Dekarbonisierungsstrategie also sechs Fahrzeugansätze zur Verfügung, von denen zwei den Dieselmotor als Bestandteil des Antriebskonzepts weiterhin beibehalten.

Die Variante Dieselelektrischer Hybrid, d.h. zunächst einmal die Ausstattung eines dieselelektrischen Fahrzeugs mit einer Pufferbatterie, um Rekuperation zu erlauben, wurde in Deutschland im Rahmen des ECOTRAIN-Projektes (siehe 5.4) verfolgt, zwischenzeitlich dann aber aufgegeben. Der Ansatz findet in Deutschland eine schwierigere Ausgangsposition, da der Bestand an Dieselfahrzeugen ganz überwiegend Diesel-mechanisch und nicht Diesel-elektrisch angetrieben ist. Eine Ausstattung mit einer Pufferbatterie allein hilft da nicht weiter, es bedarf vielmehr des Austauschs des kompletten Antriebsstrangs. Die Ausgangssituation stellt sich hierzu z.B. in Frankreich ganz anders dar. In der Studie für den BEMU/HEMU-Pilotbetrieb im Netz des SPNV Nord wurde eine Hybridisierung der BR 644, der Diesel-elektrischen Version des Talent 3, diskutiert, aber ebenfalls nicht zur Umsetzung empfohlen (siehe Diesel-Hybrid in Kapitel 5.4).

Die beschriebene Situation in Deutschland resultiert damit auch in einer eher schlechten Ausgangsposition für die Kombination Oberleitungs-Batterie-Hybrid + Diesel-Hybrid.

Die Kombinationen Oberleitungs-Batterie-Hybrid und Brennstoffzellen-Hybrid bedeuten grundsätzlich nichts anderes als die Ausstattung eines Brennstoffzellenfahrzeugs mit einem Stromabnehmer, um damit auch elektrifizierte Streckenabschnitte „elektrisch“ befahren zu können. Die für den deutschen Markt entwickelten Fahrzeuge (iLint, Mireo+H …) beinhalten diese Option nicht. Auch hier unterscheidet sich der Ansatz in Frankreich. Zu beachten ist auch, dass die als Regionalverkehrsfahrzeuge konzipierten „deutschen“ Fahrzeuge vergleichsweise kurz sind und freie Dachflächen bereits durch Brennstoffzellen und Wasserstofftanks weitestgehend belegt sind.

Im Ergebnis verblieben damit als Untersuchungsfokus der SteFanS-Studie die drei Fahrzeugkonzepte EMU, BEMU und HEMU.

Eine vereinzelt ebenfalls diskutierte Direktverbrennung von Wasserstoff in einem adaptierten Verbrennungsmotor erscheint nach den geführten Gesprächen aktuell noch sehr weit von einer Marktreife und wird augenscheinlich auch von der Fahrzeugindustrie nicht als Alternative aufgegriffen.

Nachstehende Abbildung vermittelt einen ersten Überblick über die im SPNV in Deutschland eingesetzten Fahrzeuge. Dargestellt sind die Längenverhältnisse und die Fahrzeugkonfiguration (2-teilig / 3-teilig). Erkennbar ist die Sonderrolle von Stadtbahn- bzw. Stadtbahn ähnlichen Fahrzeugen, die trotz ihrer relativ geringen Länge als 3-teilige Fahrzeuge auftreten. Erkennbar sind auch die Grenzbereiche zwischen 2- und 3-teiligen Fahrzeugen (analog zwischen 3- und 4-teiligen Fahrzeugen).

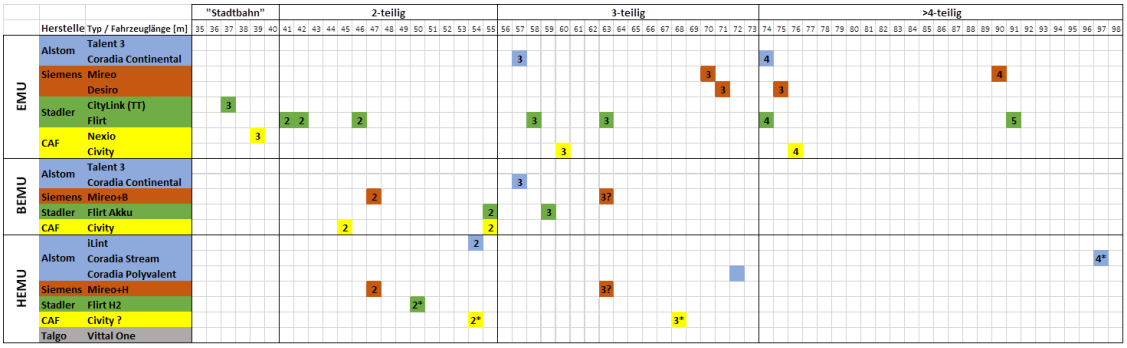


Abb. 47: Übersicht zu marktgängigen EMU-, BEMU- und HEMU-Fahrzeugen

In den weiteren Kapiteln werden insbesondere die Fahrzeuge des BEMU und HEMU-Segments ausführlicher dargestellt, wobei auch auf Unterschiede zwischen den Fahrzeugkonzepten für den deutschen Markt und im europäischen Ausland eingegangen wird.

Im Weiteren erfolgt ein kurzer Einblick in den Status von Diesel-Hybrid-Überlegungen sowie zu Lokomotiventwicklungen im Sektor „Alternative Antriebe“, letztere insbesondere im Hinblick auf Güterverkehrsanwendungen.

5.1 EMU-Fahrzeuge

Auf eine detailliertere Darstellung der Fahrzeugprodukte im EMU-Segment, die seit vielen Jahren marktgängig sind, wurde verzichtet. In den meisten Fällen setzen die BEMU- und HEMU-Konzepte der Hersteller ohnehin auf vorhandenen EMU-Plattformen auf.

5.2 BEMU-Fahrzeuge

Die Entwicklung im Bereich „neuer“ Batteriefahrzeuge gewann in Deutschland öffentliche Aufmerksamkeit ab ca. 2016 mit dem Talent 3-Prototyp des Herstellers Bombardier (jetzt Alstom, siehe Abb. 48), dem Siemens Desiro Ecojet-Umbau und Testbetrieb bei der ÖBB (siehe Abb. 49) und dem Stadler Flirt Akku-Prototypfahrzeug (siehe Abb. 50).

Quelle: Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg

Abb. 48: Talent 3-Prototypfahrzeug von Alstom (ex Bombardier)

Quelle: ÖBB

Abb. 49: Cityjet Eco-Prototypfahrzeug auf Desiro ML-Basis

Quelle: Stadler

Abb. 50: Flirt Akku-Prototypfahrzeug

Es handelte sich dabei um die ersten Batteriefahrzeuge neuer Generation in Europa[36].

Die erste Bestellung von Batteriefahrzeugen in Deutschland erfolgte im Juni 2019 für das XMU-Netz in Schleswig-Holstein (55 Stadler Flirt Akku-Fahrzeuge, siehe Abb. 52).

---

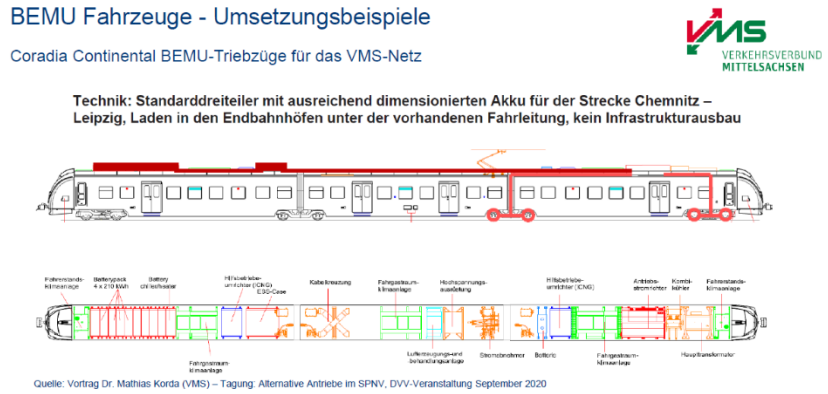
[36] In Europa etwas weniger bekannt ist die Tatsache, dass Batteriefahrzeuge in Japan im SPNV bereits seit 2014 im regelmäßigen Fahrgastbetrieb eingesetzt werden.

Im Frühjahr 2020 konnte Alstom mit 11 Fahrzeugen auf Basis des Coradia Continental für VMS/ZVNL nachziehen (siehe Abb. 51), dicht gefolgt von Siemens mit 20 Mireo+B-Fahrzeugen für das Ortenaunetz in Baden-Württemberg.

Die BEMU-Tendenz setzte sich im Jahr 2021 fort und sah u. a. CAF mit einer Batterieversion des Civity-Fahrzeuges bei VRR/NWL erfolgreich (insgesamt 63 Fahrzeuge, 2 Größen, siehe Abb. 54), Stadler verbuchte einen zweiten Flirt Akku-Auftrag der DB Regio für das Pfalznetz (44 Fahrzeuge). Siemens konnte die Aufstockung des Ortenaunetz-Auftrags um drei Fahrzeuge für die Hermann-Hesse-Bahn, sowie weitere Mireo+B-Bestellungen durch die NEB (26 Fahrzeuge, später erhöht auf 31) sowie in Dänemark (Mai 2022, 7 Fahrzeuge) verbuchen. In Frankreich erhielt Alstom (Bombardier) einen Auftrag zum Umbau von fünf Diesel-elektrischen Fahrzeugen des Typs AGC zu BEMUs.

Im Frühjahr 2022 meldete Stadler einen dritten Flirt Akku-Auftrag für das H-Netz Warnow durch DB Regio (14 Fahrzeuge) und Alstom erhielt einen Auftrag zum Umbau von sechs Talent 3-EMU-Fahrzeugen zu BEMU-Fahrzeugen für das Saarland (siehe auch 6.1.6). Zuletzt erhielt CAF noch eine ergänzende Bestellung seitens VRR/ZWL für 10 Civity BEMU der Langversion.

Die für den deutschen Markt konfigurierten Fahrzeugplattformen arbeiten entweder mit einer Anordnung der Batterien im Dachbereich (Coradia Continental, Flirt Akku) oder im Unterflurbereich (Mireo+B, Civity) und erlauben sowohl Fußbodenhöhen von 600 mm (für 55 cm Bahnsteige) als auch 800 mm (für 76 cm Bahnsteige).



Quelle: VMS

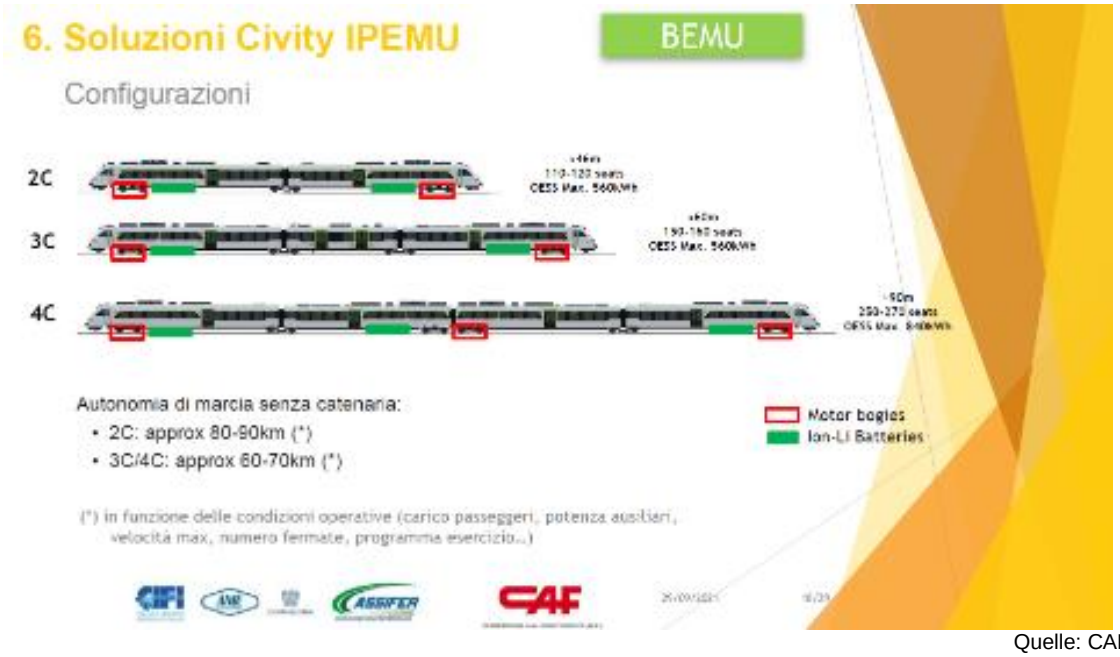
Abb. 51: Batteriefahrzeug auf Coradia Continental-Basis für VMS-Netz

Quelle: Stadler

Abb. 52: Stadler Flirt Akku-Konzept für Schleswig-Holstein

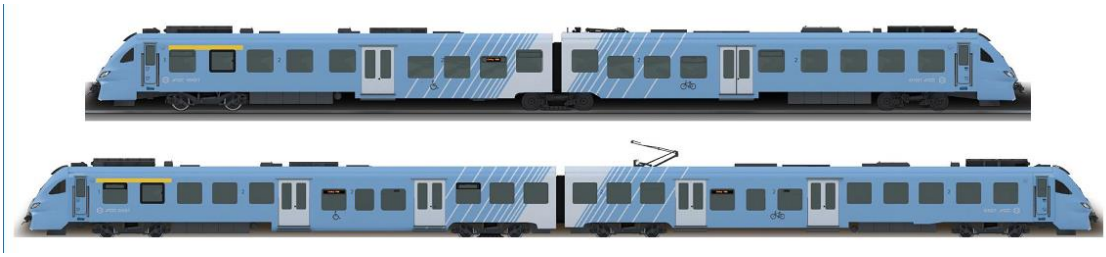
Interessant an Abb. 53 ist der Hinweis auf die Reichweiten der 2-, 3- und 4-teiligen CAF Civity-Fahrzeuge in einer frühen, konzeptuellen Überlegung, bei der dem 3-teiligen Fahrzeug bei identischer Batterieausstattung wie beim 2-teiligen Fahrzeug eine geringere Reichweite zugeschrieben wird. Gleiches gilt für das 4-teilige Fahrzeug, bei dem die erhöhte Batteriekapazität das Mehrgewicht des größeren Fahrzeuges nicht kompen-

siert. Es lässt sich feststellen, dass das bei der VRR-Ausschreibung angebotene Fahrzeug (siehe Abb. 54) in der Langversion vom ursprünglichen Konzept abweicht, indem anstatt einem dreiteiligen Fahrzeug mit zwei Jacobs-Drehgestellen jetzt ein zweiteiliges Fahrzeug mit längeren Modulen und Standard-Drehgestellen zum Einsatz kommt[37].



Quelle: CAF

Abb. 53: CAF-Civity-BEMU-Konzeptüberlegungen



Quelle: CAF

Abb. 54: CAF-Civity-Lieferkonzept VRR

Während häufiger die Option diskutiert wird, BEMU-Fahrzeuge bei späterer Elektrifizierung von Netzen zu reinen EMU-Fahrzeugen umzurüsten (siehe z.B. VMS, 6.1.4) und auch die Umrüstung von Diesel- bzw. Diesel-Hybrid-Fahrzeugen zu reinen BEMU-Fahrzeugen erfolgt (siehe 5.4), ist an dieser Stelle eine aktuelle Umrüstung EMU zu BEMU erwähnenswert. Diese betrifft 2017 bestellte Bombardier Talent 3 EMU-Fahrzeuge des Betreibers VLEXX, die dieser im Elektronetz Saar einsetzt.

Die 56 m langen Fahrzeuge erhalten je 4 Batteriepacks mit einer Kapazität von 420 kWh. Diese im Vergleich mit anderen BEMU-Fahrzeugen niedrige Kapazität erklärt sich mit den geringen Reichweiten-Anforderungen von nur ca. 15 km (siehe auch 6.1.6).

[37] Diese Vorgehensweise konnte so auch bei Stadler (siehe Pfalznetz-Fahrzeuge) festgestellt werden; der Gutachter geht davon aus, dass weitere Hersteller hier nachziehen und zunächst, zumindest bis zu einer Länge von ca. 60m, keine dreiteiligen Fahrzeuge angeboten werden.

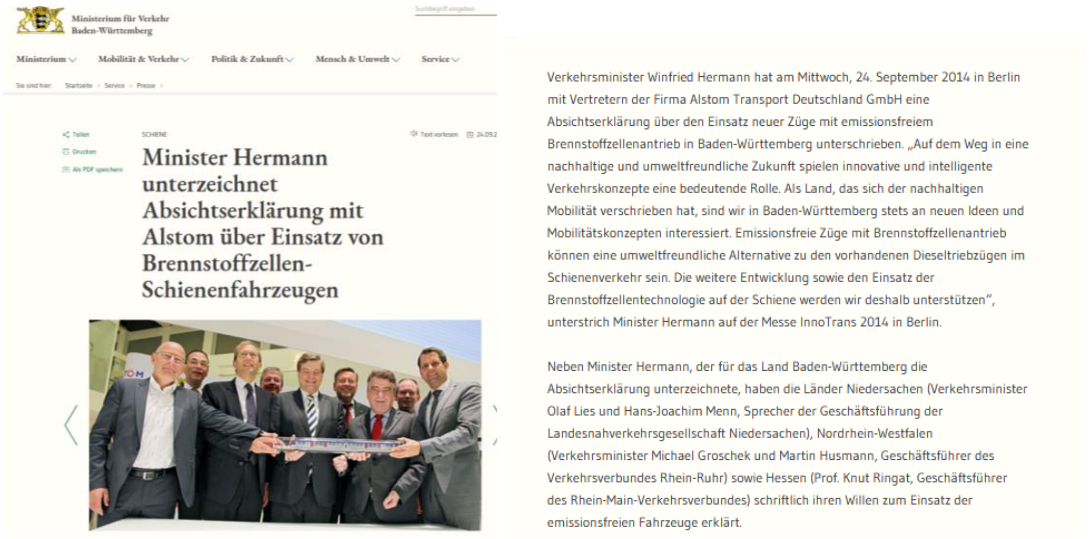
Als Gesamtkosten des Umbaus wurden 17 Mio. € genannt, was 2,8 Mio.€ pro Fahrzeug entspräche[38].

Erwähnenswert im Zusammenhang sind auch die Aktivitäten des englischen Herstellers Vivarail. Im Unterschied zu allen anderen hier diskutierten Konzepten liegt der Fokus dort nicht auf Neufahrzeugen, sondern auf dem Umbau und der Modernisierung von Diesel-Bestandsfahrzeugen[39] (Quelle: vivarail-rolling-stock). Das Vivarail-Konzept beinhaltet nicht nur die Fahrzeugseite, sondern auch die benötigte Ladeinfrastruktur (siehe 4.2.1.3). Es ist zunächst sehr deutlich auf die Bedürfnisse des Heimatmarktes zugeschnitten, scheint dort aber auch umsetzungsfähig zu sein (wirtschaftlich und genehmigungstechnisch).

5.3 HEMU-Fahrzeuge

Brennstoffzellenfahrzeuge wurden implizit für einige Jahre mit dem iLint-Fahrzeug des Herstellers Alstom „gleichgesetzt“, der mit der Entwicklung dieses Fahrzeugs, erstmals auf der Innotrans 2016 vorgestellt, Pionierarbeit geleistet hat. Das iLint-Konzept basiert auf der bewährten Lint-Plattform und lässt sich damit als „Diesel-Retrofit-Konzept“ im erweiterten Sinne einordnen. Erweitert, weil es nicht die Überlegung ist, bestehende Dieselfahrzeuge nachträglich umzubauen, man aber auf das Fahrzeug Grundkonzept der Diesel-Plattform aufsetzt[40]. Dieselmotor und Dieseltank werden ersetzt durch einen Elektromotor, Brennstoffzelle, Wasserstofftank, Pufferbatterie und Konverter.

Die iLint-Entwicklung geht zurück auf das Jahr 2014, als 4 Bundesländer Absichtserklärungen unterzeichneten und damit ihr grundsätzliches Interesse an Brennstoffzellenfahrzeugen bestätigten (siehe Abb. 55).


Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg

Ministerium · Mobilität & Verkehr · Politik & Zukunft · Mensch & Umwelt · Service

Sie sind hier: Startseite › Service › Presse

Teilen · Drucken · Als PDF speichern

SCHIENE

Minister Hermann unterzeichnet Absichtserklärung mit Alstom über Einsatz von Brennstoffzellen-Schienenfahrzeugen

Verkehrsminister Winfried Hermann hat am Mittwoch, 24. September 2014 in Berlin mit Vertretern der Firma Alstom Transport Deutschland GmbH eine Absichtserklärung über den Einsatz neuer Züge mit emissionsfreiem Brennstoffzellenantrieb in Baden-Württemberg unterschrieben. „Auf dem Weg in eine nachhaltige und umweltfreundliche Zukunft spielen innovative und intelligente Verkehrskonzepte eine bedeutende Rolle. Als Land, das sich der nachhaltigen Mobilität verschrieben hat, sind wir in Baden-Württemberg stets an neuen Ideen und Mobilitätskonzepten interessiert. Emissionsfreie Züge mit Brennstoffzellenantrieb können eine umweltfreundliche Alternative zu den vorhandenen Dieseltriebzügen im Schienenverkehr sein. Die weitere Entwicklung sowie den Einsatz der Brennstoffzellentechnologie auf der Schiene werden wir deshalb unterstützen“, unterstrich Minister Hermann auf der Messe InnoTrans 2014 in Berlin.

Neben Minister Hermann, der für das Land Baden-Württemberg die Absichtserklärung unterzeichnete, haben die Länder Niedersachen (Verkehrsminister Olaf Lies und Hans-Joachim Menn, Sprecher der Geschäftsführung der Landesnahverkehrsgesellschaft Niedersachen), Nordrhein-Westfalen (Verkehrsminister Michael Groschek und Martin Husmann, Geschäftsführer des Verkehrsverbundes Rhein-Ruhr) sowie Hessen (Prof. Knut Ringat, Geschäftsführer des Rhein-Main-Verkehrsverbundes) schriftlich ihren Willen zum Einsatz der emissionsfreien Fahrzeuge erklärt.

Quelle: Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg

Abb. 55: Absichtserklärungen von vier Bundesländern 2014

[38] Diese sehr erheblichen Kosten lassen sich nach Auffassung des Gutachters, auch im Vergleich mit den Preisen für Neufahrzeuge (siehe 8.1.2), nur bei nahezu neuwertigen Fahrzeugen und aufgrund sehr spezifischer Projektrahmenbedingungen rechtfertigen.

[39] Siehe auch hier die Diskussion zu Diesel-Hybrid in Kapitel 5.4.

[40] Das Fahrzeugkonzept des Mitbewerbers Siemens, der Mireo+H, setzt wie das Batteriefahrzeug Mireo+B auf der EMU-Plattform des Mireo, d.h. auf einem von vornherein elektrischen Fahrzeugkonzept, auf.

Darauf gründete der Bau der zwei Vorserienfahrzeuge, die nach der Erstvorstellung auf der Innotrans 2016 ab 2017 erste Probe- und Zulassungsfahrten durchführten und die im Juli 2018 die EBA-Zulassung für Deutschland erhielten.

In zahlreichen Bundesländern fanden seit 2018 Demonstrationsfahrten („Roadshow“) statt, so in Hessen 4/2018, Schleswig-Holstein 10/2018, Rheinland-Pfalz und Baden-Württemberg 1/2019, Sachsen, Thüringen und Brandenburg 2/2019, Bayern 7/2019, Nordrhein-Westfalen 2/2020. Die Corona-Krise setzte diesen Demonstrationsfahrten dann vorübergehend ein Ende. In Baden-Württemberg wurde eines der beiden Fahrzeuge im Zeitraum 7/2021 – 2/2022 im Streckennetz von SWEG / HzL getestet.

Erste Fahrzeugbestellungen für den iLint sind in Niedersachsen (LNVG, 14 Fahrzeuge, 2/2018, siehe 6.2.1) und Hessen (Fahma, 27 Fahrzeuge, 5/2019, siehe 6.2.2) erfolgt.

Zuletzt erfolgte im Februar 2022 eine Bestellung von 6 HEMU-Fahrzeugen für die Heidekrautbahn (siehe 6.2.3), hier kam allerdings das Konkurrenzprodukt der Firma Siemens, der Mireo+H zum Zuge. Dieses Fahrzeug soll ab Ende 2023 in Baden-Württemberg und Bayern umfangreich getestet werden und für die Heidekrautbahn ab 9/2024 zur Verfügung stehen.

Bestellungen für Wasserstofffahrzeuge erfolgten ansonsten in Italien (siehe 6.2.7.2), Frankreich (siehe 6.2.7.3) und den USA (siehe 6.2.7.5).

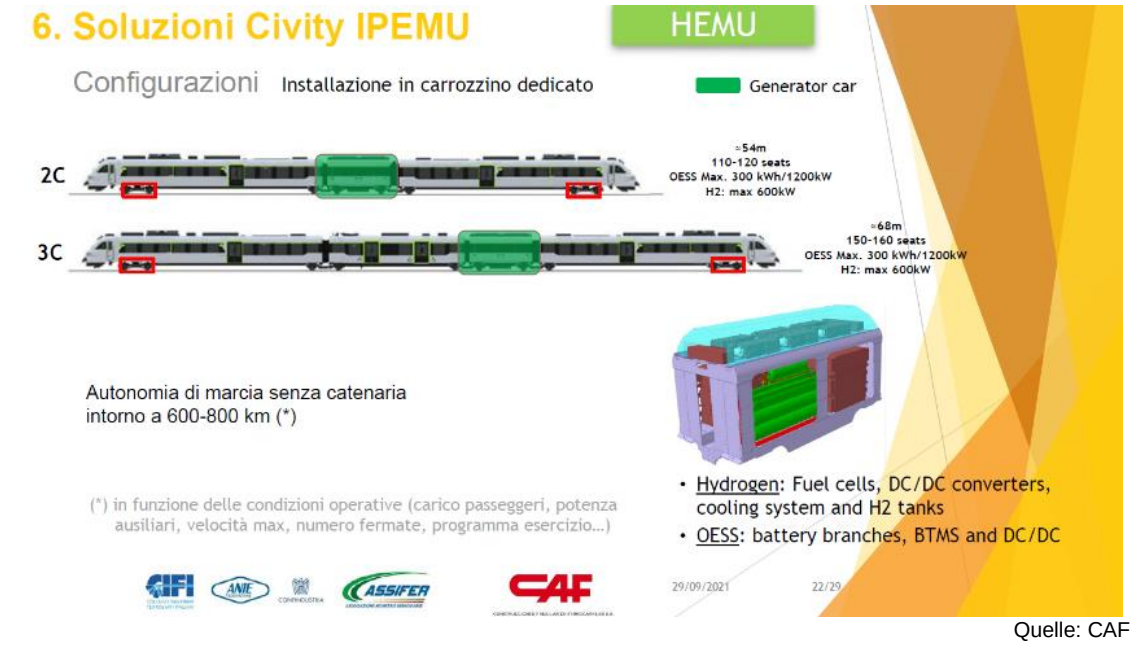
Die Bestellungen in Italien (11/2020, 6 Fz) und Frankreich (4/2021, 14 Fz) gingen an Alstom, die Bestellung für das kalifornische San Bernardino-Projekt an Stadler. Bei den Alstom-Bestellungen handelt es sich nicht um iLint-Fahrzeuge, sondern um adaptierte Coradia Stream (für FNM) bzw. Polyvalent-Plattformen (für SNCF), bei Stadler um eine Adaptierung der zuvor bereits aus Kalifornien bestellten Diesel-Flirts (ein Fahrzeug!).

Anzumerken ist hierbei, dass die genannten, deutschen und europäischen Bestellungen bisher nicht das Ergebnis klassischer EU-Wettbewerbsverfahren waren. So hieß es 2017 im europäischen Ausschreibungsblatt im Rahmen einer freiwilligen Ex-ante-Transparenzbekanntmachung zur LNVG-Bestellung u.a. „*Die Bauleistungen / Lieferungen / Dienstleistungen können aus folgenden Gründen nur von einem bestimmten Wirtschaftsteilnehmer ausgeführt werden: nicht vorhandener Wettbewerb aus technischen Gründen*“. Dies lässt sich für 2017 noch nachvollziehen, weniger allerdings für die 2020 erfolgte Bestellung der FNM, wo sich die mehr oder weniger identische Begründung findet.

Erwähnenswert sind unterschiedliche Herangehensweisen bzw. Konfigurationen bei den HEMU-Fahrzeugkonzepten außerhalb Deutschlands. Diese sind zum einen bei den Coradia Polyvalent-Fahrzeugen für die SNCF erkennbar, die zusätzlich noch Stromabnehmer aufweisen und damit auch elektrifizierte Streckenabschnitte effizient nutzen können. Diese Fahrzeuge sind eindeutig nicht als Nebenstreckenfahrzeuge konzipiert, was sich an den Streckenlängen der französischen Pilotprojekte ablesen lässt (siehe 6.2.7.3).

Die EU-seitig aufgrund der Bombardier-Übernahme geforderten Anpassungen des Alstom-Portfolios und zugeordneter Standorte resultierten zuletzt in der Übernahme des Fertigungsstandortes in Reichshoffen / Elsass einschließlich der Polyvalent-Plattform durch CAF. Hier sehen die Vereinbarungen zwischen Alstom und CAF vor, dass die Fahrzeugfertigung bei CAF liegt, Alstom aber weiterhin seine Erfahrungen mit dem Wasserstoff-Antriebssystem einbringt.

Ein weiterer, wesentlicher Unterschied, erkennbar in verschiedenen Fahrzeugkonzepten unterschiedlicher Hersteller, ist die Verwendung eines eigenen, kurzen Antriebsmoduls[41] für die Unterbringung der Wasserstoffkomponenten, d.h. anstatt der bei iLint oder Mireo+H vorgesehenen Dachposition. Diese Vorgehensweise findet sich im Coradia Stream-Fahrzeug für die FNM, in CAF-Überlegungen zu HEMU-Fahrzeugen (siehe Abb. 56), beim Stadler-Fahrzeug für San Bernardino (siehe Abb. 57)[42] und auch das Vittal One-Konzept von Talgo arbeitet damit.



Quelle: CAF

Abb. 56: CAF-Konzept mit „Antriebsmodul“ für HEMU-Fahrzeuge auf Civity-Basis

Quelle: Axel Kühn

Abb. 57: Stadler Flirt H2 für San Bernardino

Dieses Konzept bietet Vorteile im Hinblick auf den Komponententausch bei Technologiewechsel und erlaubt ggf. auch etwas höhere Wasserstoff-Tankkapazitäten. Nach Aussagen der Fahrzeugindustrie sind derartige Konzepte in Deutschland im Hinblick auf

[41] Für Fahrgäste durchgängig!
[42] Stadler verwendete dieses Konzept ja bereits in der Vergangenheit für die GTW-Plattform, aber auch für den WINK im Hinblick auf einfachen Komponententausch (Diesel > Batterie o.ä.).

eine optimale Ausnutzung begrenzter Bahnsteiglängen eher unbeliebt und werden daher im Normalfall nicht angeboten. Der sehr enge und lange Durchgang für Fahrgäste (siehe oben) erscheint ebenfalls wenig einladend – eine gleichzeitige Nutzung in beiden Richtungen ist kaum möglich.

Ausgeklammert wurde hier das Fahrzeug, das für den Wasserstoffbetrieb auf der Zillertalbahn konzipiert wurde. Aufgrund der Spurweite von 760 mm handelt es sich hier um eine Sonderentwicklung außerhalb der gängigen Plattformen. Nach der europäischen Ausschreibung im Jahr 2018 wurde zwar in Presseberichten von der Vergabe an Stadler berichtet, diese erscheint aber formal noch nicht vollzogen (siehe 6.2.7.1).

5.4 Diesel-Hybrid-Fahrzeuge

Der in der Einleitung zu Kapitel 4.2 bereits andiskutierte Diesel-Hybrid-Ansatz wird in Deutschland insbesondere mit dem in Sachsen ab 2017 stark propagierten EcoTrain-Projekt verbunden, das die Umrüstung („Hybridisierung“) von Desiro-Dieseltriebwagen zum Gegenstand hatte.

Das Projekt (siehe Ecotrain-vom-dieselmechanischen-triebwagen-zum-intelligenten-mehrsystemfahrzeug-intelligent-die-umwelt-schonen) sah den Umbau von Diesel-mechanischen Desiro-Fahrzeugen zu Diesel-elektrischen Fahrzeugen vor. Man versprach sich damit:

- Eine Reduzierung des CO2- Ausstoßes,
- eine Reduzierung des Dieselverbrauchs (Rekuperationsfähigkeit!),
- eine Nutzung erneuerbarer Energien (durch die Nachlademöglichkeit),
- eine Reduzierung der Lärmemissionen,
- eine Senkung der Betriebs- und Instandhaltungskosten,
- einen flexibleren Fahrzeugeinsatz durch das partiell emissionsfreie Fahren.

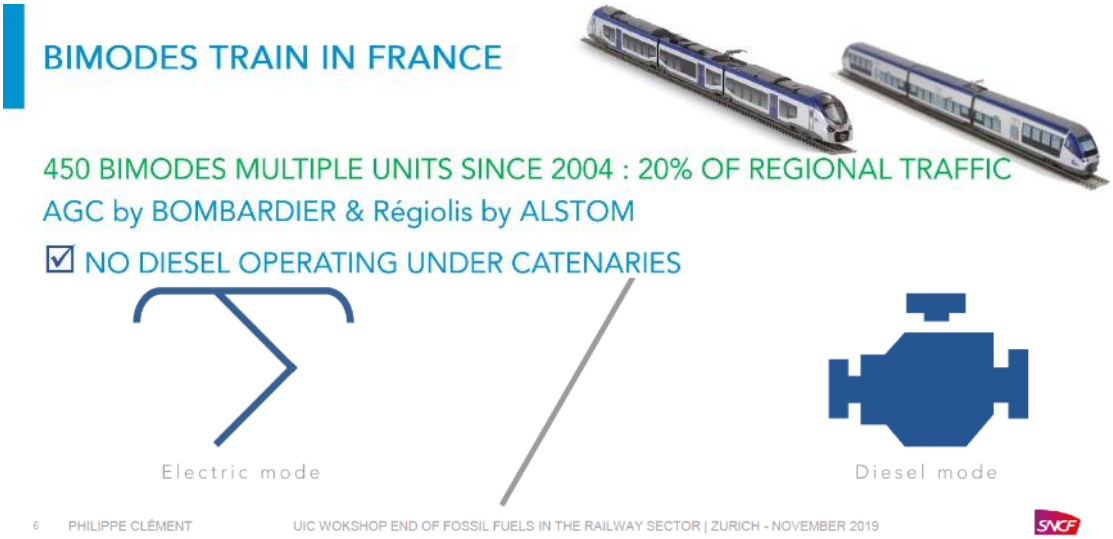
Das Konzept erforderte u. a. ein neues Hybridantriebsmodul (mit Diesel 390 kW, Generator und Fahrmotor) sowie ein Hybridenergiemodul („Batterie“, 153 kWh Kapazität). Die grundsätzliche Machbarkeit konnte zwar nachgewiesen werden, nach einer kurzen Phase hoher Publizität verschwand das Konzept im Sommer 2020 aber vergleichsweise leise von der Bildfläche, nachdem zuvor die Absicht bestand, 12 Triebwagen umzurüsten, wofür der Freistaat Sachsen 60 Mio. € bereitstellen wollte. Offiziell begründet wurde die Projekteinstellung mit Zulassungsproblemen seitens des EBA und, damit verbunden, deutlichen Kostenerhöhungen. Ohne offizielle Zahlen zu kennen, geht der Gutachter davon aus, dass die genannten Modifikationen Umbaukosten je Fahrzeug in der Größenordnung von mindestens ca. 2,0 Mio. € erfordert hätten[43]. Ob bei Restlebensdauern von ca. 15-20 Jahren und Nachinvestitionen von ca. 20-25 % einer aktuellen Neubeschaffung eine Wirtschaftlichkeit darstellbar gewesen wäre, ist zu bezweifeln; hinzukommt, dass die Investition keine zu 100 % nachhaltige Lösung gefördert hätte[44].

Wie dargestellt, ist ein Merkmal des Dieselbetriebs in Deutschland die Dominanz Diesel-mechanischer Fahrzeuge, die Überlegungen zur Hybridisierung zusätzlich erschwert. Die Ausgangsposition in Frankreich ist deutlich anders, da dort bereits eine große Anzahl von Diesel-Hybrid-Fahrzeugen im Einsatz ist – diese weisen einen elektrischen

[43] Vergleiche die EMU>BEMU-Umbaukosten für die VLEXX-Fahrzeuge in 5.2.

[44] Zu beachten ist dabei, dass auch ganz aktuell in Deutschland, auch in Baden-Württemberg, noch neue Dieselfahrzeuge beschafft wurden, deren Lebenszyklen bei normaler Nutzung bis ca. 2050 reichen würden. Die Frage des Umgangs mit derartigen Fahrzeugen nach 2030 ist daher grundsätzlich sehr berechtigt.

Antrieb und Stromabnehmer auf, was die effiziente Nutzung von Oberleitungsstrecken erlaubt (siehe Abb. 58).



Quelle: Philippe Clement, SNCF / UIC-workshop, Zürich 11/2019

Abb. 58: Bi-modale französische Fahrzeugkonzepte

Diese günstigeren Voraussetzungen waren auch Grundlage für im Frühjahr 2021 publik gemachte Umbauüberlegungen der SNCF. Diese sahen vor, zunächst fünf dieser Fahrzeuge zu Batterie-elektrischen Fahrzeugen umzubauen, d.h. den Dieselantrieb komplett (und nicht nur teilweise) durch Batterien zu ersetzen, um damit bis zu 80 km nicht elektrifizierter Streckenabschnitte befahren zu können.

Der Umbau Dieselelektrischer Fahrzeuge, hier der BR 644, wurde auch im Rahmen der SPNV-Nord Studie (Rambøll, 2021) thematisiert, letztlich aber nicht weiterverfolgt.

5.5 Markttrend für SPNV-Fahrzeuge

Die Marktentwicklung in Deutschland zeigt aktuell sehr deutlich in Richtung einer Präferenz für BEMU-Fahrzeuge (siehe Abb. 59).

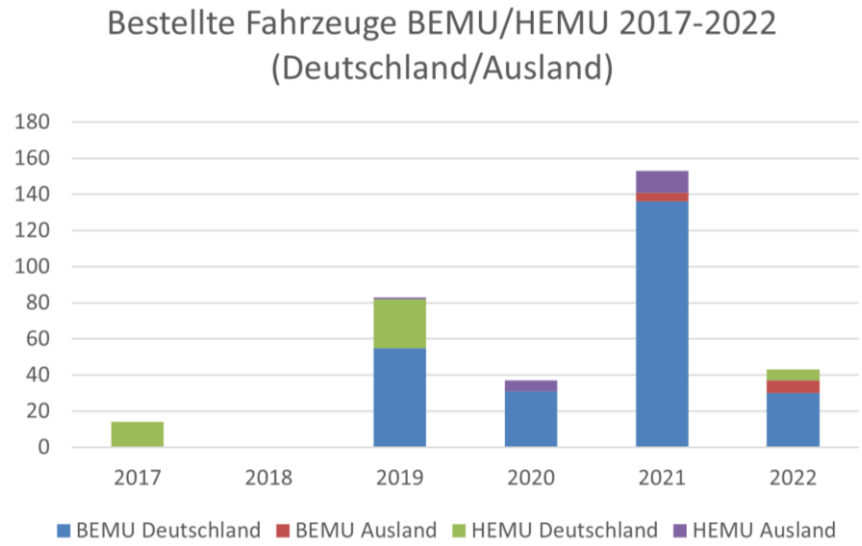


Abb. 59: Marktentwicklung BEMU <> HEMU 2017-2022

Aus Sicht des Gutachters sind aktuell keine Hinweise auf eine Trendumkehr erkennbar.

5.6 Lokomotiventwicklungen mit alternativen Antrieben

Das Kapitel liefert einen kurzen Überblick zum Entwicklungsstand und den Einsatzmöglichkeiten, die Lokomotiven mit alternativen Antrieben im Güterverkehr bieten können.

Grundsätzlich lassen sich hier drei Gruppen unterscheiden:

- Diesel-Hybrid (bereits hohe Verfügbarkeit, hier nicht näher betrachtet),
- Batterie-Oberleitungshybrid
- Wasserstoff

Neben der bereits als „gängig“ zu sehenden Diesel-Hybrid-Technologie lassen sich zahlreiche Entwicklungen, gerade wenn man den internationalen Markt einbezieht, erkennen, die auch im Bereich Batterie-Oberleitungshybrid und Wasserstoff zunehmend Optionen bieten werden.

Es ist davon auszugehen, dass die technologische Entwicklung, gerade im Bereich der Batterietechnologie, hier in Zukunft noch weitergehende Verfügbarkeit bieten und Machbarkeiten verändern wird. Im Zusammenhang ist nachfolgende Studie zu nennen, die sich im Auftrag des BMVI sehr aktuell mit dem Thema „Innovative Fahrzeuge“ befasst hat und dabei neben dem Personenverkehr auch den Güterverkehr thematisiert hat (SCI Verkehr GmbH, 2021).

Quelle: SCI-Verkehr / BMVI

Abb. 60: Studie „Innovatives Triebfahrzeug“ (2020)

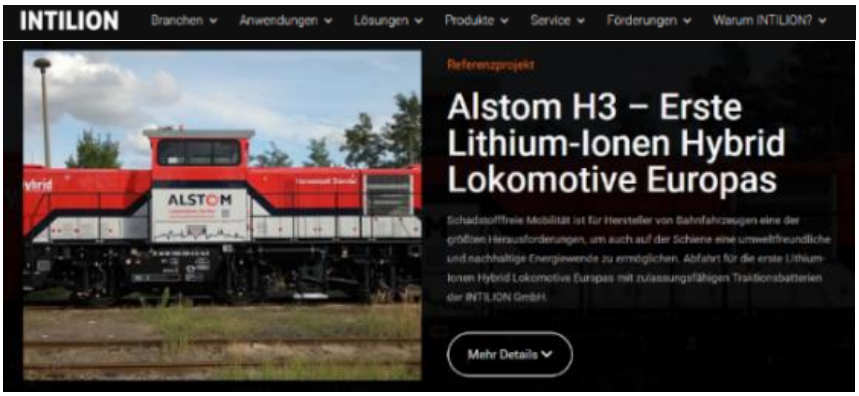
Folgende Kernergebnisse wurden im Rahmen der Studie ermittelt:

- Der Bedarf des Sektors zur Beschaffung innovativer Lokomotiven liegt **bis zum Jahr 2050 bei etwa 2.000 Fahrzeugen für schwere Rangieraufgaben, 250 Lokomotiven für die Nahverkehrsbedienung** auf nicht-elektrifizierten Strecken **sowie 400-500 Lokomotiven für Streckenfahrten** außerhalb der Korridore.
- Derzeit verfügbare Produkte im Bereich alternativer Antriebe bei Lokomotiven sind ausschließlich **Hybrid- bzw. Dual-Mode-Fahrzeuge** sowie **batterieelektrische Rangierlokomotiven**. Bis 2030 könnten batterieelektrische Antriebe auch für die Nahverkehrsbedienung vorliegen, sofern die **F&E-Bemühungen** in diesem Segment unterstützt werden. In beiden Segmenten (Rangierbetrieb und Nahverkehrsbedienung) ist bis 2030 von einem Bedarf des Sektors von jeweils 80-100 Fahrzeugen auszugehen.
- Zum Abbau wirtschaftlicher Hemmnisse ist für den Einsatz batterieelektrischer Lokomotiven im Rangiersegment und der Nahverkehrsbedienung ggf. ein **Umrüstungskonzept** zu entwickeln, da Neufahrzeuge (ohne Förderung / Incentivierung) wirtschaftlich nicht darstellbar sind. Hier könnte ein Pilotprojekt zur Umrüstung von Bestandslokomotiven im Rangierbetrieb auf batterieelektrischen Antrieb zur Erprobung und Verifizierung möglicher Betriebskostenvorteile und Überwindung operativer Hemmnisse aufgesetzt werden. Im Zeitraum von 3 Jahren dürfte die Betriebserprobung valide Ergebnisse für weitere F&E-Maßnahmen bringen.
- Im Streckenverkehr hingegen wäre der Einsatz alternativer Antriebe (vor dem Hintergrund zunehmender CO2-Bepreisung) **wirtschaftlich gut darstellbar**. Umso dringender sind hier (die bislang fehlenden technologischen) Lösungen zu finden. Aufgrund der Tatsache, dass für die Leistungsanforderungen im Streckenverkehr bislang keine alternativen Antriebe geeignet sind, besteht hier erheblicher Forschungsbedarf. Bis 2030 (evtl. sogar bis 2035) werden **keine batterieelektrischen Produkte oder wasserstoffbetriebenen Fahrzeuge marktreif** sein.
- Forschungsansätze für **Energiespeicher bzw. Brennstoffzellen für hohe Leistungsanforderungen** (Streckenverkehre) sind zu entwickeln bzw. aus anderen Anwendungsbereichen zu adaptieren. Da grundlegende technologische Herausforderungen zu meistern sind und erst anschließend eine Adaption für den Schienenverkehr erfolgen kann, ist von einer Entwicklungszeit von mindestens 10 Jahren auszugehen.

Quelle: SCI-Verkehr / BMVI

Abb. 61: Kernergebnisse der BMVI-Studie „Innovatives Triebfahrzeug“

Nachstehende Abbildungen liefern einen exemplarischen Eindruck von Lokomotiventwicklungen mit alternativen Antrieben, teils in hybrider Form, teils als Alleinantrieb.



Quelle: Intilion

Abb. 62: Alstom H3 – erste Lithium-Ionen Hybrid Lokomotive Europas

Quelle: Wabtec

Abb. 63: FLXDRIVE Batterielokomotive

Quelle: Axel Kühn

Abb. 64: Brennstoffzellenlokomotive von PESA

Im Rahmen der SteFanS-Studie standen Güterverkehrsbetrachtungen nicht im Vordergrund, es erfolgte nur eine ergänzende Betrachtung (siehe 9.7.4).

Nachdem in den letzten Jahren bereits einige Testbetriebe mit alternativen Antrieben mit SPNV-Zielrichtung durchgeführt wurden bzw. in der Vorbereitung sind, stellt sich die Frage, ob Testbetriebe auch im GV-Sektor nicht eine interessante Ergänzung für Baden-Württemberg sein können. Der Gutachter liefert hierzu in seiner abschließenden Zusammenfassung (siehe Kapitel 12) auch Empfehlungen zum Güterverkehr.

6 Projekte und Projektüberlegungen im Themenfeld „alternative Antriebe“

Dieses Kapitel gibt einen Überblick zu deutschen und internationalen Projekten und Entwicklungen im Zusammenhang mit dem Einsatz von BEMU- bzw. HEMU-Fahrzeugen.

Der Realisierungsgrad ist dabei sehr unterschiedlich und reicht von Projektideen und Forschungsprojekten bis zu realisierten oder in konkreter Umsetzung befindlichen Projekten.

Trotz sehr intensiver Recherchen übernimmt der Gutachter keine Gewähr für Vollständigkeit; umso weniger als sich, wie dargestellt, bei diesen neuen Technologien „fast täglich“ irgendwo (gerade bei internationaler Betrachtung) etwas tut und im Rahmen der Bearbeitung ein Redaktionsschluss (Frühjahr 2022) festzulegen war.

6.1 BEMU-Projektanwendungen

Nachstehend werden die wichtigsten, aktuellen Projekte in Deutschland kurz beschrieben (Kapitel 6.2.1 bis 6.1.6), ergänzend erfolgt ein kursorischer Einblick zu internationalen Aktivitäten in diesem Themenfeld (siehe 6.1.7).

6.1.1 XMU-Netz Schleswig-Holstein

Mit einem Anteil elektrifizierter Strecken am Gesamtnetz von 29 % belegte Schleswig-Holstein mit Stand 2015 das Schlusslicht der Bundesländer (allianz-pro-schiene.de/themen/infrastruktur/daten-fakten/). Dementsprechend hoch war der Druck, hier eine Lösung für die Abkehr vom Dieselbetrieb zu finden. Trotz relativ „Wasserstoff-affiner“ Rahmenbedingungen mit relativ einfachem Zugang zu nachhaltigem Windstrom und vergleichsweise wenigen Anknüpfungspunkten an elektrifizierte Strecken erfolgte aber keine eindeutige Hinwendung zu dieser Technologie. Die Vorgehensweise war vielmehr technologieoffen, was sich auch in der Bezeichnung XMU ausdrückte, in der eine Mutierung des X zu BE oder HE zunächst offengelassen wurde.

Das zu betrachtende Netz wurde in drei Lose aufgeteilt und umfasst folgende Linien:

Los 1 (Ost):

- RB 76 Kiel - Schönberger Strand (24,1 km, davon 0,2 km elektrifiziert)
- RE 83 Kiel - Lübeck – Lüneburg (158,2 km, davon 11,3 km elektrifiziert)
- RB 84 Kiel - Lübeck (80,9 km, davon 7,7 km elektrifiziert)
- RB 87 Kiel – Preetz (15,4 km, davon 0,2 km elektrifiziert)

Los 2 (Nord):

- RB 64 Husum - Bad Sankt Peter-Ording (43,6 km, davon 0,0 km elektrifiziert)
- RE 72 Kiel - Eckernförde – Flensburg (80,7 km, davon 0,2 km elektrifiziert)
- RB 73 Kiel - Eckernförde (31,1 km, davon 0,1 km elektrifiziert)
- RE 74 Kiel - Rendsburg - Husum und (89,1 km, davon 45,1 km elektrifiziert)
- RB 75 Kiel - Rendsburg-Seemühlen (44,2 km, davon 13,1 km elektrifiziert)

Los 3 (Ost-West):

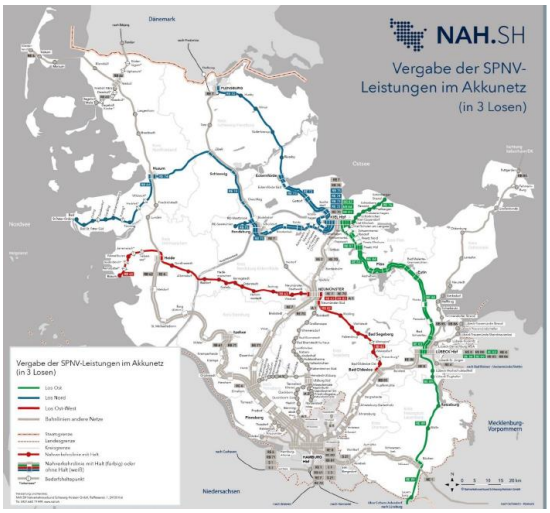
- RB 63 Neumünster - Heide – Büsum (86,4 km, davon 0,1 km elektrifiziert)
- RB 82 Neumünster - Bad Oldesloe (44,9 km, davon 0,2 km elektrifiziert)

Die technologieoffene Fahrzeugausschreibung, die die Technologieentscheidung von den Angeboten der Industrie abhängig machte, wurde im August 2016 veröffentlicht (272954-2016-DE). Die Ausschreibungsbedingungen waren dergestalt, dass Anbieter von Brennstoffzellenfahrzeugen auch die Tankinfrastruktur und die Wasserstoffversorgung sicherzustellen hatten (siehe auch Ortenaunetz, 6.1.2 und VRR, 6.1.5), während die Erstellung von ergänzenden Elektrifizierungsmaßnahmen als Aufgabe des Aufgabenträgers bzw. mittelbar des Eigentümers der Eisenbahninfrastruktur definiert wurde.

Diese „Ungleichbehandlung“ wurde im Rahmen der Angebotsbewertung grundsätzlich kompensiert, indem angenommene Elektrifizierungskosten dem BEMU-Preis zugerechnet wurden. Der Hersteller Alstom, als potenzieller Anbieter seines iLint-Fahrzeugs, sah in dieser Vorgehensweise des Aufgabenträgers verbleibende Nachteile für eine HEMU-Lösung und beschritt letztlich den Klageweg vor dem OLG. Die juristische Auseinandersetzung verzögerte die abschließende Vergabe um einige Monate, endete aber mit der Bestätigung des Urteils seitens der Vergabekammer. Insgesamt waren drei BEMU-Angebote eingegangen, Alstom hatte kein letztverbindliches HEMU-Angebot abgegeben.

Im Juli 2019 erfolgte die Bekanntgabe der Vergabe der Lieferung von 55 Fahrzeugen für einen kommunizierten Gesamtpreis von 1185 Mio. €[45] an den Hersteller Stadler (347047-2019-DE). Die Fahrzeuge gehen im Rahmen einer speziellen Finanzierungskonstruktion an eine Fahrzeugvorhaltegesellschaft (Paribus) über, die diese dann den Verkehrsunternehmen für den Betrieb zur Verfügung stellt.

Das im Verkehrsvertrag in den genannten Losen vergebene „Akkunetz“ umfasst insgesamt 10,4 Mio. Zug-km pro Jahr (siehe Abb. 65).



11 Linien

Länge ohne Elektrifizierung:

min.:	14 km
max:.:	~ 80 km
i. d. R.:	30-50 km

Netz	Zug-km/a (Mio.)	Betriebsaufnahme
Nord	4,5	12/2023
Ost	4,2	12/2022
Ost-West	1,7	12/2023
Summe	10,4	

Quelle: NAH.SH

Abb. 65: Akku-Netz Schleswig-Holstein

[45] Der sich rechnerisch ergebende Preis von ca. 21,5 Mio. € pro Fahrzeug ist ohne Kenntnis von Vertragsdetails natürlich nicht für übliche Kostenvergleiche geeignet. Er enthält sowohl Optionen, Finanzierungskosten als auch die Fahrzeugunterhaltung während der Lebensdauer, wofür Stadler aktuell in Rendsburg und Neumünster Fahrzeugwerkstätten errichtet. Literaturangaben erlauben eine grobe Einschätzung – demnach wären ca. 30 % effektive Fahrzeugkosten beim Kauf, 70 % Kosten der sonstigen LCC-Elemente. Dies würde einen Preis pro Fahrzeug von ca. 6,5 Mio. € nahelegen, eine dem Gutachter nicht unrealistisch erscheinende und in der Literatur mehrfach bestätigte Größenordnung (siehe auch 8.1.2).

Das Vergabeverfahren für die Verkehrsleistungen wurde im Mai 2020 gestartet (222374-2020-DE). Die Lose Nord und Ost-West wurden an die NBE Nordbahn Eisenbahngesellschaft, eine 50/50 Tochter von Benex und AKN, vergeben[46], die Betriebsaufnahme soll Ende 2023 erfolgen. Die Osthannoverschen Eisenbahnen (OHE), die zur Netinera-Gruppe gehören, übernehmen den Betrieb im Los Ost.

Das Projekt sieht infrastrukturseitig Verlängerungen der Bestandsoberleitung in Flensburg und Kiel, die Nachrüstung von Oberleitungen in ansonsten bereits elektrifizierten Bahnhöfen (Kiel, Bad Oldesloe und Büchen) sowie drei Oberleitungsinseln in Husum, Tönning und Heide mit Anschluss an das 50 Hz-Netz vor. Sämtliche Maßnahmen werden von DB Energie bzw. DB Netz betreut. Zusätzlich werden im Endbahnhof Schönberger Strand sowie im Werkstattbereich Lademöglichkeiten über einen Elektranten (1000 V) geschaffen, diese liegen in der Verantwortung des Fahrzeugherstellers.

Die maximal im Batteriebetrieb zu überbrückende, nicht elektrifizierte Streckenlänge beträgt ca. 80 km. Zu beachten sind dabei die in Norddeutschland anzutreffenden, günstigen topografischen Verhältnisse.

6.1.2 Ortenaunetz Baden-Württemberg

Das sogenannte Ortenaunetz umfasst mehrere Strecken im Zulauf auf Offenburg (siehe Abb. 66). Das Netz war zunächst als potenzielle Anwendung für Brennstoffzellenfahrzeuge in der Überlegung (siehe NOW-Studie (NOW GmbH; Ernst&Young; Ludwig Bölkow Systemtechnik, SIGNON; TÜV SÜD; Becker Büttner Held; IFOK;, 2016)).

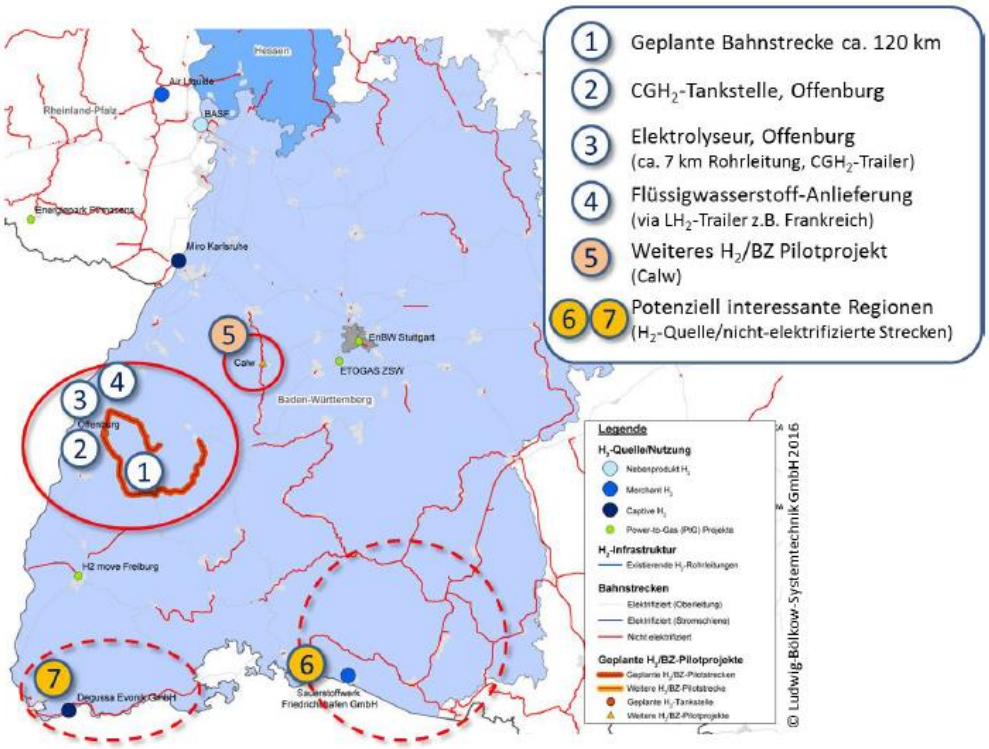


Abbildung 9: Geplante und potenziell interessante H_2/BZ-Pilotprojekte in Baden-Württemberg; Quelle: Datengrundlage nach Tabelle 1; eigene Auswertung LBST; [DB Netz 2015]; eigene Auswertung Signon

Quelle: NOW / LBST

Abb. 66: Ortenaunetz als potenzieller Wasserstoff-Pilot 2016

[46] Im Los Nord war zunächst eine Vergabe an die RDC vorgesehen; nach einem von DB Regio angestoßenen Nachprüfungsverfahren erfolgte die Vergabe auch hier an die Nordbahn.

Das jährliche Leistungsvolumen beträgt ca. 2,1 Mio. Zug-km und umfasst im Einzelnen folgende Strecken:

- RB 20 Offenburg – Appenweier – Bad Griesbach (38 km, davon 9 km elektrifiziert)
- RB 20 Offenburg – Freudenstadt (72 km, davon 29 km nicht elektrifiziert)
- RB 22 Biberach (Baden) – Oberharmersbach-Riersbach (10,6 km, nicht elektrifiziert)
- RB 24 Achern – Ottenhöfen (10,7 km, nicht elektrifiziert)

Der Verkehrsvertrag mit einer Laufzeit von 15 Jahren sollte zunächst im Frühjahr 2018 im Wege der Direktvergabe an die TRAPICO Schieneninnovations GmbH, einem Tochterunternehmen der landeseigenen SWEG, vergeben werden, er wurde dann aber im Februar 2019 europaweit ausgeschrieben (55668-2019-DE). Der bestehende Verkehrsvertrag der SWEG wurde Ende 2021 um 2 Jahre verlängert, nachdem eine Modifizierung der Ausschreibung für den Neuvertrag erforderlich wurde (632164-2021-DE).

Parallel zu der Vorbereitung eines neuen Verkehrsvertrages wurde bereits im Januar 2017 eine technologieoffene Ausschreibung für die Fahrzeugbeschaffung gestartet (33649-2017-DE) und im Oktober 2018 modifiziert (466284-2018-DE). Die Modifizierung regelte insbesondere die Rahmenbedingungen zur Energieversorgung der HEMU-Option neu[47].

Im August 2019 wurde die Vergabeentscheidung bekannt und im März 2020 bestellte die Landesanstalt Schienenfahrzeuge Baden-Württemberg (SFBW) dann bei Siemens 20 BEMU-Fahrzeuge vom Typ Mireo+B (siehe 5.2). Entsprechend der Beschaffungsmethodik des Landes Baden-Württemberg werden die Fahrzeuge vom Hersteller während ihrer Lebensdauer unterhalten; hierfür errichtet die SWEG im Auftrag von Siemens aktuell in Offenburg eine Fahrzeugwerkstatt[48].

Während die nicht elektrifizierten Streckenlängen sich in für die aktuelle BEMU-Technologie machbaren Größenordnungen bewegen, sind gerade die längeren Strecken nach Bad Griesbach und Freudenstadt als topografisch anspruchsvoll einzuordnen. Eine Fahrbarkeit ohne ergänzende Infrastruktur (Oberleitungsinsel o.ä.) konnte seitens Siemens nachgewiesen werden, so dass hier auch eine Referenz für die BEMU-Betrachtungen auf den SteFanS-Untersuchungsstrecken vorlag.

6.1.3 Pfalznetz

Das sogenannte „Pfalznetz“, hier insbesondere das Los 1, besteht aus mehreren Strecken, die auch Baden-Württemberg (Karlsruhe) und das Saarland (Saarbrücken) tangieren (siehe Abb. 67). Federführend für die Vergabeverfahren ist der Zweckverband Rheinland-Pfalz Süd, die Aufgabenträger der Nachbarländer sind eingebunden.

Im Einzelnen handelt es sich um folgende Linien:

- RE 6: Karlsruhe – Neustadt/Wstr. – Kaiserslautern (81,3 km, 36,5 km elektrifiziert)
- RB 54: Winden – Bad Bergzabern (10,0 km, nicht elektrifiziert)
- RB 55: Landau – Hinterweidenthal – Pirmasens (54,5 km, nicht elektrifiziert)
- RB 64: Pirmasens – Kaiserslautern (35,9 km, ca. 1 km elektrifiziert)
- RB 66: Kaiserslautern – Lauterecken-Grumbach (34,5 km, ca. 1 km elektrifiziert)

[47] Erkenntnisse aus dem Vergabeverfahren zum XMU-Netz in Schleswig-Holstein lassen sich vermuten (siehe 6.1.1).

[48] In dieser Werkstatt sollen auch drei für den Betrieb der Hermann-Hesse-Bahn (Renningen – Weil der Stadt – Calw) zusätzlich beschafften Fahrzeuge unterhalten werden. Siehe hierzu auch die Betrachtungen zu Werkstattstandorten und Werkstattzuführungen in Kapitel 9.7.6.

- RB 67: Kaiserslautern – Landstuhl – Kusel (51,7 km, 15,3 km elektrifiziert)
- RB 68: Saarbrücken – Zweibrücken – Pirmasens (66,5 km, 16 km elektrifiziert)

Das Projekt sieht insgesamt fünf Oberleitungsinseln und die Elektrifizierung der Streckenabschnitte Einöd-Zweibrücken bzw. im Bereich des Fehrbacher Tunnels (3 % Steigung) vor. Die längste, ohne Lademöglichkeit zu befahrende Strecke auf den beschriebenen Linien wird 48 km lang sein und liegt damit deutlich innerhalb aktuell für BEMU-Fahrzeuge diskutierter Reichweiten.

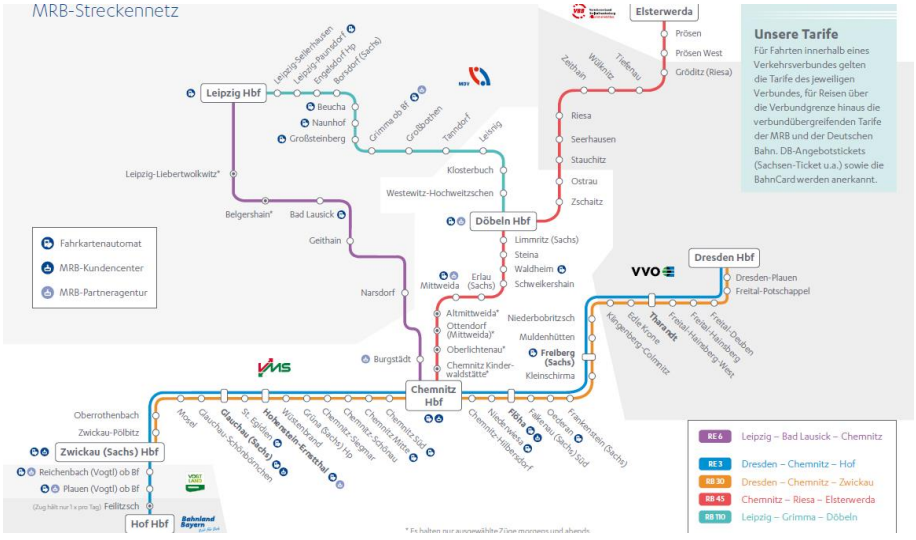
Quelle: DB / www.akkuzug-pfalznetz.de

Abb. 67: Pfalznetz (Los 1) mit Darstellung der geplanten Oberleitungsinseln

Im November 2021 bestellte DB Regio, nachdem diese den Zuschlag für den Verkehrsvertrag von den Aufgabenträgern in Rheinland-Pfalz, Baden-Württemberg und dem Saarland erhalten hatte (Laufzeit bis 2040, 15 Jahre), bei Stadler 44 Flirt Akku Triebzüge. Die Auslieferung soll ab 2025 erfolgen. Die Vorgehensweise der Fahrzeugbeschaffung unterscheidet sich damit von den anderen hier vorgestellten BEMU- (und HEMU-) Projekten, in denen die Fahrzeuge vom Aufgabenträger beschafft werden.

6.1.4 Batteriezüge Leipzig-Chemnitz (VMS)

Der Batteriezugeinsatz im VMS-Netz ist auf der Strecke Leipzig – Chemnitz, aktuell betrieben von der Mitteldeutschen Regionalbahn (MRB), vorgesehen (siehe Abb. 68).



Quelle: MRB

Abb. 68: Netz der Mitteldeutschen Regionalbahn (MRB)

Diese Strecke ist ca. 81 km lang, überwiegend eingleisig und nicht elektrifiziert. Ein weitgehender Ausbau der Strecke und die Elektrifizierung ist bis ca. 2030 geplant. In einem Zwischenzustand sollen ab Ende 2023 BEMU-Fahrzeuge einen lokal emissionsfreien Betrieb ermöglichen, dies zunächst ohne zusätzliche Elektrifizierungsmaßnahmen (Oberleitungsinseln o.ä.), d.h. die komplette Strecke von 80 km muss durch die Batteriekapazität abgedeckt werden (siehe 4.1.1 und 4.2.1.1.).

Im Februar 2020 bestellte der VMS bei Alstom hierfür 11 BEMU-Fahrzeuge des Typs Coradia Continental. Im täglichen Betrieb werden acht Fahrzeuge benötigt (vier Zugpaare in Doppeltraktion). Erste Überlegungen beinhalteten die Zielsetzung, die Fahrzeuge nach erfolgter Streckenelektrifizierung, d.h. in etwa zum Zeitpunkt eines Batteriewechsels (bei NMC-Technologie ca. 8 Jahre, siehe 4.2.1.1) zu reinen EMU-Fahrzeugen umzurüsten[49].

6.1.5 Niederrhein-Münsterland-Netz (VRR/ZWL)

Auch das Land Nordrhein-Westfalen gehörte zu den frühen Unterzeichnern der Absichtserklärung zum Einsatz von Brennstoffzellenfahrzeugen im Jahr 2014 (siehe 5.3). Folgerichtig erfolgte bereits 2016 die Einleitung eines Vergabeverfahrens für den Verkehrsvertrag auf der RE-Linie 14 Essen-Dorsten-Borken/Coesfeld durch den VRR (247321-2016-DE) für den die Zurverfügungstellung von Brennstoffzellenfahrzeugen angekündigt wurde. Zeitgleich erfolgte eine Ausschreibung zur Fahrzeugbeschaffung (137472-2016-DE). Der Verkehrsvertrag sollte ab 12/2020 laufen und 12 Jahre gültig sein. Beide Vergabeverfahren wurden 2018 aufgehoben (195907-2018-DE und 196463-2018-DE). Jeweils angekündigt wurde ein neues Vergabeverfahren für lokal emissionsfreie Triebzüge im Niederrhein-Münsterland-Netz (siehe Abb. 69). Die zunächst allein betrachtete Strecke Essen – Borken/Coesfeld ist hier enthalten, aber in eine größere Netzstruktur mit insgesamt sieben Linien eingebunden (6 Mio. Zug-km).

Die neue, zunächst technologieoffene Fahrzeugausschreibung wurde im Mai 2018 gestartet (203557-2018-DE). Ein Jahr später, im Mai 2019 erfolgte eine Modifizierung (238047-2019-DE), die den Fokus jetzt allein auf BEMU-Fahrzeuge richtete.

Quelle: VRR

Abb. 69: Niederrhein-Münsterland-Netz (VRR/ZWL)

[49] Problematik hierbei ist der Gewichtsausgleich bei Entfall des Batteriegewichts (Zulassung!)

Die sieben Strecken bzw. Linien sind:

- RE 10: Kleve-Krefeld-Düsseldorf (87 km, davon 22 km elektrifiziert)
- RE 14: Essen – Borken/Coesfeld (49 km, davon 23 km elektrifiziert)
- RE 44: Kamp-Lintfort – Moers – Bottrop (44 km, davon 36 km elektrifiziert)
- RB 31: Xanten – Moers – Duisburg (44 km, davon 30 km elektrifiziert)
- RB 36: Oberhausen – Duisburg-Ruhrort (8,6 km, davon 0,2 km elektrifiziert)
- RB 37: Geldern – Krefeld – Neuss (47,4 km, davon 17,4 km elektrifiziert)
- RB 43: Dortmund – Herne – Dorsten (48,1 km, davon 28,9 km elektrifiziert)

Im Juli 2021 erfolgte der Zuschlag für 63 Civity BEMU-Fahrzeuge an den spanischen Hersteller CAF, im April 2022 die finale Bestellung (siehe 5.2). Interessant ist dabei die Beschaffung zweier unterschiedlicher Fahrzeuggrößen (15 Fahrzeuge von 45 m Länge und 48 Fahrzeuge von 55 m Länge), entsprechend den unterschiedlichen Einsatzarten (RB/RE)[50]. Die Beschaffung erfolgt gemäß des NRW-RRX-Modells, d.h. der Hersteller ist auch hier über die Lebensdauer der Fahrzeuge für deren Instandhaltung zuständig.

6.1.6 Weitere deutsche Projekte bzw. Projektansätze

Weitere deutsche Batteriefahrzeug-Projekte sind:

- das Netz Ostbrandenburg (10 Regionalbahnlinien), wo die Niederbarnimer Eisenbahn (NEB) im Juni 2021 den Zuschlag des VBB erhielt und im Dezember des Jahres dann bei Siemens 31 Fahrzeuge des Typs Mireo+B bestellte[51] (siehe 5.2). Die Unterhaltung der Fahrzeuge erfolgt im DB Regio-Betriebswerk in Berlin-Lichtenberg.
- das H-Netz Warnow (RB 11 und RB 12), wo eine Vergabe an DB Regio im Februar 2022 und darauf aufbauend ein Auftrag von DB Regio an Stadler erfolgte. Die Inbetriebnahme der 14 Fahrzeuge ist ab Dezember 2026 vorgesehen.
- im Saarland erfolgte im Januar 2017 der Zuschlag im sogenannten Elektro-Netz-Saar (ENS) für 15 Jahre an VLEXX, die Betriebsaufnahme erfolgte 2019. Im ENS kommen aktuell nur noch auf der Strecke von Saarbrücken nach Lebach-Jabach Dieseltriebwagen zum Einsatz. Die Elektrifizierung dieser Strecke zwischen der Wemmetsweiler Kurve und Lebach-Jabach verzögert sich. Daher soll jetzt alternativ eine BEMU-Bedienung erfolgen, wozu ab 2025 durch zu BEMU-Fahrzeugen umgerüstete EMU-Fahrzeuge der bestehenden Flotte eingesetzt werden. Sechs Talent 3-Fahrzeuge sollen hierfür umgerüstet werden (siehe 5.2). Den entsprechenden, modifizierten Verkehrsauftrag erhielt der Betreiber VLEXX im April 2022 (203278-2022-DE). Der Betreiber ist verantwortlich für die Fahrzeugumrüstung (Auftrag an Alstom wurde erteilt) und die Erstellung einer Ladestation in Lebach-Jabach. Die Gesamtkosten der Umrüstung werden mit 17 Mio. € angegeben, hierfür wurde VLEXX ein Bundes-Zuschuss von 6,7 Mio. € gemäß der Förderrichtlinie „Alternative Antriebe“ gewährt.
- Der Pilotbetrieb des SPNV-Nord in Rheinland-Pfalz mit BEMU als auch HEMU-Fahrzeugen (siehe ausführlicher in 6.2.6).

Eine aktuelle Ausschreibung der Bayrischen Eisenbahngesellschaft (BEG) für eine „Untersuchung zu den technischen Voraussetzungen eines Einsatzes von Akkuhybridfahrzeugen im Allgäu“ legt zumindest nahe, dass auch in Bayern konkrete Überlegungen zum BEMU-Einsatz bestehen. Ob weitere Regionen Technologieentscheidungen für

[50] Die Vorgehensweise des Gutachters in Sachen Bemessungsfahrzeuge greift dieses Konzept auf.

[51] Die NEB ist als Betreiber für die Heidekrautbahn auch Besteller von HEMU-Fahrzeugen, siehe 6.2.3.

den Einsatz von Batteriefahrzeugen treffen, wird von weiteren Studienergebnissen abhängen, so hat z.B. das Land Mecklenburg-Vorpommern gerade eine Studie zur Frage alternativer Antriebe für das Netz der Usedomer Bäderbahn vergeben.

6.1.7 Internationale Projekte

6.1.7.1 Österreich

Mit einem Anteil von 72 % elektrifizierter Strecken (zum Vergleich Deutschland 53 %) liegt Österreich im Vorderfeld europäischer Staaten. Der Bedarf an neuen Lösungen für die nichtelektrifizierten Strecken ist damit tendenziell geringer, gleichzeitig bietet der hohe Elektrifizierungsgrad grundsätzlich eine gute Voraussetzung für BEMU-Ansätze. Wie weiter oben angesprochen (siehe 5.2 und 5.3) war die ÖBB in den zurückliegenden Jahren bei Testbetrieben sowohl im BEMU-Segment (Desiro Ecojet, erstmals vorgestellt auf der Innotrans 2018, getestet 2019/20 über 15 Monate) als auch im HEMU-Segment (iLint-Testbetrieb, Herbst 2020) prominent vertreten.

Die ÖBB-PV AG sondiert den Markt nach Fahrzeugen mit nachfolgenden Eigenschaften:
Allgemeine Fahrzeugdaten
Elektrotriebzug im konventionellen Normalspurnetz (Zugbegegnungen mit bis zu 250 km/h auch im Tunnel)
Varianten
Nah- und Regionalverkehrsausstattung
Einsatzgebiet & Zulassung
Österreich + Grenzbahnhöfe und Deutschland,
Eignung für den alpinen Winterbetrieb mit hohem Tunnelanteil
Höchstgeschwindigkeit
160 km/h im Fahrleitungs-Betrieb, 120-140 km/h im Akku-Betrieb
Zugsicherungssysteme
PZB, ETCS
Fahrzeuglänge
Ca. 50 m und ca. 75 m
Traktionierung
Mehrfachtraktion mit sämtlichen Fahrzeugvarianten möglich (bis zu 4-fach Traktion)
Stromsystem
15 kV, 25 kV
Zugbegleiterloser Betrieb
Gemäß nationaler Anforderungen der Einsatzländer
Bahnsteighöhen
200 mm, 380 mm, 550 mm, 760 mm. Niveaugleicher Einstieg bei 550 mm.
Barrierefreier Zustieg für alle Bahnsteighöhen
Anzahl und lichte Weite der Einstiegstüren
Ca. 50 m – Variante: Mindestens 2 Türen je Fahrzeugseite
Ca. 75 m – Variante: Mindestens 6 Türen je Fahrzeugseite
Lichte Weiter der Türen min. 1 300 mm
Sitzplätze
~110 Sitzplätze bei ca. 50 m Variante,
~200 Sitzplätze bei ca. 75 m Variante
Mindestsitzteiler 850 mm Reihenbestuhlung und 1 800 mm vis-a-vis Bestuhlung
WC (Mindestanforderung)
Ca. 50 m Variante:1 Universal WC barrierefrei
Ca. 75 m Variante: 1 Universal WC barrierefrei und 1 WC Standard
Antriebsart
Elektrisch und Akkubetrieb (Reichweite 80-100 km)
Lademöglichkeit für Akku stationär und während der Fahrt unter Fahrleitung
Lieferzeit
36 Monate
Instandhaltung
Optionale Instandhaltung durch den Hersteller.

Quelle: TED

Abb. 70: ÖBB-Markterkundung für Batteriefahrzeuge

Eine eindeutige Technologieentscheidung zum weiteren Umgang mit den nicht elektrifizierten ÖBB-Strecken war in der Folgezeit bisher nicht erkennbar. Ein Indiz, dass auch

in Österreich eher der Weg in Richtung von Batteriefahrzeugen eingeschlagen werden könnte, ist die vorstehend dargestellte, im März 2021 im europäischen Amtsblatt veröffentlichten Markterkundungsinitiative für Batteriefahrzeuge (121678-2021-DE).

6.1.7.2 Frankreich

Im Vergleich zu den Ambitionen im HEMU-Segment (siehe 6.2.7.3) sind die Aktivitäten im BEMU-Segment bisher überschaubar und beschränken sich auf die Umrüstung von (wenigen) Diesel-elektrischen Fahrzeugen zu Batteriefahrzeugen (siehe 5.4).

6.1.7.3 Dänemark

Dänemark verfügt aufgrund seiner geografischen Lage über sehr gute Voraussetzungen zur Nutzung von Windkraft und die Notwendigkeit zum Transport großer Strommengen zu entfernten Landesteilen wie z.B. in Deutschland (Nord >Süd) besteht nicht. Auch wenn die Gesamtmenge erzeugter erneuerbarer Energie deutlich hinter Deutschland und anderen europäischen Ländern zurückbleibt, führt Dänemark bezogen auf die Einwohnerzahl das europäische Ranking an.

Gleichzeitig waren bis in die 1980er Jahre sämtliche Bahnstrecken in Dänemark nicht elektrifiziert, den Anfang machte dann die Elektrifizierung Kopenhagen – Fredericia. Aktuell steht man bei einem Elektrifizierungsanteil von 32 % (vergleiche Deutschland mit 53 %), verfolgt aber ein sehr ehrgeiziges Elektrifizierungsprogramm, das bis 2026 die Elektrifizierung von neun Strecken mit insgesamt 1300 km umfasst. Damit resultieren in den kommenden Jahren dann auch neue Rahmenbedingungen für die Technologieentscheidung zum Betrieb verbleibender nicht elektrifizierter Strecken.

Hier ist, nachdem man sich schon in den 2000er Jahren zunächst mit der Verwendung von Wasserstoff als Antrieb auseinandergesetzt hatte, mittlerweile eine sehr eindeutige Tendenz zum Einsatz von Batteriefahrzeugen zu erkennen.

Ein erstes Pilotprojekt wurde für eine Nebenbahnstrecke an der Westküste Jütlands (Lemvigbahn) initiiert; Siemens erhielt hier im Frühjahr 2022 einen ersten Auslandsauftrag für Mireo+B-Fahrzeuge (siehe 5.2).

6.1.7.4 Großbritannien

Mit aktuell 38 % Anteil elektrifizierter Strecken rangiert Großbritannien im unteren Mittelfeld in Europa (zum Vergleich Deutschland 53 %). Dies zeigt die nochmals größere Dringlichkeit für eine Dekarbonisierungsstrategie. Eine solche wurde von Network Rail entwickelt und 2020 vorgelegt („Traction Decarbonisation Network Strategy“ (Network Rail, 2020)).

Sie sieht für insgesamt 15.400 km (eingleisige Infrastruktur) eine Vollelektrifizierung von 13.000 km (= 84 %!) vor – für 1.300 km Strecke wird der Einsatz von Brennstoffzellenfahrzeugen favorisiert, für 800 km der Einsatz von Batteriefahrzeugen. Für 300 km Strecke wurde noch keine abschließende Empfehlung erarbeitet.

Im BEMU-Segment erscheinen dem Gutachter insbesondere die Vivarail-Ansätze erwähnenswert, die sich zum einen um dem Thema Retrofit, d.h. der Umrüstung ehemaliger Dieselfahrzeuge zu Batteriefahrzeugen verschrieben haben, zum anderen auch eine technische Lösung für Schnellladestationen erarbeitet haben (siehe 4.2.1.3). Nach-

stehende Abbildung zeigt eines der Vivarail-Fahrzeuge während der letzten UN-Klimakonferenz in Glasgow während einer Besichtigung durch den britischen Thronfolger Prinz Charles.

Quelle: Vivarail

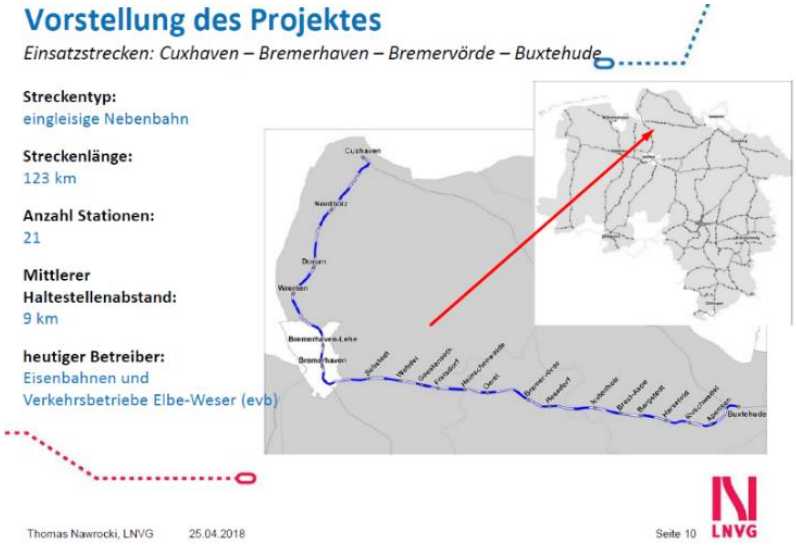
Abb. 71: COP26 Glasgow – Prince Charles besichtigt das Vivarail-Batteriefahrzeug

6.2 HEMU-Projektanwendungen

Nachstehend werden die wichtigsten, aktuellen Projekte in Deutschland kurz beschrieben (Kapitel 6.2.1 bis 6.2.5), ergänzend erfolgt ein kursorischer Einblick zu internationalen Aktivitäten in diesem Themenfeld (siehe 6.2.7).

6.2.1 LNVG Elbe-Weser (EVB)

Das Wasserstoff-Projekt der LNVG für die von der EVB betriebene Linie Buxtehude-Bremervörde-Bremerhaven-Cuxhaven (Gesamtlänge 123 km, nicht elektrifiziert) kann mit Fug und Recht als die Keimzelle der deutschen Entwicklungen und Projekte im HEMU-Segment gesehen werden.



Quelle: LNVG (Nawrocki)

Abb. 72: Wasserstoffprojekt im EVB-Netz

Das Land Niedersachsen war neben Hessen, Nordrhein-Westfalen und Baden-Württemberg Unterzeichner der ersten Absichtserklärungen im Jahr 2014 (siehe 5.3) und für dieses Projekt erfolgte Ende 2017 die erste Fahrzeugbestellung für iLint-Fahrzeuge (14 Fahrzeuge). Die vorgenommene Direktvergabe wurde damit begründet, dass nur ein Wettbewerber aktuell in der Lage sei, derartige Fahrzeuge zu liefern (siehe 5.3). Mit den beiden iLint-Vorserienfahrzeugen, auf der Innotrans 2016 erstmals der Öffentlichkeit vorgestellt, wurde auf dieser Strecke der erste und bisher zeitlich längste Testbetrieb mit Brennstoffzellenfahrzeugen -vom 16. September 2018 bis 29. Februar 2020- durchgeführt.

Angesichts der flachen, norddeutschen Topografie und großer Haltestellenabstände ist auf dieser Strecke, bestätigt im Testbetrieb, ein vergleichsweise niedriger Wasserstoffverbrauch pro Kilometer zu erwarten (0,17-0,23 kg/km; verschiedene Quellen).

Die Beauftragung von Alstom beschränkte sich nicht allein auf die Lieferung der Fahrzeuge, sondern beinhaltete auch die Sicherstellung der Wasserstoffversorgung.

Kernbestandteil des Projekts ist eine Wasserstofftankstelle in Bremervörde, die von der Linde AG als Konsortialpartner von Alstom errichtet wurde. Das Planfeststellungsverfahren für diese erste deutsche Tankstelle dieser Art dauerte vom Zeitpunkt der Einleitung bis zur Bestandskraft des Beschlusses ca. 15 Monate.

Eine lokale Wasserstoffproduktion in Tankstellennähe wird diskutiert, ohne dass bisher verbindliche Festlegungen erfolgt sind. Alternativ war auch eine Versorgung aus dem Chemiestandort in Stade (DOW Chemical) in der Diskussion. Für den Testbetrieb erfolgte eine Wasserstoffanlieferung aus den Niederlanden auf der Straße.

Der Fahrgastbetrieb wurde am 24.8.2022 aufgenommen, nur geringfügig verspätet gegenüber dem 2018 veröffentlichten Zeitplan[52]. Die Fahrzeugauslieferung leidet derzeit allerdings unter Lieferschwierigkeiten, so dass aktuell nur ein Teil der Kurse bereits mit iLint-Fahrzeugen gefahren wird.

6.2.2 RMV Taunusbahn

Das Taunusbahn-Projekt im RMV ist das zweite und bisher größte, deutsche Wasserstoffprojekt, das seinen Ursprung ebenfalls der Frühphase der Überlegungen verdankt. Auch Hessen war Unterzeichner der ersten Absichtserklärung in 2014 (siehe 5.3). Die Technologieentscheidung war hier stark beeinflusst von der industriepolitisch erwünschten Zusammenarbeit mit dem von Infraserv betriebenen Industriepark Höchst, wo Wasserstoff als Koppelprodukt der Chloralkalielektrolyse zur Verfügung steht und umfangreiche Erfahrungen im Umgang mit Wasserstoff bestehen.

Die Ausschreibung zur Fahrzeugbeschaffung wurde im April 2018 eingeleitet (171195-2018-DE). Es enthielt neben den zunächst angegebenen 26 Fahrzeugen auch die Betankungsinfrastruktur und die Fahrzeugunterhaltung über 25 Jahre („Verfügbarkeitsmodell“), geplante Betriebsaufnahme war Dezember 2022. Anders als in Niedersachsen (siehe 6.2.1) wurde hier formal von einem möglichen Wettbewerb ausgegangen[53]. Die

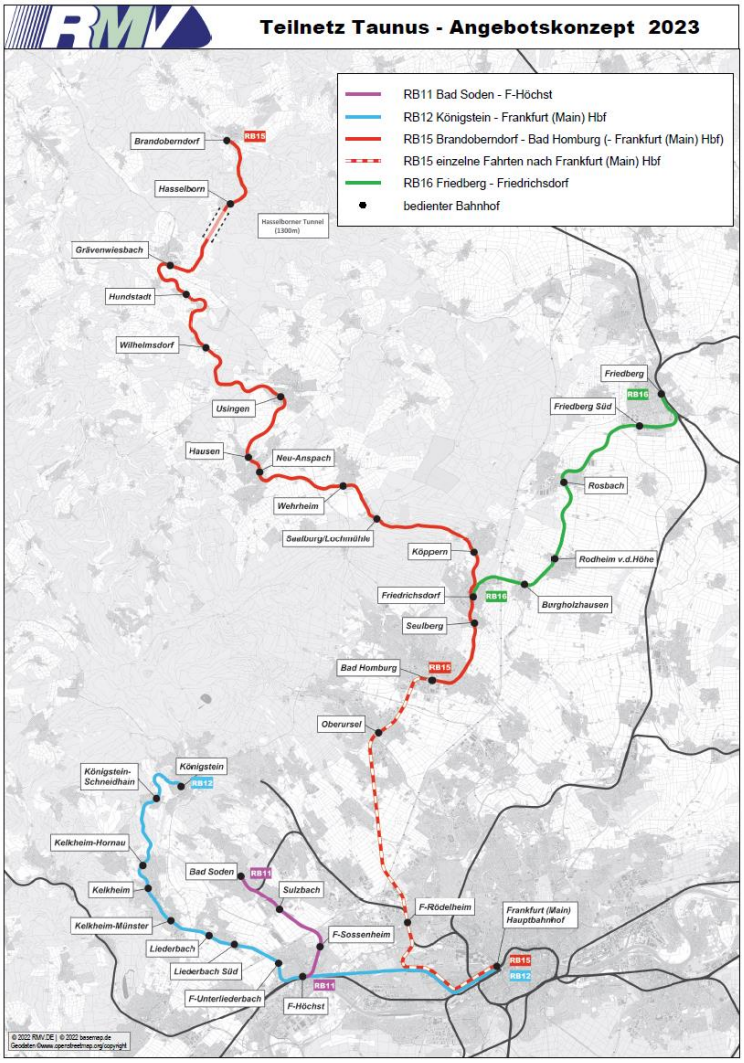
[52] Zunächst werden allerdings nur einzelne Kurse mit iLint-Fahrzeugen betrieben, die Auslieferung und Inbetriebnahme leidet unter Störungen der Lieferketten.

[53] Die Abfassung der Vergabebekanntmachung mit der „Dummy“-Angabe, dass 99 Angebote eingegangen seien, deutet allerdings darauf hin, dass es nur einen Teilnehmer am Verhandlungsverfahren gab.

Vergabe an die Arbeitsgemeinschaft Alstom/Infraserv erfolgte dann im Mai 2019 (244256-2019-DE), bestellt wurden final 27 Fahrzeuge des Typs iLint. Hierbei wird von 24 Fahrzeugen im täglichen Betrieb ausgegangen, 3 Fahrzeuge bilden die Betriebs- und Instandhaltungsreserve. Die Fahrzeugunterhaltung erfolgt im Betriebswerk von DB Regio in Frankfurt/Griesheim, wofür eine Kooperation vereinbart wurde[54].

In der Verantwortung von Infraserv lag die Erstellung der Betankungsanlage im Industriepark Höchst. Der Spatenstich für diese Maßnahme erfolgte im November 2020. Angepasst an die Flottengröße sieht die Tankstelle insgesamt acht Zapfsäulen basierend auf zwei unabhängigen Fülllinien vor. Es wird eine Speicherkapazität für 4400 kg Wasserstoff vorgesehen (500 bar, siehe auch 4.2.2.2), der geschätzte Tagesbedarf wird mit 2300 kg angegeben. Für die Erstellung der Tankstelle waren drei neue Gleise im Norden des Industrieparks Höchst zu verlegen (Kosten siehe auch 8.1.1.6). Das Tankkonzept sieht vor, dass die Fahrzeuge im Zweitagesrhythmus betankt werden.

Das Taunus-Netz umfasst vier Regionalbahnlinien (siehe Abb. 73):



Quelle: RMV

Abb. 73: Das hessische Taunusbahn-Netz

[54] Es wird auch hier deutlich, dass der DB-Konzern großes Interesse hat, sich im Bereich der alternativen Antriebe („Zukunftstechnologien“) zu positionieren und entsprechende Erfahrungen zu gewinnen.

- RB 11 Bad Soden – Frankfurt Höchst (6,6 km, elektrifiziert!)
- RB 12 Königstein – Frankfurt/Höchst – Frankfurt Hbf (25,2 km, davon 15,9 km elektrifiziert)
- RB 15 Brandoberndorf – Bad Homburg – Frankfurt Hbf (60,8 km, davon 41,6 km elektrifiziert)
- RB 16 Friedberg – Friedrichsdorf (16,4 km, davon 0,3 km elektrifiziert)

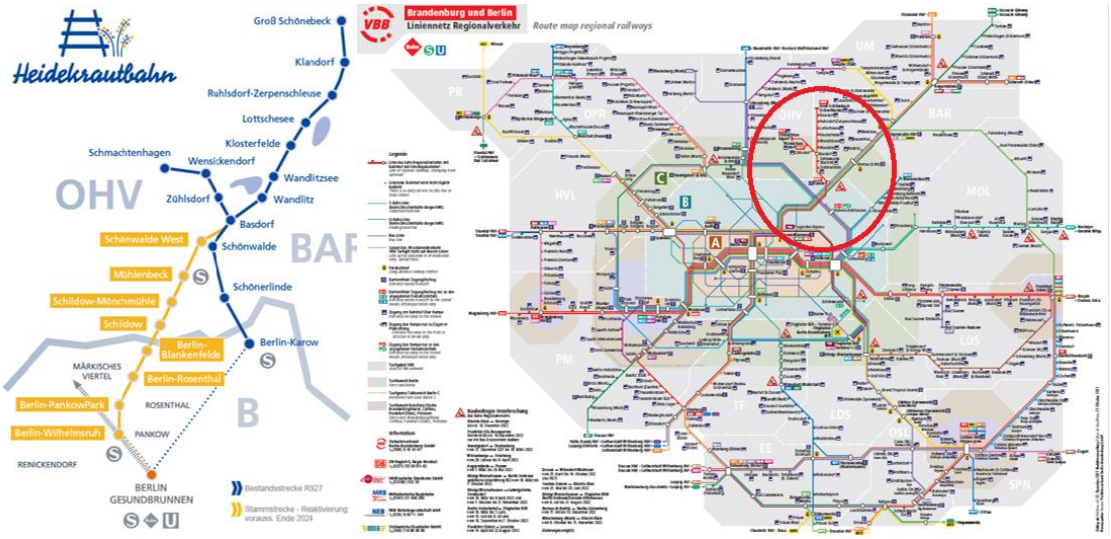
Die jährliche Gesamtfahrleistung beträgt 2,1 Mio. Zug-km (ab 2023 1,8 Mio.). Das Vergabeverfahren für die Verkehrsleistungen wurde im September 2021 gestartet (457966-2021-DE). Hier ist die Zurverfügungstellung von 25 Fahrzeugen für den Betrieb genannt (d.h. ein Fahrzeug dient als Betriebsreserve, zwei weitere Fahrzeuge als Instandhaltungsreserve, siehe auch 7.10.1).

Die Vergabe des Verkehrsvertrages erfolgte im März 2022 an die Regionalverkehre Start Deutschland GmbH, eine Tochter der DB Regio (130466-2022-DE). Der Vertrag ab Dezember 2022 hat eine Laufzeit von 12 Jahren.

6.2.3 Heidekrautbahn

Das Projekt Heidekrautbahn weist im Vergleich zu den vorgenannten Projekten in Niedersachsen und Hessen ein sehr deutliches Alleinstellungsmerkmal auf: es handelt sich hier um ein echtes „Sektorkopplungsprojekt“ (siehe auch 9.7.5), d.h. es geht um den Aufbau einer regionalen Wasserstoffwirtschaft, in der das SPNV-Projekt nur ein Teil ist. Das nachstehend beschriebene Projekt aus Thüringen (siehe 6.2.4) hat den gleichen Ansatz.

Das SPNV-Projekt Heidekrautbahn umfasst aktuell die Strecke von Berlin-Karow nach Basdorf (13 km) und weiter nach Groß Schönebeck (24 km) über Basdorf und die in Basdorf abzweigende Strecke nach Schmachtenhagen (10 km). Für die alte Stammstrecke von Basdorf nach Berlin-Wilhelmsruh (17 km) bestehen Reaktivierungsüberlegungen, die dann auch eine Weiterführung von Wilhelmsruh nach Berlin-Gesundbrunnen umfassen würde. Reaktivierungsüberlegungen bestehen auch für die in Wensickendorf vom Schmachtenhagener Streckenast abzweigende Stichstrecke nach Liebenwalde (13 km).

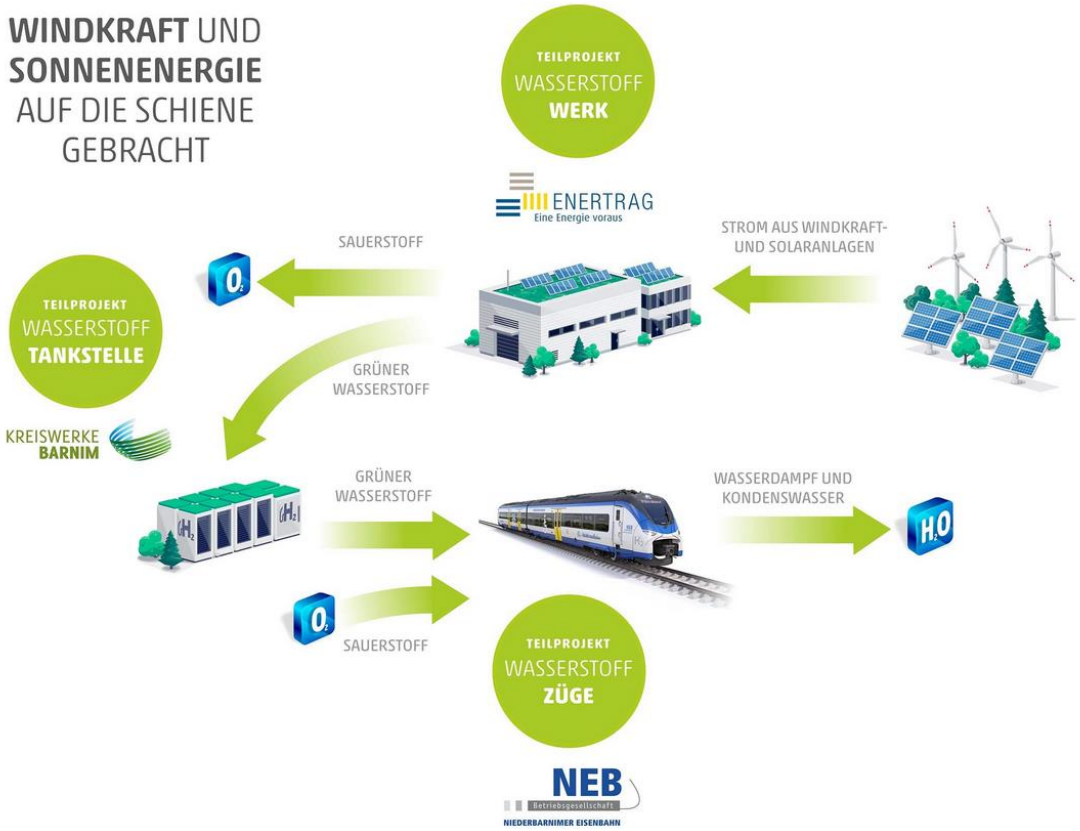


Quelle: Niederbarnimer Eisenbahn-Betriebsgesellschaft (NEB) / VBB (adaptiert)

Abb. 74: Linienverlauf und Netzeinbindung der Heidekrautbahn

Die Überlegungen zur Umstellung von Diesel- auf Wasserstoffbetrieb gehen auf das Jahr 2017 zurück. Im Mai 2021 erhielt das Projekt eine Bundesförderung von 25 Mio. € mit der ab 12/2024 sechs Brennstoffzellenfahrzeuge mit regional produziertem, grünem Wasserstoff in Betrieb gehen sollen. Die Förderung verteilte sich auf die Niederbarnimer Eisenbahn (NEB) mit 9 Mio. € für die Fahrzeugbeschaffung, Enertrag mit 13 Mio. € für den Aufbau eines Wasserstoffwerks und 2,5 Mio. € an die Kreiswerke Barnim für eine Wasserstoff-Schienentankstelle. Der Auftrag für sieben Mireo+H-Fahrzeuge ging zwischenzeitlich an Siemens (siehe 5.3).

Die Einbindung in eine regionale Wasserstoffwirtschaft lässt sich in nachstehender Abbildung ansatzweise erkennen. Ältere Projektbeschreibungen (Kreiswerke Barnim, 2018) zeigen auch die hier nicht dargestellte Einbindung des lokalen ÖPNV (Busse) und von Müllfahrzeugen unter der Überschrift „Weitere lokale Partner zur Steigerung der Marktfähigkeit“.



Quelle: Barnimer Energiegesellschaft (BEG)

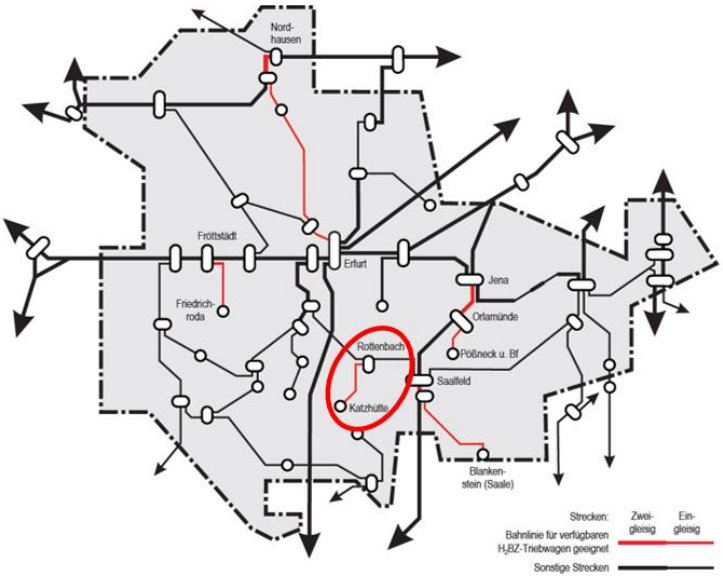
Abb. 75: Teilprojekte und Partner im Projekt Heidekrautbahn

6.2.4 Schwarzatal-Projekt Thüringen

Die nicht elektrifizierte Nebenstrecke Rottenbach – Katzhütte (KBS 562, „Schwarzatalbahn“, 25 km) wurde im Rahmen einer Grundsatzstudie (Bauhaus Universität Weimar, 2019) für ein thüringisches Wasserstoffpilotprojekt identifiziert (siehe Abb. 76).

Im September 2020 wurde seitens des Thüringer Ministeriums für Infrastruktur und Landwirtschaft die europäische Ausschreibung für einen 10-jährigen Verkehrsvertrag veröffentlicht (419147-2020-DE). Gefordert wurde die Erbringung der SPNV-Leistungen

(ca. 275 000 Zug-km pro Jahr) mit Brennstoffzellen-Fahrzeugen ab 1.1.2022 wobei ausschließlich „grüner“ Wasserstoff zum Einsatz kommen sollte. Die erforderliche Infrastruktur sollte mit dem EIU abgestimmt werden.



Quelle: H2BZ Pilotprojekt Thüringen / Bauhaus Universität Weimar (adaptiert)

Abb. 76: Übersichtskarte Eisenbahnnetz Thüringen

DB Netz und DB Energie als EIU begannen mit den Vorbereitungen für die Umsetzung des Projekts. So wurde seitens DB Energie im Mai 2021 für den Standort Rottenbach eine Wasserstofftankstelle mit zugeordneter lokaler Elektrolyse europäisch ausgeschrieben (269426-2021-DE).

Detailliertere Hintergründe zum Ausschreibungsergebnis waren für den Gutachter nicht zugänglich, kurz vor dem Jahresende 2021 wurde aber der Projektstop seitens des Aufgabenträgers aufgrund deutlicher Kostensteigerungen bekannt (siehe insuedthueringen.de/verkehrspolitik-zu-teuer-wasserstoffzug-faehrt-vorerst-nicht-im-schwarzatal oder mdr.de/schwarzatal-wasserstoff-zug-ministerium-notbremse).

Im Januar 2022 erfolgte die Vergabebekanntmachung (24786-2022-DE) seitens des Landesministeriums für eine Notvergabe bis 31.12.2023 (Fortsetzung des Dieselbetriebs durch die DB RegioNetz Verkehrs GmbH), da ein vorheriges offenes Verfahren keine bzw. keine geeigneten Angebote/Teilnahmeanträge ergeben hatte[55].

[55] Aus Sicht des Gutachters ist anzumerken, dass das Ausschreibungsergebnis in der Konsequenz nach den in der SteFanS-Studie gewonnenen Erkenntnissen nicht überrascht. Die Neubeschaffung von sehr spezifischen SPNV-Fahrzeugen (30 Jahre Lebensdauer) durch den Anbieter der Verkehrsleistungen und die Erstellung teurer Infrastruktur im Rahmen eines auf nur 10 Jahre ausgelegten Verkehrsvertrages erscheint kritisch. Dies auch dann, wenn ggf. (dem Gutachter nicht bekannt) Weiterverwendungsregularien zur Risikoabsicherung möglich gewesen wären. Allein schon die aktuell sehr hohen Gestehungskosten für lokal und nachhaltig erzeugten Wasserstoff dürften die Betriebskosten deutlich erhöht haben (siehe 8.3).

6.2.5 Mühldorfer Stern (BEG)

Die Überlegungen in Bayern zum Einsatz von Brennstoffzellenfahrzeugen gehen zurück auf die politische Beauftragung des bayrischen Aufgabenträgers BEG Ende 2019 (siehe Abb. 77). Bemerkenswert ist der Hinweis im letzten Absatz der Pressemitteilung zur synergetischen Nutzung des „braunen“ Nebenprodukt-Wasserstoffs im Chemiedreieck Mühldorf – in deutlichem Gegensatz zur Forderung nach „grünem“ Wasserstoff in Thüringen (siehe 6.2.4) oder auch in Baden-Württemberg (siehe 7.3). Parallelen zur Herangehensweise in Hessen und in Niedersachsen im Zusammenhang mit dem Industriepark Höchst (Infraserv) und Stade (DOW Chemical) werden ebenfalls deutlich.

BEG

Startseite | Die BEG | Aufgaben | Wettbewerb | Projekte | Medien

Mehr Nachhaltigkeit im Schienenverkehr

05.12.2019 BEG StMB

Bayerns Verkehrsminister Dr. Hans Reichhart macht Südostbayern zur Wasserstoff-Modellregion – Testfahrt im Allgäu geplant

- Ab Ende 2024 sollen Wasserstoffzüge in Bayern im Regelbetrieb fahren
- Raum Mühldorf für Wasserstoffzüge besonders geeignet
- Zudem Testfahrt im Allgäu 2020 geplant

Ab Ende des Jahres 2024 sollen in Südostbayern Züge mit Wasserstoffantrieb fahren. Bayerns Verkehrsminister Dr. Hans Reichhart hat heute die Bayerische Eisenbahngesellschaft (BEG) beauftragt, im Vergabeverfahren für den „Linienstern Mühldorf“ Wasserstoff als Antriebstechnik zu berücksichtigen. Reichhart: „In Bayern sollen bald erste Wasserstoffzüge unterwegs sein. Wir wollen den Einsatz von Dieselzügen sukzessive reduzieren und auf Dauer sogar ganz durch innovative Antriebsarten ersetzen. Die Elektrifizierung hat sich bereits bewährt, das Potential von Wasserstoff wollen wir nun genauer untersuchen.“

Der Raum Mühldorf ist aus Sicht Reichharts besonders für eine Erprobung von Wasserstoff geeignet: „Bei der Chemieindustrie im Chemiedreieck fällt der sogenannte ‚braune Wasserstoff‘ als Nebenprodukt an. Diesen könnten wir kostensparend und ohne Effizienzverluste für die Züge einsetzen.“ Außerdem benötigen die Züge auf den Schienenstrecken rund um Mühldorf keine spezielle Neigetechnik. Diese ist bei Wasserstoffzügen noch nicht ausgereift, allerdings vor allem bei hügeligen Strecken notwendig, um Fahrzeit zu sparen und Anschlusszüge zuverlässig zu erreichen. „Hier muss sich die Wasserstofftechnik noch bewähren“, so Reichhart.

Quelle: Bayrische Eisenbahn-Gesellschaft (BEG)

Abb. 77: Pressemitteilung zu bayrischen Wasserstoffplänen im SPNV (2019)

Die politischen Vorgaben wurden seitens der BEG dann Anfang 2021 im Ausschreibungsverfahren für den Mühldorfer Stern (siehe Abb. 78) umgesetzt (60438-2021-DE).

Quelle: Bayrische Eisenbahn-Gesellschaft (BEG)

Abb. 78: Ausschreibungsnetz Mühldorfer Stern

Die Ausschreibung sah einen Wasserstoffbetrieb auf den Strecken Mühldorf – Burghausen (32 km) und Mühldorf – Passau (113 km) vor (Neufahrzeuge, > 140 km/h). Die Laufzeit des Vertrags war auf acht Jahre begrenzt (max. drei Jahre Verlängerung), für die Neuanschaffung der Brennstoffzellenfahrzeuge stand eine Kapitaldienstgarantie zur Verfügung (Nichtinanspruchnahme derselben mit Bonuswirkung). Siehe dazu auch nachstehende Abb. 79, die einen eher kritischen Zeitungskommentar wiedergibt (merkur.de/bayern/riskanter-versuch-mit-wasserstoff-zuegen).

Bayern: Riskanter Versuch mit Wasserstoff-Zügen

Erstellt: 08.02.2021, 19:00 Uhr
Von: Dirk Walter

München/Mühldorf – Die Bahn will Neuland erkunden. Ab Dezember 2024 sollen auf zwei Bahnstrecken der Südostbayernbahn (SOB) Wasserstoffzüge unterwegs sein. Das teilte die Bayerische Eisenbahngesellschaft mit, die das gesamte Streckennetz der SOB nun ausgeschrieben hat.

Der neue Verkehrsvertrag startet 2024 und endet 2032. Da die Laufzeit mit acht Jahren relativ gering ist, wäre es keine Überraschung, wenn der bisherige Betreiber – also die SOB – die Strecken behält.

Interessanter ist eine der Bedingungen in der Ausschreibung: Zwischen Passau und Mühldorf sowie Burghausen und Mühldorf sollen künftig Wasserstoffzüge fahren. Es ist ein „Pilotprojekt“, betont BEG-Sprecher Wolfgang Oeser. Freilich sind dafür einige Investitionen notwendig, unter anderem der Bau einer Wasserstofftankstelle in Mühldorf. Und es müssen insgesamt zehn Züge beschafft werden. Bisher sind bei den Herstellern nicht viele Prototypen auf dem Markt - die Wasserstofftechnologie ist noch neu. Infrage könnte der „Coradia iLint“ von Alstom kommen. Ein erster Ansatz, Wasserstoffzüge auf dem Streckennetz der Oberlandbahn zu testen, wurde seitens des Betreibers Transdev dankend abgelehnt: zu riskant. Dass die BEG sich nun Strecken im Netz der SOB für den Versuch ausgesucht hat, geschah nicht ganz freiwillig, sondern aufgrund politischer Vorgaben. Auch Bayern, so die Botschaft, soll bei dieser Zukunftstechnologie etwas vorweisen.

Gutachten der BEG warnt vor Wasserstoff-Experiment

Die BEG hat seit 2017 ein Gutachten der TU Dresden vorliegen, in dem Wasserstoffzüge als in „nahezu in allen Szenarien am teuersten“ bewertet werden. Und ob am Ende nicht die Fahrgäste für die Versuche büßen müssen, weil die Fahrzeuge pannenanfällig sind, ist offen. Kennern des SOB-Netzes wäre es lieber gewesen, wenn batteriegetriebene Fahrzeuge erprobt würden. Noch dazu soll die Strecke Mühldorf-Burghausen elektrifiziert werden – ausgerechnet dort dann mit Wasserstoff zu experimentieren, macht wenig Sinn.

Quelle: Münchner Merkur (Onlineausgabe, adaptiert)

Abb. 79: Onlinebericht zur BEG-Ausschreibung Mühldorfer Stern 2021

Auch hier begann DB Energie mit den Vorbereitungen für eine Wasserstofftankstelle in Mühldorf und schrieb den zuführenden Wasserstofftransport auf der Straße europaweit aus (300755-2021-DE). Im Februar 2022 erfolgte die Aufhebung des Verfahrens (83117-2022-DE), nachdem die BEG im Januar 2022 über die vorläufige Ruhestellung der Verkehrsausschreibung informiert hatte.

Die vorliegenden Informationen lassen erkennen, dass die eingegangenen Angebote für den Wasserstoffbetrieb die Budgetvorstellungen der BEG deutlich übertrafen. Eine Neuauflage der Ausschreibung für den Mühldorfer Stern wurde im Mai 2022 veröffentlicht (255511-2022-DE) und zeigte deutlich veränderte Inhalte zum Wasserstoffbetrieb. So wurde dieser auf die Strecke Mühldorf-Burghausen beschränkt[56] und die Teilnehmer wurden zunächst um indikative Alternativangebote Diesel vs Wasserstoff gebeten.

6.2.6 Weitere deutsche Projekte bzw. Projektansätze

Bestrebungen für die Aufnahme eines Betriebs mit Brennstoffzellenfahrzeugen sind in Deutschland aktuell noch in der Region Düren in Nordrhein-Westfalen zu erkennen („Dürener Netz“, Rurtalbahn), hier in engem Zusammenhang mit Bestrebungen zum Aufbau einer regionalen Wasserstoffwirtschaft (siehe auch 9.7.5).

Darüber hinaus plant der SPNV-Nord in Rheinland-Pfalz einen Pilotbetrieb sowohl mit BEMU als auch HEMU-Fahrzeugen (Rambøll, 2021). Aktuelle Sitzungsprotokolle des Aufgabenträgers lassen erkennen, dass das Vorhaben, das die Bestellung von je 3 HEMU (durch DB Regio) bzw. BEMU-Fahrzeugen (durch die HLB) vorsieht, wie geplant weitergeführt wird[57]. Förderanträge wurden positiv beschieden und werden Zuschüsse zur HEMU-Beschaffung von bis zu 5,82 Mio. € und zur BEMU-Beschaffung von

[56] Dem Gutachter liegen keine Informationen zu den Gründen vor, die letztlich zum Verzicht auf die „lange“ Strecke Mühldorf-Passau geführt haben. Die für Baden-Württemberg durchgeführten Betrachtungen lassen aber die Vermutung zu, dass auch hier die Konstellation mit nur einer Tankstelle in Mühldorf und den erforderlichen Tagesumlaufleistungen die Tankfahrtenproblematik verschärft haben könnte und einen erhöhten Fahrzeugbedarf erfordert hätte.
[57] Eine Ausnahme stellt die Einbindung der Ahrtalbahn dar – diese soll beim Wiederaufbau nach der Flutkatastrophe jetzt elektrifiziert werden.

3,54 Mio. €[58] erhalten. Eine Wasserstofftankstelle soll durch DB Energie in Limburg/Diez errichtet werden.

Technologieentscheidungen für Wasserstoff werden auch von weiteren Studienergebnissen abhängen, so hat z.B. das Land Mecklenburg-Vorpommern gerade eine Studie zur Frage alternativer Antriebe für das Netz der Usedomer Bäderbahn vergeben.

6.2.7 Internationale Projekte

6.2.7.1 Zillertalbahn (Österreich)

Bei diesem Projekt handelt es sich um eine schmalspurige Nebenstrecke (760 mm) zwischen Jenbach und Mayrhofen (32 km), die künftig mit Brennstoffzellenfahrzeugen betrieben werden soll. Das Projekt besteht bereits seit ca. 2018, die Umsetzung hatte sich allerdings verzögert.

Aktuell fehlen sowohl seitens des Bundeslandes Tirol als auch seitens des Bundes noch die Zusagen zur Finanzierung des Rollmaterials, dessen Anschaffungskosten mit 75 Mio. € beziffert werden (siehe 5.3). Der Beginn des erforderlichen Neubaus des Bahnhofs Mayrhofen samt Wasserstoffanlage (Tankstelle plus Elektrolyseur) ist wegen noch nicht abgeschlossener Grunderwerbsverhandlungen offen. Als frühestmögliche Inbetriebnahme des Projekts wird Dezember 2026 genannt.[59]

Das Rollmaterial soll nach eingehender Wirtschaftlichkeitsprüfung und Finanzierungszusagen von der Schiene Tirol GmbH, einer Tochtergesellschaft des Tiroler Verkehrsverbundes (VTT), angeschafft und an die Zillertalbahn vermietet werden.[60]

6.2.7.2 Brescia FNM (Italien)

Die FNM beabsichtigt die Umstellung des Betriebs auf der Strecke Brescia - Iseo - Edolo (103 km). Für das Projekt wurden zunächst 6 Coradia Stream-Fahrzeuge bei Alstom bestellt (siehe 5.3). Eine Inbetriebnahme wird für 2023 angekündigt. Das Schienenverkehrsprojekt soll in ein regionales „Hydrogen Valley“-Projekt eingebunden werden, das u.a. auch den Einsatz von 40 Wasserstoffbussen vorsieht. In einer ersten Projektphase soll der Wasserstoff noch einer Produktion aus Dampfreformierung entstammen (mit CO^2 Speicherung / „blauer“ Wasserstoff), danach soll eine Umstellung auf „grünen“ Wasserstoff erfolgen.

Kalkuliert wird hier mit einem Wasserstoffverbrauch von 0,36 kg/km[61] – resultierend aus einer anspruchsvollen Topografie und größeren Fahrzeugen.

6.2.7.3 SNCF (Frankreich)

Die SNCF bereitet für vier französische Regionen einen Pilotbetrieb auf nachstehend dargestellten Linien vor:

- Auvergne-Rhône-Alpes

[58] Diese Zuschussunterschiede bei gleicher Fahrzeuganzahl konnten vom Gutachter bisher nicht verifiziert werden; Mehrkosten von 64 % für HEMU-Fahrzeuge sind durch sonstige Erkenntnisse nicht gedeckt.
[59] Bilanzpressekonferenz der Zillertalbahn AG, 19.08.2022
[60] Tiroler Tageszeitung (TT), 31.05.2022 und 28.07.2022
[61] Ob es sich hier um einen EoL-Wert handelt, konnte nicht ermittelt werden.

  - Moulins – Clermont-Ferrand – Brioude (176 km, 106 km elektrifiziert),
  - Lyon – Roanne – Clermont-Ferrand (269 km, 121 km elektrifiziert),
- Burgundy – Franche Comte
  - Dijon – Laroche – Migennes – Auxerre – Avallon (233 km, 159 km elektrifiziert),
  - Dijon – Laroche – Migennes – Auxerre – Corbigny (263 km, 159 km elektrifiziert),
- Occitanie
  - Toulouse – Montréjeau – Luchon (139 km, 104 km elektrifiziert)
- Grand-Est
  - Mulhouse – Thann – Kruth (38 km, 22 km elektrifiziert)

14 Coradia Polyvalent-Fahrzeuge wurden 2021 bei Alstom bestellt (siehe 5.3), eine Betriebsaufnahme ist ca. 2024 geplant.

Das letztgenannte Projekt auf der Strecke Mulhouse-Kruth erscheint aus der deutschen Betrachtung zunächst etwas seltsam, bei einer nicht elektrifizierten Strecke von 16 km würde man hier eher ein Einsatzfeld für BEMU-Fahrzeuge vermuten. Hier ist aber zu beachten, dass die französischen Brennstoffzellen-Fahrzeuge hybrid ausgelegt sind und mit ihren Stromabnehmern auch Oberleitungsabschnitte nutzen können (siehe 5.3).

6.2.7.4 Groningen (Niederlande)

Das Wasserstoffprojekt in Groningen ist eingebunden in eine sehr umfassende regionale Strategie zum Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft (siehe auch 9.7.5) mit einem der absehbar größten Produktionsstandorte für grünen Wasserstoff in Europa[62].

Das Eisenbahnnetz in Friesland ist nicht elektrifiziert und die topografischen Rahmenbedingungen einfach. Nach einem mehrwöchigen iLint-Testbetrieb im Jahr 2020 besteht aktuell die Absicht mit 4 HEMU-Fahrzeugen den Betrieb auf der Strecke Groningen-Leeuwarden (54 km) aufzunehmen. Ein Förderbescheid der Europäischen Investitionsbank liegt seit Dezember 2021 vor, eine europäische Ausschreibung für die Fahrzeugbeschaffung durch ARRIVA ist für den Herbst 2022 angekündigt.

6.2.7.5 San Bernardino (Kalifornien / USA)

Das sogenannte ARROW-Projekt beinhaltet zunächst und in erster Linie die Reaktivierung eines historischen Eisenbahnkorridors von 15 km Länge zwischen San Bernardino und Redlands im Großraum Los Angeles. Die Strecke wurde im SPNV 1938 stillgelegt und zwischenzeitlich teilweise abgebaut. Die Bauarbeiten hierfür begannen 2019 und eine Inbetriebnahme im Dieselbetrieb war für 2022 geplant. Hierfür wurden bei Stadler 2018 drei Flirt-Triebwagen bestellt. In San Bernardino besteht Anschluss an das Metrolink-Liniennetz.

Eine zusätzliche Komponente kam mit dem geplanten Wasserstoffbetrieb hinzu. Für diesen wurde in sehr umfangreichen Studien sowohl ein Shuttlebetrieb bis San Bernardino als auch eine Durchbindung zur Union Station in Los Angeles untersucht. Im November 2019 wurde bei Stadler ein Brennstoffzellenfahrzeug auf Flirt-Basis bestellt.

Bei Inbetriebnahme in 2024 wird es sich um den ersten Einsatz eines Brennstoffzellenfahrzeugs im Passagierverkehr in den Vereinigten Staaten handeln.

[62] Basiert auf Nordsee-Windstrom und Photovoltaik.

6.2.7.6 Spanien

In Spanien sind aktuell noch keine konkreten Projekte bekannt, erwähnenswert ist aber das großangelegte, europäische „Horizont 2020“-Forschungsprojekt FCH_2Rail („Fuel Cell Hybrid PowerPack for Rail Applications“) mit CAF als Fahrzeughersteller, der spanischen Staatsbahn Renfe, Adif als spanischem Netzbetreiber (vergleichbar DB Netz), Toyota als Brennstoffzellenlieferant und weiteren Partnern (siehe cordis.europa.eu/project/). Deutsche Partner in diesem Projekt sind das DLR (als Koordinator) und Stemmann-Technik.

7 Grundsätzliche Festlegungen für die Studie

7.1 Unterscheidung Machbarkeit / Wirtschaftlichkeit

Beim Vergleich eines EMU-Betriebs mit alternativen Antrieben wie BEMU und HEMU ist auf eine zielführende Betrachtung in Sachen Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit zu achten. Für einen voll-elektrischen EMU-Betrieb stellt sich die Frage der Machbarkeit nicht, da die Stromversorgung kontinuierlich für die Gesamtstrecke gewährleistet ist. Anders sieht dies für Batterie- bzw. Wasserstoff-betriebene Fahrzeuge aus, wo Reichweiten -und damit Machbarkeiten- in nichtelektrifizierten Strecken ganz entscheidend von Fragen der vorhandenen Batterie- bzw. Wasserstoffkapazität bestimmt werden.

Dies erfordert für eine Machbarkeitsbetrachtung alternativer Antriebe ein Ansetzen von technischen und betrieblichen „Worst Case"-Bedingungen, wie betriebliche Sonderbedingungen, z. B. Verspätungen mit längerem Aufenthalt in Abschnitten ohne Stromversorgung, erhöhten Energieverbrauch aufgrund kumuliert wirkender Nebenverbraucher, jahreszeitliche Schwankungen, „End of life"-Betrachtungen usw.

Im Realbetrieb, z.B. im Jahresdurchschnitt, wie er für Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen zugrunde zu legen ist, stellt sich damit regelmäßig ein niedrigerer Energieverbrauch ein. Eine Verwendung der Energieverbrauchswerte der Machbarkeitsbetrachtung und Hochrechnung auf ein Gesamtjahr oder bei der Betrachtung eines 30-Jahres-Zeitraums würde deutlich überhöhte Energiekosten ergeben.

Der Gutachter gleicht diesen Unterschied aus, in dem er für Machbarkeitsbetrachtungen die Nebenverbraucher mit einem hohen Ansatz von 90 kW betrachtet, für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung aber mit 50 kW arbeitet.

7.2 Berücksichtigung von Förderungsaspekten

Es wird der Grundsatz verfolgt, zuerst eine Betrachtung der Kosten auf Basis der „Total-Cost-Ownership (TCO)" vorzunehmen, in der alle Kosten über die betrachtete Lebensdauer von 30 Jahren berücksichtigt werden (siehe 7.11). Erst im Anschluss an diese Berechnung werden ergänzend Förderaspekte geprüft und dargestellt, ohne dass diese aber in die Technologieempfehlung eingehen. Damit wird sichergestellt, dass ein neutraler Kostenvergleich (aus volkswirtschaftlicher Sicht) zwischen den Technologien möglich ist, d.h. keine Verfälschung durch Förderaspekte erfolgt.

Annahmen zur Förderung basieren auf dem GVFG, das für Infrastrukturmaßnahmen eine auch mittelfristig erwartbare Förderquote aufzeigt (aktuell 90 %). In der aktuellen Fassung werden u.a. Bau oder Ausbau von Schienenwegen, Reaktivierung von Strecken, Elektrifizierung und Tank- und Ladeinfrastruktur für alternative Antriebe gefördert.

Für die Fahrzeugförderung gibt es aktuell keine Regularien, die über einen 30-Jahres-Zeitraum verlässliche Aussagen zu Förderquoten zulassen. Fahrzeuge mit alternativen Antrieben werden bisher allein über eigene, zeitlich beschränkte Förderprogramme gefördert. Dementsprechend wurde keine Förderung von Fahrzeugkosten angenommen.

Technologien mit hohem Infrastrukturanteil, wie eben EMU und BEMU, schneiden bei der Betrachtung von Förderaspekten daher günstiger ab als HEMU. Dies ist ein weiteres Argument für das Ausklammern von Förderaspekten bei der Technologieempfehlung.

7.3 Grundbedingung „grüne Energieversorgung“

Das Land Baden-Württemberg verfolgt bereits die Strategie, den elektrischen Betrieb im SPNV auf die Verwendung „grünen“ Stroms zu basieren (siehe 8.3.1). Von daher erschien es konsistent, für alle in der SteFanS-Studie betrachteten Antriebstechnologien gleiche Voraussetzungen zu schaffen.

Daher erfolgte die grundsätzliche Festlegung, die Betrachtungen zum Wasserstoffeinsatz konsequent auf „grünen“ Wasserstoff auszurichten, d.h. auf Wasserstoff, der aus erneuerbaren Energien erzeugt wird. Lösungen, wie sie in anderen deutschen Wasserstoff-Projekten gewählt wurden (z.B. Taunusnetz <> Chemiepark Höchst / Infraserv) oder angedacht sind (z.B. Chemiedreieck Mühldorf), d.h. Synergien mit lokalen Chemiestandorten oder Übergangsszenarien, bei denen in einer Übergangsphase bis zur lokalen Erzeugung grünen Wasserstoffs zunächst „grauer“ Wasserstoff angekauft wird (z.B. in Bremervörde) wurden als für Baden-Württemberg nicht zielführend erachtet.

In Baden-Württemberg besteht eine grundsätzliche Problematik im Hinblick auf die Schaffung von Windkraft- und Photovoltaikanlagen. Dies birgt eine erhebliche Unsicherheit, ob Anlagen jeweils dort, wo eine Wasserstoffproduktion für den SPNV benötigt wird, d.h. in den jeweiligen Korridoren, geschaffen werden können. Daher wurde festgelegt, die Studie nicht mit diesen Fragestellungen zu überfrachten, sondern konsequent vom Ankauf „grünen Stroms“ für die Elektrolyse an den benötigten Standorten (im Bereich von Wasserstofftankstellen, d.h. „on site“-Elektrolyse) auszugehen[63].

Damit wurde auch die Problematik des Wasserstofftransports von schwer definierbaren Produktions- bzw. „Einkaufs“standorten eliminiert, die sich über einen Betrachtungszeitraum von 30 Jahren auch mehrfach ändern könnten. Grundsätzliche Aspekte zum Wasserstofftransport sind in Kapitel 4.2.2.5 dargestellt.

7.4 Umwelt- und Emissionsdiskussion

Die im vorhergehenden Kapitel beschriebene Vorgehensweise bedeutete im Weiteren, dass Emissionsunterschiede zwischen den Antriebstechnologien weitestgehend nivelliert werden, d.h. alle betrachteten Technologien basieren auf erneuerbaren Energien und werden mit den entsprechen Preisen betrachtet.

Quelle: ÖBB

Abb. 80: Co2-Emissionen Diesel-EMU/BEMU-HEMU bezogen auf Strommix

[63] Diese Erzeugungsmethode kann im Einzelfall zu höheren Wasserstoffgestehungskosten führen als bei optimaler Anbindung an eine regulatorisch günstigere Stromerzeugung, siehe 8.3.1.2

Eine Befassung mit Emissionsunterschieden, wie sie sich z.B. aus unterschiedlichem „Strommix“ ergibt (siehe Abb. 80), wurde damit gegenstandslos.

7.5 Von Einzelstrecken zu regionalen Teilnetzen

Bereits in einem frühen Stadium der Untersuchung zeigte sich die Notwendigkeit einer Zusammenfassung von Einzelstrecken zu regionalen Teilnetzen. Eine solche Zusammenfassung war zwar Gegenstand der geplanten Untersuchungsmethodik, war aber zunächst als Teil einer „finalen Strategie- und Ergebnisphase“ gesehen worden.

Die Notwendigkeit zur Zusammenfassung ist z.B. begründet in

- betrieblichen Überlappungen von Einzelstrecken (z. B. Teilnetz 2: Donautalbahn und Aulendorf-Sigmaringen im Abschnitt Herbertingen-Sigmaringen),
- Infrastrukturerfordernissen, die mehreren Strecken zugutekommen (z. B. Teilnetz 4: Westfrankenbahn/Wasserstofftankstelle in Miltenberg – genutzt von Strecken Miltenberg-Crailsheim und Miltenberg-Seckach),
- Problematik separater/unterschiedlicher Technologieempfehlungen für zusammenhängende Strecken oder überlappende Betriebskonzepte.

Diese Überlegungen führten zu einer frühzeitigen Zusammenfassung der Einzelstrecken zu sechs Teilnetzen, die dann in der wirtschaftlichen Untersuchung auch jeweils als Einheit betrachtet wurden (siehe Kapitel 10.1 ff). Nachstehende Tabelle zeigt die vorgenommene Zusammenfassung.

Tabelle 2: Zusammenfassung von Strecken/Linien zu Teilnetzen

Strecke	Linien	Teilnetz	
Pforzheim - Horb	Pforzheim - Horb Pforzheim - Nagold	1	Nagoldtalbahn
Ulm - Sigmaringen - Tuttlingen	Ulm - Blaubeuren Ulm - Munderkingen Ulm - Tuttlingen Herbertingen - Ehingen	2	Donautalbahn Plus
Aulendorf - Sigmaringen	Aulendorf - Sigmaringen		
Aulendorf - Kißlegg	Friedrichshafen - Leutkirch Aulendorf - Wangen	3	RS Bodensee-Oberschwaben
Miltenberg - Crailsheim	Miltenberg - Crailsheim Tauberbischofsheim - Bad Mergentheim	4	Westfrankenbahn
Miltenberg - Seckach	Miltenberg - Seckach		
Öhringen - Schwäbisch Hall-Hessental	Heilbronn - Schwäbisch Hall-Hessental Öhringen - Schwäbisch Hall-Hessental	5	Hohenlohebahn
Korntal - Weissach	Korntal - Weissach	6	Raum Stuttgart
Kirchheim/Teck - Oberlenningen	Kirchheim/Teck - Oberlenningen		
Nürtingen - Neuffen	Nürtingen - Neuffen		

In einer späteren Studienphase (nach Vorliegen einer Empfehlungstendenz im jeweils zugeordneten Teilnetz) wurden ergänzend noch die Strecken Hechingen-Gammertingen-Sigmaringen und die potenzielle Reaktivierungsstrecke Stockach-Mengen (Ablachtalbahn) in die Untersuchung einbezogen. Dies erfolgte allerdings mit reduziertem Umfang, d.h. allein bezüglich der empfohlenen Technologie im „benachbarten Teilnetz“ (in beiden Fällen die Donautalbahn). Ein Technologievergleich und eine wirtschaftliche Betrachtung erfolgten in diesen Fällen nicht (siehe Kapitel 9.2.6.2 und 9.2.6.3).

7.6 Weitere Festlegungen / untersuchte Technologien

Wie dargestellt, war es zunächst Untersuchungsansatz, für alle Strecken die Elektrifizierung (EMU) den alternativen Technologien BEMU und HEMU gegenüberzustellen. Im Untersuchungsverlauf zeigte sich im Gesamtzusammenhang bzw. aufgrund spezifischer Rahmenbedingungen, dass eine Untersuchung der HEMU-Alternative nicht überall zielführend ist. Für die Regio-S-Bahn (RS) Bodensee-Oberschwaben und die SPNV-Linie Friedrichshafen-Leutkirch hätte ein HEMU-Einsatz bedeutet, dass überwiegende, bereits elektrifizierte Streckenabschnitte (Friedrichshafen-Aulendorf, Kißlegg-Leutkirch) von Fahrzeugen bedient werden, die die Oberleitung nicht nutzen können[64]. Der erkennbare Energiekostennachteil für Wasserstoff führte aus (volks-)wirtschaftlicher Sicht zum Ausschluss. Ähnlich ist die Situation im Bereich der Hohenlohebahn, wo zumindest ein Betrieb zwischen Heilbronn und Schwäbisch Hall-Hessental zugrunde zu legen ist und der Abschnitt Heilbronn-Öhringen Cappel bereits elektrifiziert ist.

Die Argumentation lässt sich erweitern (und gilt dann sinngemäß auch für eine BEMU-Betrachtung), wenn „Langläufer“ in die Betrachtung einbezogen werden, so im Fall der Hohenlohebahn z.B. ein Betrieb Mannheim-Heilbronn-Schwäbisch Hall-Nürnberg (siehe Kapitel 10.5.4).

Andere Gründe sprachen für die drei, sehr kurzen[65] Einzelstrecken im Stuttgarter Raum gegen eine Wasserstoffbetrachtung. Sämtliche Strecken, die alle räumlich getrennt sind, verfügen über Berührungspunkte zum elektrifizierten Netz und liegen definitiv deutlich innerhalb heutiger BEMU-Reichweiten. Der Aufbau eigener Wasserstoffinfrastrukturen für jede der Strecken und für sehr wenige Fahrzeuge erscheint nicht darstellbar.

Tabelle 3 gibt eine Übersicht der finalen Auswahl[66].

Tabelle 3: Überblick untersuchte Technologien

Strecke	Teilnetz		Untersuchte Technologie
Pforzheim-Horb	1	Nagoldtalbahn	EMU/BEMU/HEMU
Ulm-Sigmaringen-Tuttlingen Aulendorf-Sigmaringen	2	Donautalbahn Plus	EMU/BEMU/HEMU
Immendingen-Blumberg-Riedöschingen *Immendingen-Tuttlingen*	*2**	*Orientierung an Donautalbahn Plus-Empfehlung*	
Aulendorf-Kisslegg	3	RS Bodensee-Oberschwaben	EMU/BEMU
Miltenberg-Crailsheim Miltenberg-Seckach	4	Westfrankenbahn	EMU/BEMU/HEMU
Öhringen-Schwäbisch-Hall	5	Hohenloheplan	EMU/BEMU
Korntal-Weissach Kirchheim/Teck-Oberlenningen Nürtingen-Neuffen	6	Raum Stuttgart	EMU/BEMU

[64] Grundlage der Aussage sind die auf dem deutschen Markt angebotenen Fahrzeuge (siehe Kapitel 5.3).
[65] Thälesbahn 9 km, Teckbahn 11 km, Strohgäubahn 22 km
[66] Hier nicht enthalten sind die zwei im Untersuchungsverlauf zusätzlich beauftragten Strecken (Hechingen-Gammertingen-Sigmaringen und die Ablachtalbahn), die Vorgehensweise zu diesen Strecken entspricht der zu den „Ringzug“-Strecken.

Im Rahmen von Teilnetz 6 bietet die Strohgäubahn, die von den drei Strecken die größte Länge und den größten Elektrifizierungsaufwand erfordert (siehe 9.6.1), auf den ersten Blick eine bessere Ausgangsposition für den Einsatz der Wasserstofftechnologie als die anderen beiden Strecken. Sollten in diesem Korridor aufgrund sonstiger Aktivitäten zur Schaffung einer regionalen Wasserstoffwirtschaft günstigere Rahmenbedingungen geschaffen werden, könnte hier eine ergänzende Prüfung erfolgen. Derzeit sind derartige Synergien nicht erkennbar (siehe auch 9.7.5) und der Gutachter sieht die Nachteile einer Insellösung mit hohen Fahrzeugbeschaffungskosten für eine kleine Flotte übergewichtig.

7.7 Einbeziehung qualitativ / strategischer Aspekte

Es wurde festgelegt, dass Betrachtungen und Empfehlungen nach Feststellung der betrieblichen und technischen Machbarkeit zunächst aus rein wirtschaftlicher Sicht erfolgen sollen. In einem zweiten Schritt werden dann auch ergänzende qualitative und strategische Aspekte für eine Gesamtempfehlung herangezogen (siehe Kapitel 11).

7.8 Methodik für Betriebssimulationen und Energieflussberechnungen

7.8.1 Bemessungsfahrzeuge

Die von der Fahrzeugindustrie angebotenen Fahrzeuge mit alternativen Antrieben (BEMU, HEMU) weisen teilweise deutlich unterschiedliche Parameter auf (siehe Kapitel 5). Dies betrifft Fahrzeuglänge, Gewicht, Motorisierung, Batteriekapazitäten, Tankkapazität für Wasserstoff etc. Eine direkte Verwendung dieser Fahrzeugpalette im Rahmen der betrieblichen und energetischen Betrachtung, aber auch für einen wirtschaftlichen Vergleich, wurde daher vom Gutachter verworfen.

Die Vorgehensweise wurde stattdessen auf fiktiven Bemessungsfahrzeugen basiert; nachstehende Tabelle 4 zeigt die sechs bzw. acht den weiteren Untersuchungen zugrunde gelegten Bemessungsfahrzeuge.

Entsprechend den zum Teil sehr unterschiedlichen Einsatzcharakteristika auf den betrachteten Strecken bzw. Teilnetzen wurden zwei Bemessungsfahrzeugkategorien entwickelt: ein RB-Fahrzeug von 45 m Länge und ein RE-Fahrzeug von 60 m Länge. Beide Fahrzeuge bilden dabei das untere und obere Ende der Parameterbandbreite ab.

Die Konfiguration der Bemessungsfahrzeuge orientiert sich zum einen an den Parametern der heute angebotenen Fahrzeuge im Segment BEMU und HEMU, zum anderen wurde sie durch die Aufstellung und Auswertung einer Fahrzeugdatenbank für EMU-Fahrzeuge ergänzt. Letztere diente insbesondere auch zur Abbildung der Gewichtsunterschiede, die sich aus den zusätzlichen Komponenten von BEMU- und HEMU-Fahrzeugen ergeben. Diese Gewichtsunterschiede stellen einen wesentlichen Einflussfaktor für den Energieverbrauch dar (siehe Kapitel 4.1.2 und 9.7.1).

Im Rahmen der Gespräche des Gutachters mit verschiedenen Industrievertretern (siehe Kapitel 3.3) wurde sowohl die Vorgehensweise als auch die Parameterauslegung grundsätzlich als der Fragestellung angemessen beurteilt.

Inwieweit die verwendeten Bemessungsfahrzeugtypen im Weiteren auch in einer Fahrzeugausschreibung Verwendung finden sollen, ist eine strategische Entscheidung des Aufgabenträgers. Eine nachrichtliche Einschätzung des Gutachters findet sich in 9.7.6.

Tabelle 4: Bemessungsfahrzeuge

Parameter Konfiguration	Einheit	EMU-RE 3-teilig	EMU-RB 2-teilig	BEMU-RE 3-teilig	BEMU-RB 2-teilig	HEMU-RE 3-teilig	HEMU-RB 2-teilig
Länge	[m]	60	45	60	45	60	45
Masse (leer)	[t]	108	86	119	94	117	92
Masse (beladen)	[t]	121	94	131	102	130	101
Masse (Δ)	[t]	13	9	13	9	13	9
Masse (leer)/Länge	[t/m]	1,80	1,90	1,98	2,08	1,95	2,05
Masse (beladen)/Länge	[t/m]	2,01	2,10	2,19	2,28	2,16	2,25
Drehgestelle	[1]	4	3	4	3	4	3
Achsen	[1]	8	6	8	6	8	6
Achsen/Länge	[1/10m]	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33
Sitzplätze	[1]	168	117	168	117	168	117
Sitzplätze/m	[1/m]	2,8	2,6	2,8	2,6	2,8	2,6
Gewicht Fahrgäste Sitzplätze	[t]	13	9	13	9	13	9
Geschwindigkeit	[km/h]	160	140	160	140	160	140
Beschleunigung	[m/s²]	1,1	1,1	1,1	1,1	1	0,7
Leistung	[kW]	1700	1000	1700	1000	1700	800
Leistung/Masse	[kW/t]	15,74	11,70	14,31	10,68	13,12	7,92
Leistung/Sitzplatz	[kW/1]	10,12	8,55	10,12	8,55	10,12	6,84
Brennstoffzelle	[kW]					600	400
Gewicht Brennstoffzelle	[kg]					2100	1400
Batterie Traktion/Puffer	[kWh]			800	600	350	250
Gewicht Batterie	[kg]			12000	9000	5250	3750
Batteriegewicht/kWh	[kg/kWh]			15	15	15	15
Tankkapazität	[kg]					260	180
Gewicht Tank	[kg]					3714	2571
Summe Komponentengewicht	[kg]			12000	9000	11064	7721
Theor. Reichweite Batterie (48% bei 4 kWh/km)	[km]			96	72		
Theor. Reichweite H2 (80% bei 0,26 kg/km)	[km]					800	554

7.8.2 Iterative Betrachtung (Infrastrukturszenarien)

Insbesondere bei der Beurteilung der BEMU-Technologie ist eine iterative Herangehensweise erforderlich, um die Wechselwirkungen zwischen Infrastrukturausbau und „Fahrzeugfähigkeit“ abzubilden, d.h. es ist vorab zunächst nicht bekannt, welche Infrastrukturergänzungen ggf. erforderlich sind, um eine Machbarkeit sicherzustellen.

Zu beachten ist, dass es alleinige Aufgabe der hier dargestellten Infrastrukturszenarien ist, die für einen BEMU-Betrieb erforderlichen Elektrifizierungsmaßnahmen abzubilden. Sonstige Infrastrukturmaßnahmen, die zum Fahren eines Betriebskonzeptes (z.B. eines dichteren Takts) oder im Rahmen des Gesamtkonzepts erforderlich sein mögen, werden hier nicht betrachtet.

Die im Rahmen der Studie zu entwickelnden Infrastrukturszenarien orientierten sich dabei von der Ausgangssituation („Minimalinfrastruktur“) schrittweise in Richtung einer benötigten Infrastruktur und berücksichtigten dabei die grundsätzlichen Alternativstrategien „Verlängerung vorhandener Elektrifizierungsabschnitte“ und „Oberleitungsinseln“, die sich in der Regel durch deutlich unterschiedlichen Aufwand unterscheiden (Anbindung an übergeordnetes Leitungsnetz eines EVU, lokale Verfügbarkeit der benötigten „Strommengen“). Ladestationen stellen dabei eine Sonderform der Oberleitungsinsel insbesondere für Endbahnhöfe mit langen Wendezeiten dar.

Hierbei kann auch der Fall eintreten, dass mehrere alternative Infrastrukturszenarien als „machbar“ identifiziert werden. In diesen Fällen wurde in einem zweiten Schritt eine vertiefte Betrachtung zur Identifizierung des insgesamt günstigsten Szenarios durchgeführt, das die Aspekte des Infrastrukturbedarfs, der Kosten, benötigter Planverfahren, der Realisierungszeiten, ggf. auch der Durchsetzbarkeit einschloss.

Die hier vorgenommenen Überlegungen bewegen sich zunächst auf strategischem Niveau. Die Anordnung von Elektrifizierungsabschnitten bzw. Lademöglichkeiten ist dabei als vorläufig zu sehen und kann im Wege vertiefender Infrastrukturplanungen selbstverständlich angepasst und variiert werden[67].

Die Herangehensweise bei der Betrachtung der HEMU-Technologie erfordert keine vergleichbaren Infrastrukturszenarien bzw. allein bezüglich der Fragestellung, ob eine oder mehrere Wasserstofftankstellen erforderlich sind und wo diese anzuordnen sind. Die Lage der Wasserstofftankstelle hat Implikationen für Betriebskonzepte und Tagesfahrleistungen, da ggf. zusätzliche Tankfahrten abzuwickeln sind (siehe 7.8.4).

Zusätzlich zu klären war die Fragestellung, ob die Zurverfügungstellung von Wasserstoff über lokal zugeordnete Elektrolyse („on site“) oder durch Ankauf und Antransport („off site“) erfolgen soll.

Aufgrund der aktuell noch sehr geringen Verfügbarkeit grünen Wasserstoffs in Baden-Württemberg und der Problematik Transportwege zu unterschiedlichen Tankstellenstandorten in Baden-Württemberg seriös abzuschätzen, wurde für die Studie festgelegt, dass grundsätzlich eine „on site“ Elektrolyse auf Basis von Grünstrom zugrunde gelegt werden soll. Für diese ist zu beachten, dass hierfür ebenfalls eine Anbindung an das übergeordnete Stromnetz zu gewährleisten ist und adäquate Strommengen gesichert zur Verfügung stehen müssen (Ausnahme: lokale Stromerzeugung über Windkraft und Photovoltaik; für den Technologievergleich aber nicht betrachtet).

7.8.3 Betriebliche Simulation (Open Track)

Da die Bearbeitung der Energieflussberechnung sowie der Betriebssimulation eine komplexe, von vielen Rahmenbedingungen abhängige Aufgabenstellung ist, wurde die Spezialsoftware OpenTrack der OpenTrack Railway Technology Ltd eingesetzt.

OpenTrack basiert auf einem am Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme der ETH Zürich realisierten Forschungsprojekt zum Thema interaktive Betriebssimulation von Schienennetzen.

Während der Simulation fahren die vordefinierten Züge auf der gegebenen Gleistopologie unter den gewünschten Randbedingungen. Die Software erlaubt die Modellierung eines theoretischen Betriebs sowie dynamische Simulationen in Abhängigkeit von Betriebsstörungen (Fahrgastwechsel, Wartezeit an Kreuzungen, unterschiedliche Fahrbeziehungen, usw.). Für den grundsätzlichen Aufbau des OpenTrack-Modells sind Daten zur Infrastruktur des einzubeziehenden Streckennetzes, zu den eingesetzten Fahrzeugen und des vorhandenen/geplanten Betriebs notwendig.

Mit den Daten wurde zunächst das Grundmodell erstellt. Hierzu wurde:

[67] Selbstverständlich sind Anpassungen dabei hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Batterieladung / -entladung zu prüfen.

- zuerst die Infrastruktur detailliert abgebildet,
- daraufhin die zu betrachtenden Fahrzeugtypen (siehe 7.8.1) eingegeben,
- dann die einzelnen Linienfahrten definiert,
- die Haltestellenaufenthaltszeiten eingegeben,
- und schließlich werden die Fahrten zu Umläufen kombiniert.

7.8.4 Excel-Tool

Im Rahmen der Untersuchung wurde ein Excel-Tool entwickelt, das dem Auftraggeber für dortige Verwendung zur Verfügung gestellt wurde. Damit kann, aufbauend auf einer vereinfachten Energieflussberechnung, eine TCO-Berechnung (siehe 7.11) durchgeführt werden. Für erste Überschlagsrechnungen, z.B. einzelne Reaktivierungsstrecken[68], reicht der geringere Detailierungsgrad aus. Durch Vergleichsrechnungen mit der OpenTrack-Software wurde das Werkzeug „geeicht“.

Der Baustein zur fahrdynamischen Energieflussberechnung beruht auf der energetischen Berechnung einer Fahrt auf einer Regionalverkehrslinie.

Berücksichtigt werden

- der Energieverlust oder -gewinn durch Beschleunigung bzw. Verzögern vor und nach einem Halt oder Geschwindigkeitswechsel durch einen Halt,
- der Energieverlust oder -gewinn durch Höhenunterschiede sowie
- pauschaliert der Energieverbrauch der Nebenverbraucher (Heizung, Klimaanlage, Druckluft, etc.).
- die streckenrelevanten Parameter[69] wie
  - Höchstgeschwindigkeit,
  - Elektrifizierung,
  - Höhenmeter und
  - Zughalte
- technische Parameter der Fahrzeuge

Basierend auf diesen Eingabedaten wird die Energiebilanz einer Zugfahrt berechnet.

Das Excel-Tool wurde im Rahmen der SteFanS-Studie für einzelne Strecken angewendet, die keine detaillierten Betrachtungen zur betrieblichen Machbarkeit bzw. eine genauere Fahrzeitenrechnung erforderten (siehe z.B. Teilnetz 6 in 9.6).

7.8.5 Betriebskonzepte und Fahrzeugbedarfe

Der vom Auftraggeber vorgegebene Werktagsfahrplan[70] wurde in OpenTrack hinterlegt und auf grundsätzliche Fahrbarkeit mit den Bemessungsfahrzeugen (siehe 7.8.1) geprüft. Hierbei wurden in einem ersten Schritt Mindest-Wendezeitvorgaben für die Umlaufbildung berücksichtigt.

[68] Für komplexere Fragestellungen, insbesondere betrieblicher Natur, ist das Werkzeug weniger geeignet.
[69] In Abhängigkeit des Streckenkilometers einzugeben; zusätzlich kann für BEMU-Anwendungen die Zeit unter Fahrdraht eingestellt werden.
[70] Zugrunde gelegte Betriebskonzepte entsprechen nicht zwangsläufig dem heutigen Bestandsfahrplan.

Die Anzahl an Zugpaaren ist Takt-abhängig. Bei einem Stundentakt sind an Werktagen 19 Zugpaare und an Wochenendtagen 17 Zugpaare vorgesehen. Bei einem Zweistundentakt verringert sich die Anzahl der Zugpaare an Werktagen auf 9, an Wochenendtagen auf 8. Bei einem Halbstundentakt fahren werktags 38 Zugpaare und an Wochenend-Tagen 34 Zugpaare. Ist ein Viertelstundentakt vorgegeben, dann fahren 60 Zugpaare an Werktagen und 56 Zugpaare am Wochenende.

Für die BEMU-Technologie können zur Gewährleistung ausreichender Ladezeiten ggf. Wendezeitverlängerungen erforderlich sein. Dies wurde im Rahmen der durchgeführten Iterationen geprüft bzw. eingearbeitet, wobei infrastrukturelle Rahmenbedingungen, d.h. die Verfügbarkeit von Abstellgleisen auf strategischem Niveau einbezogen wurden.

Für die HEMU-Technologie ist aktuell Stand der Technik, Tankvorgänge außerhalb der Betriebszeiten, d.h. in der Regel nachts, abzuwickeln (siehe 4.2.2.2), so dass hier kein Einfluss auf die Wendezeiten besteht. Hier ist allerdings zu berücksichtigen, dass der zugrunde gelegte Tankstellenstandort zusätzliche Tankfahrten erfordern kann (analog zur heutigen Problematik im Dieselbetrieb), die sich im Zusammenspiel mit der Tankkapazität des jeweiligen Fahrzeugs und den betrieblich erforderlichen Tageslaufleistungen in zusätzlichem Fahrzeugbedarf ausdrücken kann. Auch dieser Aspekt wurde im Rahmen des Iterationsprozesses berücksichtigt.

Der Fahrzeugbedarf unterscheidet sich je nach eingesetzter Technologie:

- Der für EMU und BEMU ermittelte betriebliche Fahrzeugbedarf ist jeweils identisch, für HEMU wurde für einige Strecken ein erhöhter Fahrzeugbedarf ermittelt (siehe Unterkapitel bei den Teilnetzen in Kapitel 9). Dieser resultiert aus der beschriebenen Problematik, dass die Wasserstoff-Speicherkapazität an Bord limitiert ist („Wasserstofftank“) und unter Ansatz von Tankreserve und Zusatzbedarf für Tankfahrten nicht immer mit den Tagesumläufen harmonisierbar ist; insbesondere nicht auf langen Strecken mit entsprechenden „Zusatz“-wegen zu einer (ggf. zwei) punktuell angeordneten Tankstelle(n).
- In Abstimmung mit dem Auftraggeber wurde als Berechnungsansatz für Betriebs- und Instandhaltungsreserve jeweils 10 % angesetzt (siehe 7.10.1).
- Auf eine Optimierung des Fahrzeugbedarfs durch Ansatz gemeinsamer Reserven in Teilnetzen bzw. mit Nachbarnetzen wurde verzichtet. Dies bedeutet u.a. auch, dass für „Kleinstflotten“ Mindestreserven angesetzt wurden, die o.g. Prozentansätze zwangsläufig überschreiten.

Zu beachten ist, dass Fragestellungen der benötigten Fahrgastkapazität auf SPNV-Linien und damit verbunden die Frage von Einfach- bzw. Mehrfach-Traktionen unbeachtet blieben. Die ermittelten Fahrzeugbedarfe beziehen sich zunächst allein auf Einzelfahrzeuge. Sollten auf einzelnen Linien bzw. in Teilnetzen regelmäßig Mehrfach-Traktionen erforderlich sein, so sind diese zusätzlichen Fahrzeuge bei der Ermittlung des Fahrzeug-Gesamtbedarfs (z.B. im Hinblick auf Fahrzeugausschreibungen) hinzuzurechnen.

Aufgrund der Kostenunterschiede zwischen EMU-, BEMU- und HEMU-Fahrzeugen (siehe 8.1.2) hätte eine Berücksichtigung erhöhter Fahrzeugzahlen aufgrund von Mehrfach-Traktionen ansonsten die Kosten-Spreizung im Technologievergleich verstärkt.

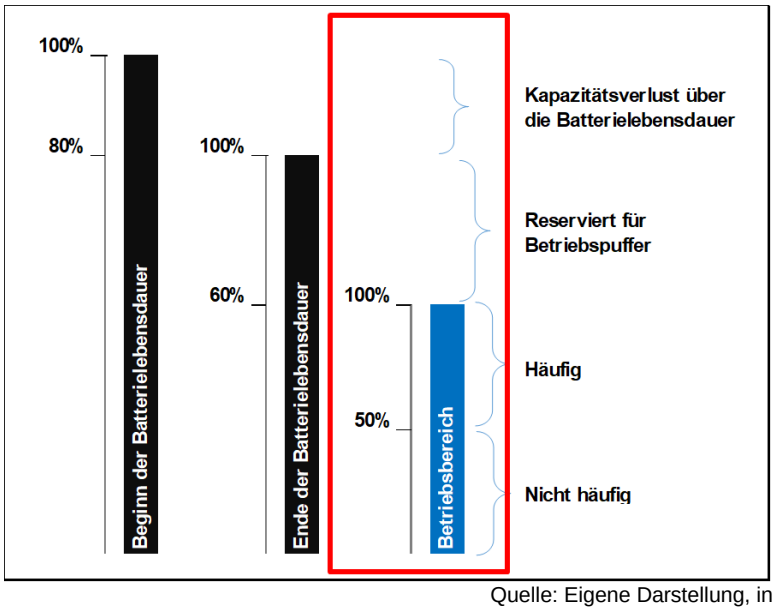
7.8.6 Energieverbrauch / Festlegungen für Simulation

7.8.6.1 Batteriekapazität (BoL/EoL, Sicherheitspuffer)

Im Rahmen der Studie wurde ein Aufsatztool (in Python) entwickelt, das es erlaubt die betrieblichen Darstellungen aus OpenTrack unter Zugrundelegung der jeweiligen Infrastrukturszenarien (insbesondere für BEMU hoch relevant) im Rahmen eines „Postprocessing“ mit Energieflussbetrachtungen zu ergänzen. Das Werkzeug und seine Ergebnisse konnten auch über Vergleichsrechnungen einzelner Fahrzeughersteller mit deren Simulationstools „geeicht“ werden.

Damit lässt sich die spezifische Wirkung einzelner Elektrifizierungsmaßnahmen auf den Batterieladestand transparent abbilden.

Basis der Energie-Betrachtung im BEMU-Fall war zunächst die Kapazität einer neuen Batterie („Begin of Life“, BoL), darauf aufbauend ein EoL-Status („End of Life“, EoL; üblicherweise angesetzt mit 80 %). Im nächsten Schritt folgten Einstellungen zur Limitierung der Batterieentladung (üblicherweise wird ein 60 % Fenster zugrunde gelegt; „Frequent Operation Area“). Siehe Abb. 81 und (Mott MacDonald, 2019).



Quelle: Eigene Darstellung, in Anlehnung an Mott MacDonald, 2019

Abb. 81: Vorgehensweise zur Betrachtung der Batteriekapazität

Die alleinige Betrachtung des ungestörten Normalbetriebs ist für eine Machbarkeitsbetrachtung zu alternativen Antrieben nicht ausreichend. Dies gilt verstärkt für den BEMU-Betrieb, für den sichergestellt werden muss, dass auch bei Störungen im Betriebsablauf eine Lademöglichkeit (elektrifizierter Abschnitt oder Ladestation) erreicht werden kann. Derartige Störungen treten gerade auf eingleisigen Strecken häufiger auf, wenn Fahrzeuge an Kreuzungsbahnhöfen länger auf den Gegenzug warten müssen und sich Verspätungen im Gesamtsystem fortpflanzen und auf weitere Fahrten auswirken.

Da eine Einzelbetrachtung unterschiedlicher Verspätungsszenarien für die Vielzahl an zu betrachtenden Strecken zu aufwändig erschien, wurde stattdessen ein zusätzlicher Sicherheitspuffer verwendet, der in den Energiefluss-Grafiken (siehe Kapitel 9) als 20 %-Linie ausgewiesen ist. Die Nichtverletzung dieser Grenzlinie bedeutet damit eine weitere, theoretische Beschränkung der nutzbaren Batteriekapazität wie nachstehend beispielhaft dargestellt:

Kapazität Batterie neu (BoL):	600 kWh
Kapazität Batterie gealtert (EoL, 80 %):	480 kWh
Kapazität Batterie bei empfohlener Nutzung (60 %):	288 kWh
Kapazität Batterie mit zusätzlichem Sicherheitspuffer (80 %):	230 kWh

Damit stehen rechnerisch ca. 60 kWh für betriebliche Sondersituationen zur Verfügung. Dies entspricht z.B. bei einem angenommenen Verbrauch von 4 kWh/km einer Distanz von 15 km (bei Rekuperation auch deutlich mehr) oder bei 90 kW für Nebenverbraucher während Standzeiten einen Zeitpuffer von 40 min.

Eine Unterschreitung der 20 %-Linie bedeutet damit keine Nicht-Machbarkeit, sondern allein eine Reduzierung des Sicherheits- bzw. Reservepuffers. Im Einzelfall stehen natürlich auch immer Teile des nicht zur regelmäßigen Nutzung empfohlenen Puffers von 40 % zur Verfügung. Je weniger „kritische“ Lade- und Entladevorgänge eine Batterie zu bewältigen hat, desto länger wird ihre Lebensdauer sein.

Diese „Batteriebelastung“ lässt sich über sogenannte „äquivalente Vollzyklen“ abbilden, die dann eine Lebensdauerabschätzung ermöglichen. Diese Methodik wurde vom Gutachter ergänzend für den Vergleich von Infrastrukturszenarien eingesetzt.

7.8.6.2 Wasserstoffverbrauch

Das Energiemanagement bei Brennstoffzellenfahrzeugen, d.h. das Zusammenspiel zwischen Brennstoffzelle und Pufferbatterie, ist sehr komplex (Zuschaltzeiten, Funktionsfenster etc.) und seine exakte Abbildung würde für den Rahmen derartiger Technologievergleiche zu weit führen. Eine vom Gutachter verwendete, vereinfachte Betrachtung führt zu streckenspezifisch unterschiedlichen Wasserstoffverbräuchen in den Größenordnungen, die auch in anderen Studien bzw. in Testbetrieben[71] ermittelt wurden (siehe Abb. 82). Deutlich erkennbar sind größere Unterschiede, die in der Topographie, zum Teil auch in Haltemustern begründet sind.

Referenzstrecke	Vergleichsdaten				
	Streckenlänge pro Runde	Anzahl der Stationen	Verbrauchswerte		Energiebedarf Brennstoffzellen gegenüber Dieselantrieb
			Diesel	Wasserstoff	
	km	-	l/km (kWh/km)	kg/km (kWh/km)	
Buxtehude – Bremerhaven – **Bremervörde** – Cuxhaven – Buxtehude	240	44	1,08 (10,8)	0,23 (7,7)	-29%
Frankfurt – **Königstein** – Frankfurt	50,2	18	1,82 (18,2)	0,34 (11,3)	-38%

Simulationsergebnisse zu Verbrauchsdaten der BZ-Züge auf den Referenzstrecken

Quelle: NOW GmbH

Abb. 82: Simulationsergebnisse zu Diesel- und Wasserstoffverbrauch

7.8.6.3 Hilfsenergieverbrauch

Ein weiterer, sehr wichtiger Parameter für die energetische Bewertung sind Annahmen zum Verbrauch an Traktions- und Hilfsenergie (absolut und relativ zueinander). Hier spielt die Tatsache, dass der Hilfsenergieverbrauch auch während Haltezeiten, ggf.

[71] z.B. iLint-Testbetrieb in Baden-Württemberg.

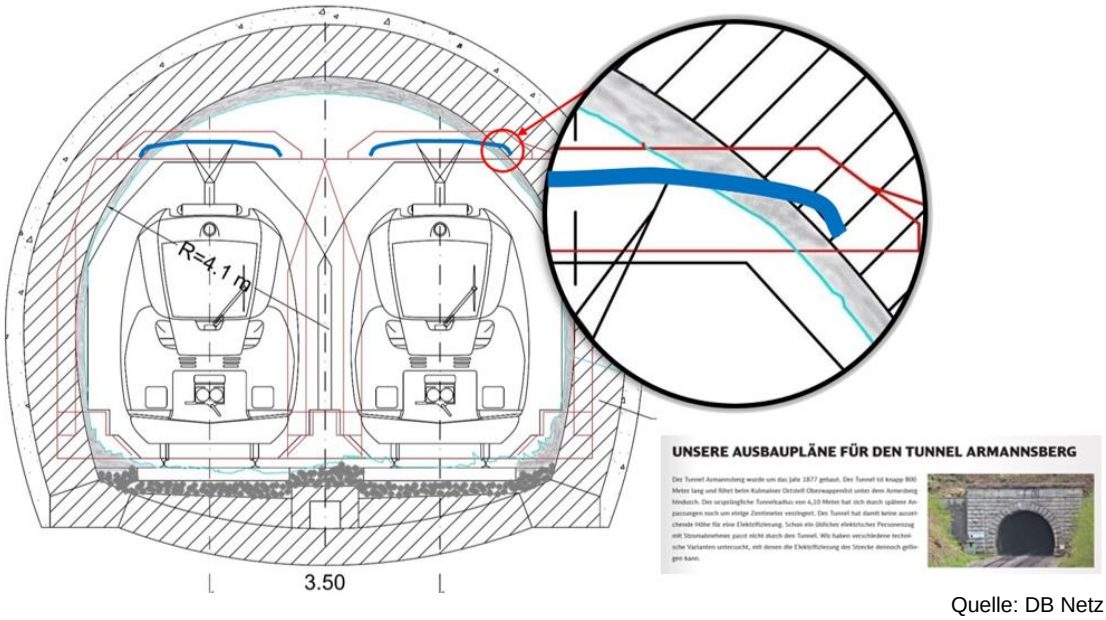
auch während der Wendezeiten besteht und im Winter erheblich ansteigen kann, eine große Rolle[72].

Wie bereits dargestellt wurden für Machbarkeitsbetrachtungen die Nebenverbraucher mit einem hohen Ansatz von 90 kW betrachtet, für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung dann mit 50 kW (siehe auch Kapitel 7.1).

7.9 Methodik für Infrastrukturbetrachtungen

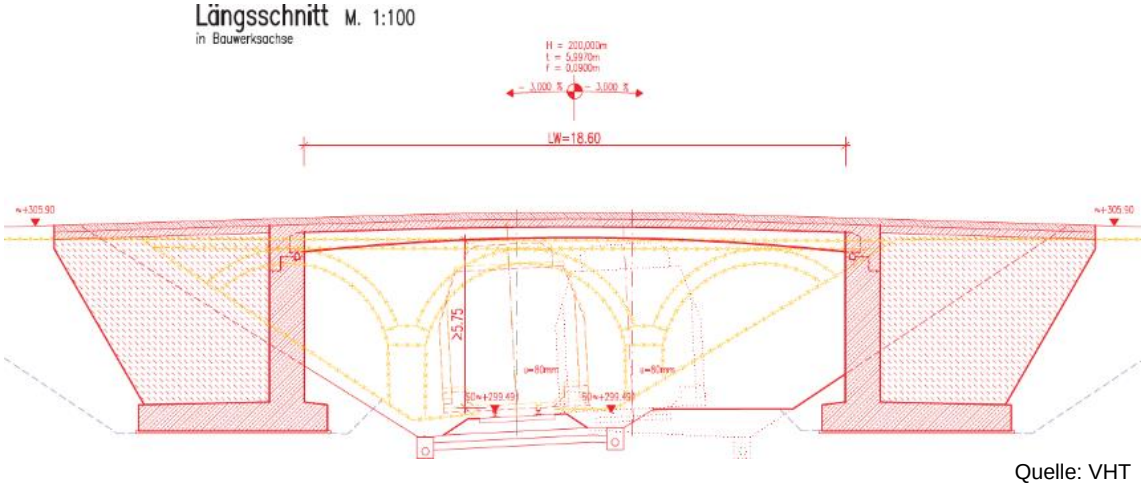
7.9.1 Elektrifizierung und Elektrifizierungskomplexität

Die Betrachtung einer Vielzahl von Elektrifizierungsmaßnahmen in Deutschland zeigt sehr deutlich, dass die Gesamtkosten regelmäßig stark von den erforderlichen Begleitmaßnahmen wie z.B. Tunnelanpassungen (im Extremfall Neubau!) oder Anpassungen an querenden Straßenbrücken beeinflusst werden (siehe Abb. 83- Abb. 85).



Quelle: DB Netz

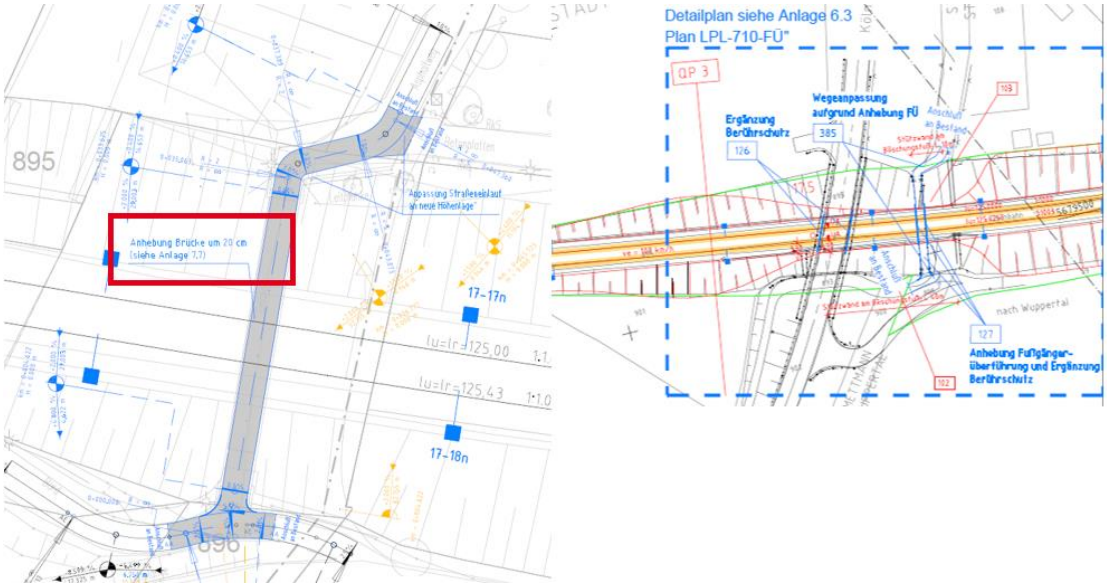
Abb. 83: Beispiel eines für eine Elektrifizierung ungeeigneten Bestandstunnels



Quelle: VHT

Abb. 84: Beispiel einer für eine Elektrifizierung ungeeigneten Bestands-Straßenbrücke

[72] Dies war u.a. eine wertvolle Erkenntnis aus dem iLint-Testbetrieb in Baden-Württemberg.

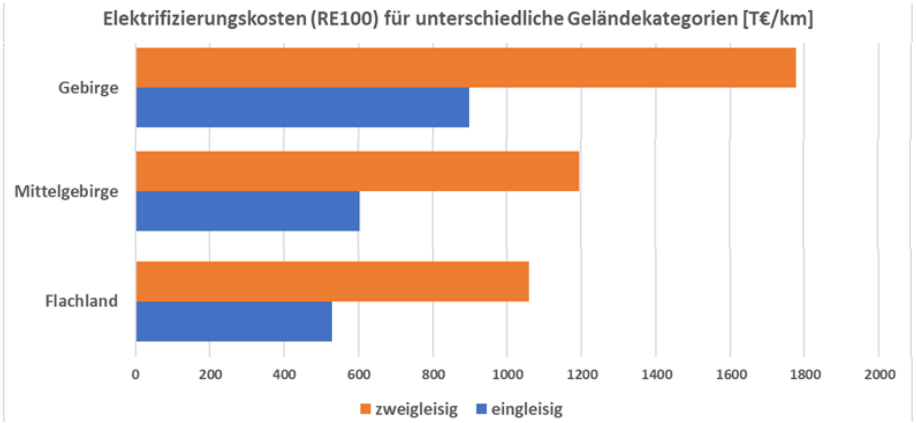


Quelle: Regiobahn

Abb. 85: Beispiel für Anhebung einer Brücke im Zuge einer Elektrifizierung

Auch größere Eisenbahnüberführungen können je nach Alter und Bauart ein Problem darstellen. Die reinen Kosten für Fahrleitungsmasten und Fahrleitung sind demgegenüber dann oft vergleichsweise gering.

Weitere Quellen liefern für einfache Elektrifizierungsmaßnahmen Kosten von ca. 0,65-1,0 Mio. €/km, wobei ein Topografiefaktor zu berücksichtigen ist (siehe Abb. 86).



Quelle: Eigene Darstellung, in Anlehnung an BMVI-Studie, 2021

Abb. 86: Spezifische Kosten von Oberleitungsanlagen (ein-/zweigleisig, Topografie)

Die für das BMVI tätig gewesenen Gutachter (TU Dresden, TU Berlin, PTV Group, 2021) weisen weiter daraufhin, dass „86 % der nicht elektrifizierten Strecken eingleisig verlaufen“, womit sich der „kilometerspezifische Mittelwert zu rund 750.000 € pro Kilometer ergibt“. Und weiter „Darin enthalten sind bereits die Kosten für die Elektrifizierung von Bahnhöfen und Haltepunkten ebenso wie die kostenintensive Elektrifizierung von Weichen.“

DB Netz spricht von einer Kostenbandbreite von 1,4 - 3,6 Mio. € im bundesdeutschen Durchschnitt, was aber Vorhaben mit umfangreichem Anpassungsbedarf anderer Infrastruktur einschließt. Extremfälle wie z.B. die geplante Elektrifizierung der Bahnstrecke Albstadt-Sigmaringen, wo aktuell für 27 km Streckenlänge 160 Mio. € Elektrifizierungs-

kosten genannt werden (5,9 Mio. €/km), sind selbstverständlich nicht überall zu erwarten. Der Grund für diese exorbitanten Kosten ist insbesondere im Ersatz zweier Bestandstunnel von 125 m und 326 m Länge zu sehen, hinzukommen eine Vielzahl kleinerer Eisenbahnüberführungen und eine ganze Reihe von Straßenüberführungen.

Sehr deutlich wird damit aber die Notwendigkeit, im Sinne eines fairen Technologievergleichs, zu einer Einschätzung zur Komplexität von Elektrifizierungsmaßnahmen zu gelangen, damit die EMU-Technologie nicht durchgängig zu günstig angesetzt wird.

Eine Detailuntersuchung für alle Untersuchungsstrecken (mit über 500 km Gesamtlänge!) war für eine strategische Betrachtung, wie sie die SteFanS-Studie darstellt, auszuschließen[73]. Der Gutachter hat daher nachstehend beschriebene, alternative Vorgehensweise gewählt.

- Alle betrachteten Strecken wurden hinsichtlich Anzahl und Länge vorhandener Tunnelbauwerke, größerer EÜs (>500 m²) und der Anzahl von Straßenüberführungen geprüft (siehe Diskussion in den jeweiligen Teilnetzen, Kapitel 9).
- Die Vorgehensweise lässt selbstverständlich keine Beurteilung zu, ob ein Bestandstunnel ohne Anpassung elektrifiziert werden kann und wie viele Straßenbrücken angepasst werden müssen. Es erfolgt damit eine Einschätzung zur potenziellen Zahl kritischer Bauwerke aber nicht zur tatsächlichen Zahl bzw. dem Umfang erforderlicher Maßnahmen.
- Ergänzend erfolgte eine grobe Einschätzung zur Bewaldungssituation im Hinblick auf mögliche Sturmschaden-Problematiken[74].
- Die Ergebnisse lassen die Einordnung in drei Kategorien zu:
    - Normale Komplexität: Wenige Teilstrecken betroffen
    - Erhöhte Komplexität: Teilstrecken betroffen
    - Hohe Komplexität: Gesamtstrecke betroffen

Daher werden für die Wirtschaftlichkeitsberechnung folgende Komplexitäts-Zuschläge abgeleitet (für betroffene Streckenabschnitte):

- Normal: Standard-Elektrifizierungskosten von 1,0 Mio. €/km (siehe 8.1.1.1)
- Erhöht: Zuschlag von 50 %, d.h. 1,5 Mio. €/km
- Hoch: Zuschlag von 100 %, d.h. 2,0 Mio. €/km

Die jeweiligen Einschätzungen sind unter dem Kapitel Infrastrukturbedarf der einzelnen Strecken wiedergegeben.

7.9.2 Unterschiede in der Betrachtung EMU, BEMU und HEMU

EMU-Betrachtung:
Wie zum Thema Elektrifizierungskomplexität (siehe 7.9.1) dargestellt, beeinflussen die Rahmenbedingungen der Gesamtstrecke die Machbarkeit und die Kosten ggf. in erheblichem Maße, ein „Ausweichen“ bzw. „Vermeiden“ ist nicht möglich. Eine Vereinfachung ergibt sich durch den Lückenschlusscharakter; durch die Anbindung an existierende Elektrifizierungsabschnitte kann auf ergänzende Anbindungen an das Bahnstrom- oder

[73] Eine solche Betrachtung war auch nicht Gegenstand der Leistungsbeschreibung.
[74] Eine Zunahme von Sturmereignissen aufgrund der Klimaveränderung ist tendenziell absehbar und eine Einbeziehung der Empfindlichkeit für Schadensereignisse aus Gutachtersicht berechtigt. Die Sicherung von Bahnkorridoren ist insbesondere bei engen Tallagen nur eingeschränkt möglich bzw. würde bei Eingriffen in den Baumbestand Einwendungen seitens des Natur- und Landschaftsschutzes hervorrufen.

EVU-Netz in den allermeisten Fällen verzichtet werden (Unterwerke, Umrichterwerke, Bahnstromleitungen o.ä.).

Ausnahmen treten dann auf, wenn bereits Überlastungen im elektrifizierten Netz erkennbar sind – dies ist nach Aussage DB Energie in Baden-Württemberg nicht der Fall.

Für den Betrieb mit alternativen Antrieben stellen sich die Zusammenhänge anders dar:

BEMU-Betrachtung:

- Im BEMU-Fall sind grundsätzlich zwei Herangehensweisen möglich – entweder ergänzende Elektrifizierungen in direkter Verlängerung bestehender Oberleitungsabschnitte oder punktuelle Oberleitungsinseln.
- Die direkte Verlängerung hat den Vorteil, wie im EMU-Fall auf zusätzliche Netzanbindungsmaßnahmen verzichten zu können, gleichzeitig besteht aber keine Ausweichmöglichkeit im Falle komplexer Rahmenbedingungen (z.B. Tunnel).
- Oberleitungsinseln gewähren zwar eine gewisse Flexibilität in ihrer Positionierung („Ausweichen“ möglich, wobei ladetechnisch erforderliche Mindestlängen ggf. einschränken), benötigen aber regelmäßig zusätzliche Netzanbindungsmaßnahmen.
- Punktuelle Ladestationen bieten eine Alternative (auch kostenmäßig), ihre Anwendung erscheint allerdings eher für Endhalte mit längeren Standzeiten geeignet.

HEMU-Betrachtung:

- Wasserstofftankstellen bieten zwar den großen Vorteil punktueller Maßnahmen, erfordern allerdings ebenfalls eine Energieversorgung aus dem EVU-Netz (in größerem Maße, wenn kombiniert mit lokaler H2-Herstellung (Elektrolyseur)) und regelmäßig den Bau ergänzender Tankgleise, um die Trennung der Wasserstoffinfrastruktur vom sonstigen Schienenverkehr sicherzustellen.

7.10 Methodik für die Ermittlung des Fahrzeugbedarfs

7.10.1 Betriebs- und Instandhaltungsreserve

In Abstimmung mit dem Auftraggeber wurde als Berechnungsansatz für Betriebs- und Instandhaltungsreserve jeweils 10 % angesetzt. Auf eine Optimierung des Fahrzeugbedarfs durch Ansatz gemeinsamer Reserven in Teilnetzen bzw. mit Nachbarnetzen wurde verzichtet. Damit wurden für „Kleinstflotten“ Mindestreserven angesetzt, die o.g. Prozentansätze zwangsläufig überschreiten.

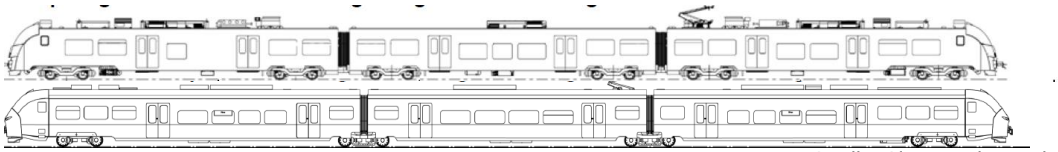
7.10.2 Unterschiede in der Betrachtung EMU, BEMU, HEMU

Der für EMU und BEMU ermittelte betriebliche Fahrzeugbedarf ist jeweils identisch, für HEMU wurde ein erhöhter Fahrzeugbedarf angesetzt. Dieser resultiert aus der Problematik, dass die Wasserstoff-Speicherkapazität an Bord limitiert ist („Wasserstofftank“) und unter Ansatz von Tankreserve und Zusatzbedarf für Tankfahrten nicht mit den Tagesumläufen harmonisierbar ist; insbesondere nicht auf langen Strecken mit entsprechenden „Zusatz“-wegen zu einer (zwei) punktuell angeordneten Tankstelle(n).

7.10.3 Achslastbetrachtung und Passagierkapazität

Ein identisches Fahrzeug-Gesamtgewicht resultiert über eine unterschiedliche Fahrzeugkonfiguration (h.i. Anzahl Achsen/Drehgestelle) in unterschiedlichen Achslasten.

Dies wird z.B. im Vergleich der Siemens-Fahrzeugplattformen Desiro und Mireo deutlich (siehe Abb. 87).



Quelle: Siemens (Kammler-Küter)

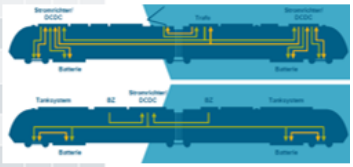
Abb. 87: Vergleich Desiro <> Mireo (ohne <> mit Jacobs-Drehgestellen)

Die Reduzierung der Drehgestellanzahl (6 > 4) resultiert zwar durchaus in einer Gewichtsersparnis, diese kompensiert das Mehrgewicht pro Achse aber nicht. Der Trend in der Fahrzeugindustrie für Regionalverkehrs-Triebzüge geht aufgrund der Kosteneinsparungen, die sich damit realisieren lassen, eindeutig Richtung Jacobs-Drehgestellen[75].

Fahrzeuge mit alternativen Antrieben, d.h. BEMU und HEMU, sind aufgrund der mitzuführenden Zusatzkomponenten (siehe 4.1.2) schwerer als reine EMU-Fahrzeuge, d.h. die Achslast-Problematik wird hier tendenziell zusätzlich verstärkt.

Das Thema spiegelt sich in einschlägigen Siemens-Veröffentlichungen aus frühen Entwicklungsphasen aktueller Fahrzeugplattformen wider (siehe Abb. 88). Im Regelfall wird mindestens Streckenklasse C (<20 t) benötigt, während Streckenklasse B (<18t) nur mit einer geringeren Batteriekapazität und geringerer Reichweite nutzbar ist[76].

Konfiguration	Performance	Strecken klasse	Max. V	Batt. Kapazität						H2 Kapazität							
				1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	7	8
2-car 120 Sitze	Standard	C (<20 t)	160	80 km													
	Range	C (<20 t)	140	90 km													
	Lightweight	B <(18 t)	140	40 km													
3 car 165 Sitze	Standard	C (<20 t)	160			100 km											
	Range	C (<20 t)	140				110 km										
	Lightweight	B (<18 t)	140		60 km												
2-car 120 Sitze	Standard	C (<20 t)	160							500 km							
3 car 165 Sitze	Standard	C (<20 t)	160							800 km							



Quelle: Siemens, adaptiert

Abb. 88: Fahrzeugkonfigurationen und Streckenklassen bzw. Reichweiten

Die nicht elektrifizierten Untersuchungsstrecken in Baden-Württemberg sind in dieser Hinsicht unkritisch (Kategorien C und D), anders stellt sich das z.B. in Bayern dar.

Das Mehrgewicht von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben führt zu einer weiteren Betrachtung. Davon ausgehend, dass EMU-Fahrzeuge mit einer maximalen Fahrgastkapazität keine wesentlichen Achslastreserven mehr aufweisen, müssten darauf aufsetzende BEMU/HEMU-Fahrzeuge das Mehrgewicht prinzipiell zumindest teilweise über eine Reduzierung der Fahrgastkapazität kompensieren[77].

---

[75] Abweichend von dieser generellen Tendenz ist aktuell erkennbar, dass die Fahrzeughersteller z.B. für längere BEMU-Fahrzeuge (ca. 55m) eine Dreiteiligkeit mit zwei Jacobs-Drehgestellen vermeiden und stattdessen auf zweiteilige Fahrzeuge mit längeren Modulen und normalen Drehgestellen abzielen (siehe Kapitel 5.2).

[76] Hierbei handelt es sich um Überlegungen aus dem Jahr 2018; „Lightweight"-Konzepte o.ä. finden sich in aktuellen Beschreibungen nicht mehr.

[77] Ein Mehrgewicht von 9t entspräche theoretisch 120 Fahrgästen (!).

Aufgrund sehr großer Konfigurationsunterschiede innerhalb der EMU-Fahrzeugplattformen bedingt durch die Schwerpunktsetzung unterschiedlicher Aufgabenträger (Sitzplatzfokus vs Mehrzweckflächen, mehr/weniger Türen …) ist eine nachvollziehbare Berechnung, die einen Kapazitätsunterschied zwischen EMU- und HEMU/BEMU-Fahrzeugen ausweist, nicht möglich. Auf eine Berücksichtigung des Aspekts im Rahmen des Technologievergleichs wurde daher verzichtet.

Tendenziell ist die Aussage, dass EMU-Fahrzeuge bei identischen Achslasten eine größere Fahrgastkapazität ermöglichen, aber berechtigt.

7.11 Methodik für Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

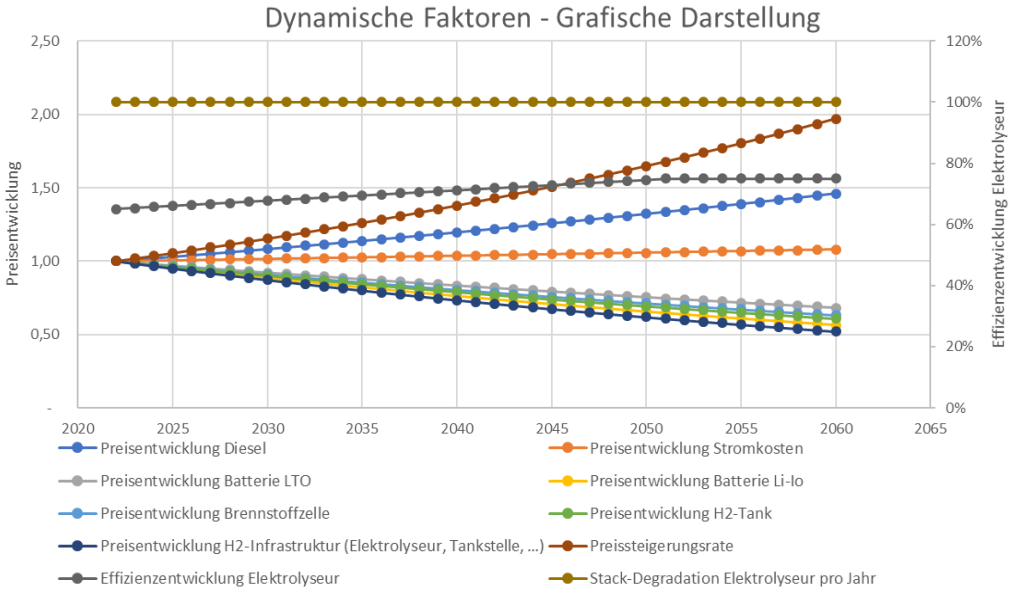
7.11.1 Grundsätzliches

Für eine Wirtschaftlichkeitsberechnung stehen mehrere Verfahren zur Verfügung:

- TCO
- LCC
- Kapitalwertmethode

„Total Cost of Ownership“, abgekürzt TCO, ist eine ganzheitliche Kostenbetrachtung, die nicht nur die Anschaffungskosten, sondern auch laufende direkte und indirekte Kosten über den kompletten Lebenszyklus hinweg berücksichtigt. Das bedeutet, dass neben den Anschaffungskosten, auch die Personal-, Wartungs- und Energiekosten sowie allfällige Ersatzinvestitionen von Komponenten (oft auch in den Wartungskosten enthalten) über den Lebenszyklus betrachtet werden.

Um eine möglichst realitätsnahe Berechnung der Kosten über den Lebenszyklus abzubilden, werden die Kosten dynamisiert (zur aktuellen Entwicklung der Energiekosten siehe 8.4). Bei Preisentwicklung von Personal und Energie z.B. werden entsprechende jährliche Zunahmen der Kosten hinterlegt; bei neuen Technologien werden auch abnehmende jährliche Kosten hinterlegt (Verbilligung aufgrund des technologischen Fortschritts, siehe Abb. 89).



Quelle: komobile

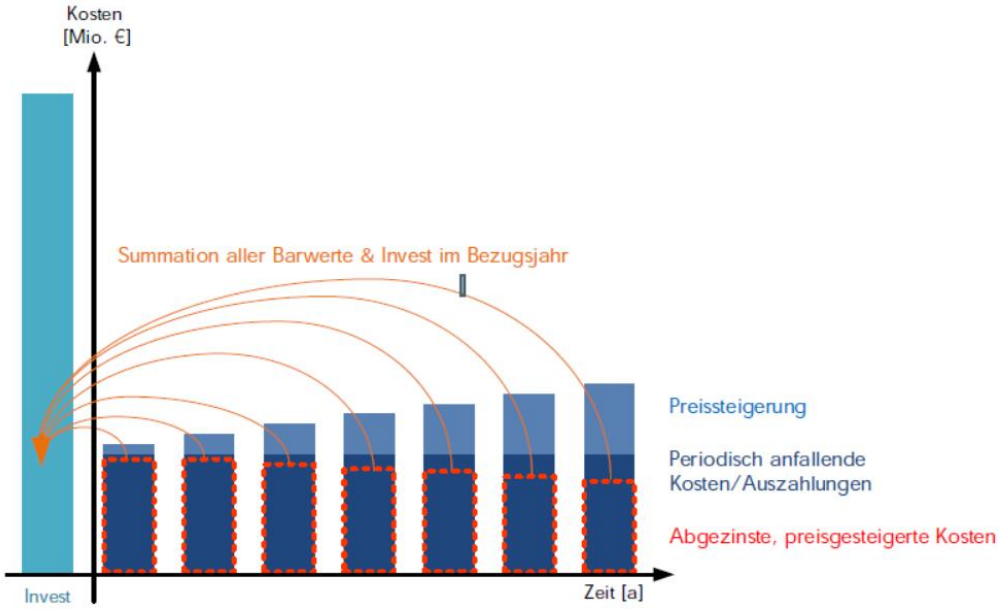
Abb. 89: Dynamische Betrachtung Energie / Komponenten (Beispiel)

Life-Cycle-Costing (LCC) bzw. Lebenszykluskostenrechnung ist eine weitere ganzheitliche Kostenberechnung, in der die Entwicklung eines Produktes von der Produktidee bis zur Rücknahme vom Markt betrachtet wird.

In der LCC werden nicht nur die Anschaffungskosten, sondern auch die Kosten der Nutzung (z. B. Betriebspersonalkosten, Instandhaltungskosten, Energie- und Verbrauchskosten, …) und der Entsorgung eines Produktes betrachtet. Unter bestimmten, zu in den Richtlinien festgelegten Bedingungen, können auch die Kosten für externe Effekte (wie Treibhausgasemissionen) einbezogen werden.[78] Im Gegensatz zur Kapitalwertmethode werden die anfallenden Zahlungen nicht auf den Anschaffungszeitpunkt abgezinst (Barwert), sondern die tatsächlichen Zahlungen mit ihren nominellen Werten verglichen.

Die Kapitalwertmethode berücksichtigt nicht nur die Lebenszykluskosten, sondern auch deren zeitliches Auftreten und liefert durch die Diskontierung die Auswirkungen auf den Barwert der Investition als Entscheidungsmaßstab.

Der Kapitalwert ergibt sich aus der Summe der auf die Gegenwart („Bezugsjahr“) abgezinsten zukünftigen Zahlungsflüsse einer Investition. Durch die Abzinsung von zukünftigen Geldflüssen auf die Gegenwart, wird der Zeitwert des Geldes berücksichtigt und verschiedene Maßnahmen/Investitionen vergleichbar gemacht werden. Der Festlegung des Diskontsatzes kommt dabei maßgebliche Bedeutung zu, da bei höheren Diskontsätzen spätere Zahlungsflüsse deutlich weniger gewichtet werden.



Quelle: VVO / TU Dresden

Abb. 90: Vorgehensweise bei einer Kapitalwertmethode

Für die gegenständliche Arbeit wurde die TCO-Methode für die Wirtschaftlichkeitsberechnung ausgewählt.

[78] Siehe: Europäische Kommission, Directive 2014/24/EU und Directive 2014/25/EU

7.11.2 Betrachtungszeitraum

Der Betrachtungszeitraum wird auf 30 Jahre festgelegt; dieser entspricht der Lebensdauer von Schienenfahrzeugen. Als Bezugsjahr für die Kosten wird 2021/2022 festgelegt. Für Kosten nach 2022 werden Dynamisierungsfaktoren für die Entwicklung der Preise von Energie, Batterie, Infrastruktur, Brennstoffzelle, … hinterlegt (siehe 8.4 bzw. Tabelle 6).

7.11.3 Restwertbetrachtung für Elektrifizierungsmaßnahmen

Wie dargestellt (siehe 7.11.2) wurde für die Untersuchung ein Betrachtungszeitraum von 30 Jahren gewählt. Dieser orientiert sich an der regelmäßig verwendeten Fahrzeuglebensdauer im SPNV-Bereich. Nicht alle Investitionen im Rahmen einer SPNV-Maßnahme weisen jedoch eine identische Lebensdauer auf, diese kann deutlich höher liegen (z.B. Oberleitungsanlagen, siehe auch 8.1.1.1). Der Gutachter hat daher für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung nach TCO ergänzend für langlebigere Investitionen eine Restwertermittlung und -gegenrechnung ermöglicht (siehe 7.11.4, „Spezial 1“). Dies betrifft neben den erwähnten Oberleitungsanlagen auch Fahrzeugkomponenten, die noch innerhalb des Betrachtungszeitraums getauscht werden müssen (z.B. Batterien), dann aber über diesen hinaus noch genutzt werden könnten.

7.11.4 TCO-Vorgehensweise

Für die wirtschaftliche Bewertung der Technologien wurde vom Gutachter im ersten Schritt eine klassische TCO-Betrachtung („Total Cost of Ownership“) vorgenommen.

Diese betrachtete gemäß Festlegung einen 30-Jahres-Zeitraum, d.h. sie entspricht dem üblichen Ansatz für Fahrzeuglebensdauern. Hierbei gehen die jeweiligen Erstinvestitionen in Infrastruktur und Fahrzeuge, Ersatzinvestitionen in Abhängigkeit von der Lebensdauer (z.B. Batterien) sowie die jeweiligen Energie- und Unterhaltungskosten in die Betrachtung ein. Außerdem wird auch die Kostendynamisierung über die Zeit (zu erwartende Kostensteigerungen bzw. -senkungen, z.B. fallende Batteriepreise) mit berücksichtigt.

In einem zweiten Schritt werden Verfeinerungen vorgenommen, die z.B. auch Förderungsaspekte (siehe 7.2) beinhalten. Die gegenüber Fahrzeugen längeren Lebensdauern von Oberleitungsinfrastruktur, gerade auch im Nebenstreckenbetrieb, wurden über eine Restwertbetrachtung abgebildet (siehe 7.11.3).

Die TCO-Betrachtung erfolgt für alle betrachteten TCO-Blöcke in einer weitgehend identischen Systematik:

- „Standard“ = klassische TCO (30 J.) ohne Restwertbetrachtung (>30 J.),
- „Spezial 1“ = erweiterte TCO (30 J.) mit Restwertbetrachtung (> 30 J.),
- „Spezial 2“ = erweiterte TCO (75 J.) mit/ohne Restwertbetrachtung (> 75 J.)
- „Spezial 3“ = erweiterte TCO (30 J.) mit Restwert- und Förderungsbetrachtung
- „Spezial 4“ = Sensitivbetrachtungen, z.B. zur Wirkung der Batterietechnologie (LTO vs NMC), zum Fahrzeugbedarf HEMU oder zu Auswirkungen bezüglich spezifischer Betriebskonstellationen

Von den dargestellten Betrachtungsstufen wurden „Spezial 2“ und „Spezial 4“ nur exemplarisch durchgespielt[79], eine entsprechende Betrachtung für alle TCO-Blöcke erschien nicht zielführend.

Der große Schwachpunkt einer 75-Jahres-Betrachtung („Spezial 2“) liegt darin, dass eine Vielzahl von Kostenannahmen in ihrer Dynamik bereits für den klassischen 30-Jahres-Zeitraum Ungenauigkeiten bergen, diese Problematik gewinnt erheblich an Brisanz für eine zweite bzw. dritte Fahrzeugbeschaffungsperiode bzw. für Energiekostenbetrachtungen.

Die TCO-Empfehlung des Gutachters basiert daher zunächst auf den Ergebnissen der Betrachtungsstufen „Standard“ und „Spezial 1“.

Die Betrachtungsstufe „Spezial 3“ ist volkswirtschaftlich zumindest nicht ohne Brisanz und auch mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. So kann nicht automatisch angenommen werden, dass eine Infrastrukturförderung auch langfristig bei 90 % liegen wird bzw. in welcher Höhe ggf. Fahrzeugförderungen für alternative Antriebe als kontinuierliche Förderung zur Verfügung stehen werden. Diese Betrachtungsstufe wird vom Gutachter daher nicht bzw. nur qualitativ in die Empfehlungsargumentation einbezogen.

Die „pure“ TCO-Empfehlung wird in einem letzten Schritt unter Betrachtung qualitativer und strategischer Gesichtspunkte (Komplexität einer Elektrifizierung, Lückenschlusscharakter, Güterverkehrsbedeutung, Zeitschiene etc.) überprüft und ggf. angepasst (siehe Kapitel 11).

Unter Einbeziehung dieser Zusatzaspekte erfolgt eine Gesamtempfehlung, die je nach TCO-Gruppe auch zu abweichenden Empfehlungen führen kann.

[79] Für „Spezial 2“ nur in TCO 1 „Nagoldtalbahn“, für „Spezial 4“ in TCO 1 und TCO 4, siehe dort

8 Kostenparameter und Festlegungen für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

8.1 Investitionskosten

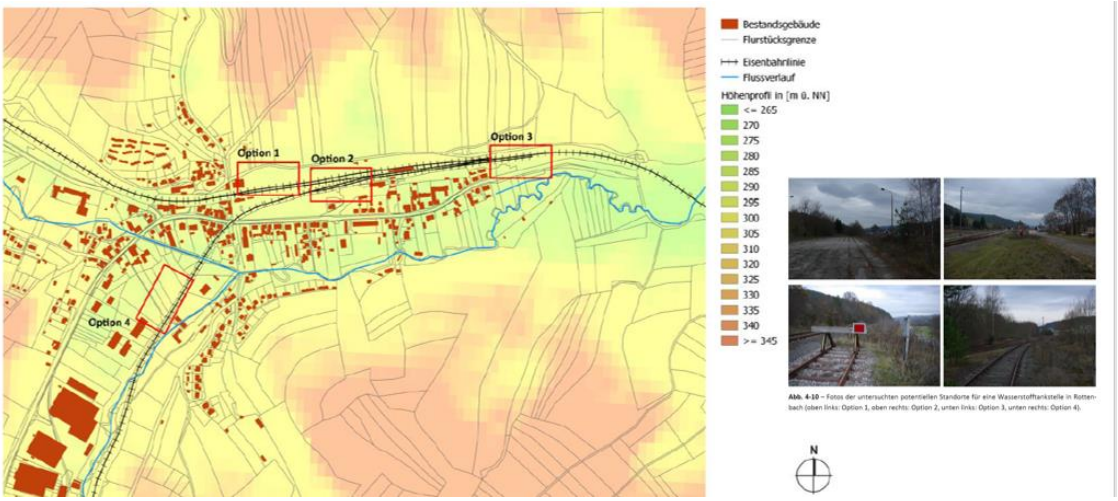
Die Investitionskosten setzen sich zusammen aus den Kosten für die Infrastruktur im technologiebedingten Betriebszusammenhang, sowie Kosten für die Anschaffung der Fahrzeuge.

8.1.1 Infrastruktur für den Bahnbetrieb

Bereits erste Testrechnungen im Rahmen der Studie zeigten, dass eine fundierte Technologiebewertung, insbesondere aus wirtschaftlicher Sicht, nicht erfordert, alle betrachteten Technologien technisch „bis zum letzten Detail“ parallel zu bearbeiten, insbesondere nicht bezüglich der Infrastrukturdetails. Deutliche, die Ergebnisse stark beeinflussende, Unterschiede liegen bei einer 30-Jahresbetrachtung stärker / insbesondere im Bereich des Energieverbrauchs und der Energiekosten sowie in den Betriebs- und Unterhaltungskosten.

Eine detaillierte Betrachtung von Infrastrukturlösungen für Technologien, die dann im Weiteren nicht empfohlen werden, würde bedeuten, hier Planungsmittel zu investieren, die sinnvoller anderweitig verwendet werden sollten.

Beispiel: Eine detaillierte Betrachtung zur Ausgestaltung einer Wasserstofftankstelle, ihre exakte Positionierung nach einer Standortevaluierung (siehe Abb. 91), eine Detaillierung der Anpassungen an der Gleisinfrastruktur etc. macht nur dann wirklich Sinn, wenn die Wasserstofftechnologie abschließend präferiert wird. Kostenungenauigkeiten auf der Investitionsseite in einer Bandbreite von < 5 Mio. € wirken letztlich nicht entscheidend.



Quelle: H2BZ Pilotprojekt Thüringen / Bauhaus Universität Weimar

Abb. 91: Standortsuche Wasserstofftankstelle Rottenbach / Thüringen

Sinnvoller erscheint, wenn nötig, in dieser Phase mit zielgerichteten Sensitivitätsanalysen, ggf. auch Sensitivitätsszenarien, die Wirkungen von Parameterveränderungen für die betrachteten Technologien zu beleuchten.

Die nachstehend beschriebene Vorgehensweise des Gutachters basiert auf dieser Untersuchungsphilosophie („so viel Tiefe wie notwendig, um eine fundierte Technologieempfehlung zu liefern“).

8.1.1.1 Elektrifizierungskosten

Für Elektrifizierungsmaßnahmen werden folgende Kosten angesetzt:

In der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung verwendete Werte	Kosten	Lebensdauer
Oberleitung, davon	1,0 Mio. €/km	
Oberleitungsinstallationen	0,9 Mio. €/km	75 Jahre
Fahrdraht	0,1 Mio. €/km	38 Jahre

Die Lebensdauer der Oberleitung wird mit 75 Jahren angenommen, die Lebensdauer des Fahrdrahts wird mit 38 Jahren angenommen.[80] Der Ansatz längerer Lebensdauern erscheint auch aufgrund der Charakteristika der betrachteten Strecken gerechtfertigt.[81]

Die Betrachtung einer Vielzahl von Elektrifizierungsmaßnahmen in Deutschland zeigt sehr deutlich, dass die Gesamtkosten derartiger Projekte regelmäßig stark von den erforderlichen Begleitmaßnahmen wie z.B. Tunnelanpassungen (im Extremfall Neubau!) oder Anpassungen an querenden Straßenbrücken beeinflusst werden (siehe 7.9.1).

Angesichts von über 500 Streckenkilometern, die sich in der Summe der Untersuchungsstrecken in Baden-Württemberg ergeben, konnte, wie dargestellt, keine vertiefte Beurteilung und Abschätzung der Elektrifizierungskomplexität erfolgen.

Die vereinfachte Methodik (siehe ebenfalls 7.9.1) resultierte in folgenden Zuschlägen:

- Normale Komplexität: Standard-Elektrifizierungskosten von 1,0 Mio. €/km
- Erhöhte Komplexität: Zuschlag von 50 %, d.h. 1,5 Mio. €/km
- Hohe Komplexität: Zuschlag von 100 %, d.h. 2,0 Mio. €/km

Die Zuschläge werden dabei nur für die Streckenabschnitte angewendet, für die eine Erschwernis erkannt wurde.

In die Betrachtung wurde qualitativ auch die Bewaldungssituation als Indiz für die potenzielle Häufigkeit von Sturmschäden einbezogen. Hier weist der Gutachter darauf hin, dass aufgrund der klimatischen Veränderungen sowohl Häufigkeit als auch Schwere von Unwetterereignissen (u.a. Stürmen) weiter anwachsen werden und damit für kritische Streckenbereiche die Gefahr von Oberleitungsschäden anwachsen wird. Dies hat zum Beispiel im Bereich der Regiobahn Kaarst-Mettmann im politischen Raum Fragen aufgeworfen, ob eine bereits planfestgestellte Elektrifizierungsmaßnahme auch so realisiert werden soll oder stattdessen ein Umstieg auf BEMU-Technologie sinnvoll sein könnte. Der Gutachter empfiehlt, diesen Aspekt in der Gesamteinschätzung in die Beurteilung einzubeziehen.

Für Bauen unter Betrieb wird seitens des Gutachters für alle Elektrifizierungsmaßnahmen (EMU) ein Zuschlag von 30 % der Elektrifizierungskosten angesetzt (SMA, ENOTRAC, 2009). Bei punktuellen Eingriffen wie z.B. Ladestationen wurde auf diesen Zuschlag verzichtet.

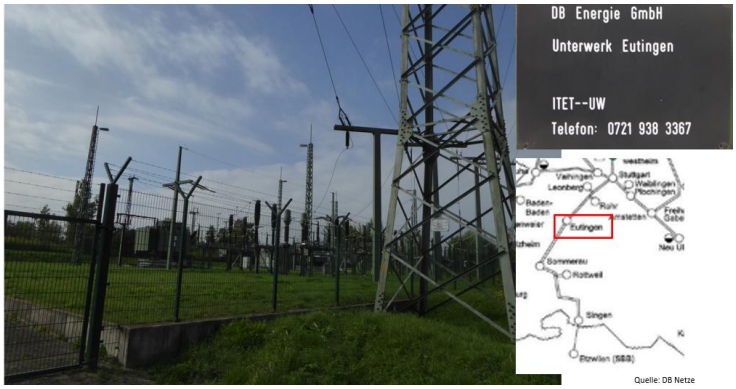
[80] TU Dresden 2020 und Auskunft DB Netz

[81] Für Strecken des Hochgeschwindigkeitsnetzes bzw. mit sehr hoher Zugbelastung sind kürzere Lebensdauern zu erkennen, nicht aber für Nebenstrecken mit relativ geringem Verkehr.

8.1.1.2 Umrichter und Unterwerk ab Bahnstromleitung (EMU, BEMU)

Quelle: DB Energie

Abb. 92: Umrichterwerk Niederbiegen auf der Südbahn



Quelle: Axel Kühn (Foto) / DB Netz (Karte)

Abb. 93: Unterwerk Eutingen

Für die Kosten der Umrichter und Unterwerke werden folgende Kosten angesetzt:

In der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung verwendete Werte	Kosten	Lebensdauer
Unterwerk	5 Mio. €	20a
Umrichter	2,2 Mio. €	20a

Als Lebensdauer wurden für ein Unterwerk und für ein Umrichterwerk gemäß standardisierter Bewertung 20 Jahre angenommen.

8.1.1.3 Netzanschluss

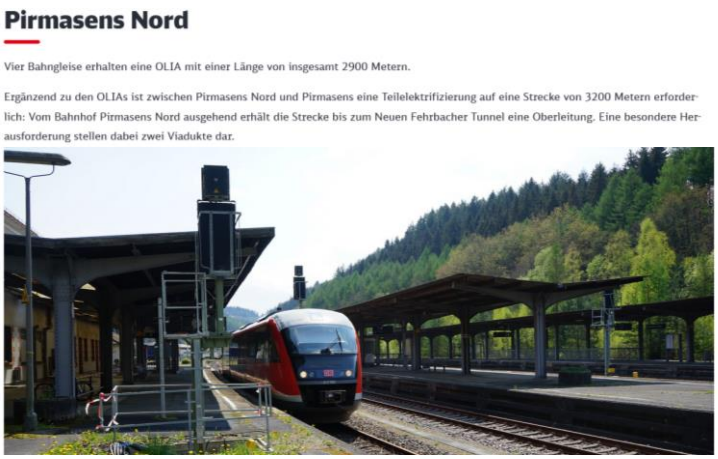
Die Kosten für einen etwaigen erforderlichen Netzanschluss sind sehr schwer zu beziffern, da diese Kosten fallspezifisch sehr stark variieren können – von mehreren hunderttausend Euro bis in den Millionenbereich.

Für die Kosten eines Netzanschlusses werden – falls erforderlich – fallspezifisch folgende Kosten angesetzt:

In der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung verwendete Werte	Kosten	Lebensdauer
Netzanschluss	300.000 €	75a

8.1.1.4 Oberleitungsinsel (BEMU)

Die Kostenannahmen sind grundsätzlich identisch bzw. ähnlich zu Vollelektrifizierungen; ggf. sind hier aufgrund des Inselcharakters häufiger Zusatzkosten für die Anbindung an das übergeordnete Stromversorgungsnetz zu berücksichtigen (siehe 8.1.1.3), seltener auch zusätzliche Gleise (vergleiche Wasserstofftankstellen unter 4.2.2.4). Häufig handelt es sich dabei um mehrgleisige Bahnhöfe (siehe Beispiel in Abb. 94)



Quelle: DB / www.akkuzug-pfalznetz.de

Abb. 94: Künftige Oberleitungsinsel Pirmasens Nord im Rahmen des Pfalznetzes

8.1.1.5 Ladestationen und „smarte“ Elektranten (BEMU)

Das Konzept der Ladestationen bzw. „smarten“ Elektranten (siehe 4.2.1.2) ist noch sehr „jung“. Es zielt darauf ab, den Planungs-, Genehmigungs- und Infrastrukturaufwand, der mit der klassischen Oberleitungserstellung einhergeht, deutlich zu reduzieren. Eine Ladestation ist als punktuelle Alternative zu einer Oberleitungsinsel zu sehen. Aufgrund der Charakteristika erlauben derartige Anlagen in der Regel auch einen Anschluss an ein lokales Mittelspannungsnetz, was ebenfalls eine Kostenersparnis beinhaltet.

Die Annahmen für die Wirtschaftlichkeitsberechnung wurden im Rahmen der Informationsgespräche (siehe 3.3) verifiziert.

In der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung verwendete Werte	Kosten	Lebensdauer
Ladestation	1.200.000 €	30a

8.1.1.6 Wasserstofftankstelle (HEMU)

Bezüglich der Beurteilung von Standorten für Wasserstofftankstellen ist deren erheblicher Platzbedarf und die Notwendigkeit einer Abtrennung des Tankgleises vom sonstigen Eisenbahnbetrieb zu beachten. Hier entsteht regelmäßig zusätzlicher Infrastrukturbedarf, der über den einer klassischen Dieseltankstelle deutlich hinausgeht (siehe Beispiel Bremervörde nachstehend).

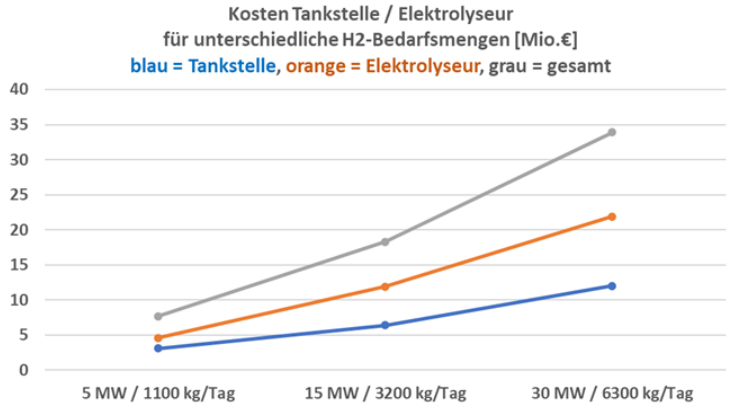
Im Vergleich zu Bremervörde ist die für das hessische Wasserstoffprojekt am Industriepark Höchst in Bau befindliche Anlage nochmals deutlich aufwändiger. So ist dort die doppelte Fahrzeuganzahl zu versorgen (siehe 6.2.2). Für diese Anlage werden Kosten von ca. 4,2 Mio. € berichtet (Quelle Frankfurter Rundschau fr.de/frankfurt/weitere-wasserstoff-tankstelle-im-industriepark-hoechst). An anderer Stelle wird allerdings angegeben, dass diese Kosten sich allein auf die „grundlegende Schieneninfrastruktur“ (d.h. die Errichtung der Gleisanlagen, Tankgleise etc., im Fall Höchst durchaus komplex) beziehen, d.h. die Gesamtkosten dürften noch deutlich höher liegen.

Es steht außer jedem Zweifel, dass die Kosten einer Wasserstoff-Schienentankstelle deutlich höher liegen als zum Beispiel in der VDE-Studie (VDE, 2020) pauschal mit 1 Mio. € angenommen, vor allem besteht eine deutliche Abhängigkeit von der Größe (Tankmengen). Bereits für „normale“ Wasserstofftankstellen werden Kostengrößenordnungen im Bereich 2,0 – 2,5 Mio. € berichtet.

Quelle: Google Earth (adaptiert) / Axel Kühn

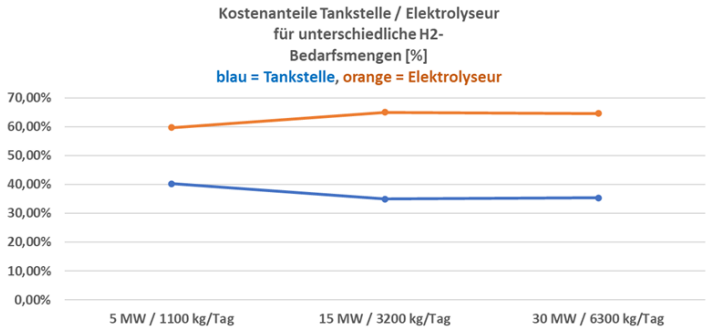
Abb. 95: Flächenbedarf Wasserstofftankstelle Bremervörde

Im Rahmen der österreichischen Hytrail-Studie (HyCenta; EVT; Energieinstitut JKU Linz; Synergesis Consult; TU Graz;, 2017) wurden Abschätzungen zu den Produktionsmengen abhängigen Kosten von Tankstellen und Elektrolyseuren vorgenommen, die vom Gutachter in nachfolgenden Grafiken verarbeitet wurden.



Quelle: eigene Darstellung, in Anlehnung an Daten der Hytrail-Studie

Abb. 96: Kostenansätze Elektrolyseur/Tankstelleninfrastruktur



Quelle: eigene Darstellung, in Anlehnung an Daten der Hytrail-Studie

Abb. 97: Kostenansätze Elektrolyseur/Tankstelleninfrastruktur

Zu beachten ist, dass diese Kosten sich rein auf die Wasserstoff-spezifischen Anlagen beziehen, Kosten für die Anpassung von Gleisanlagen kommen hinzu. Diese wurden im Rahmen der SteFanS-Studie nicht betrachtet, da hier für jeden potenziellen Tankstellen-Standort Detailprüfungen zur Lage und eine Bestimmung des Anpassungsbedarfs der Gleisinfrastruktur erforderlich gewesen wäre.

Für die Kosten einer Wasserstofftankstelle wurden für einen durchschnittlichen Tagesbedarf von 2000 kg[82] folgende Kosten angesetzt:

In der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung verwendete Werte	Kosten	Lebensdauer
H2-Tankstelle	4,75 Mio. €	30a

Dieser Kostenansatz liegt höher als in einzelnen Literaturangaben, dafür wurden aber keine weiteren Kosten für Gleisanpassungen betrachtet (siehe auch 4.2.2.4).

8.1.1.7 Elektrolyseur

Es wurde angenommen, dass vorgeschaltet zu einer Wasserstofftankstelle jeweils auch ein Elektrolyseur zur Herstellung des Wasserstoffes angeordnet wird. Auch zu den Kosten von Elektrolyseuren finden sich eine Vielzahl von Literaturangaben (siehe nachstehendes Beispiel).

28.02.2020 - 12:01

Trillium bestellt 1-MW-Elektrolyseur bei Nel Hydrogen

Brennstoffzelle | E-Busse | FCEV | H2-Tankstellen | Illinois | Kalifornien | NEL | ÖPNV | Santa Ana | Trillium | Urbana | USA

Die US-Tochter des norwegischen Energiekonzerns Nel hat einen Millionen-Auftrag von Trillium erhalten: Nel soll einen 1-MW-Elektrolyseur für ein Projekt mit Brennstoffzellen-Bussen in Illinois liefern.

Die Anlage soll in der Stadt Urbana entstehen. Der dortige ÖPNV-Betrieber MTD hat zwölf Brennstoffzellen-Busse geordert. Für die Wasserstoff-Versorgung ist Trillium Transportation Fuels zuständig. Die geplante H2-Tankstelle soll mit dem Elektrolyseur von Nel den Wasserstoff lokal erzeugen. Die Energiequelle wird in der Mitteilung nicht angegeben – sie ist aber entscheidend für die Umweltbilanz der Wasserstoff-Erzeugung.

Konkret handelt es sich um einen Proton-PEM-Elektrolyseur, der ein Megawatt Leistung bringt. Den Gesamtauftrag beziffert Nel mit der Ausrüstung und den damit verbundenen Dienstleistungen auf 2,2 Millionen Dollar. Die Lieferung ist für Ende 2020 geplant.

Quelle: Trillium / www.electrive.net/2020/02/28/trillium-bestellt-1-mw-elektrolyseur-bei-nel-hydrogen/

Abb. 98: Bestellung eines 1 MW-Elektrolyseurs (2020)

Für die Kosten eines Elektrolyseurs werden folgende Kosten angesetzt:

In der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung verwendete Werte	Kosten	Lebensdauer
Elektrolyseur < 15 MW	1,5 Mio. €/MW	30a
Elektrolyseur > 15 MW	1,2 Mio. €/MW	30a

8.1.2 Fahrzeugkosten

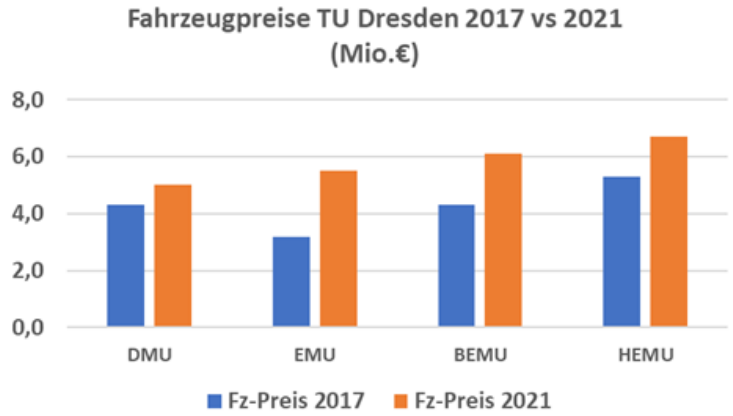
Fahrzeugkosten wurden auf Basis der Literaturrecherche, ergänzt durch Informationen aus den geführten Gesprächen, für die gewählten Bemessungsfahrzeuge berechnet bzw. abgeschätzt. Die gesichteten Studien allein zeigen kein eindeutiges Bild, da teilweise Fahrzeuge unterschiedlicher Konfiguration verglichen werden. Auch zeigen die Zahlen aus aktuellen Fahrzeugbestellungen, soweit überhaupt Kosten öffentlich berichtet werden, dass die Kosten real oft höher liegen als in den Studien angegeben. Dies

[82] Auf eine Einzelbetrachtung anhand des spezifischen Wasserstoff-Tagesbedarfs in den betrachteten Teilnetzen wurde verzichtet.

kann im Einzelfall auch an spezifischen Rahmenbedingungen der jeweiligen Ausschreibung, z.B. im Hinblick auf die Inkludierung der Fahrzeugunterhaltung für die Lebensdauer, liegen.

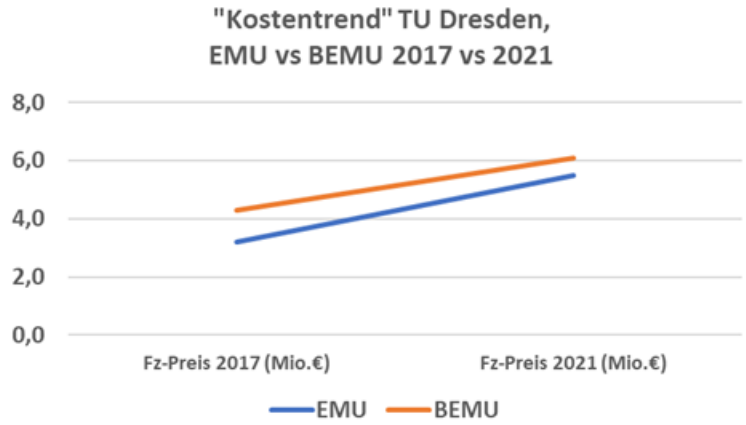
Die Recherche zeigt allerdings, dass tendenziell die Kostendifferenz zwischen EMUs und BEMU bzw. HEMU abgenommen hat bzw. heute niedriger angenommen werden kann als noch vor einigen Jahren, als der „Neuland-Faktor“ alternativer-Antriebe noch höher war und zu anderen Kosteneinschätzungen führte. Interessant sind hier vor allem die Studien der TU Dresden für die bayrische Eisenbahngesellschaft (BEG)[83].

Während in der Erststudie 2017 noch davon ausgegangen wurde, dass BEMU um 34 % und HEMU um 66 % teurer als EMU sind, wurde die Differenz 2020 mit rund 10 % respektive 20 % deutlich geringer angenommen. Dies wurde wie folgt begründet: *„Zwischenzeitlich haben sich sowohl der Anbietermarkt als auch die verfügbaren Fahrzeug- und Antriebstechnologien derart weiterentwickelt, dass ein Update der Studie aus 2017 geboten ist.“.* Siehe dazu auch nachstehende Abbildungen 99 bis 101, in denen der Gutachter die Annahmen der TU Dresden grafisch aufbereitet hat.



Quelle: Eigene Darstellung, in Anlehnung an BEG-Studien 2017 und 2021, TU Dresden

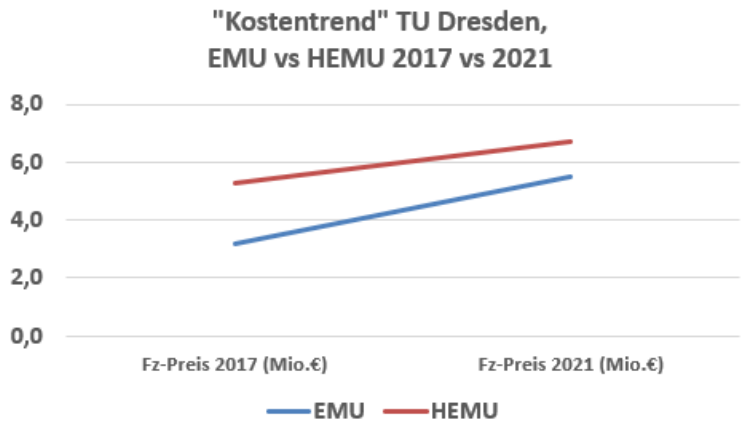
Abb. 99: Vergleich Fahrzeugpreise 2017 und 2021 (TU Dresden)



Quelle: Eigene Darstellung, in Anlehnung an BEG-Studien 2017 und 2021, TU Dresden

Abb. 100: Kostentrend EMU <> BEMU von 2017 nach 2021

[83] Wissenschaftliche Bewertung von alternativen, emissionsarmen Antriebskonzepten für den bayerischen SPNV (TU Dresden, 2020)



Quelle: Eigene Darstellung, in Anlehnung an BEG-Studien 2017 und 2021, TU Dresden

Abb. 101: Kostentrend EMU <> HEMU von 2017 nach 2021

Aufbauend auf den Ergebnissen der Recherche, sowie den Zahlen aus aktuellen Fahrzeugbestellungen wurden Einheitskosten je Meter Fahrzeug festgelegt: Fahrzeugkosten für EMU wurden dabei 10 % geringer als die Kosten für BEMU, die für HEMU 10 % höher als für BEMU gewählt. Die Kosten je Fahrzeug wurden dann auf Basis der Fahrzeuglängen der beiden Bemessungsfahrzeug-Typen (RB 45 m, RE 60m) ermittelt. Die Lebensdauer wurde mit dem branchenüblichen Wert von 30 Jahren gearbeitet.

In Wirtschaftlichkeitsbetrachtung verwendete Werte	Kosten/m Fahrzeug	Lebensdauer
EMU	144.000 €	30a
BEMU	160.000 €	30a
HEMU	176.000 €	30a

Damit ergeben sich z.B. für das RB-Bemessungsfahrzeug als EMU-Version Kosten von 6,48 Mio. €, als BEMU von 7,2 Mio. € und als HEMU von 7,92 Mio. €.

8.2 Betriebskosten

Die Betriebskosten setzen sich zusammen aus den Betriebskosten für Fahrzeuge (Wartung und Revision), dem Komponententausch (Batterie, Brennstoffzelle und Wasserstofftank), den Betriebskosten der Infrastruktureinrichtungen sowie den Personalkosten.

8.2.1 Betriebskosten Fahrzeuge

Angaben für Betriebskosten von Fahrzeugen variieren stark zwischen den betrachteten Studien – vor allem für die neuen Antriebstechnologien HEMU und BEMU. Zwei neuere Studien mit detaillierten, kilometerbezogenen Angaben zu den Betriebskosten (TU Dresden, 2020) und (VDE, 2020) geben an, dass die Betriebskosten (exkl. Komponententausch) für BEMU 5-10 % über denen des EMU liegen, die eines HEMU ~5-10 % über denen des BEMU.

Unterhaltungskosten:

- Für Fahrzeuge mit alternativen Antrieben liegen bislang noch keine echten Erfahrungen vor, wie sich deren Unterhaltungskosten im Vergleich zu klassischen EMU-Fahrzeugen verhalten. Eine Reihe von Studien, die vom Gutachter ausgewertet wurden, hat dazu Annahmen getroffen (siehe nachstehende Tabelle). Diese unterscheiden sich zum Teil sehr deutlich, so haben identische Gutachter in unterschiedlichen Studien, die nur wenige Jahre auseinanderliegen, zum Teil stark abweichende Parameter verwendet (TU Dresden).

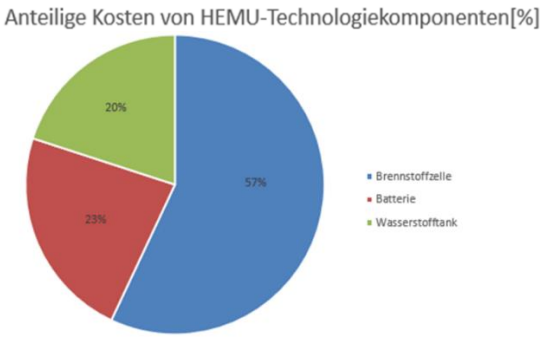
- Ebenso wird nicht immer deutlich, welche Kostenbestandteile angesetzt bzw. nicht angesetzt wurden (Revision? Komponententausch?), zum Teil wurden auch nicht alle Technologien abgebildet.
- Aufbauend auf der TCO-Vorgehensweise des Gutachters wird Komponententausch als Investition zum Zeitpunkt x betrachtet und nicht km-bezogen abgebildet.
- Der Gutachter sieht Revision als Bestandteil der laufenden Kosten und findet sich damit im Bereich von TU Dresden bzw. VDE (blaue Felder in Tabelle).
- Der Gutachter verwendet daher für BEMU und HEMU Kostenabstufungen in ähnlicher Größenordnung (jeweils + ca. 8 %).

Tabelle 5: Vergleich von Ansätzen verschiedener Studien

Instandhaltungskosten (€/km)												
Autor/Studie/ Thema/Kunde	TU Dresden Altern. Antriebs-konzepte BEG	TU Dresden Altern. Antriebs-konzepte BEG	VDE Klima-neutrale Alternativen	TU Dresden Altern. Antriebs-konzepte BEG	TU Dresden Altern. Antriebs-konzepte BEG	VDE Klima-neutrale Alternativen	VDE Klima-neutrale Alternativen	TU Dresden/ TU Berlin/PTV Elektrifizierung BMVI	UIC Alternatives for railway electrification	Goudappel-Coffeng Gent-Terneuzen	Roland Berger Use of fuelcells & Hydrogen in railway environment	KCW Altern. Antriebe im ÖPNV VOR
Jahr	2017	2021	2020	2017	2021	2020	2020	2021	2019	2018	2019	2021
DMU	0,89	1,03	1,44	1,23	1,53	1,86	1,20	0,85	0,79	0,91	0,90	Kosten nur total
EMU	0,64	0,76	1,02	0,64	0,76	1,02	0,80	0,40	0,40	0,69	0,40	Kosten nur total
BEMU	0,64	0,84	1,07	0,88	1,27	1,81	0,85	1,16	0,56	-----	-----	Kosten nur total
HEMU	0,79	0,89	1,18	1,58	1,41	2,60	0,95	-----	0,72	0,91	0,80	Kosten nur total
Daten-spezifikation	mit Revision / ohne Komponententausch			mit Revision und Komponententausch			ohne Revision und Komponenten-tausch	ohne spezifische Angaben zu Revision / Komponententausch				
Δ BEMU > EMU (€/km)	0,00	0,08	0,05	0,23	0,51	0,80	0,05	0,76	0,16			
Δ BEMU > EMU (%)	0	**11**	**5**	36	67	78	6	190	40			
Δ HEMU > BEMU (€/km)	0,15	0,05	0,11	0,70	0,14	0,79	0,10		0,16			
Δ HEMU > BEMU (%)	23	**6**	**11**	80	11	43	12		29			

Quellen:
TU Dresden (2017): Technische und wirtschaftliche Bewertung alternativer Antriebskonzepte. Auftraggeber: BEG
PTV, TU Dresden (2021): Wissenschaftliche Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie Abschlussbericht zur Studie „Elektrifizierungsvarianten für das deutsche Schienennetz"
TU Dresden (2021): Wissenschaftliche Bewertung von alternativen, emissionsarmen Antriebskonzepten für den bayerischen SPNV (Phase 2). Auftraggeber: BEG
VDE (2020): Bewertung klimaneutraler Alternativen zu Dieseltriebzügen
UIC (2019): Alternatives for railway electricification. UIC Best Practice Workshop – The end of fossil fuels in the railway sector.
Goudappel Coffeng (2018): Passagiersvervoer Rail Gent – Terneuzen. Implementation Study for Optimization of Cross-border Rail Infrastructure in the Port area Ghent – Terneuzen
Roland Berger (2019): STUDY ON THE USE OF FUEL CELLS & HYDROGEN IN THE RAILWAY ENVIRONMENT. REPORT 1. State of the art & business case and market potential
KCW (2021): Alternative Antriebe im öffentlichen Verkehr

Eine ergänzende Plausibilisierung ergibt sich aus nachstehender Betrachtung. Bei der Beurteilung unterschiedlicher Unterhaltungskosten im Vergleich der Fahrzeugtypen ist zu beachten, dass die „alternativen Antriebskomponenten", denen Zusatzaufwände zugeordnet werden können, ja nur einen Teil des Gesamtfahrzeugs darstellen, das ansonsten als nahezu baugleich angenommen werden kann. Diesen Anteil quantifiziert die Hydrail-Studie aus Kanada (CH2M HILL, Ernst & Young, Canadian Nuclear Laboratories, 2018) auf ca. 25 %, d.h. auf einen kleineren Teil der Fahrzeugkosten[84].



Quelle: Eigene Darstellung, in Anlehnung an Hydrail-Studie, Ontario/Kanada

Abb. 102: Kostenanteile der HEMU-Technologiekomponenten

[84] Bei angenommenen Gesamtkosten von 6,8 Mio. CAN$ für ein HEMU summieren sich die Wasserstoffkomponenten dort auf 1,75 Mio. CAN$, d.h. ca. 26 %; davon Brennstoffzelle ca. 15 %, Batterie ca. 6 %, Tank ca. 5 %.

Für die Betriebskosten der Fahrzeuge werden folgende Kosten (pro Zug-km) angesetzt:

In der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung verwendete Werte	
EMU	0,80 €/km
BEMU	0,86 €/km
HEMU	0,93 €/km

8.2.2 Betriebskosten aufgrund Komponententausch

Der Komponententausch betrifft BEMU- und HEMU-Fahrzeuge. Bei BEMU-Fahrzeugen muss regelmäßig die Batterie getauscht werden, bei HEMU-Fahrzeugen Batterie, Brennstoffzelle und Wasserstofftank.

8.2.2.1 Batterietausch

Im Rahmen der SteFanS-Studie wurde unter Zugrundelegung der LTO-Technologie konsequent sowohl für Traktionsbatterien (BEMU) als auch Pufferbatterien (HEMU) eine Batterielebensdauer von 15 Jahren angesetzt (siehe 4.2.1.1).

Die Wirkung der alternativen Batterietechnologie NMC mit kürzerer Lebensdauer (8 Jahre), geringeren Kosten und Gewicht wurde in einer Sensitivbetrachtung abgebildet (siehe 10.1.5).

Für den Batterietausch werden folgende Kosten angesetzt:

In der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung verwendete Werte	Lebensdauer	Kosten Batterietausch
BEMU	15 Jahre	1.000 €/kWh
HEMU	15 Jahre	1.000 €/kWh

8.2.2.2 Brennstoffzellentausch

Für die Kosten des Tauschs von Brennstoffzellen und des Wasserstofftanks werden folgende Kosten angesetzt:

In der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung verwendete Werte	Lebensdauer	Kosten BZ-tausch
HEMU	8 Jahre	1.000 €/kW

In der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung verwendete Werte	Lebensdauer	Kosten Tausch H2-Tank
HEMU	15 Jahre	300.000 €/Tank

8.2.3 Betriebskosten Infrastruktur

Für verschiedene Kostensätze der „klassischen“ Eisenbahninfrastruktur liegen umfangreiche Informationen aus der „standardisierten Bewertung“ vor, die entsprechend übernommen wurden.

8.2.3.1 Betriebskosten Bahnstromversorgung

Für den Betrieb der Bahnstromversorgung wurde entsprechend der gesichteten Literatur ein CAPEX-bezogener Ansatz gewählt („capital expenditure“ = Investitionskosten).

In der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung verwendete Werte	
Betriebskosten Oberleitung	0,5 % der CAPEX p.a.
Betriebskosten Umrichter und Unterwerk	0,5 % der CAPEX p.a.

8.2.3.2 Betriebskosten Oberleitungsinsel (BEMU)

Die Kosten werden analog zu den Betriebskosten einer Oberleitung angenommen.

8.2.3.3 Betriebskosten Ladestation (BEMU)

Für den Betrieb von Ladestationen werden folgende pauschalierte Kosten angesetzt:

In der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung verwendete Werte	
Betriebskosten Ladestation	6.000 €/a

8.2.3.4 Betriebskosten H2-Tankstelle (HEMU)

Für die Betriebskosten der Wasserstofftankstellen wurde ebenfalls ein CAPEX-bezogener Ansatz gewählt. Zusätzlicher Personalbedarf wurde nicht berücksichtigt (Annahme: ferngesteuerter Betrieb).

In der Literatur finden sich zum Teil auch differenziertere Vorgehensweisen, die eine Einzelbetrachtung zu Lebensdauern und Betriebskosten von Tankstellenkomponenten (z.B. Tank, Kompressor etc.) vorsehen. Der Gutachter hat auf diese Verfeinerung angesichts des strategischen Niveaus der SteFanS-Studie verzichtet.

In der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung verwendete Werte	
Wartungskosten Wasserstofftankstelle	3 % der CAPEX p.a.

8.2.3.5 Betriebskosten Elektrolyseur (HEMU)

Für die Betriebskosten von Elektrolyseanlagen werden folgende Kosten angesetzt, es gelten die oben zu Tankstellen gemachten Aussagen.

In der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung verwendete Werte	
Wartungskosten Elektrolyseur, inkl. Stack-Tausch	3,3 %

8.2.3.6 Betriebskosten Personal

Für Personalkosten wurden einheitlich 40 €/h angesetzt.

8.3 Energiekosten

Die Energiekosten bilden zunächst einmal die Kosten für die erforderliche Traktionsenergie ab. In der Wasserstoffbetrachtung kommen Kosten für den Wasserbedarf (siehe 4.2.2.6), die Restwasser-Entsorgung und ggf. zusätzliche Transportkosten hinzu.

Im Sinne des Betrachtungszeitraums von 30 Jahren und der TCO-Vorgehensweise (siehe 7.11.2 und 7.11.4) besteht die Notwendigkeit, nicht nur aktuelle Kosten anzusetzen, sondern auch Kostenentwicklungen über die Zeit anzunehmen. Für die letzten Jahrzehnte war die Vorgehensweise in vergleichbaren Studien relativ einfach: eine relativ bescheidene, inflationsbedingte jährliche Zunahme und, im Einzelfall ggf. noch die Berücksichtigung von spezifischen Zusatztrends. Beispiele für derartige Trendannahmen finden sich nachstehend in den Abbildungen 105 bis 107 in Kapitel 8.4.

Als im Sommer 2021 die Arbeiten an der SteFanS-Studie aufgenommen wurden, war man sich der Corona-Krise sehr bewusst, die zwar auch gewisse wirtschaftliche Verwerfungen (Störung von Lieferketten etc.) verursacht hat, die aber als vorübergehend

angesehen werden konnte. Eine wesentliche Veränderung der Einschätzungen zu Rohstoff- und Energiekosten mit Bezug zur Studie war daher nicht erforderlich.

Die seit Februar 2022 hinzugekommene Ukraine-Krise hat im Vergleich eine weitaus größere Bedeutung, da hier sehr weitgehende Veränderungen der Marktsituation zu erwarten sind, die ggf. nicht vorübergehend sind und langfristige Wirkungen haben. Diese Wirkungen zeigen sich aktuell (Sommer 2022) in ausgeprägten Energiepreissteigerungen (Gas/Strom), in einer veränderten Energiestrategie „weg vom russischen Gas“ und hin zu nachhaltigen Zukunftsenergien (z.B. Wasserstoff, aber auch Windstrom/Photovoltaik) und einer deutlich erhöhten Inflation. Es erscheint absehbar, dass Energie insgesamt teurer wird und gleichzeitig ein enormer Nachfrageschub nach alternativen Energien deren Ausbau zwar beschleunigt, gleichzeitig aber zumindest kurzfristig für eine Verknappung und Verteuerung spezifischer Energieformen sorgt. Sobald die aktuelle Inflationsentwicklung sich über Lohnerhöhungen auch in der Industrieproduktion niederschlägt, sind hier ebenfalls deutliche Kostensteigerungen zu erwarten, gleiches gilt dann auch für die SPNV-Betriebskosten.

Die Betrachtungen im Rahmen der SteFanS-Studie erfolgten sämtlich noch auf Basis normaler Entwicklungen, d.h. aus Sicht der Vorkrisenzeit.

Eine Reihe von Folgewirkungen wird die relativen Kostenunterschiede zwischen den betrachteten Technologien absehbar nicht überproportional beeinflussen. Wo ein Einfluss jedoch absehbar erscheint, ist im Bereich Energie (siehe auch Kapitel 12).

8.3.1 Stromkosten

8.3.1.1 Stromkosten (EMU/BEMU)

Die Deutsche Bahn wirbt seit einiger Zeit damit, zumindest im Fernverkehr zu 100 % mit Ökostrom zu fahren, im Nahverkehr ist dies nur dann gegeben, wenn seitens der Länder und Aufgabenträger wie in Baden-Württemberg entsprechende Strategien umgesetzt und finanziert werden (siehe Abb. 103).

Quelle: Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg

Abb. 103: Ökostrom im Nahverkehr Baden-Württemberg

Die Kostenannahmen für die wirtschaftliche Betrachtung spiegeln eine „Ökostrom-Zulage“ wider, der Preis pro kWh liegt deutlich über Annahmen für Bahnstrom mit aktuellem Strommix:

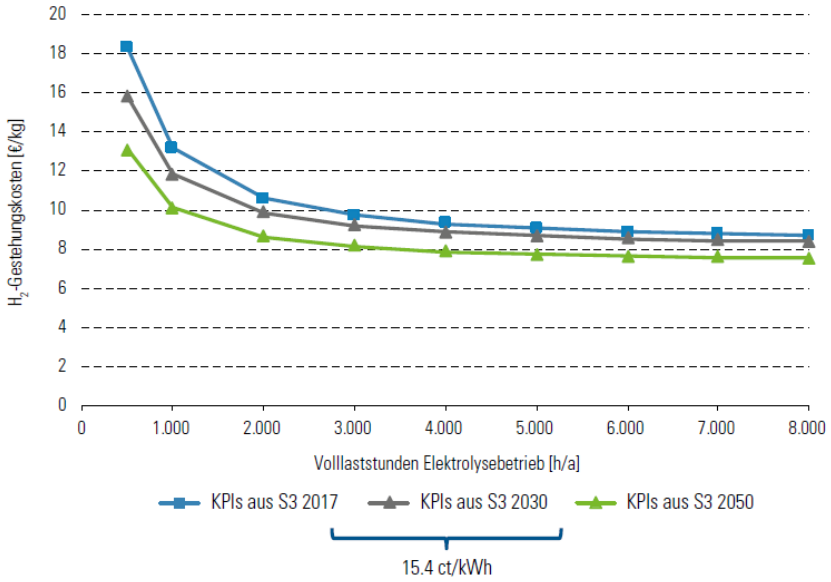
In der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung verwendete Werte	
Bahnstrom („Öko“)	0,13 €/kWh

Für die EMU- und BEMU-Betrachtung erscheint aufgrund der überwiegenden Zusammenhänge mit elektrifizierten Bestandsstrecken eine konsequente Verwendung von Bahnstrom als Berechnungsgrundlage naheliegend. Im konkreten Einzelfall kann bei dezentraler Stromversorgung einer Oberleitungsinsel bzw. einer Ladestation auch der Anschluss an das regionale bzw. lokale Netz eines Energieversorgers sinnvoll sein. Sich dadurch ggf. ergebende Preisunterschiede gegenüber Bahnstrom erscheinen bei der vorliegenden strategischen Betrachtung vernachlässigbar.

8.3.1.2 Stromkosten (HEMU)

Für den HEMU-Betrieb auf Regionalstrecken mit lokaler Elektrolyse im Bereich der Wasserstofftankstellen stellt sich regelmäßig die Frage nach der Stromversorgung von Elektrolyseur und Tankstelle. Diese kann grundsätzlich, wenn die Produktionsstätte im Nahbereich zu einer Bahnstromversorgung angeordnet wird, von dort versorgt werden (Annahme ausreichender Kapazitäten), alternativ kommt die Anbindung an ein regionales oder kommunales Stromnetz in Betracht oder es wird eine direkt zugeordnete, lokale Windstrom/Photovoltaik-Versorgung vorgesehen. Da eine Erhebung der spezifischen Rahmenbedingungen potentieller Standorte im Rahmen der „strategischen“ SteFanS-Studie zu weit geführt hätte, wurde auch für die Wasserstoffproduktion die Verwendung von Bahnstrom mit dem obengenannten Kostensatz vereinbart. Damit ist gleichzeitig auch rechnerisch sichergestellt, dass „grüner“ Wasserstoff produziert wird.

Die Stromkosten sind das bestimmende Element für die Kosten für Wasserstoff.



Quelle: NOW GmbH / Fraunhofer ISE

Abb. 104: Einfluss von Technologie- und Kostenentwicklung auf den Wasserstoffpreis

So schrieb die NOW 2018: „Es ist festzuhalten, dass bei heutigen Strombezugskosten die weitere Technologieentwicklung und Kostenreduktion nur beschränkten Einfluss auf die Wasserstoffgestehungskosten und damit die Wettbewerbsfähigkeit der Elektrolysetechnologie besitzen. Wie aus Abbildung 9-1 (siehe vorstehend) ersichtlich, lassen sich die Wasserstoffgestehungskosten bei diesen Strombezugspreisen insbesondere ab 2.000 Volllaststunden pro Jahr nicht mehr substantiell durch Verbesserungen der Leistungsparameter steigern“ (S.148, (NOW GmbH, 2018)[85]).

[85] Die Gestehungskosten aus dem Diagramm sind aus heutiger Sicht in der Größenordnung nicht mehr stimmig, da sich die regulatorischen Rahmenbedingungen, auch durch den Entfall

Diese Rahmenbedingung betrifft zunächst ausschließlich die Produktion von Wasserstoff in Deutschland unter nicht optimalen Rahmenbedingungen (siehe auch Fußnote 85), deutlich niedrigere Kosten lassen sich ggf. bei Standortsynergien in Deutschland oder einer Produktion in Südeuropa, Nordafrika o.ä. erzielen, wobei im letzteren Fall dann eben andere Kostenbestandteile für den deutschen Käufer größere Wirkung erhalten (z.B. Transportkosten, zumindest bis zum Vorhandensein entsprechender Pipelinenetze).

8.3.2 Wasserkosten

Die Wasserkosten zur Herstellung von Wasserstoff müssen berücksichtigt werden; der Wasserbedarf ist nicht unbedeutend (siehe 4.2.2.6):

Für die Wasser- und Abwasserkosten zur Herstellung von Wasserstoff werden folgende Kosten angesetzt[86]:

In der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung verwendete Werte	
Frischwasser	2,0 €/m³
Abwasser	2,0 €/m³

8.3.3 Resultierender Wasserstoffpreis für SteFanS-Studie

Für die Herstellung von einem Kilo Wasserstoff werden 25 Liter Wasser benötigt. Die Wasserkosten belaufen sich für 1 kg H2 auf 0,05 €. Die Energiekosten belaufen sich auf 7,88 €/kg H2 bei einem Energiebedarf von 60,62 kWh/kg H2 und Stromkosten von 0,13 €/kWh. In der Summe kostet die Herstellung von Wasserstoff über die zugrunde gelegte „on site“-Elektrolyse 7,98 €/kg.

Die Preise (brutto) für ein Kilo Wasserstoff werden aktuell mit ca. 9,50 €/kg H2 angegeben (z.B. IPP ESN, 2019 oder destatista.de, 2022).

Die Angaben in den ausgewerteten Quellen sind unterschiedlich, die vom Gutachter angesetzten Kosten bewegen sich im Mittelfeld der Bandbreite. Unter günstigen Verhältnissen können im Einkauf aktuell bereits günstigere Preise für grünen Wasserstoff erzielt werden (Größenordnung ca. 6 €/kg).

Hier wären dann aber situativ Transportkosten in die Betrachtung einzubeziehen. Ebenso können synergetische Konfigurationen für Elektrolysestandorte (siehe Fußnote 85) ggf. noch etwas günstigere Rahmenbedingungen ermöglichen.

der EEG-Umlage verändert/verbessert haben. Richtig bleibt der unverändert dominante Einfluss des Strompreises und vergleichsweise geringe Steigerungspotenziale bei der Effizienz. Unabhängig davon stellt die Wasserstoffproduktion aus Industriestrom / Bahnstrom aus heutiger Sicht eine eher ungünstige Herangehensweise dar. Bei Anordnung von Elektrolyseuren an einem Wasserkraftwerk oder einer Müllverbrennungsanlage ließen sich auch deutlich niedrigere Stromkosten erzielen. Inwieweit derart günstige Rahmenbedingungen, die nach Auffassung von Gesprächspartnern im Studienverlauf ggf. Wasserstoffgestehungskosten in einer Größenordnung von 4-5 €/kg ermöglichen könnten, streckenspezifisch bzw. im Zusammenhang mit betrieblich benötigten Tankstellenstandorten erreicht werden können, ist aus derzeitiger Sicht nicht abschließend zu beurteilen.

[86] Kosten ortsabhängig; Frischwasser- / Abwasserkosten in ähnlicher Größenordnung

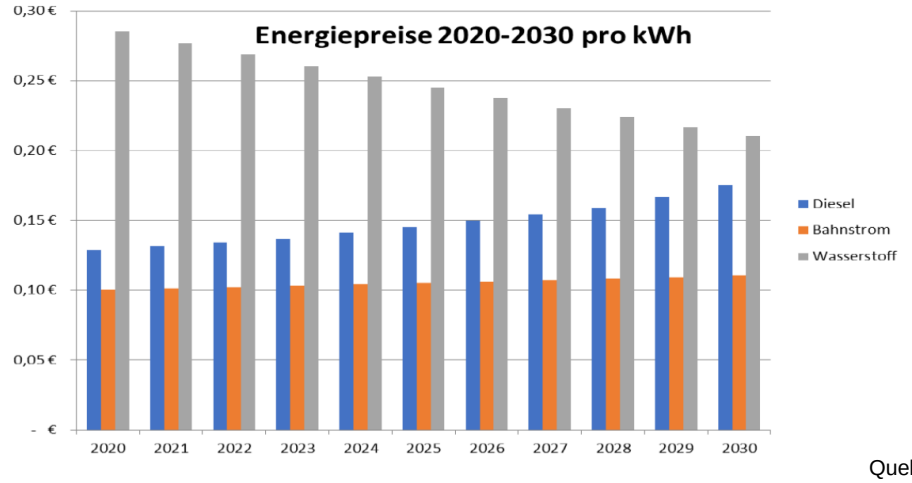
8.3.4 Transportkosten Wasserstoff

Wird Wasserstoff nicht vor Ort produziert, sondern in einer zentralen Anlage, fallen Transportkosten vom Ort der Herstellung bis zur Tankstelle an. Aufgrund der Grundsatzentscheidung, im Rahmen der SteFanS-Studie mit lokaler Elektrolyse („on site“) zu arbeiten (siehe 7.3) spielt dieser Kostenparameter in der wirtschaftlichen Bewertung keine Rolle.

8.4 Kostenentwicklung über die Zeit

Die Kostenentwicklung über längere Zeiträume (30 Jahre) darzustellen, unterliegt naturgemäß hohen Unsicherheiten. Gerade bei Energiepreisen ist die Unsicherheit derzeit sehr hoch (siehe Kapitel 8.3). Die aktuellen Turbulenzen am Energiemarkt aufgrund der Ukrainekrise und die resultierende Abkehr von russischem Gas lassen sich bezüglich ihrer mittel- bis langfristigen Auswirkungen kaum seriös einschätzen.

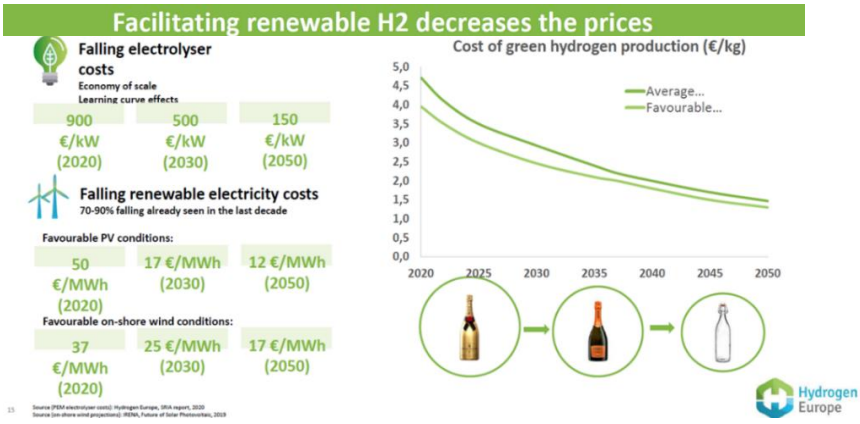
Viele Untersuchungen gehen bisher von steigenden Kosten für fossile Kraftstoffe und – aufgrund vom angenommenen technologischen Fortschritt – von sinkenden Kosten von Wasserstoff aus (siehe Abbildungen 105 und 106).



Quelle: SCI-Verkehr / BMVI

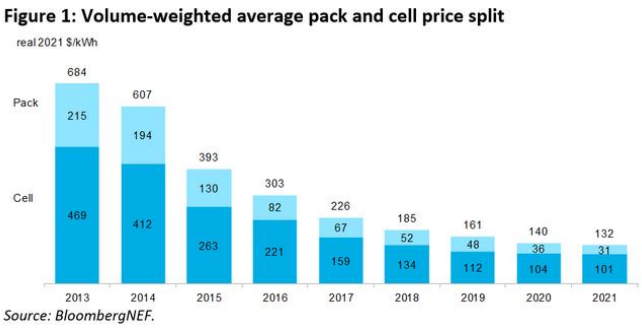
Abb. 105: Konservatives Energiepreisszenario (IZT 2020)

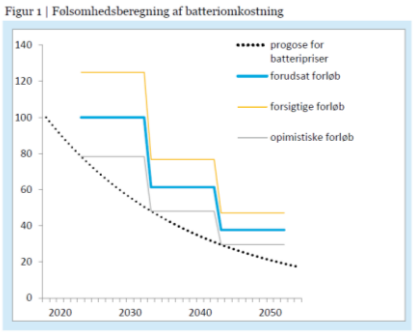
Ebenso wird von sinkenden Kosten aufgrund des technologischen Fortschritts als auch der zunehmenden industriellen Produktion („economy of scale“) von Batterien ausgegangen (siehe Abb. 107).



Quelle: Hydrogen Europe

Abb. 106: Erwartete Kostentrends im Wasserstoffbereich 2020-2050





Quelle: BloombergNEF (links), DSB/MOVIA/Transport- og Boligministeriet (rechts)

Abb. 107: Batteriepreisentwicklung

Anhand der verschiedenen Studien und auf Basis von diversen Fachgesprächen, wurde vom Gutachter eine Dynamisierung der Kosten für die Wirtschaftlichkeitsberechnung angenommen, siehe Tabelle 6.

Tabelle 6: Preisentwicklung pro Jahr

Preisentwicklung Stromkosten	EMU/BEMU	0,2 %
Preisentwicklung Batterie LTO	BEMU	-1,5 %
Preisentwicklung Batterie NMC	BEMU	-1,5 %
Preisentwicklung Brennstoffzelle	HEMU	-1,5 %
Preisentwicklung H2-Tank	HEMU	-1,5 %
Preisentwicklung H2-Infrastruktur (Elektrolyseur, Tankstelle, …)	HEMU	-1,5 %
Preissteigerungsrate (Infrastruktur + Betriebskosten)	alle	2,0 %
Effizienzentwicklung Elektrolyseur	HEMU - 2022	65,0 %
	HEMU - 2051	75,0 %
Preisentwicklung Wasserkosten	HEMU	1,0 %
Personalkostenentwicklung	alle	2,0 %

9 Strecken- und Teilnetz-Analyse

Die Strecken- und Teilnetzanalyse beinhaltet grundsätzlich vier Teilbereiche:

- Betriebliche Analyse
- Energetische Analyse
- Infrastrukturanalyse
- Analyse sonstiger, bewertungsrelevanter Aspekte

Zu beachten ist, dass in den betrachteten, nachstehend beschriebenen Teilnetzen die jeweilige nicht elektrifizierte Strecke in einigen Fällen mit mehreren SPNV-Linien bedient wird, die betrieblich und energetisch andere Rahmenbedingungen aufweisen und einer separaten Bearbeitung bedurften. Die Einteilung der Unterkapitel spiegelt daher die betrachtete betriebliche Nutzung (SPNV-Linien) wider.

Die meisten Strecken wurden mit einer detaillierten Fahrzeitenrechnung in OpenTrack untersucht. Fünf Strecken wurden jedoch in dem entwickelten Excel-Tool hinsichtlich der Fahrzeit und der energetischen Machbarkeit eines BEMU- bzw. HEMU-Betriebs untersucht. Abbildung 108 zeigt die untersuchten Strecken und gibt an, ob diese mit detaillierter Fahrzeitenrechnung untersucht wurden.

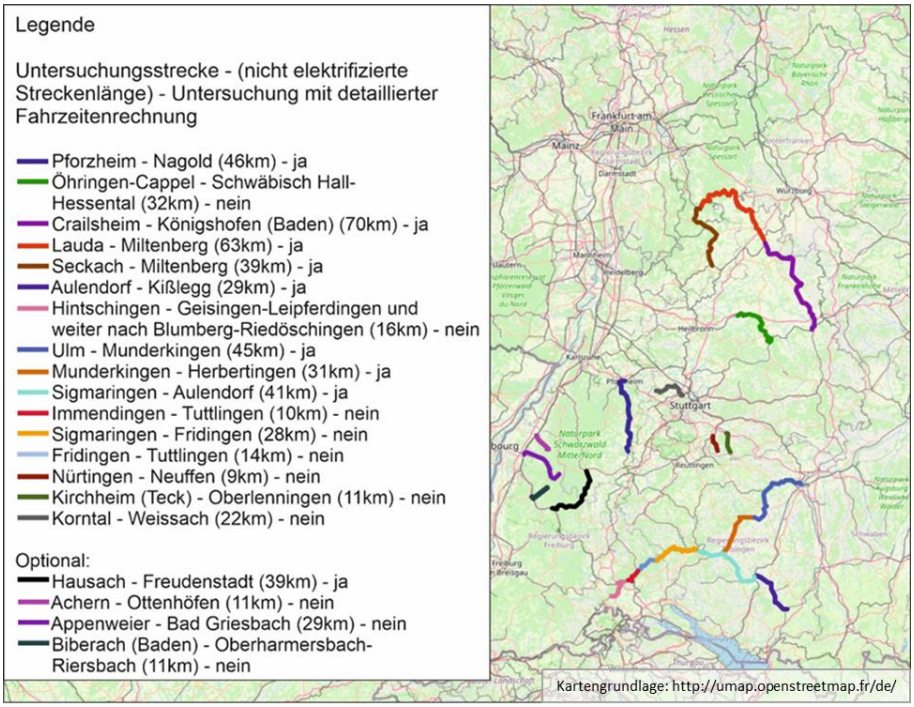


Abb. 108: Aktualisierte Strecken mit Untersuchungsmethodik

Allgemeiner Hinweis: Der Berichtsteil enthält für den überwiegenden Teil der Strecken nur Auszüge der energetischen Analysen; der Fokus lag auf der Darstellung der Ausgangssituation (Infrastrukturszenario 0) und dem dann ermittelten Zielszenario (Infrastrukturszenario x), welches die Machbarkeit sicherstellt und im Weiteren der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zugrunde liegt.

9.1 Teilnetz 1 „Nagoldtalbahn“ (TCO 1)

Das Teilnetz 1 „Nagoldtalbahn“ enthält die nicht elektrifizierte Strecke

- Pforzheim-Hochdorf

mit den zugrunde gelegten SPNV-Linien

- Pforzheim <> Horb
- Pforzheim <> Nagold

Die Strecke und betrieblich zugrunde gelegte Linienwege sind in Abb. 109 dargestellt.

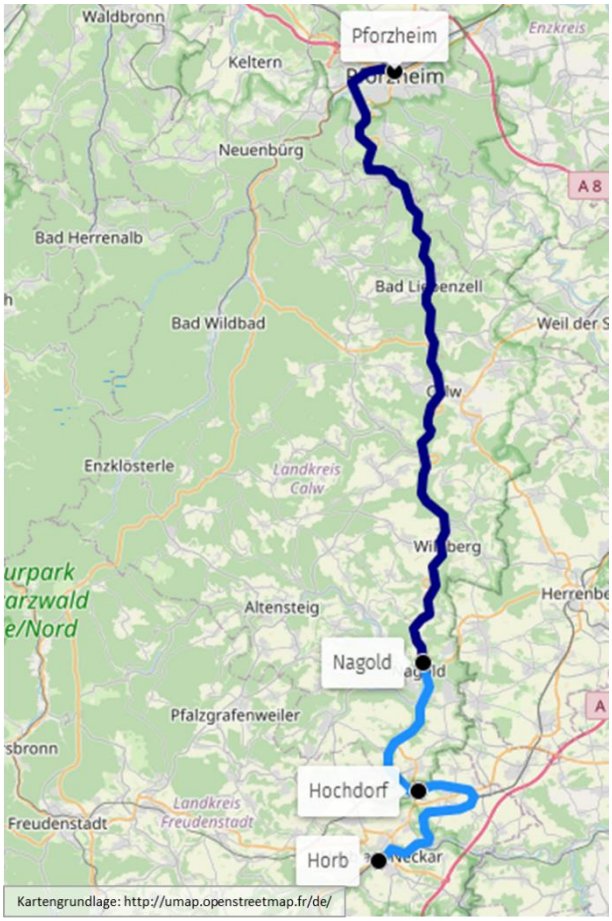


Abb. 109: Strecke und Linienabschnitte der Nagoldtalbahn

Als Untersuchungsstrecke („nicht elektrifiziert“) war hier zunächst nur der Abschnitt Pforzheim-Nagold zugrunde gelegt worden (siehe Abb. 2), eine Annahme, die auf einer angedachten Elektrifizierung Hochdorf-Nagold basierte („MEX Nagold“). Im Untersuchungsverlauf wurde dann davon ausgegangen, dass der nicht elektrifizierte Bestand, d.h. der Abschnitt Pforzheim-Hochdorf, zu betrachten ist.

Die betriebliche und energetische Betrachtung erfolgt nachstehend zunächst auf Basis der Einzelstrecke bzw. der beiden SPNV-Linien. Die Untersuchung des „Langläufers“ betrachtet allein die Strecke Pforzheim-Horb, nicht aber heute teilweise noch bestehende Durchbindungen Horb-Tübingen[87].

Entsprechend den Festlegungen in Kapitel 7.6 werden für dieses Teilnetz alle Technologiealternativen betrachtet (EMU, BEMU und HEMU).

[87] Der Streckenabschnitt Horb-Tübingen ist für eine Elektrifizierung vorgesehen.

Abb. 110 zeigt das Höhenprofil für die Strecke von Pforzheim nach Horb, es ist erkennbar, dass die Fahrtrichtung Pforzheim-Hochdorf die kritischere ist („Bergfahrt“).

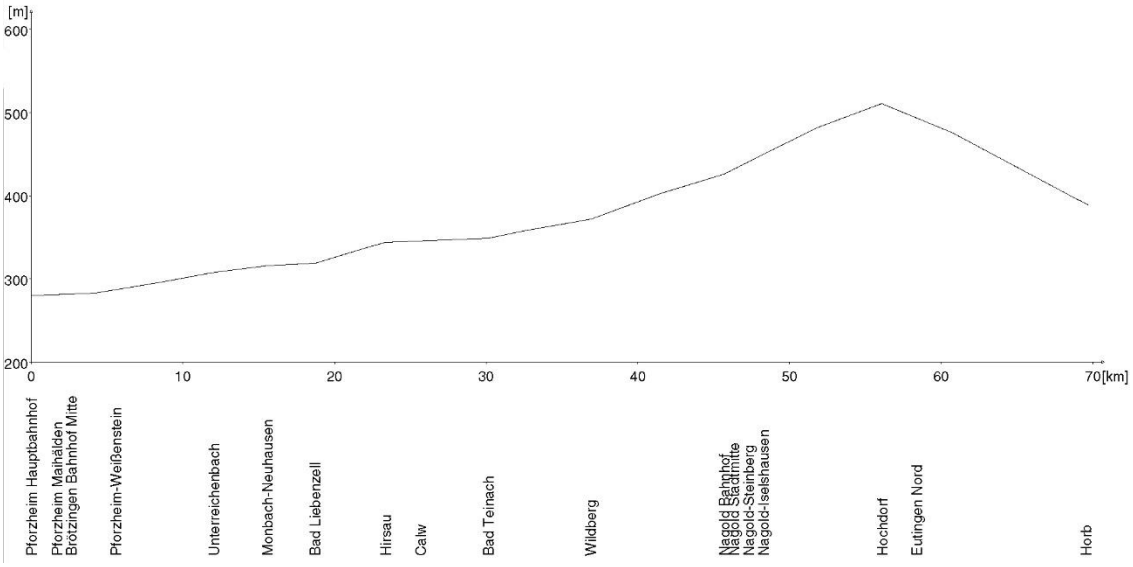


Abb. 110: Höhenprofil von Pforzheim nach Horb

9.1.1 Infrastrukturszenarien

Die Prüfung der Machbarkeit für den BEMU-Betrieb erfolgte anhand von Infrastrukturszenarien (siehe 7.8.2). Für die Nagoldtalbahn wurden neben dem Ausgangszenario zunächst sechs Infrastrukturszenarien geprüft. Diese sind in Tabelle 7 beschrieben.

Für die weitere BEMU-Betrachtung wurde Szenario 3a festgelegt (siehe Abb. 112), die Aussagen zum Infrastrukturbedarf beziehen sich hierauf (siehe 9.1.5.2). Für „kleinere“ Szenarien wie 1a, 1b oder 2 konnte keine Machbarkeit bestätigt werden.

Tabelle 7: BEMU-Infrastrukturszenarien Nagoldtalbahn

Szenario 0	Elektrifizierung Gleis 103 im Bahnhof Pforzheim
Szenario 1a	Elektrifizierung Gleis 103 im Bahnhof Pforzheim u. Brötzingen <> Tunnelmund
Szenario 1b	Elektrifizierung Gleis 103 im Bahnhof Pforzheim u. Hochdorf <> Tunnelmund
Szenario 2	Kombination der Szenarien 1a + 1b
Szenario 3a	Elektrifizierung Gleis 103 im Bahnhof Pforzheim u. Bahnhof Nagold
Szenario 3a Plus	Elektrifizierung Gleis 103 im Bahnhof Pforzheim u. Ladestation im Bahnhof Nagold für den Kurzläufer (Pforzheim-Nagold)
Szenario 3b	Elektrifizierung Gleis 103 im Bahnhof Pforzheim u. Bahnhof Nagold <> Nagold Stadtmitte
Szenario 4	Elektrifizierung Gleis 103 im Bahnhof Pforzheim u. Bahnhof Nagold <> Hochdorf

Das Infrastrukturszenario 3a sah zunächst die Schaffung einer Oberleitungsinsel in Nagold vor, die sowohl von Langläufern Pforzheim-Horb als auch in Nagold endenden Kurzläufern zur Batterieladung verwendet werden sollte. In der weiteren Diskussion wurde das Infrastrukturszenario weiterentwickelt („3a Plus“), nachdem eine Sensitivitätsprüfung ergab, dass mit einem RE-Fahrzeug mit 800 kWh Batterie eine Machbarkeit für den Langläufer ohne Lademöglichkeit in Nagold sichergestellt werden kann.

In den Abbildungen 111 und 112 sind die Infrastrukturszenarien 0 und 3a dargestellt.

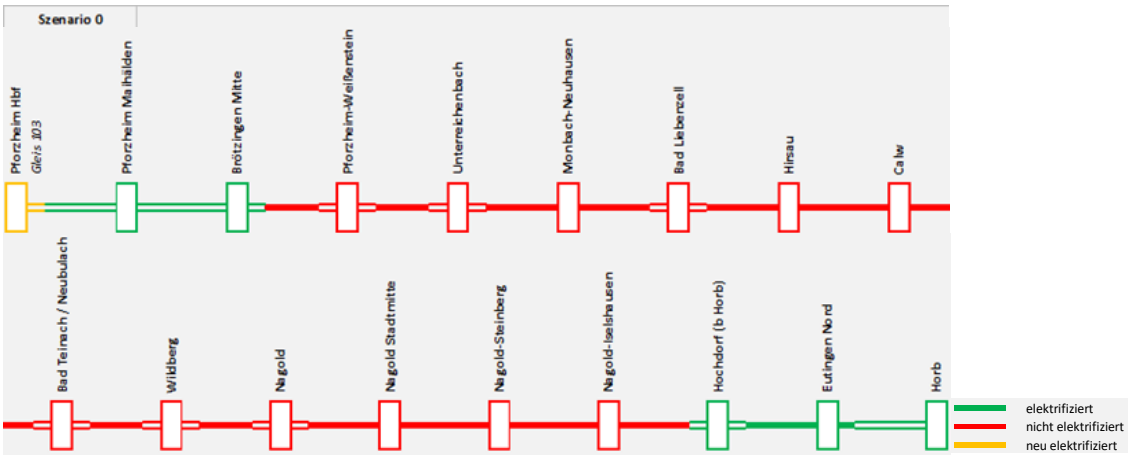


Abb. 111: Infrastrukturszenario 0 Pforzheim – Horb

Abb. 112: Infrastrukturszenario 3a Pforzheim – Horb

9.1.2 Linie Pforzheim-Horb

Tabelle 8 zeigt die wesentlichen Charakteristika für die Linie Pforzheim-Horb.

Tabelle 8: Strecken- bzw. Liniencharakteristika der Linie Pforzheim – Horb

Strecke	**Pforzheim-Horb**
∑ Streckenlänge [km]	66
Nicht elektrifiziert [km]	Pforzheim-Hochdorf, 56
Zweigleisigkeit [km]	Pforzheim Hbf - Brötzingen Mitte, 3, Eutingen im Gäu Em Süd – Horb, 8
Δ Höhenmeter [m]	Pforzheim>Horb: 231; Horb>Pforzheim: 120
Ø Geschwindigkeit [km/h]	53,2
Takt [min]	60
Zugpaare Werktags (Hin- / Rückfahrten)	19
Zugpaare Wochenende (Hin- / Rückfahrten)	17
Haltanzahl	19
Ø Haltabstand [km]	3,5
Streckenklasse	D4 (Pforzheim Hbf-Brötzingen Mitte, Nagold-Horb) CE (Brötzingen Mitte–Nagold)

In den Abbildungen 113 und 114 sind Ausschnitte der Fahrpläne abgebildet, die aus der Simulation des Betriebs der Nagoldtalbahn resultieren.

Zugtyp	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB
Zugnummer	774500	774000	774502	774002	774504	774004	774506	774006	774508	774008	774510	774010	774512	774012
0 Pforzheim Hbf	4:36	5:06	5:36	6:06	6:36	7:06	7:36	8:06	8:36	9:06	9:36	10:06	10:36	11:06
2 Pf Maihälden Hp	4:39	5:09	5:39	6:09	6:39	7:09	7:39	8:09	8:39	9:09	9:39	10:09	10:39	11:09
3 Brötzingen Mitte	4:40	5:10	5:40	6:10	6:40	7:10	7:40	8:10	8:40	9:10	9:40	10:10	10:40	11:10
3 Brötzingen Mitte	4:41	5:11	5:41	6:11	6:41	7:11	7:41	8:11	8:41	9:11	9:41	10:11	10:41	11:11
5 Pforzheim-Weißenstein	4:43	5:13	5:43	6:13	6:43	7:13	7:43	8:13	8:43	9:13	9:43	10:13	10:43	11:13
5 Pforzheim-Weißenstein	4:45	5:15	5:45	6:15	6:45	7:15	7:45	8:15	8:45	9:15	9:45	10:15	10:45	11:15
12 Unterreichenbach	4:50	5:20	5:50	6:20	6:50	7:20	7:50	8:20	8:50	9:20	9:50	10:20	10:50	11:20
12 Unterreichenbach	4:51	5:21	5:51	6:21	6:51	7:21	7:51	8:21	8:51	9:21	9:51	10:21	10:51	11:21
16 Monb-Neuhsn Hp	4:55	5:25	5:55	6:25	6:55	7:25	7:55	8:25	8:55	9:25	9:55	10:25	10:55	11:25
19 Bad Liebenzell	4:57	5:27	5:57	6:27	6:57	7:27	7:57	8:27	8:57	9:27	9:57	10:27	10:57	11:27
19 Bad Liebenzell	5:00	5:30	6:00	6:30	7:00	7:30	8:00	8:30	9:00	9:30	10:00	10:30	11:00	11:30
23 Hirsau Hp	5:04	5:34	6:04	6:34	7:04	7:34	8:04	8:34	9:04	9:34	10:04	10:34	11:04	11:34
26 Calw Hp	5:07	5:37	6:07	6:37	7:07	7:37	8:07	8:37	9:07	9:37	10:07	10:37	11:07	11:37
30 Bad Teinach / Neubulach	5:14	5:44	6:14	6:44	7:14	7:44	8:14	8:44	9:14	9:44	10:14	10:44	11:14	11:44
37 Wildberg (Württ)	5:19	5:49	6:19	6:49	7:19	7:49	8:19	8:49	9:19	9:49	10:19	10:49	11:19	11:49
37 Wildberg (Württ)	5:20	5:50	6:20	6:50	7:20	7:50	8:20	8:50	9:20	9:50	10:20	10:50	11:20	11:50
46 Nagold	5:27	5:57	6:27	6:57	7:27	7:57	8:27	8:57	9:27	9:57	10:27	10:57	11:27	11:57
46 Nagold	5:31	6:01	6:31	7:01	7:31	8:01	8:31	9:01	9:31	10:01	10:31	11:01	11:31	12:01
46 Nagold-Stadtmitte	5:32	6:02	6:32	7:02	7:32	8:02	8:32	9:02	9:32	10:02	10:32	11:02	11:32	12:02
47 Nagold-Steinberg		6:04		7:04		8:04		9:04		10:04		11:04		12:04
49 Nagold-Iselshausen		6:07		7:07		8:07		9:07		10:07		11:07		12:07
56 Hochdorf (b Horb)		6:12		7:12		8:12		9:12		10:12		11:12		12:12
56 Hochdorf (b Horb)		6:14		7:14		8:14		9:14		10:14		11:14		12:14
59 Eutingen Nord		6:17		7:17		8:17		9:17		10:17		11:17		12:17
- Eutingen im Gäu		|		|		|		|		|		|		|
70 Horb Pbf		6:25		7:25		8:25		9:25		10:25		11:25		12:25
Fahrzeit	0:56	1:19	0:56	1:19	0:56	1:19	0:56	1:19	0:56	1:19	0:56	1:19	0:56	1:19
Connexion	**774505**	**774007**	**774507**	**774009**	**774509**	**774011**	**774511**	**774013**	**774513**	**774015**	**774515**	**774017**	**774517**	**774019**
nächste Abfahrt	**6:25**	**7:31**	**7:25**	**8:31**	**8:25**	**9:31**	**9:25**	**10:31**	**10:25**	**11:31**	**11:25**	**12:31**	**12:25**	**13:31**
Wendezeit	**0:53**	**1:06**	**0:53**	**1:06**	**0:53**	**1:06**	**0:53**	**1:06**	**0:53**	**1:06**	**0:53**	**1:06**	**0:53**	**1:06**

Abb. 113: Auszug Fahrplan Pforzheim - Horb

Zugtyp	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB
Zugnummer	774501	774001	774503	774003	774505	774005	774507	774007	774509	774009	774511	774011	774513	774013
0 Horb Pbf		4:31		5:31		6:31		7:31		8:31		9:31		10:31
- Eutingen im Gäu		|		|		|		|		|		|		|
12 Eutingen Nord		4:41		5:41		6:41		7:41		8:41		9:41		10:41
14 Hochdorf (b Horb)		4:42		5:42		6:42		7:42		8:42		9:42		10:42
14 Hochdorf (b Horb)		4:44		5:44		6:44		7:44		8:44		9:44		10:44
22 Nagold-Iselshausen		4:50		5:50		6:50		7:50		8:50		9:50		10:50
23 Nagold-Steinberg		4:52		5:52		6:52		7:52		8:52		9:52		10:52
24 Nagold-Stadtmitte	4:25	4:54	5:25	5:54	6:25	6:54	7:25	7:54	8:25	8:54	9:25	9:54	10:25	10:54
24 Nagold	4:26	4:55	5:26	5:55	6:26	6:55	7:26	7:55	8:26	8:55	9:26	9:55	10:26	10:55
24 Nagold	4:30	5:00	5:30	6:00	6:30	7:00	7:30	8:00	8:30	9:00	9:30	10:00	10:30	11:00
33 Wildberg (Württ)	4:36	5:06	5:36	6:06	6:36	7:06	7:36	8:06	8:36	9:06	9:36	10:06	10:36	11:06
33 Wildberg (Württ)	4:37	5:07	5:37	6:07	6:37	7:07	7:37	8:07	8:37	9:07	9:37	10:07	10:37	11:07
40 Bad Teinach / Neubulach	4:46	5:16	5:46	6:16	6:46	7:16	7:46	8:16	8:46	9:16	9:46	10:16	10:46	11:16
44 Calw Hp	4:51	5:21	5:51	6:21	6:51	7:21	7:51	8:21	8:51	9:21	9:51	10:21	10:51	11:21
47 Hirsau Hp	4:54	5:24	5:54	6:24	6:54	7:24	7:54	8:24	8:54	9:24	9:54	10:24	10:54	11:24
51 Bad Liebenzell	4:57	5:27	5:57	6:27	6:57	7:27	7:57	8:27	8:57	9:27	9:57	10:27	10:57	11:27
51 Bad Liebenzell	5:00	5:30	6:00	6:30	7:00	7:30	8:00	8:30	9:00	9:30	10:00	10:30	11:00	11:30
55 Monb-Neuhsn Hp	5:03	5:33	6:03	6:33	7:03	7:33	8:03	8:33	9:03	9:33	10:03	10:33	11:03	11:33
58 Unterreichenbach	5:06	5:36	6:06	6:36	7:06	7:36	8:06	8:36	9:06	9:36	10:06	10:36	11:06	11:36
58 Unterreichenbach	5:07	5:37	6:07	6:37	7:07	7:37	8:07	8:37	9:07	9:37	10:07	10:37	11:07	11:37
65 Pforzheim-Weißenstein	5:12	5:42	6:12	6:42	7:12	7:42	8:12	8:42	9:12	9:42	10:12	10:42	11:12	11:42
65 Pforzheim-Weißenstein	5:15	5:45	6:15	6:45	7:15	7:45	8:15	8:45	9:15	9:45	10:15	10:45	11:15	11:45
67 Brötzingen Mitte	5:18	5:48	6:18	6:48	7:18	7:48	8:18	8:48	9:18	9:48	10:18	10:48	11:18	11:48
67 Brötzingen Mitte	5:19	5:49	6:19	6:49	7:19	7:49	8:19	8:49	9:19	9:49	10:19	10:49	11:19	11:49
68 Pf Maihälden Hp	5:21	5:51	6:21	6:51	7:21	7:51	8:21	8:51	9:21	9:51	10:21	10:51	11:21	11:51
70 Pforzheim Hbf	5:23	5:53	6:23	6:53	7:23	7:53	8:23	8:53	9:23	9:53	10:23	10:53	11:23	11:53
Fahrzeit	0:58	1:22	0:58	1:22	0:58	1:22	0:58	1:22	0:58	1:22	0:58	1:22	0:58	1:22
Connexion	**774502**	**774002**	**774504**	**774004**	**774506**	**774006**	**774508**	**774008**	**774510**	**774010**	**774512**	**774012**	**774514**	**774014**
nächste Abfahrt	**5:36**	**6:06**	**6:36**	**7:06**	**7:36**	**8:06**	**8:36**	**9:06**	**9:36**	**10:06**	**10:36**	**11:06**	**11:36**	**12:06**
Wendezeit	**0:13**	**0:13**	**0:13**	**0:13**	**0:13**	**0:13**	**0:13**	**0:13**	**0:13**	**0:13**	**0:13**	**0:13**	**0:13**	**0:13**

Abb. 114: Auszug Fahrplan Horb – Pforzheim

Abb. 115 gibt eine Übersicht, welche BEMU-Infrastrukturszenarien auf den jeweiligen Linien mit dem RB- bzw. RE-Bemessungsfahrzeug machbar sind, Abb. 116 zeigt exemplarisch den SOC-Verlauf für die Linie Pforzheim – Horb (RE-Fahrzeug). Dieser weist die Machbarkeit eines BEMU-Betriebs nach, wenn zusätzlich zur vorhandenen Elektrifizierung Horb-Hochdorf noch das Gleis 103 in Pforzheim elektrifiziert wird.

Abb. 117 zeigt den Energiebedarf eines HEMU RB-Fahrzeugs für die Linie Pforzheim – Horb.

BEMU		Pforzheim ↕ Nagold *BEMU-RE*	Pforzheim ↕ Nagold *BEMU-RB*	Pforzheim ↕ Horb *BEMU-RE*	Pforzheim ↕ Horb *BEMU-RB*
Szenario 0	Elektrifizierung Gleis 103 im Bahnhof Pforzheim	🔴	🔴	🔴	🔴
Szenario 1a	Elektrifizierung Gleis 103 im Bahnhof Pforzheim & Brötzingen <> Tunnelmund	🔴	🔴	🟡	🔴
Szenario 1b	Elektrifizierung Gleis 103 im Bahnhof Pforzheim & Hochdorf <> Tunnelmund	🔴	🔴	🟡	🔴
Szenario 2	Kombination der Szenarien 1a + 1b	🔴	🔴	🟢	🔴
Szenario 3a	Elektrifizierung Gleis 103 im Bahnhof Pforzheim & Bahnhof Nagold	🟢	🟢	🟢	🟢
Szenario 3a Plus	Elektrifizierung Gleis 103 im Bahnhof Pforzheim & Elektrant im Bahnhof Nagold für den Kurzläufer (Pforzheim-Nagold)	🟢	🔴	🟢	🟢
Szenario 3b	Elektrifizierung Gleis 103 im Bahnhof Pforzheim & Bahnhof Nagold <> Nagold Stadtmitte	🟢	🟢	🟢	🟢
Szenario 4	Elektrifizierung Gleis 103 im Bahnhof Pforzheim & Bahnhof Nagold <> Hochdorf	🟢	🟢	🟢	🟢

🔴 Betrieb unmöglich
🟢 Betrieb möglich (Grenzbereich)
🟡 Betrieb unmöglich (Grenzbereich)
🟢 Betrieb möglich

Abb. 115: Übersicht Machbarkeit Infrastrukturszenarien

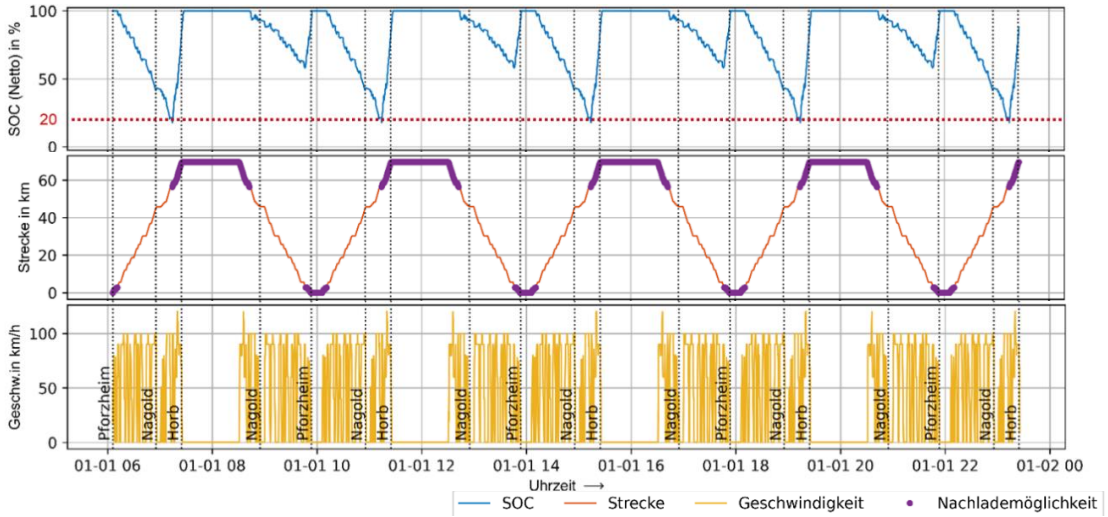


Abb. 116: SOC Pforzheim – Horb (BEMU-RE, Infrastrukturszenario 3a Plus)

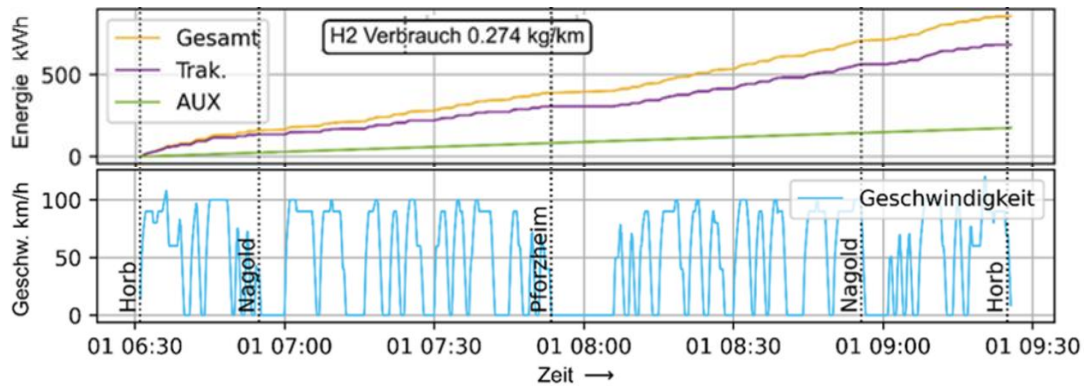


Abb. 117: Energiebedarf Pforzheim–Horb (HEMU-RB)

9.1.3 Linie Pforzheim-Nagold

Tabelle 9 fasst wesentliche Charakteristika für die Linie Pforzheim – Nagold zusammen.

Tabelle 9: Strecken- bzw. Liniencharakteristika der Linie Pforzheim – Nagold

Strecke	**Pforzheim-Nagold**
∑ Streckenlänge [km]	46
Nicht elektrifiziert [km]	Pforzheim-Nagold, 46
Zweigleisigkeit [km]	Pforzheim Hbf - Brötzingen Mitte, 3
Δ Höhenmeter [m]	Pforzheim>Nagold: 146; Nagold>Pforzheim: 0
Ø Geschwindigkeit [km/h]	49,3
Takt [min]	60
Zugpaare Werktags (Hin- / Rückfahrten)	19
Zugpaare Wochenende (Hin- / Rückfahrten)	17
Haltanzahl	13
Ø Haltabstand [km]	3,5
Streckenklasse	D4 (Pforzheim Hbf–Brötzingen Mitte), CE (Brötzingen Mitte-Nagold)

Abb. 118 zeigt den SOC-Verlauf für die Linie Pforzheim – Nagold (RB-Fahrzeug). Mit der zu schaffenden Lademöglichkeit in Nagold sowie der Elektrifizierung von Gleis 103 in Pforzheim (Infrastrukturszenario 3a/3a Plus) ist ein BEMU-Betrieb möglich.

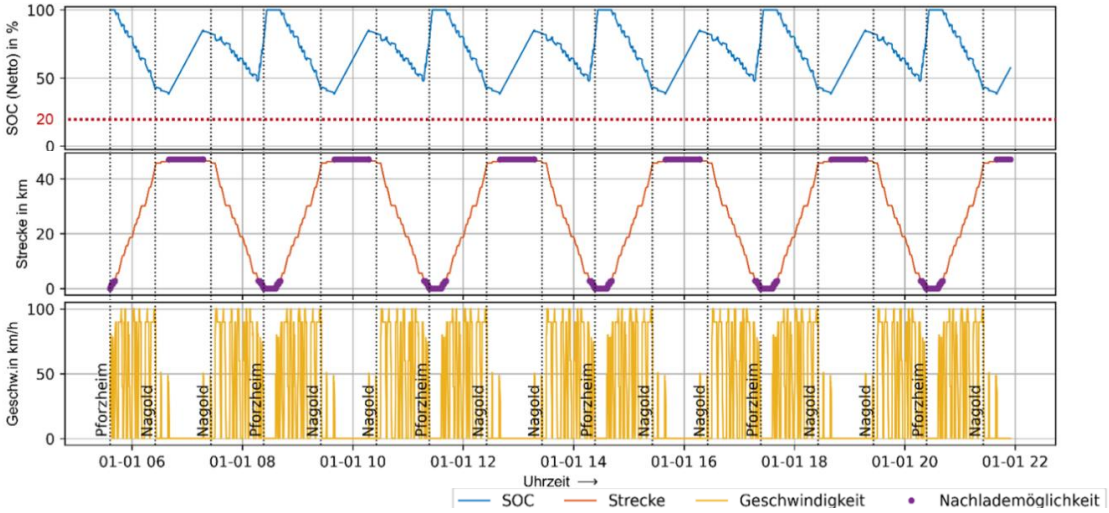


Abb. 118: SOC Pforzheim – Nagold (BEMU-RB, Infrastrukturszenario 3a)

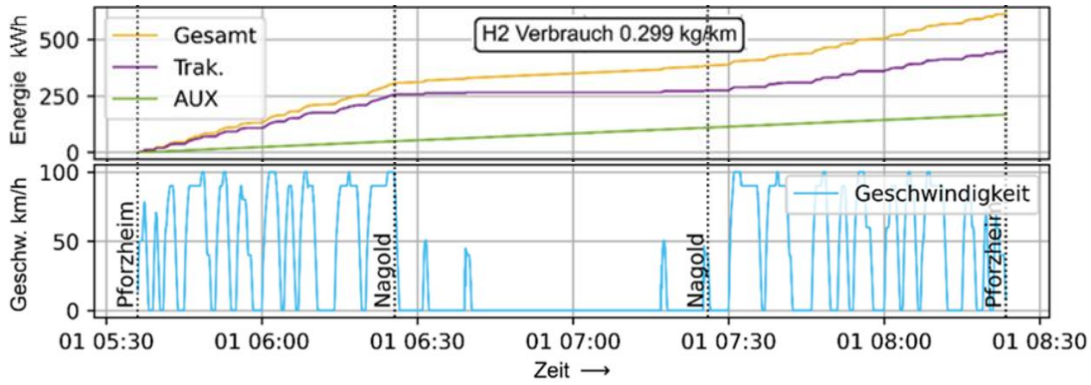


Abb. 119: Energiebedarf Pforzheim–Nagold (HEMU-RB)

Der Energiebedarf für ein HEMU RB-Fahrzeug ist in Abb. 119 dargestellt.

9.1.4 Betriebsstatistik Teilnetz

In Abb. 120 ist die Fahrleistung pro Fahrzeug an einem Werktag abgebildet. Fahrzeug eins bis drei beziehen sich auf die Linie Pforzheim – Nagold, Fahrzeuge vier bis sieben auf die Linie Pforzheim – Horb. Die zusätzliche Fahrleistung bei HEMU- Fahrzeugen ergibt sich aus Tankfahrten zur Wasserstofftankstelle in Horb.

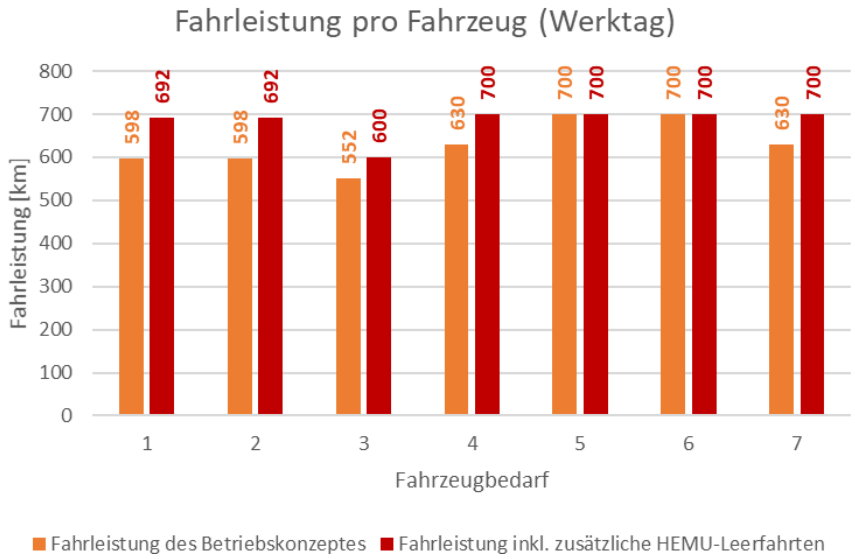


Abb. 120: Fahrleistung pro Fahrzeug der Nagoldtalbahn

9.1.5 Infrastruktur- und Fahrzeugbedarf Teilnetz

9.1.5.1 Infrastrukturbedarf EMU

Für eine Vollelektrifizierung der Nagoldtalbahn sind 55,6 km zusätzliche Oberleitung notwendig. Diese setzen sich aus 50,2 km eingleisige Strecke und 5,4 km zweigleisigen Abschnitten zusammen.

Zusätzliche Maßnahmen zur Anbindung an das Bahnstromnetz sind aufgrund des Lückenschlusses zwischen elektrifizierten Streckenabschnitten nicht erforderlich.

Die Elektrifizierungskomplexität (siehe 7.9.1) wird für die Gesamtstrecke als hoch eingeschätzt. Hierfür ist zum einen die hohe Tunneldichte (7,7 % Tunnelanteil an Gesamtlänge), zum anderen die enge Tallage mit zahlreichen querenden Straßenbrücken verantwortlich.

9.1.5.2 Infrastrukturbedarf BEMU

Für den BEMU-Betrieb ergibt sich insgesamt ein Bedarf von 1,61 km zusätzlicher Oberleitung. Davon entfallen 0,44 km auf eingleisige und 1,17 km auf zweigleisige Abschnitte. Die zu elektrifizierenden Abschnitte sind, entsprechend dem gewählten Infrastrukturszenario 3a, das Gleis 103 im Bahnhof Pforzheim und der Bahnhof Nagold.

Eine Oberleitungsinsel im Bereich Bahnhof Nagold erfordert darüber hinaus einen Anschluss an das übergeordnete Energieversorgungsnetz, deren Komplexität in dieser Phase nicht detaillierter betrachtet wurde. Diese Anbindung wäre verzichtbar bei einer Elektrifizierung des Teilabschnittes Nagold-Hochdorf (Infrastrukturszenario 4).

In der Kostenbetrachtung nicht vertieft wurde die Variante, im Bahnhof Nagold eine Lademöglichkeit nur für dort endende Kurzläufer vorzusehen (ggf. als Ladestation ausgeführt). Hierdurch wäre absehbar eine Kosteneinsparung und Planungsvereinfachung, auch im Hinblick auf die Anbindung an das Energieversorgungsnetz, möglich.

9.1.5.3 Infrastrukturbedarf HEMU

Für die HEMU-Betrachtung wurde die Anordnung einer Wasserstofftankstelle mit zugeordnetem Elektrolyseur (Stromversorgung über Bahnstrom) in Horb angenommen. Auf eine detailliertere Betrachtung im Hinblick auf sonstige, infrastrukturelle Anpassungen (Gleisplan, h.i. Tankgleis, siehe 4.2.2.4) wurde zunächst verzichtet.

9.1.5.4 Fahrzeugbedarfe

Entsprechend Kapitel 9.1.4 ergibt sich für den EMU- bzw. BEMU-Betrieb der beiden Linien ein Bedarf von sieben RB-Fahrzeugen. Mit einer ausreichenden Betriebs- und Instandhaltungsreserve erhöht sich der Bedarf auf insgesamt neun Fahrzeuge. Davon abweichend ergibt sich der Fahrzeugbedarf bei einem HEMU-Betrieb, für den inkl. Betriebs- und Instandhaltungsreserve 16 Fahrzeuge benötigt werden (davon zwei Fahrzeuge Reserve).

Der deutlich erhöht angenommene Fahrzeugbedarf der HEMU-Betrachtung resultiert aus den hohen Tagesfahrleistungen und der Notwendigkeit zusätzlicher Tankfahrten. Ein Tagesumlauf von 700 km bedingt bei einem angenommenen Wasserstoffverbrauch von ca. 0,3 kg/km einen Verbrauch von ca. 210 kg, was bei einer Tankreserve von 20 % (Annahme) einen Tankinhalt von ca. 260 kg erfordert. Dieser Tankinhalt wird vom iLint-Serienfahrzeug gerade erreicht, andere Hersteller gehen allerdings von geringeren Tankinhalten und Reichweiten aus (siehe 4.2.2.2). Der Gutachter sieht hier die Machbarkeit kompletter Tagesumläufe mit einer Tankfüllung zumindest als kritisch an und hat daher einen erhöhten Fahrzeugbedarf angenommen[88].

9.1.6 Ergänzende Betrachtungen zum Teilnetz

9.1.6.1 Netzwirkung / Durchbindungsaspekte

Als weitgehend eingleisige Strecke mit eingeschränkten (kurzen) Kreuzungsbahnhöfen ist die Nutzbarkeit der Nagoldtalbahn für Fernverkehrszwecke eingeschränkt. Eine Umfahrung des Großraums Stuttgart von Karlsruhe aus in Richtung Süden würde zum einen verkehrlich wenig Sinn machen, zum anderen müsste dazu in Pforzheim die Fahrtrichtung gewechselt werden[89]. Dieser Sachverhalt würde sich auch bei einer Vollelektrifizierung nicht anders darstellen.

Aus Sicht der Bahnstromversorgung würde eine Vollelektrifizierung der Nagoldtalbahn einen Lückenschluss im elektrifizierten Netz bedeuten und durchaus Sinn machen. Dies umso mehr, wenn auch die Strecke Calw - Weil-der-Stadt elektrifiziert würde und damit ein Zusammenwirken der DB-Unterwerke/Schaltposten in Mühlacker / Vaihingen-Enz, Leonberg und Eutingen möglich wäre.

[88] In einer Sensitivitätsbetrachtung wurde nachgewiesen, dass die Technologieempfehlung auch bei Ansatz gleichen Fahrzeugbedarfs für EMU, BEMU und HEMU nicht anders ausfallen würde (siehe 10.1.6).
[89] Nur bei Direktfahrt über Pforzheim, nicht bei Führung über Bruchsal-Bretten-Mühlacker-Pforzheim.

Im Bahnhof Calw endet auch die reaktivierte Strecke von Weil der Stadt nach Calw (Hermann-Hesse-Bahn). Eine physische Verbindung mit der Nagoldtalbahn besteht derzeit nicht und ist aktuell auch nicht vorgesehen, was u.a. für die Werkstattzuführung der Fahrzeuge nach Offenburg problematisch erscheint (siehe 6.1.2). Mit Schaffung einer Gleisverbindung in Calw würden sich grundsätzlich auch neue Möglichkeiten („Netzwirkungen“, d.h. eine Erhöhung der Flexibilität bei der Gestaltung künftiger Verkehrskonzepte) bieten[90].

9.1.6.2 Güterverkehrsaspekte

Wie auf zahlreichen Nebenstrecken hat der regionale Güterverkehr auch auf der Nagoldtalbahn seine Bedeutung in den vergangenen Jahren verloren. Bahnhöfe wie Brötzingen oder Weißenstein, die in der Vergangenheit umfangreiche Gleisanlagen aufwiesen, wurden zurückgebaut.

Nagold ist derzeit der einzige Bahnhof, der noch Güterverkehr aufweist. Hier betreiben zwei Unternehmen Anschlussgleise und erhalten Montag-Freitag eine Bedienfahrt von Böblingen über Hochdorf[91]. Siehe auch DB Cargo (Verzeichnis der Bestimmungsstellen für Güterwagen - VBG - 715.1001, 2021).

Der dichte Takt des SPNV im Abschnitt Pforzheim-Nagold (30min-Takt) und die weitgehende Eingleisigkeit mit kurzen Kreuzungsbahnhöfen lassen die Nutzung dieses Abschnittes für den Güterverkehr nur sehr eingeschränkt zu, insbesondere nicht für Umleitungsverkehre im Güterfernverkehr. Hinzu kommen Lichtraumeinschränkungen im Bereich der Tunnelbauwerke.

9.1.6.3 Zeitschiene / Sonstige externe Einflüsse

Die Sanierung der Tunnelbauwerke auf der Nagoldtalbahn, die eine Voraussetzung für jegliche Elektrifizierungsüberlegungen darstellt, steht nach Aussage DB Netz erst Anfang der 2030er Jahre an. Weder abschließender Umfang noch Kosten dieser Maßnahmen sind aktuell beurteilbar, sonstige Anpassungsmaßnahmen, die z.B. im Hinblick auf Eisenbahnüberführungen bzw. querende Straßenbrücken erforderlich werden können, würden zusätzlich die Komplexität einer Vollelektrifizierung erhöhen und diese verzögern. Die Schaffung einer Oberleitungsinsel bzw. Ladestation in Nagold (siehe 9.1.5.2) erfordert bei realistischer Betrachtung zwar ebenfalls einen Zeitbedarf von mehreren Jahren, die Umsetzung, umso mehr, wenn nur eine Ladestation für in Nagold endende Fahrten geschaffen wird, sollte sich aber deutlich schneller realisieren lassen.

Die Bewaldungssituation und die Enge der Tallage zeigt für die Nagoldtalbahn, anders als für andere betrachteten Strecken, tendenziell eine erhöhte Sturmschaden-Problematik, sie war in der Vergangenheit auch mehrfach bei Unwetterereignissen betroffen. Eine nur punktuelle Elektrifizierung in einem vorhandenen Bahnhofsbereich mit gegebenem, größerem Abstand zur Waldgrenze bietet in dieser Hinsicht durchaus Vorteile.

9.2 Teilnetz 2 „Donautalbahn Plus“ (TCO 2)

Folgende Strecken bilden das Rückgrat dieses Teilnetzes:

[90] Zum Beispiel für die in der Vergangenheit bereits stark diskutierte Anbindung aus dem Nagoldtal in Richtung Stuttgart.

[91] Damit befährt dieser Güterzug in Dieseltraktion eine Gesamtstrecke von 46 km, von denen 36 km elektrifiziert sind (!). Es handelt sich hier um einen typischen Fall, für den die Anwendung einer Hybridlokomotive Sinn machen könnte (siehe 5.6).

- Ulm-Sigmaringen-Tuttlingen
- Aulendorf-Sigmaringen

Abb. 121 gibt einen Überblick der Strecken bzw. dem Betriebskonzept zugrundeliegenden Linien. Eine Besonderheit dieses Teilnetzes ist der gemeinsame Streckenabschnitt Herbertingen-Sigmaringen.

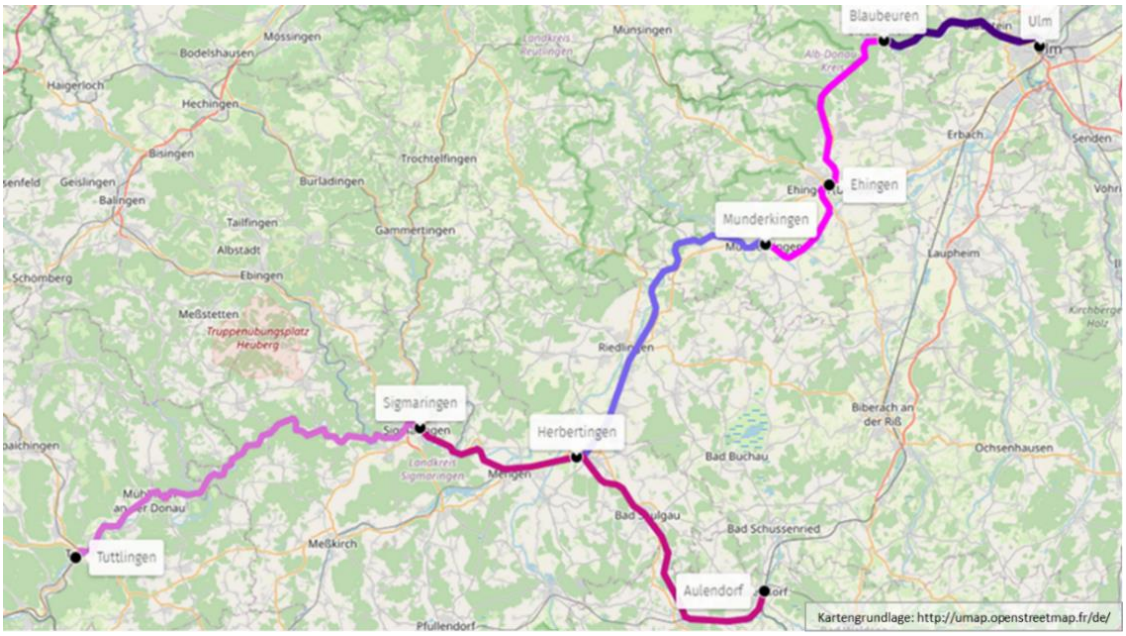


Abb. 121: Donautalbahn und Strecke Aulendorf-Sigmaringen

Die Abbildungen 122 und 123 zeigen die Höhenprofile für die Strecken Ulm – Tuttlingen und Aulendorf – Sigmaringen. Für die erstgenannte Strecke wird deutlich, dass die Fahrtrichtung von Ulm in Richtung Tuttlingen die energetisch kritischere ist, Aulendorf-Sigmaringen ist im Vergleich topografisch anspruchslos.

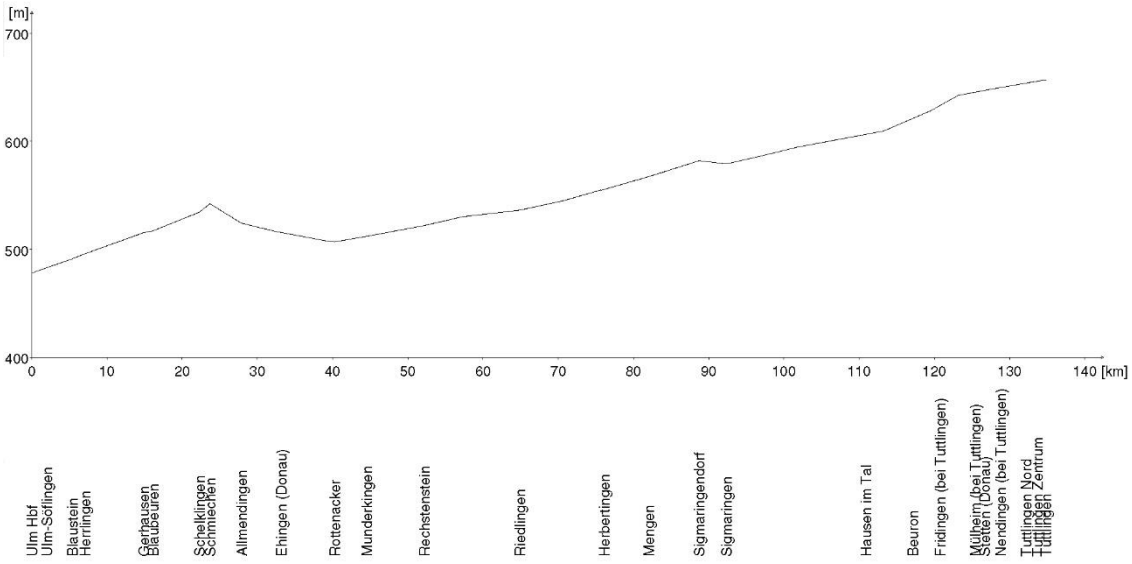


Abb. 122: Höhenprofil von Ulm nach Tuttlingen

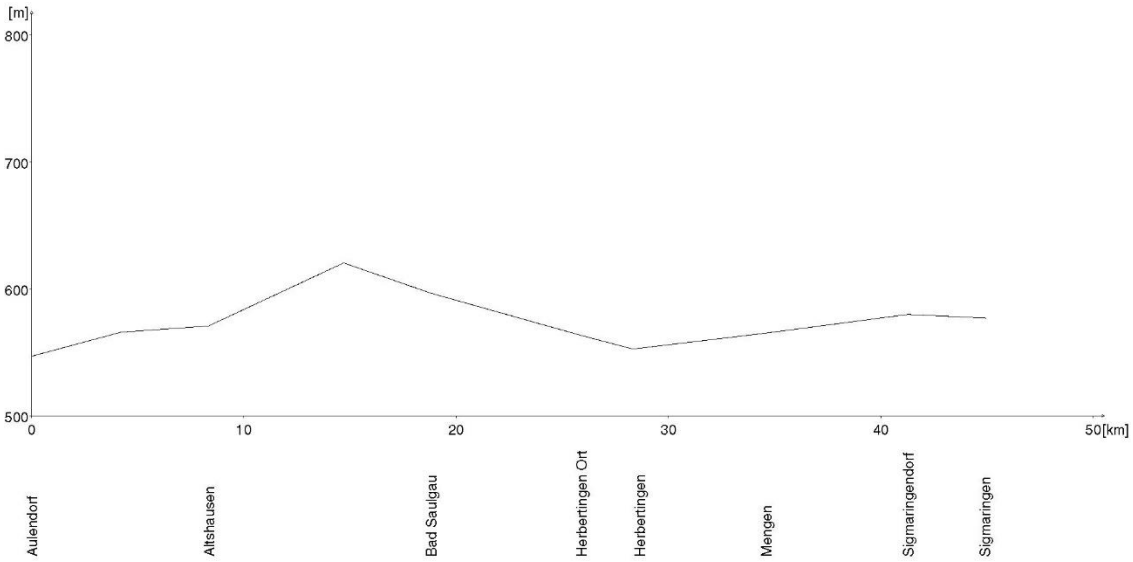


Abb. 123: Höhenprofil von Aulendorf nach Sigmaringen

Die vorgenannten Strecken sind Gegenstand des Technologievergleichs und der wirtschaftlichen Bewertung (TCO). Entsprechend den Festlegungen in Kapitel 7.6. werden für dieses Teilnetz alle Technologiealternativen betrachtet (EMU, BEMU und HEMU).

Ohne Bestandteil der TCO-Betrachtung zu sein, wurden weitere Strecken mit Zuordnung zu diesem Teilnetz untersucht (siehe 9.2.6). Hier wird davon ausgegangen, dass die „Hauptstrecken“ des Teilnetzes maßgeblich für die Technologieempfehlung sind und sonstige, räumlich zugeordnete Strecken diese Empfehlung übernehmen.

9.2.1 Strecke Ulm-Herbertingen-Sigmaringen-Tuttlingen

Für den SPNV-Betrieb wird zwischen folgenden Linienwegen unterschieden:

- Ulm <> Blaubeuren
- Ulm <> Munderkingen
- Ulm <> Tuttlingen
- Herbertingen <> Ehingen

9.2.1.1 Infrastrukturszenarien

Die iterative Herangehensweise beinhaltete eine Zusammenführung der Infrastrukturszenarien für die Teilstrecken Ulm-Tuttlingen und Aulendorf-Sigmaringen. Der Mindestinfrastrukturbedarf letzterer Strecke (siehe 9.2.2) ging dann in die Betrachtung der Donautalbahn als gesetzt ein. Die Abbildungen 124 und 125 zeigen das Ausgangsinfrastrukturszenario 0 und das BEMU-Infrastrukturszenario 9a, das für die weitere Betrachtung gewählt wurde.

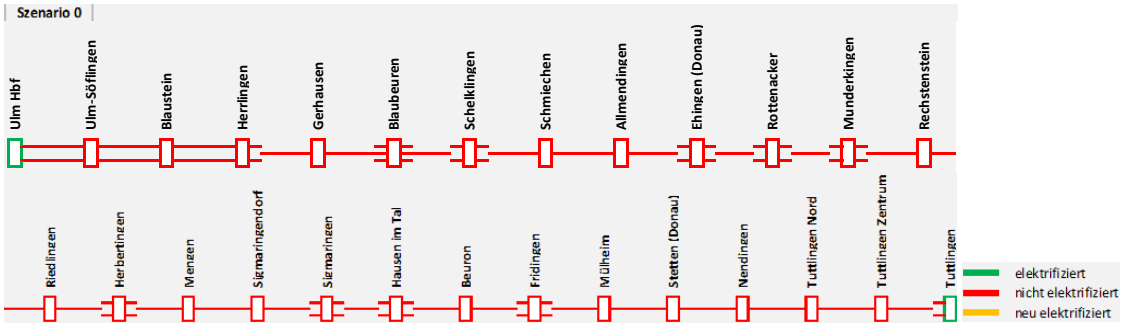


Abb. 124: Infrastrukturszenario 0 Ulm – Tuttlingen

Abb. 125: Infrastrukturszenario 9a Ulm – Tuttlingen

Tabelle 10: BEMU-Infrastrukturszenarien Ulm-Herbertingen-Sigmaringen-Tuttlingen

Szenario 0	Bestandselektrifizierung Bahnhof Ulm und Tuttlingen
Szenario 1a	Oberleitungsverlängerung von Ulm bis Herrlingen
Szenario 1b	Oberleitungsverlängerung von Ulm bis Blaubeuren
Szenario 2a	Elektrifizierung von Bahnhof Blaubeuren
Szenario 2b	Elektrifizierung von Blaubeuren bis Schelklingen
Szenario 3a	Elektrifizierung von Bahnhof Munderkingen
Szenario 3b	Elektrifizierung von Rottenacker bis Munderkingen
Szenario 3c	Elektrifizierung von Ehingen (Donau) bis Munderkingen
Szenario 3d	Elektrifizierung von Schelklingen bis Munderkingen
Szenario 4a	Elektrifizierung von Bahnhof Sigmaringen
Szenario 4b	Elektrifizierung von Sigmaringendorf bis Sigmaringen
Szenario 4c	Elektrifizierung von Sigmaringen bis Inzigkofen
Szenario 4d	Elektrifizierung von Herbertingen bis Mengen
Szenario 4e	Elektrifizierung von Herbertingen bis Sigmaringen
Szenario 5a	Kombination der Szenarien 3c & 4a
Szenario 5b	Elektrifizierung von Fridingen bis Tuttlingen
Szenario 5c	Kombination der Szenarien 2b & 4a
Szenario 6a	Kombination der Szenarien 1b & 4b
Szenario 6b	Kombination der Szenarien 1b & 5b
Szenario 6c	Kombination der Szenarien 3d & 4d
Szenario 7a	Kombination der Szenarien 1b, 2b & 3d
Szenario 7b	Kombination der Szenarien 1b, 2b, 3d & 4c
Szenario 7c	Kombination der Szenarien 1b, 2b, 3d & 5b
Szenario 7d	Kombination der Szenarien 1b, 2b, 3d, 4c & 5b
Szenario 8a	Kombination der Szenarien 3d, 4b & 4c
Szenario 8b	Kombination der Szenarien 3d, 4c & 4d
Szenario 8c	Kombination der Szenarien 3d, 4c & 5b
Szenario 9a	Kombination der Szenarien 3d, 4b & 4d
Szenario 9b	Kombination der Szenarien 3d, 4a, 4d & 5b
Szenario 9c	Kombination der Szenarien 3d, 4b, 4d & 5b
Szenario 9d	Kombination der Szenarien 2a, 4b, 4d & 5b

Die Prüfung der Machbarkeit für den BEMU-Betrieb erfolgte anhand von insgesamt 30 Infrastrukturszenarien (siehe 7.8.2 bzw. obenstehende Tabelle 10).

Die Abbildungen 126 und 127 zeigen für die Linien der Strecke Ulm – Tuttlingen die Fahrpläne, bzw. Ausschnitte davon, mit Fahr- und Wendezeiten.

Die Fahrpläne der Kurzläufer Ulm – Blaubeuren, Ulm – Munderkingen und Herbertingen – Ehingen sind in den jeweiligen Darstellungen enthalten.

Gerade der Kurzläufer Ulm-Blaubeuren weist ein sehr ungünstiges Verhältnis zwischen Fahrzeit (17-18 min) und Wendezeit (40-43 min) auf, was bei der Betrachtung kilometerspezifischer Verbräuche zu beachten ist (siehe 9.2.1.2). Hier wirken die Hilfsenergieverbräuche während der Wendezeiten in besonders starkem Maße negativ.

km	Zugtyp	RE	RB	RB	RB	RE	RB	RB	RB	RE	RB	RB	RB
	Zugnummer	550000	99000	560000	560500	550002	99002	560002	560502	550004	99004	560004	560504
0	Ulm Hbf	5:05		5:27	5:52	6:05		6:27	6:52	7:05		7:27	7:52
2	Ulm-Söflingen	I		5:30	5:55	I		6:30	6:55	|		7:30	7:55
6	Blaustein	I		5:34	5:59	I		6:34	6:59	|		7:34	7:59
7	Herrlingen	I		5:36	6:01	I		6:36	7:01	|		7:36	8:01
7	Herrlingen	I		5:36	6:03	I		6:36	7:03	|		7:36	8:03
15	Gerhausen	I		5:42	6:09	I		6:42	7:09	|		7:42	8:09
16	Blaubeuren	5:16		5:44	6:11	6:16		6:44	7:11	7:16		7:44	8:11
23	Schelklingen	5:21		5:49		6:21		6:49		7:21		7:49	
23	Schelklingen	5:23		5:56		6:23		6:56		7:23		7:56	
24	Schmiechen	I		5:59		I		6:59		|		7:59	
28	Allmendingen	I		6:03		I		7:03		|		8:03	
33	Ehingen (Donau)	5:29		6:06		6:29		7:06		7:29		8:06	
33	Ehingen (Donau)	5:33	5:36	6:07		6:33	6:36	7:07		7:33	7:36	8:07	
41	Rottenacker	I	5:45	6:13		I	6:45	7:13		|	7:45	8:13	
41	Rottenacker	I	5:45	6:17		I	6:45	7:17		|	7:45	8:17	
45	Munderkingen	5:41	5:49	6:20		6:41	6:49	7:20		7:41	7:49	8:20	
52	Rechtenstein	I	6:01			I	7:01			|	8:01		
65	Riedlingen	5:54	6:11			6:54	7:11			7:54	8:11		
76	Herbertingen	6:03	6:21			7:03	7:21			8:03	8:21		
82	Mengen	6:09				7:09				8:09			
89	Sigmaringendorf Hp	I				I				|			
93	Sigmaringen	6:16				7:16				8:16			
93	Sigmaringen	6:17				7:17				8:17			
111	Hausen i Tal	6:32				7:32				8:32			
111	Hausen i Tal	6:36				7:36				8:36			
118	Beuron	6:42				7:42				8:42			
121	Fridingen (b Tuttlingen)	6:46				7:46				8:46			
126	Mülheim (b Tuttlingen)	I				I				|			
127	Stetten (Donau)	I				I				|			
129	Nendingen (b Tuttlingen)	I				I				|			
133	Tuttlingen Nord	I				I				|			
134	Tuttlingen Zentrum	I				I				|			
135	Tuttlingen	6:56				7:56				8:56			
	Fahrzeit	1:51	0:45	0:53	0:18	1:51	0:45	0:53	0:18	1:51	0:45	0:53	0:18
	Connexion	550009	99003	560503	560003	550011	560505	560505	560005	550013	560507	560507	560007
	nächste Abfahrt	8:05	6:39	6:55	6:51	9:05	7:39	7:55	7:51	10:05	8:39	8:55	8:51
	Wendezeit	1:08	0:18	0:34	0:40	1:08	0:18	0:34	0:40	1:08	0:18	0:34	0:40

Abb. 126: Auszug Fahrplan Ulm – Tuttlingen

Zugtyp	RE	RB	RB	RB	RE	RB	RB	RB	RE	RB	RB	RB
Zugnummer	550001	560001	560501	99001	550003	560003	560503	99003	550005	560005	560505	99005
km												
0 Tuttlingen	4:05				5:05				6:05			
1 Tuttlingen Zentrum	I				I				I			
2 Tuttlingen Nord	I				I				I			
6 Nendingen (b Tuttlingen)	I				I				I			
8 Stetten (Donau)	I				I				I			
9 Mülheim (b Tuttlingen)	I				I				I			
14 Fridingen (b Tuttlingen)	4:17				5:17				6:17			
17 Beuron	4:21				5:21				6:21			
24 Hausen i Tal	4:27				5:27				6:27			
24 Hausen i Tal	4:31				5:31				6:31			
42 Sigmaringen	4:46				5:46				6:46			
42 Sigmaringen	4:48				5:48				6:48			
46 Sigmaringendorf Hp	I				I				I			
53 Mengen	4:56				5:56				6:56			
59 Herbertingen	5:01			5:39	6:01			6:39	7:01			7:39
70 Riedlingen	5:09			5:51	6:09			6:51	7:09			7:51
83 Rechtenstein	I			6:01	I			7:01	I			8:01
90 Munderkingen	5:22		5:55	6:10	6:22		6:55	7:10	7:22		7:55	8:10
94 Rottenacker	I		5:58	6:14	I		6:58	7:14	I		7:58	8:14
94 Rottenacker	I		5:59	6:14	I		6:59	7:14	I		7:59	8:14
102 Ehingen (Donau)	5:30		6:04	6:22	6:30		7:04	7:22	7:30		8:04	8:22
102 Ehingen (Donau)	5:31		6:05		6:31		7:05		7:31		8:05	
107 Allmendingen	I		6:09		I		7:09		I		8:09	
111 Schmiechen	I		6:13		I		7:13		I		8:13	
112 Schelklingen	5:38		6:15		6:38		7:15		7:38		8:15	
112 Schelklingen	5:41		6:20		6:41		7:20		7:41		8:20	
119 Blaubeuren	5:46	5:51	6:29		6:46	6:51	7:29		7:46	7:51	8:29	
120 Gerhausen	I	5:53	6:31		I	6:53	7:31		I	7:53	8:31	
128 Herrlingen	I	5:58	6:36		I	6:58	7:36		I	7:58	8:36	
128 Herrlingen	I	5:59	6:37		I	6:59	7:37		I	7:59	8:37	
129 Blaustein	I	6:02	6:40		I	7:02	7:40		I	8:02	8:40	
133 Ulm-Söflingen	I	6:05	6:43		I	7:05	7:43		I	8:05	8:43	
135 Ulm Hbf	5:57	6:08	6:46		6:57	7:08	7:46		7:57	8:08	8:46	
Fahrzeit	1:52	0:17	0:51	0:43	1:52	0:17	0:51	0:43	1:52	0:17	0:51	0:43
Connexion	550002	560502	560004	99002	550004	560504	560006	99004	550006	560506	560008	99006
nächste Abfahrt	6:05	6:52	7:27	6:36	7:05	7:52	8:27	7:36	8:05	8:52	9:27	8:36
Wendezeit	0:07	0:43	0:40	0:14	0:07	0:43	0:40	0:14	0:07	0:43	0:40	0:14

Abb. 127: Auszug Fahrplan Tuttlingen – Ulm

9.2.1.2 Linie Ulm-Blaubeuren

In Tabelle 11 sind die wesentlichen Strecken- bzw. Liniencharakteristika aufgeführt.

Tabelle 11: Strecken- bzw. Liniencharakteristika der Linie Ulm - Blaubeuren

Strecke	**Ulm-Blaubeuren**
Streckenlänge gesamt [km]	16
Nicht elektrifiziert [km]	Ulm-Blaubeuren, 16
Zweigleisigkeit [km]	Ulm Hbf-Herrlingen, 7
Δ Höhenmeter [m]	Ulm>Blaubeuren: 40; Blaubeuren>Ulm: 0
Ø Geschwindigkeit [km/h]	56,5
Takt [min]	60
Zugpaare Werktags (Hin- / Rückfahrten)	19
Zugpaare Wochenende (Hin- / Rückfahrten)	17
Haltanzahl	6
Ø Haltabstand [km]	2,7
Streckenklasse	D4

Für einen BEMU-Betrieb der Linie Ulm – Blaubeuren ist bereits die Bestandselektrifizierung ausreichend. Der SOC-Verlauf (RB-Fahrzeug) ist in Abb. 128 dargestellt, der Energiebedarf des HEMU RB-Fahrzeugs in Abb. 129. Der im Vergleich ungewöhnlich hohe Wasserstoffverbrauch resultiert aus dem hohen Wendezeitanteil, während dem weiterhin Hilfsenergie verbraucht wird, gleichzeitig aber die gefahrene Strecke Null ist.

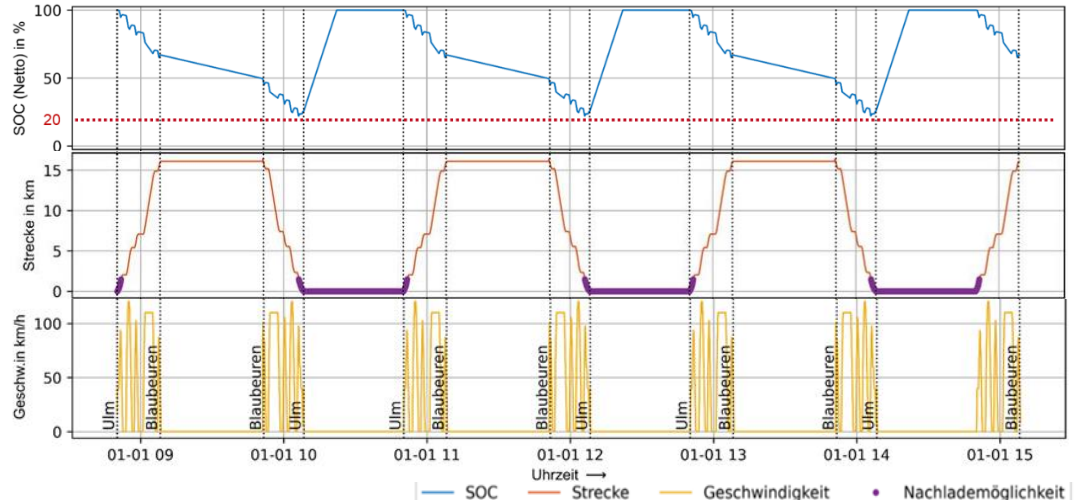


Abb. 128: SOC-Verlauf Ulm – Blaubeuren (BEMU RB, Infrastrukturszenario 0 bzw. 9a)

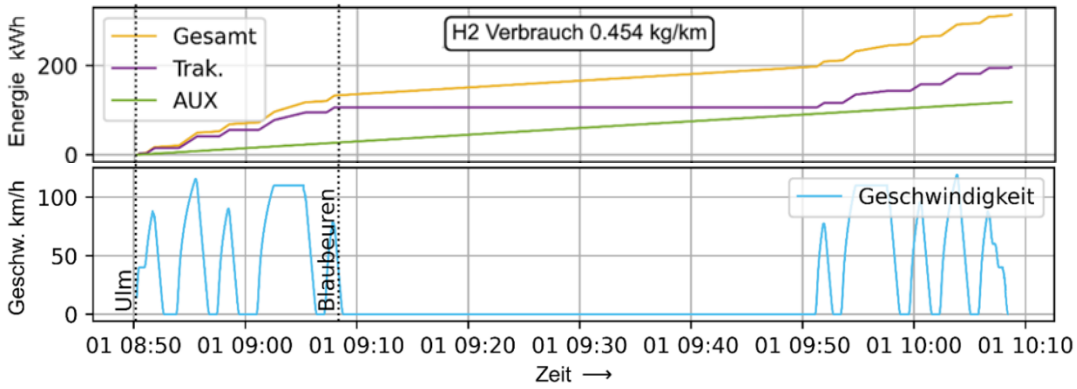


Abb. 129: Energiebedarf Ulm–Blaubeuren (HEMU-RB)

9.2.1.3 Linie Ulm-Munderkingen

In Tabelle 12 sind die wesentlichen Charakteristika der Strecke/Linie aufgeführt.

Tabelle 12: Strecken- bzw. Liniencharakteristika der Linie Ulm - Munderkingen

Strecke	**Ulm-Munderkingen**
∑ Streckenlänge [km]	45
Nicht elektrifiziert [km]	Ulm-Munderkingen, 45
Zweigleisigkeit [km]	Ulm Hbf – Herrlingen, 7
Δ Höhenmeter [m]	Ulm>Munderkingen: 70; Munderkingen>Ulm: 42
Ø Geschwindigkeit [km/h]	52,9
Takt [min]	60
Zugpaare Werktags (Hin- / Rückfahrten)	19
Zugpaare Wochenende (Hin- / Rückfahrten)	17
Haltanzahl	12
Ø Haltabstand [km]	3,7
Streckenklasse	D4

In Abb. 130 ist der SOC-Verlauf der Linie Ulm – Munderkingen (RB-Fahrzeug) im Infrastrukturszenario 9a, in Abb. 131 der Energiebedarf für den HEMU-Betrieb dargestellt.

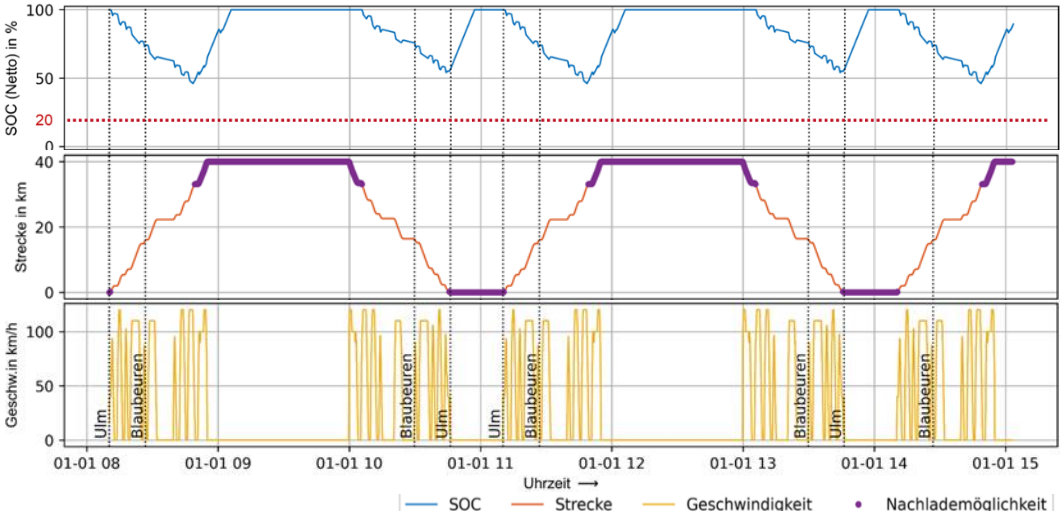


Abb. 130: SOC-Verlauf Ulm – Munderkingen (BEMU RB, Infrastrukturszenario 9a)

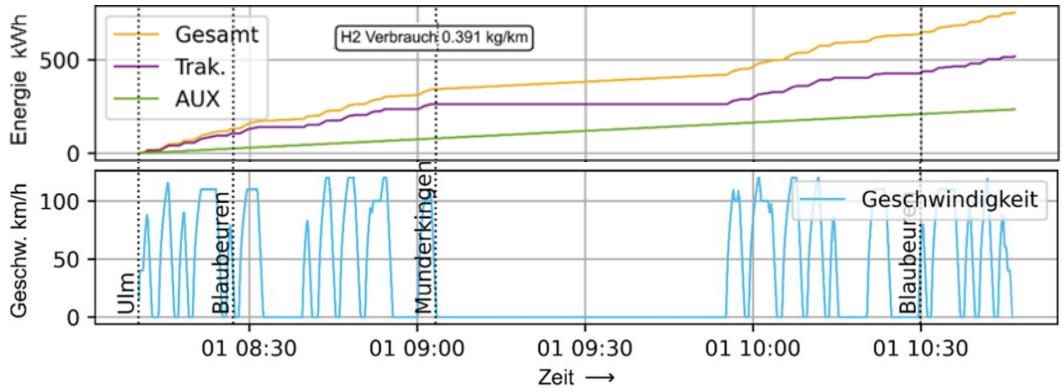


Abb. 131: Energiebedarf Ulm–Munderkingen (HEMU-RB)

9.2.1.4 Linie Ulm-Tuttlingen

In Tabelle 13 sind die wesentlichen Strecken- bzw. Liniencharakteristika aufgeführt.

Tabelle 13: Strecken- bzw. Liniencharakteristika der Linie Ulm - Tuttlingen

Strecke	**Ulm-Tuttlingen**
∑Streckenlänge [km]	135
Nicht elektrifiziert [km]	Ulm-Herbertingen; Sigmaringen-Tuttlingen, 118
Zweigleisigkeit [km]	Ulm Hbf – Herrlingen, 7
Δ Höhenmeter [m]	Ulm>Tuttlingen: 213; Tuttlingen>Ulm: 45
Ø Geschwindigkeit [km/h]	72,3
Takt [min]	60
Zugpaare Werktags (Hin- / Rückfahrten)	19
Zugpaare Wochenende (Hin- / Rückfahrten)	17
Haltanzahl	27
Ø Haltabstand [km]	5,0
Streckenklasse	D4

Abb. 132 zeigt den SOC-Verlauf für die Linie Ulm – Tuttlingen (RE-Fahrzeug) im Infrastrukturszenario 9a, das einen BEMU-Betrieb ermöglicht.

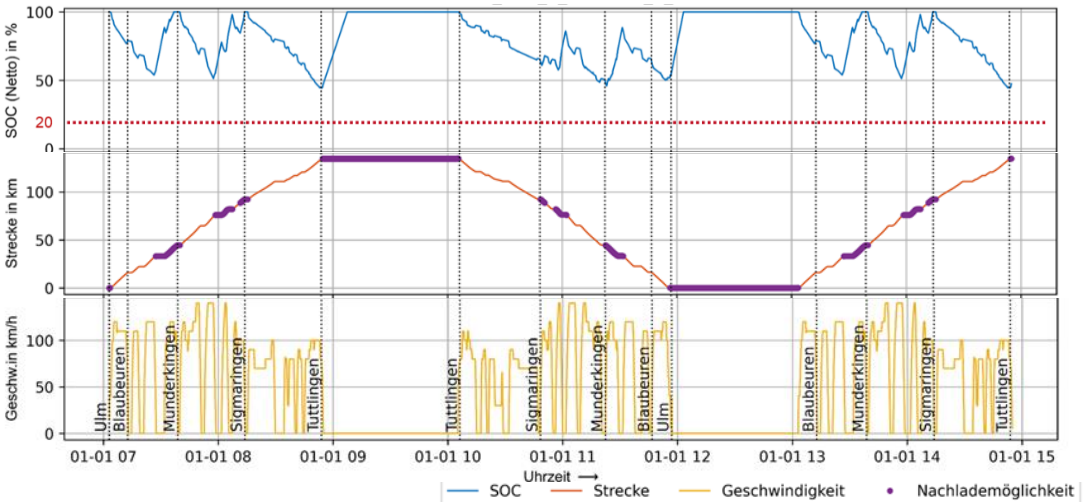


Abb. 132: SOC Ulm–Tuttlingen (BEMU-RE, Infrastrukturszenario 9a)

BEMU		Ulm ↕ Tuttlingen *BEMU-RE*	Ulm ↕ Munderkingen *BEMU-RB*	Ulm ↕ Blaubeuren *BEMU-RB*
Szenario 0	Bestandselektrifizierung Bahnhof Ulm und Tuttlingen	🔴	🔴	🟢
Szenario 6a	Kombination der Szenarien 1b & 4b	🔴	🟡	🟢
Szenario 6b	Kombination der Szenarien 1b & 5b	🔴	🟡	🟢
Szenario 6c	Kombination der Szenarien 3d & 4d	🟡	🟢	🟢
Szenario 7a	Kombination der Szenarien 1b, 2b & 3d	🔴	🟢	🟢
Szenario 7b	Kombination der Szenarien 1b, 2b, 3d & 4c	🟢	🟢	🟢
Szenario 7c	Kombination der Szenarien 1b, 2b, 3d & 5b	🟡	🟢	🟢
Szenario 7d	Kombination der Szenarien 1b, 2b, 3d, 4c & 5b	🟢	🟢	🟢
Szenario 8a	Kombination der Szenarien 3d, 4b & 4c	🟢	🟢	🟢
Szenario 8b	Kombination der Szenarien 3d, 4c & 4d	🟢	🟢	🟢
Szenario 8c	Kombination der Szenarien 3d, 4c & 5b	🟢	🟢	🟢
Szenario 9a	Kombination der Szenarien 3d, 4b & 4d	🟢	🟢	🟢
Szenario 9b	Kombination der Szenarien 3d, 4a, 4d & 5b	🟢	🟢	🟢
Szenario 9c	Kombination der Szenarien 3d, 4b, 4d & 5b	🟢	🟢	🟢
Szenario 9d	Kombination der Szenarien 2a, 4b, 4d & 5b	🟢	🟢	🟢

🔴 Betrieb unmöglich
🟢 Betrieb möglich (Grenzbereich)
🟡 Betrieb unmöglich (Grenzbereich)
🟢 Betrieb möglich

Abb. 133: Übersicht Machbarkeit Infrastrukturszenarien

Abb. 133 gibt eine Übersicht, welche kombinierten Infrastrukturszenarien (siehe 9.2.1.1) auf den Linien Ulm – Tuttlingen, Ulm – Munderkingen und Ulm – Blaubeuren machbar sind (die Zusatzbetrachtung Herbertingen – Ehingen wurde hier nicht erfasst).

Der Energiebedarf für den HEMU-Betrieb (RE-Fahrzeug) ist in Abb. 134 dargestellt.

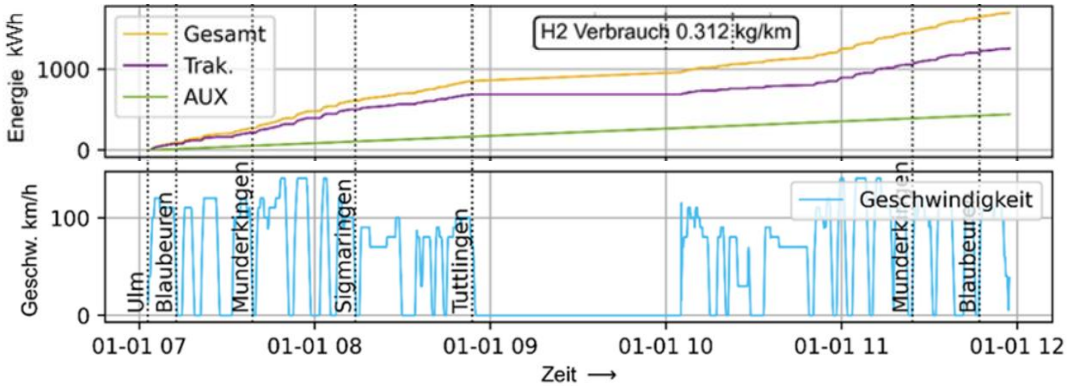


Abb. 134: Energieverbrauch Ulm–Tuttlingen (HEMU-RE)

9.2.1.5 Linie Herbertingen-Ehingen

In Tabelle 14 sind die wesentlichen Strecken- bzw. Liniencharakteristika aufgeführt.

Tabelle 14: Strecken- bzw. Liniencharakteristika der Linie Herbertingen – Ehingen

Strecke	**Herbertingen-Ehingen**
∑ Streckenlänge [km]	43
Nicht elektrifiziert [km]	Herbertingen-Ehingen, 43
Zweigleisigkeit [km]	Durchgehend eingleisig
Δ Höhenmeter [m]	Herbertingen>Ehingen: 9; Ehingen>Herbertingen: 47
Ø Geschwindigkeit [km/h]	62,9
Takt [min]	60
Zugpaare Werktags (Hin- / Rückfahrten)	19
Zugpaare Wochenende (Hin- / Rückfahrten)	17
Haltanzahl	6
Ø Haltabstand [km]	7,2
Streckenklasse	D4

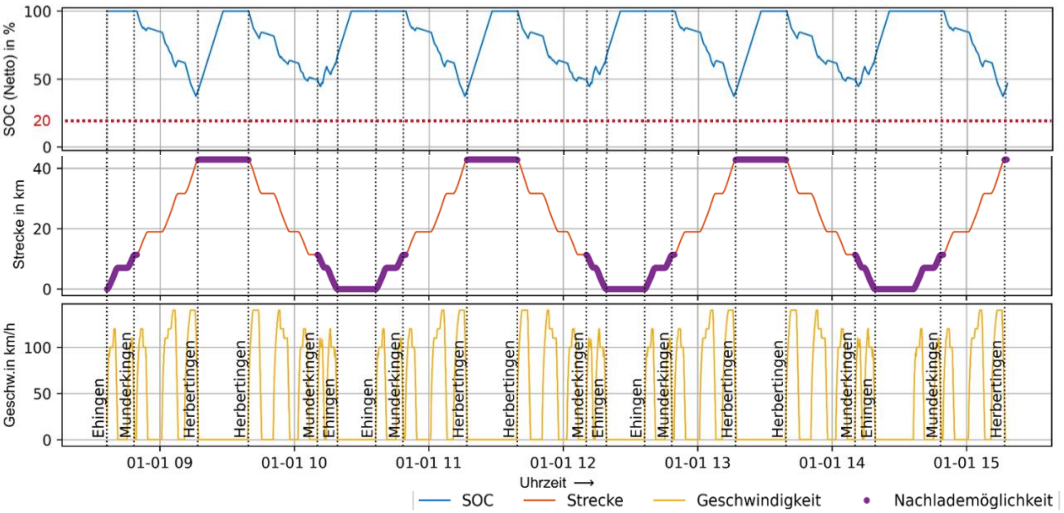


Abb. 135: SOC Ehingen–Herbertingen (BEMU RB, Infrastrukturszenario 9a)

Der SOC-Verlauf für den Betrieb der Linie Ehingen – Herbertingen mit einem BEMU RB-Fahrzeug im Infrastrukturszenario 9a ist vorstehend in Abb. 135, der Energiebedarf für den HEMU-Betrieb mit einem RB-Fahrzeug in Abb. 136 dargestellt.

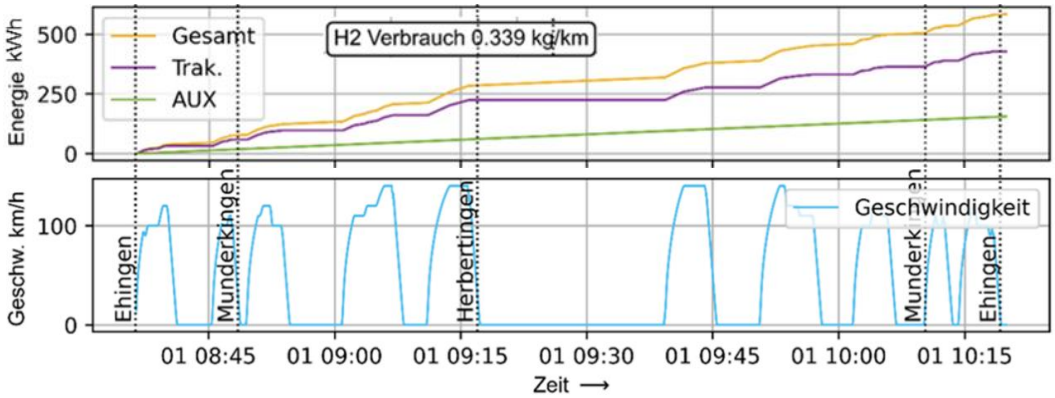


Abb. 136: Energiebedarf Herbertingen – Ehingen (HEMU RE)

9.2.2 Strecke Aulendorf – Sigmaringen

Der SPNV-Betrieb wird auf folgendem Linienweg betrachtet:

- Aulendorf <> Sigmaringen

9.2.2.1 Infrastrukturszenarien

Die Prüfung der Machbarkeit für den BEMU-Betrieb erfolgte wiederum anhand von Infrastrukturszenarien (siehe 7.8.2). Neben dem Infrastrukturszenario mit der Bestandselektrifizierung wurden zwei weitere Infrastrukturszenarien betrachtet. Die neu zu elektrifizierende Strecke des gewählten Infrastrukturszenarios bezieht sich auf das Infrastrukturszenario 9a der Strecke Ulm-Herbertingen-Sigmaringen-Tuttlingen.

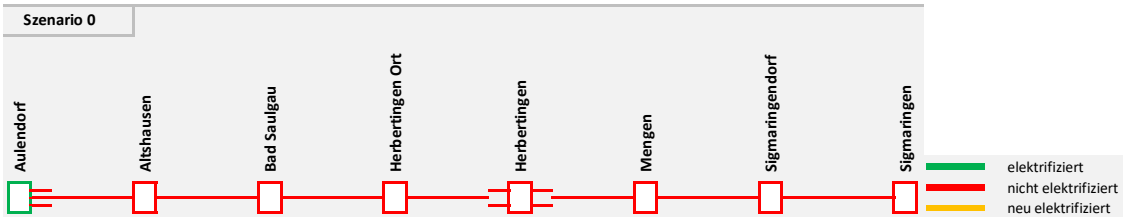


Abb. 137: Infrastrukturszenario 0 Aulendorf – Sigmaringen

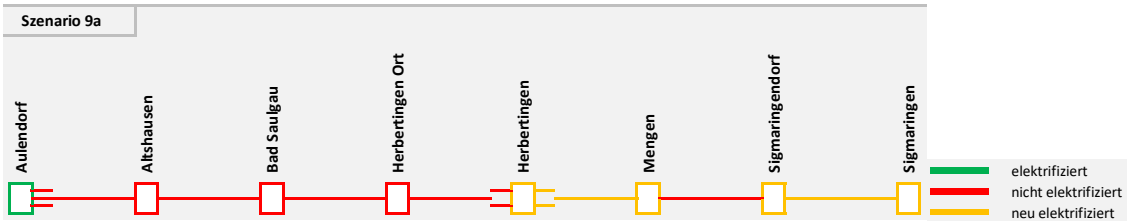


Abb. 138: Infrastrukturszenario 9a Aulendorf – Sigmaringen

9.2.2.2 Linie Aulendorf-Sigmaringen

Tabelle 15: Strecken- bzw. Liniencharakteristika der Linie Aulendorf – Sigmaringen zeigt die wesentlichen Streckencharakteristika der Linie Aulendorf-Sigmaringen, in den Abbildungen 139 und 140 sind die Fahrpläne der Linie Aulendorf – Sigmaringen mit Fahr- und Wendezeiten dargestellt.

Tabelle 15: Strecken- bzw. Liniencharakteristika der Linie Aulendorf – Sigmaringen

Strecke	**Aulendorf-Sigmaringen**
Streckenlänge gesamt [km]	44
Nicht elektrifiziert [km]	Aulendorf-Sigmaringen, 44
Zweigleisigkeit [km]	Durchgehend eingleisig
Δ Höhenmeter [m]	Aulendorf > Sigmaringen: 94, Sigmaringen > Aulendorf: 72
Ø Geschwindigkeit [km/h]	64,4
Takt [min]	60
Zugpaare Werktags (Hin-/Rückfahrten)	19
Zugpaare Wochenende (Hin-/Rückfahrten)	17
Haltanzahl	8
Ø Haltabstand [km]	5,5
Streckenklasse	D4

Zugtyp	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB
Zugnummer	530000	530002	530004	530006	530008	530010	530012	530014	530016	530018	530020	530022	530024	530026	530028	530030	530032	530034	530036
km																			
0 Aulendorf	5:05	6:05	7:05	8:05	9:05	10:05	11:05	12:05	13:05	14:05	15:05	16:05	17:05	18:05	19:05	20:05	21:05	22:05	23:05
8 Altshausen	5:11	6:11	7:11	8:11	9:11	10:11	11:11	12:11	13:11	14:11	15:11	16:11	17:11	18:11	19:11	20:11	21:11	22:11	23:11
19 Saulgau	5:19	6:19	7:19	8:19	9:19	10:19	11:19	12:19	13:19	14:19	15:19	16:19	17:19	18:19	19:19	20:19	21:19	22:19	23:19
26 Herbertingen Ort	5:25	6:25	7:25	8:25	9:25	10:25	11:25	12:25	13:25	14:25	15:25	16:25	17:25	18:25	19:25	20:25	21:25	22:25	23:25
28 Herbertingen	5:27	6:27	7:27	8:27	9:27	10:27	11:27	12:27	13:27	14:27	15:27	16:27	17:27	18:27	19:27	20:27	21:27	22:27	23:27
28 Herbertingen	5:32	6:32	7:32	8:32	9:32	10:32	11:32	12:32	13:32	14:32	15:32	16:32	17:32	18:32	19:32	20:32	21:32	22:32	23:32
34 Mengen	5:37	6:37	7:37	8:37	9:37	10:37	11:37	12:37	13:37	14:37	15:37	16:37	17:37	18:37	19:37	20:37	21:37	22:37	23:37
40 Sigmaringendorf	5:42	6:42	7:42	8:42	9:42	10:42	11:42	12:42	13:42	14:42	15:42	16:42	17:42	18:42	19:42	20:42	21:42	22:42	23:42
44 Sigmaringen	5:46	6:46	7:46	8:46	9:46	10:46	11:46	12:46	13:46	14:46	15:46	16:46	17:46	18:46	19:46	20:46	21:46	22:46	23:46
Fahrzeit	0:41	0:41	0:41	0:41	0:41	0:41	0:41	0:41	0:41	0:41	0:41	0:41	0:41	0:41	0:41	0:41	0:41	0:41	0:41
Connexion	530005	530007	530009	530011	530013	530015	530017	530019	530021	530023	530025	530027	530029	530031	530033	530035	530037	-	-
nächste Abfahrt	6:17	7:17	8:17	9:17	10:17	11:17	12:17	13:17	14:17	15:17	16:17	17:17	18:17	19:17	20:17	21:17	22:17	-	-
Wendezeit	0:30	0:30	0:30	0:30	0:30	0:30	0:30	0:30	0:30	0:30	0:30	0:30	0:30	0:30	0:30	0:30	0:30	-	-

Abb. 139: Fahrplan Aulendorf – Sigmaringen

Zugtyp	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB
Zugnummer	530001	530003	530005	530007	530009	530011	530013	530015	530017	530019	530021	530023	530025	530027	530029	530031	530033	530035	530037
km																			
0 Sigmaringen	4:17	5:17	6:17	7:17	8:17	9:17	10:17	11:17	12:17	13:17	14:17	15:17	16:17	17:17	18:17	19:17	20:17	21:17	22:17
4 Sigmaringendorf	4:21	5:21	6:21	7:21	8:21	9:21	10:21	11:21	12:21	13:21	14:21	15:21	16:21	17:21	18:21	19:21	20:21	21:21	22:21
10 Mengen	4:27	5:27	6:27	7:27	8:27	9:27	10:27	11:27	12:27	13:27	14:27	15:27	16:27	17:27	18:27	19:27	20:27	21:27	22:27
16 Herbertingen	4:31	5:31	6:31	7:31	8:31	9:31	10:31	11:31	12:31	13:31	14:31	15:31	16:31	17:31	18:31	19:31	20:31	21:31	22:31
16 Herbertingen	4:32	5:32	6:32	7:32	8:32	9:32	10:32	11:32	12:32	13:32	14:32	15:32	16:32	17:32	18:32	19:32	20:32	21:32	22:32
18 Herbertingen Ort	4:35	5:35	6:35	7:35	8:35	9:35	10:35	11:35	12:35	13:35	14:35	15:35	16:35	17:35	18:35	19:35	20:35	21:35	22:35
25 Saulgau	4:41	5:41	6:41	7:41	8:41	9:41	10:41	11:41	12:41	13:41	14:41	15:41	16:41	17:41	18:41	19:41	20:41	21:41	22:41
36 Altshausen	4:49	5:49	6:49	7:49	8:49	9:49	10:49	11:49	12:49	13:49	14:49	15:49	16:49	17:49	18:49	19:49	20:49	21:49	22:49
44 Aulendorf	4:55	5:55	6:55	7:55	8:55	9:55	10:55	11:55	12:55	13:55	14:55	15:55	16:55	17:55	18:55	19:55	20:55	21:55	22:55
Fahrzeit	0:37	0:37	0:37	0:37	0:37	0:37	0:37	0:37	0:37	0:37	0:37	0:37	0:37	0:37	0:37	0:37	0:37	0:37	0:37
Connexion	530000	530002	530004	530006	530008	530010	530012	530014	530016	530018	530020	530022	530024	530026	530028	530030	530032	530034	530036
nächste Abfahrt	5:05	6:05	7:05	8:05	9:05	10:05	11:05	12:05	13:05	14:05	15:05	16:05	17:05	18:05	19:05	20:05	21:05	22:05	23:05
Wendezeit	0:09	0:09	0:09	0:09	0:09	0:09	0:09	0:09	0:09	0:09	0:09	0:09	0:09	0:09	0:09	0:09	0:09	0:09	0:09

Abb. 140: Fahrplan Sigmaringen – Aulendorf

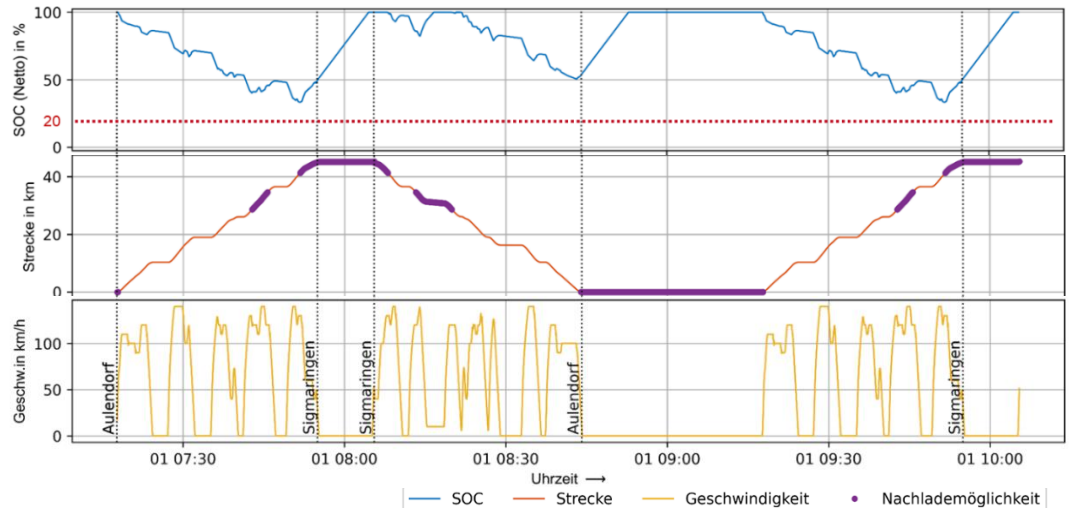


Abb. 141: SOC Aulendorf – Sigmaringen (BEMU RB, Infrastrukturszenario 9a)

Abb. 141 zeigt den SOC-Verlauf der Linie Ehingen – Herbertingen im Infrastrukturszenario 9a (RB-Fahrzeug), das einen BEMU-Betrieb auf der Strecke ermöglicht. Der Energiebedarf für den HEMU-Betrieb (RB-Fahrzeug) ist in Abb. 142 dargestellt.

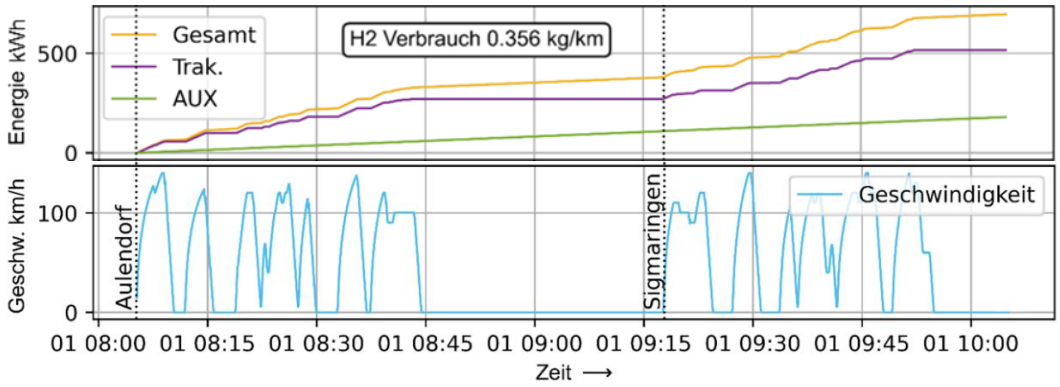


Abb. 142: Energiebedarf Aulendorf – Sigmaringen (HEMU RB)

9.2.3 Betriebsstatistik Teilnetz

Für den Betrieb der oben beschriebenen Strecken des Teilnetzes „Donautalbahn Plus“ ergibt sich ein Fahrzeugbedarf von insgesamt 16 Fahrzeugen. Die Fahrleistungen der einzelnen Fahrzeuge sind in Abb. 143 dargestellt, hier für Werktage. Dabei beziehen sich die ersten sieben Fahrzeuge auf den Betrieb zwischen Ulm und Tuttlingen, die Fahrzeuge 8 bis 10 auf die Linie Ulm – Munderkingen und die Fahrzeuge 11 und 12 auf die Linie Ulm – Blaubeuren. Für den Betrieb der Linie Aulendorf – Sigmaringen werden zwei Fahrzeuge benötigt (13 und 14). Die Fahrleistung der Fahrzeuge 15 und 16 bezieht sich auf den Betrieb zwischen Ehingen und Herbertingen.

Die zusätzlichen Leerfahrten für HEMU ergeben sich aus Tankfahrten.

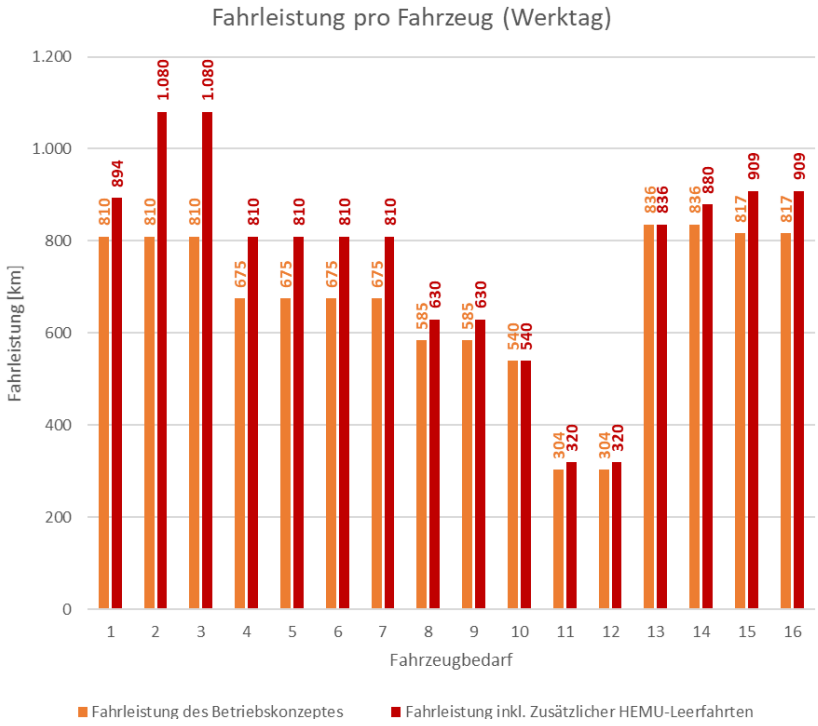


Abb. 143: Fahrleistung pro Fahrzeug der „Donautalbahn Plus“

9.2.4 Infrastruktur- und Fahrzeugbedarf Teilnetz

9.2.4.1 Infrastrukturbedarf EMU

Für eine Vollelektrifizierung des Teilnetzes Donautalbahn Plus[92] sind insgesamt 181 km zusätzliche Oberleitung notwendig. Diese setzen sich aus 147,2 km eingleisige Strecke und 33,8 km zweigleisigen Abschnitten zusammen.

Zusätzliche Maßnahmen zur Anbindung an das Bahnstromnetz sind aufgrund des Lückenschlusses zwischen elektrifizierten Streckenabschnitten nicht erforderlich.

Die Elektrifizierungskomplexität (siehe 7.9.1) wird für die Gesamtstrecke als durchschnittlich eingeschätzt. Hierfür ist zum einen die relativ geringe Tunneldichte (2,9 % Tunnelanteil an Gesamtlänge, weitestgehend konzentriert auf den Abschnitt Sigmaringen-Tuttlingen), zum anderen überwiegend nicht gegebene enge Tallagen ohne starke Bewaldung und eine bezogen auf die große Streckenlänge durchschnittliche Zahl an querenden Straßenbrücken verantwortlich.

9.2.4.2 Infrastrukturbedarf BEMU

Für den BEMU-Betrieb ergibt sich insgesamt ein Bedarf von 57,6 km zusätzlicher Oberleitung. Davon entfallen 43,6 km auf eingleisige und 14,0 km auf zweigleisige Abschnitte. Die zu elektrifizierenden Abschnitte sind dabei, entsprechend dem gewählten Infrastrukturszenario 9a mit der Kombination der Infrastrukturszenarien 3d, 4b und 4d, von Schelklingen bis Munderkingen, von Herbertingen bis Mengen und von Sigmaringen bis Sigmaringendorf angeordnet.

Aufgrund der isolierten Lage der Inselabschnitte sind hier jeweils Anbindungen an das übergeordnete Stromnetz erforderlich, deren Komplexität in dieser Phase nicht detaillierter betrachtet wurde.

9.2.4.3 Infrastrukturbedarf HEMU

Für die HEMU-Betrachtung wurde angesichts der großen Entfernungen in diesem Teilnetz die Anordnung von zwei Wasserstofftankstellen mit zugeordneter lokaler Wasserstoffproduktion in Ulm und Sigmaringen vorgesehen. Die Energieversorgung wurde in Ulm über die vorhandene Bahnstromversorgung, in Sigmaringen analog zur BEMU-Vorgehensweise über die Anbindung an ein regionales Versorgungsnetz angenommen.

9.2.4.4 Fahrzeugbedarfe

Entsprechend Kapitel 9.2.3 ergibt sich für den EMU- bzw. BEMU-Betrieb der Linien im Teilnetz 2 ein Bedarf von neun RB- und sieben RE-Fahrzeugen. Als zusätzliche Betriebs- und Instandhaltungsreserve werden weitere vier RB und zwei RE-Fahrzeuge benötigt, so dass sich insgesamt ein Bedarf von 13 RB- und neun RE-Fahrzeuge ergibt, d.h. in der Summe 22 Fahrzeuge. Für den HEMU-Betrieb erhöht sich der Fahrzeugbedarf auf insgesamt 28 Fahrzeuge, 15 RB- und 13 RE-Fahrzeuge, inkl. Instandhaltungsreserve. Hier sind vier RB- und zwei RE-Fahrzeuge als Reserve vorgesehen.

Der erhöhte Fahrzeugbedarf der HEMU-Betrachtung resultiert aus den teilweise sehr hohen Tagesfahrleistungen und der Notwendigkeit zusätzlicher Tankfahrten (trotz der beschriebenen Anordnung von zwei Wasserstofftankstellen). Wie zur Nagoldtalbahn

[92] Strecken Ulm-Sigmaringen-Tuttlingen und Aulendorf-Sigmaringen

bereits dargestellt, sind Tageslaufleistungen ab ca. 700 km ggf. kritisch, im Bereich dieses Teilnetzes weisen einige Fahrzeuge Laufleistungen zwischen 810 und 1080 km auf, was unter Berücksichtigung von Tankreserven deutlich im kritischen Bereich liegt.

Hinzu kommen aufgrund der stark diversifizierten Betriebskonzepte (Kurzläufer auf kurzen Teilstrecken!) hohe Wendezeitanteile, die aufgrund des Hilfsenergiebedarfs in erhöhtem Wasserstoffverbrauch resultieren.

9.2.5 Ergänzende Betrachtungen zum Teilnetz

9.2.5.1 Netzwirkung / Durchbindungsaspekte

Der Streckenabschnitt Ulm-Herbertingen und Herbertingen-Aulendorf wurde während den Baumaßnahmen an der Südbahn Ulm-Friedrichshafen als Umleitungsstrecke im Güterverkehr verwendet, erforderte dazu aber zweimaliges Kopfmachen. Diese Einschränkung würde auch bei einer Elektrifizierung fortbestehen. Eine echte Netzwirkung mit erweiterter betrieblicher Nutzbarkeit würde sich erst ergeben, wenn auch die Reaktivierungsstrecke Mengen-Stockach elektrifiziert würde und damit ein durchgehender Betrieb Ulm-Radolfzell und damit eine Anbindung an die Bodenseegürtelbahn und Hochrheinbahn geschaffen würde. Diese Funktion, d.h. eine Umgehung von Friedrichshafen) würde allerdings bereits mit der Elektrifizierung der Teilstrecken Aulendorf-Mengen und Mengen-Stockach geschaffen[93]. Die Verbindung Aulendorf-Sigmaringen wäre auch im Zusammenhang mit der diskutierten Elektrifizierung Albstadt-Sigmaringen interessanter als eine (vollständige) Elektrifizierung Ulm-Herbertingen. Aus dieser Sicht bestehen innerhalb des Teilnetzes unterschiedliche Lückenschlussqualitäten.

9.2.5.2 Güterverkehrsaspekte

Für den Aspekt der Anschlussbedienung liegt ein Schwerpunkt auf dem Abschnitt Ulm-Ehingen, in dem ca. zehn Gleisanschlüsse bedient werden. Eine weitere Zunahme des lokalen Güterverkehrs ist geplant (Schelklingen, Allmendingen, Rottenacker). Inwieweit diese Verkehre von den für den Personenverkehr geplanten Teil-Elektrifizierungen im Sinne einer Dekarbonisierung des Güterverkehrs profitieren können, ggf. durch Einsatz geeigneter Hybrid-Lokomotiven (siehe 5.6), bedarf einer ergänzenden Prüfung.

Die Bedeutung der Strecke für Umleitungsverkehre im Güter-Fernverkehr ist aus den vorgenannten Gründen (siehe 9.2.5.1) eher eingeschränkt. Im Abschnitt Sigmaringen-Tuttlingen bestehen, unbeachtlich der Elektrifizierungsfrage, weitere infrastrukturelle Einschränkungen zuungunsten des Güterverkehrs (Gleislängen, z.B. im Bahnhof Sigmaringen, Achslastbeschränkungen im Bereich Fridingen etc.).

9.2.5.3 Zeitschiene / Sonstige externe Einflüsse

Es sind keine besonderen Einflüsse erkennbar. Zu beachten ist die zurzeit diskutierte Elektrifizierung des Streckenabschnittes Albstadt/Ebingen-Inzigkofen-Sigmaringen, die die Rahmenbedingungen im Raum Sigmaringen verändert und die für einen BEMU-Betrieb im Teilnetz “Donautalbahn Plus“ erforderliche Elektrifizierung („Oberleitungsinsel“) im Bahnhof Sigmaringen ersetzen bzw. vereinfachen würde.

[93] Diese Umleitungsfunktion erfährt zusätzliche Bedeutung, wenn auch die Strecke Aulendorf-Kißlegg elektrifiziert zur Verfügung steht, siehe Teilnetz 3.

9.2.6 Zusätzliche Streckenbetrachtungen (nur BEMU)

Im Rahmen dieses Kapitels werden zum einen Teilstrecken des „Ringzuges“, zum anderen die Strecken Hechingen-Gammertingen-Sigmaringen und die Reaktivierungsstrecke „Ablachtalbahn“ vorgestellt. Während erstere Teilstrecken bereits Gegenstand der ursprünglichen Leistungsbeschreibung für die SteFanS-Studie waren[94], wurden die beiden letzteren Strecken im Studienverlauf ergänzend in das Arbeitsprogramm aufgenommen. Für diese Strecken erfolgte keine eigenständige Betrachtung zur Technologiewahl[95], es wurde vielmehr geprüft, welche Machbarkeiten bzw. Infrastruktur-Synergien sich für die im Teilnetz gewählte Technologie ergeben. Die Bearbeitung baute damit auf den Empfehlungen gemäß 10.2.4 und 11 auf und betrachtete allein die BEMU-Technologie.

9.2.6.1 Teilstrecken „Ringzug“

Die Untersuchung umfasst folgenden Streckenabschnitt des Ringzug-Netzes:

- Fridingen – Blumberg-Riedöschingen

Für den SPNV-Betrieb wird zwischen folgenden Linienwegen unterschieden:

- Tuttlingen <> Immendingen
- Immendingen <> Blumberg-Riedöschingen
- Tuttlingen <> Blumberg-Riedöschingen

Die Strecken bzw. Linien sind nachstehend in Abb. 144 dargestellt, Abb. 145 zeigt das Infrastrukturszenario 0 für die Strecke Tuttlingen - Blumberg-Riedöschingen. Eine Untersuchung weiterer Infrastrukturszenarien über Szenario 0 hinaus war nicht erforderlich, da bereits mit diesem für beide Strecken ein BEMU-Betrieb möglich ist.

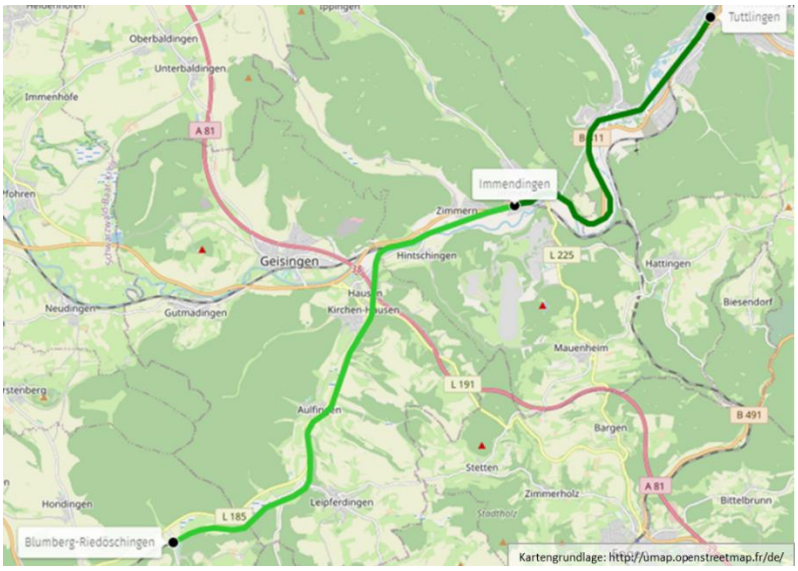


Abb. 144: Teilstrecken Tuttlingen-Immendingen-Blumberg („Ringzugkonzept“)

[94] Siehe Kapitel 2
[95] Siehe auch Kapitel 7.6

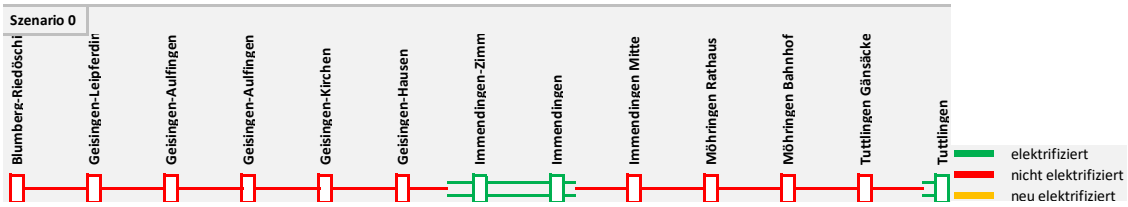


Abb. 145: Infrastrukturszenario 0 Tuttlingen – Blumberg-Riedöschingen

Tabelle 16 zeigt die wesentlichen Streckencharakteristika, die Abbildungen 146 und 147 den SOC-Verlauf für Hin- und Rückfahrt auf der Strecke von Tuttlingen nach Immendingen. Es ist erkennbar, dass während der Wende die Batterie geladen und mit vollgeladener Batterie zurückgefahren werden kann.

Tabelle 16: Strecken- bzw. Liniencharakteristika der Ringzug-Teilstrecken

Strecke	**Tuttlingen – Immendingen**	**Immendingen - Blumberg-Riedöschingen**	**Tuttlingen – Blumberg-Riedöschingen**
∑Streckenlänge [km]	10	15	25
Nicht elektrifiziert [km]	Tuttlingen-Immendingen, 10	Hintschingen-Blumberg-Riedöschingen, 11	Immendingen-Tuttlingen; Hintschingen-Blumberg-Riedöschingen, 21
Zweigleisigkeit [km]	durchgehend eingleisig	Immendingen - Abzw. Hintschingen, 2,2	Immendingen-Abzw. Hintschingen, 2,2
Δ Höhenmeter [m]	Tuttlingen >Immendingen: 9 Immendingen >Tuttlingen: 0	Immendingen>Blumberg-Riedöschingen: 34 Blumberg-Riedöschingen >Immendingen: 0	Tuttlingen>Blumberg-Riedöschingen: 43 Blumberg-Riedöschingen> Tuttlingen: 0
Ø Geschwindigkeit [km/h]	54,5	40,9	41,7
Takt [min]	60	60	60
Zugpaare Werktags (Hin- / Rückfahrten)	19	19	19
Zugpaare Wochenende (Hin- / Rückfahrten)	17	17	17
Haltanzahl	6	7	12
Ø Haltabstand [km]	2,0	2,4	2,1
Streckenklasse	D4	B2 (Hintschingen - Blumberg-Riedöschingen), D4 (Immendingen – Hintschingen)	B2 (Hintschingen - Blumberg-Riedöschingen), D4 (Tuttlingen – Hintschingen)

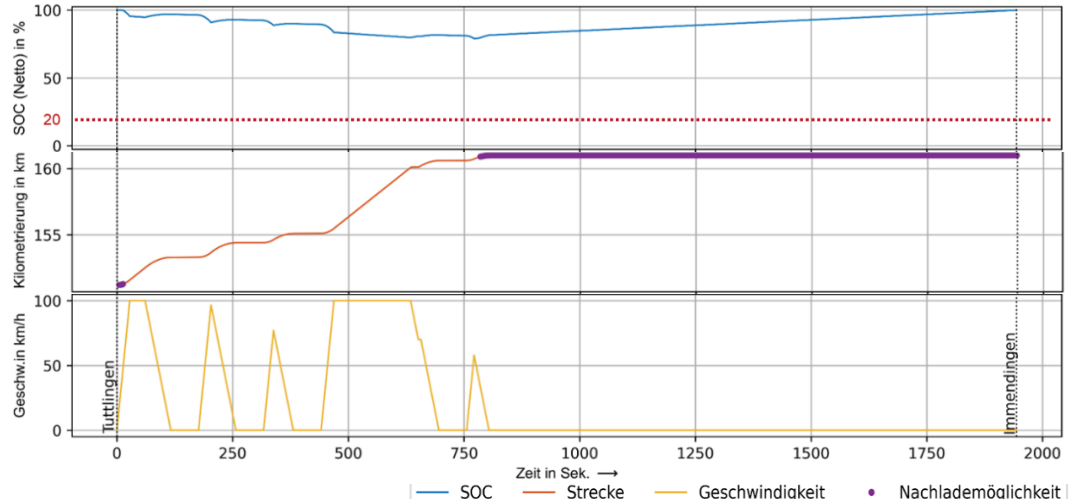


Abb. 146: SOC Tuttlingen-Immendingen (BEMU RB, Infrastrukturszenario 0)

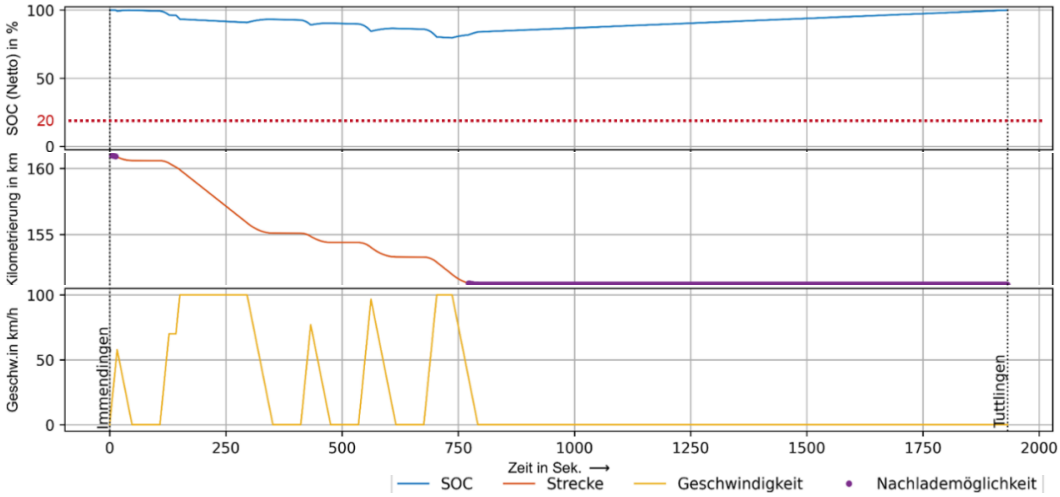


Abb. 147: SOC Immendingen-Tuttlingen (BEMU RB, Infrastrukturszenario 0)

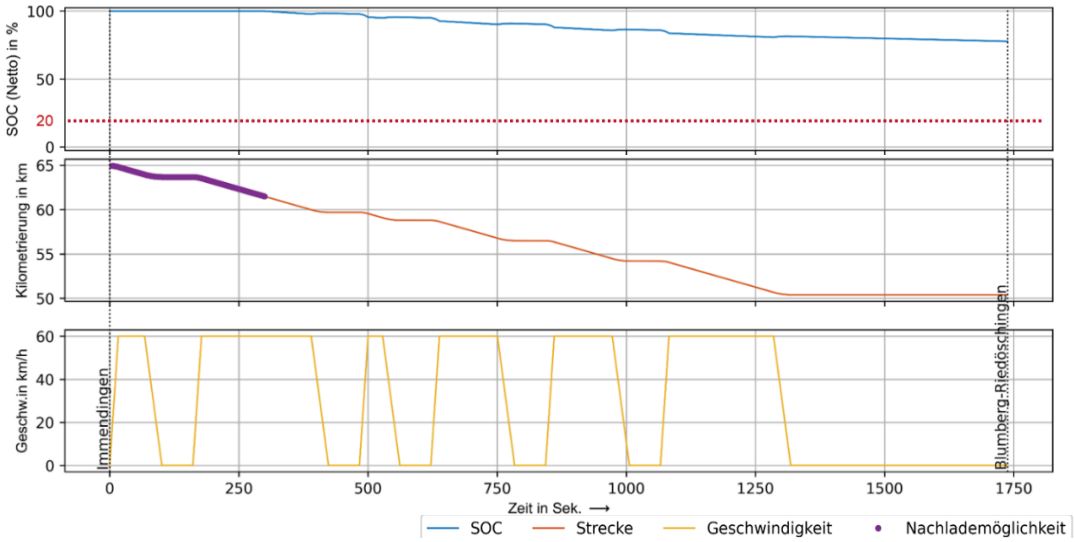


Abb. 148: SOC Immendingen-Blumberg/Riedöschingen (BEMU RB, Infrastrukturszenario 0)

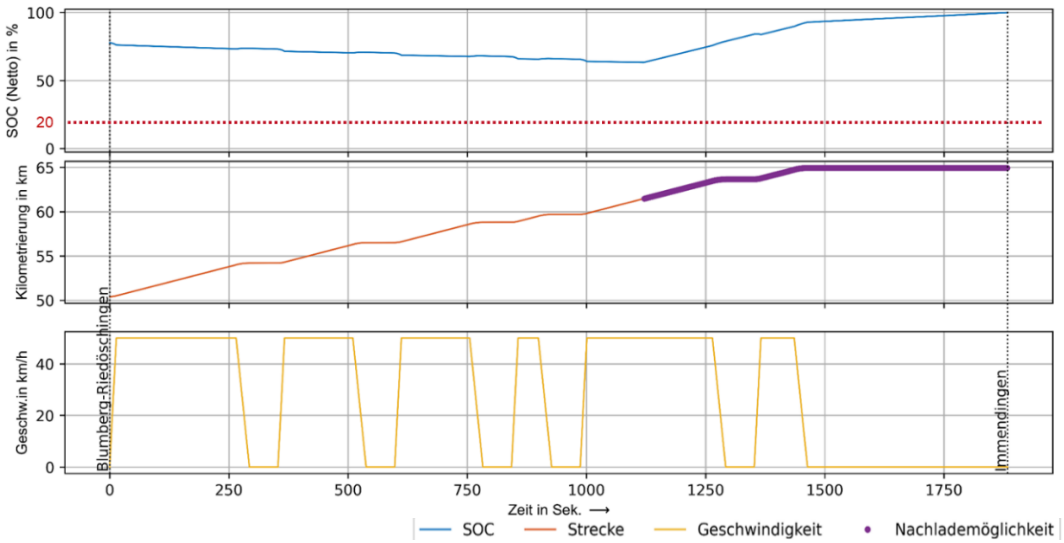


Abb. 149: SOC Blumberg/Riedöschingen-Immendingen (BEMU RB, Infrastrukturszenario 0)

Vorstehend ist der SOC-Verlauf für die Hin- und Rückfahrt mit einem RB-Fahrzeug von Immendingen nach Blumberg-Riedöschingen dargestellt. Da dort nicht geladen werden kann, nimmt der SOC hier während der Wendezeit weiter ab. Trotzdem ist der BEMU-

Betrieb hier mit der Bestandselektrifizierung möglich, da die Batterie in Immendingen vollständig aufgeladen werden kann.

Nach der zunächst abschnittsweisen Einzelbetrachtung wurde im nächsten Schritt ein durchgehender Betrieb Blumberg/Riedöschingen – Immendingen – Tuttlingen betrachtet. Wie die Abbildungen 150 und 151 zeigen, ist auch in diesem Fall ein BEMU-Betrieb mit der Bestandselektrifizierung möglich.

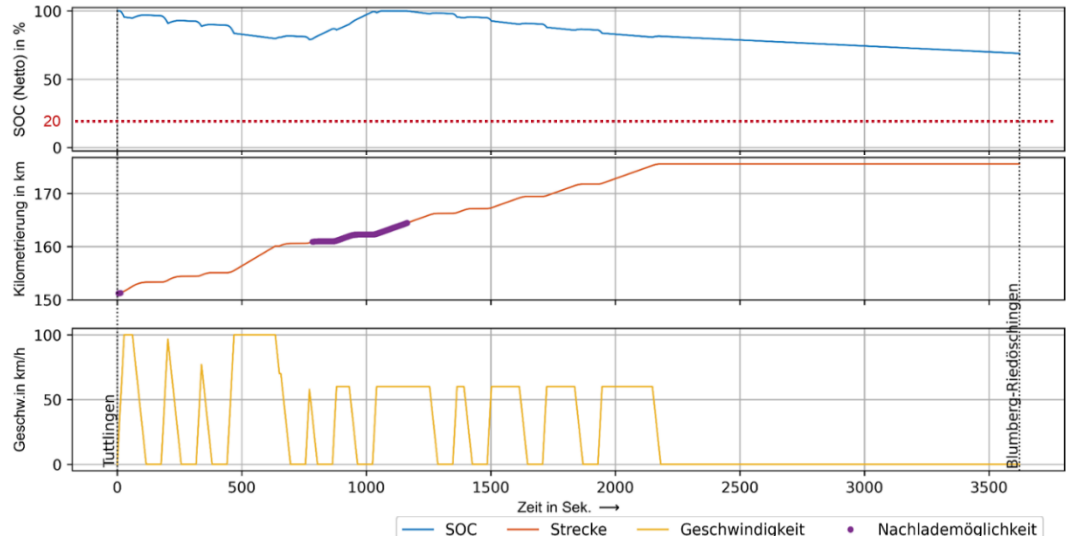


Abb. 150: SOC Tuttlingen-Blumberg/Riedöschingen (BEMU RB, Infrastrukturszenario 0)

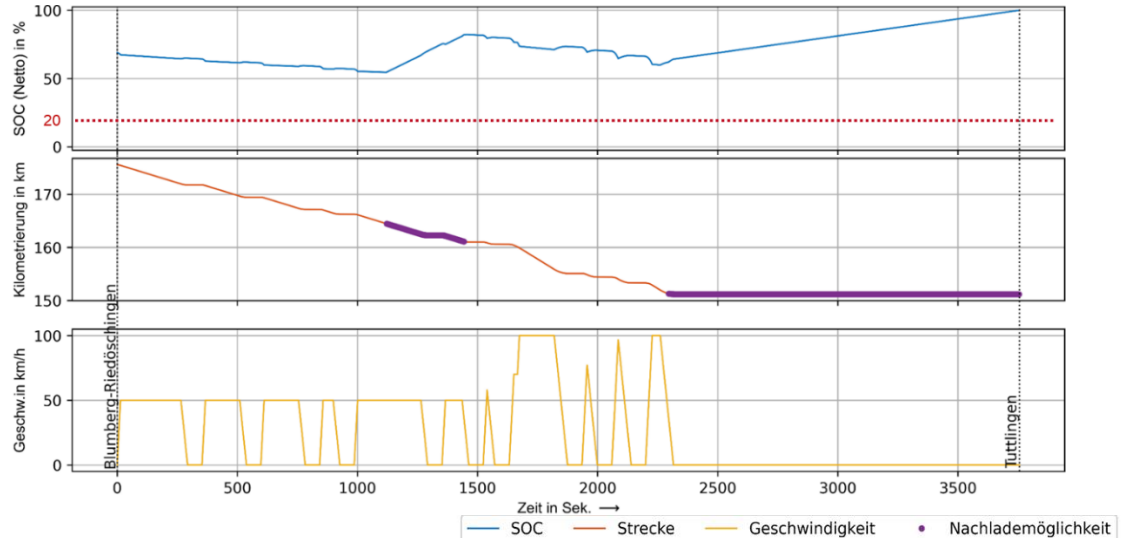


Abb. 151: SOC Blumberg/Riedöschingen-Tuttlingen (BEMU RB, Infrastrukturszenario 0)

9.2.6.2 Strecke Stockach – Mengen („Ablachtalbahn“)

Die Einbeziehung dieser Reaktivierungsstrecke erfolgte nach der Identifizierung des Elektrifizierungsabschnitts Mengen-Herbertingen als Kernbestandteil von Teilnetz 2 (siehe 9.2.1.1 und 9.2.2.1) und der BEMU-Empfehlung für dieses Teilnetz. Ziel der Betrachtung war es, mögliche Synergien der damit in Mengen künftig zu erwartenden Lademöglichkeit im Zusammenwirken mit der geplanten Elektrifizierung Radolfzell-Stockach im Hinblick auf einen BEMU-Betrieb auf der Reaktivierungsstrecke zu gewinnen.

In der Untersuchung wurde zwischen folgenden Linienwegen unterschieden:

- Mengen <> Stockach
- Mengen <> Radolfzell
- Meßkirch <> Radolfzell

Die Strecke ist nachstehend in Abb. 152 dargestellt, Tabelle 17 zeigt die wesentlichen Strecken- bzw. Liniencharakteristika.

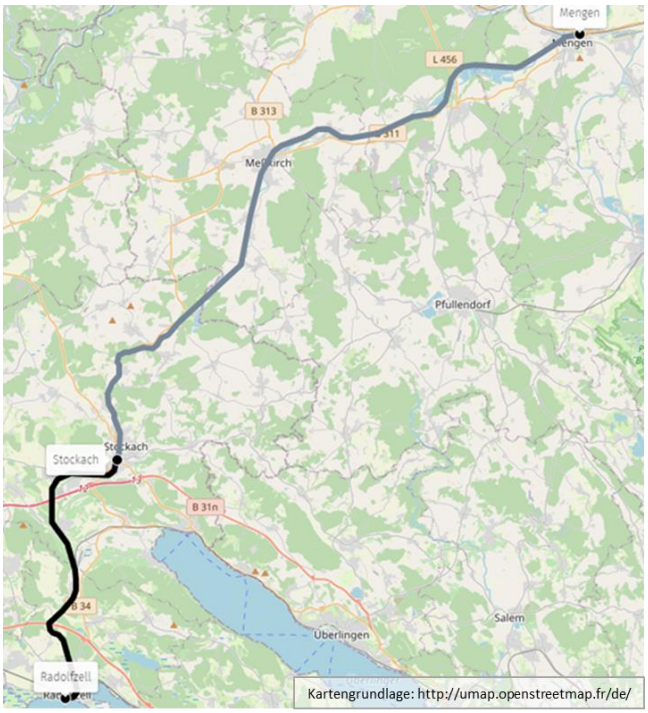


Abb. 152: Strecke der Ablachtalbahn

Tabelle 17: Strecken- bzw. Liniencharakteristika der Ablachtalbahn

Strecke	**Stockach-Mengen**	**Radolfzell-Mengen**	**Radolfzell-Meßkirch**
∑Streckenlänge [km]	39	57	38
Nicht elektrifiziert [km]	Stockach-Mengen, 39	Stockach-Mengen, 39	Stockach-Meßkirch, 21
Zweigleisigkeit [km]	durchgehend eingleisig	Radolfzell–Brandbühl West, 4,2; Brandbühl Ost-Stahringen, 2,3	Radolfzell–Brandbühl West, 4,2; Brandbühl Ost-Stahringen, 2,3
Δ Höhenmeter [m]	Stockach>Mengen: 140 Mengen>Stockach: 62	Radolfzell>Mengen: 223 Mengen>Radolfzell: 62	Radolfzell>Meßkirch: 223 Meßkirch>Radolfzell: 14
Ø Geschwindigkeit [km/h]	64,6	58,4	55,2
Takt [min]	60	60	60
Zugpaare Werktags (Hin- / Rückfahrten)	19	19	19
Zugpaare Wochenende (Hin- / Rückfahrten)	17	17	17
Haltanzahl	6	11	9
Ø Haltabstand [km]	7,9	5,2	4,2
Streckenklasse	C4 (Stockach–Schwackenreute); D4 (Schwackenreute – Mengen)	C4 (Stockach–Schwackenreute); D4 (Radolfzell-Stahringen, Schwackenreute–Mengen)	D4 (Radolfzell - Stockach) D4 (Schwackenreute – Meßkirch)

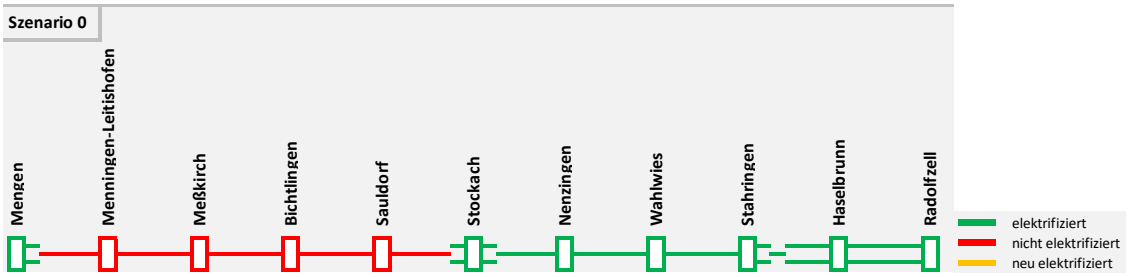


Abb. 153: Infrastrukturszenario 0 Mengen-Radolfzell („Ablachtalbahn“)

Für die Ablachtalbahn ist bereits mit Infrastrukturszenario 0 (siehe Abb. 153) ein BEMU-Betrieb möglich (RB-Fahrzeug), die Untersuchung weiterer Szenarien konnte entfallen.

Die Abbildungen 154 u. 155 zeigen den SOC-Verlauf zwischen Mengen und Stockach, Abbildungen 156 u. 157 den zwischen Mengen und Radolfzell (jeweils Hin- / Rückfahrt). Den Verlauf bei Verkürzung auf Meßkirch - Radolfzell zeigen Abbildungen 158 und 159.

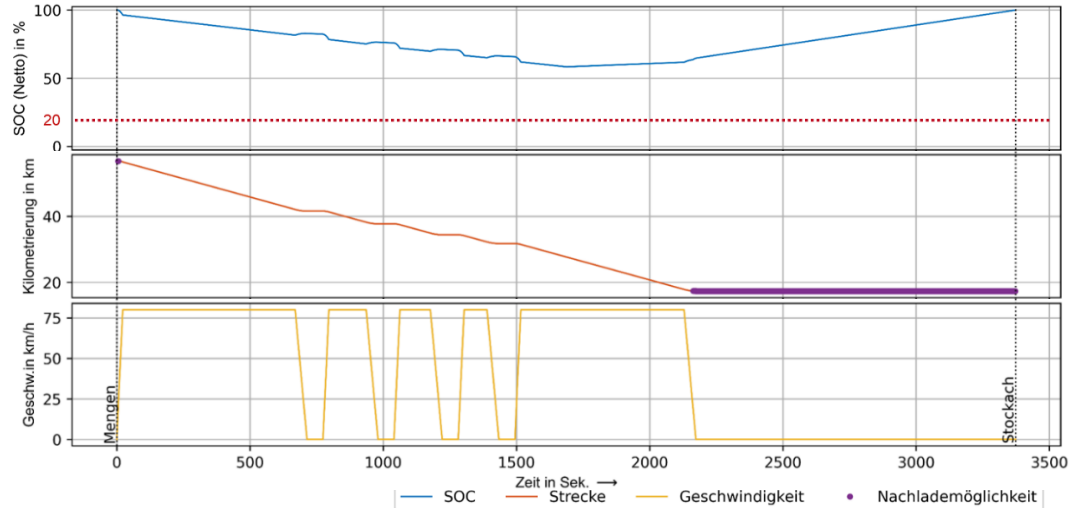


Abb. 154: SOC Mengen-Stockach (BEMU RB, Infrastrukturszenario 0)

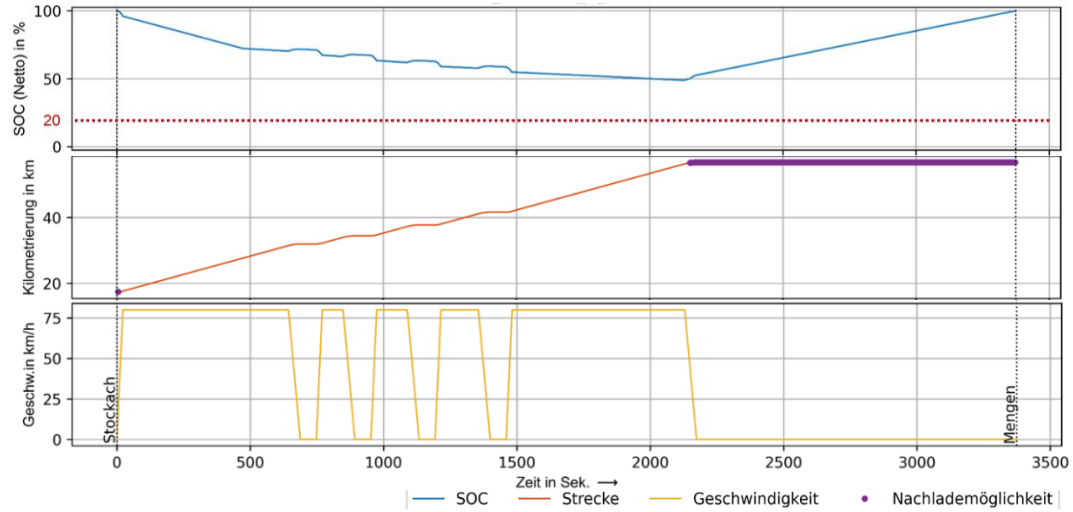


Abb. 155: SOC Stockach-Mengen (BEMU RB, Infrastrukturszenario 0)

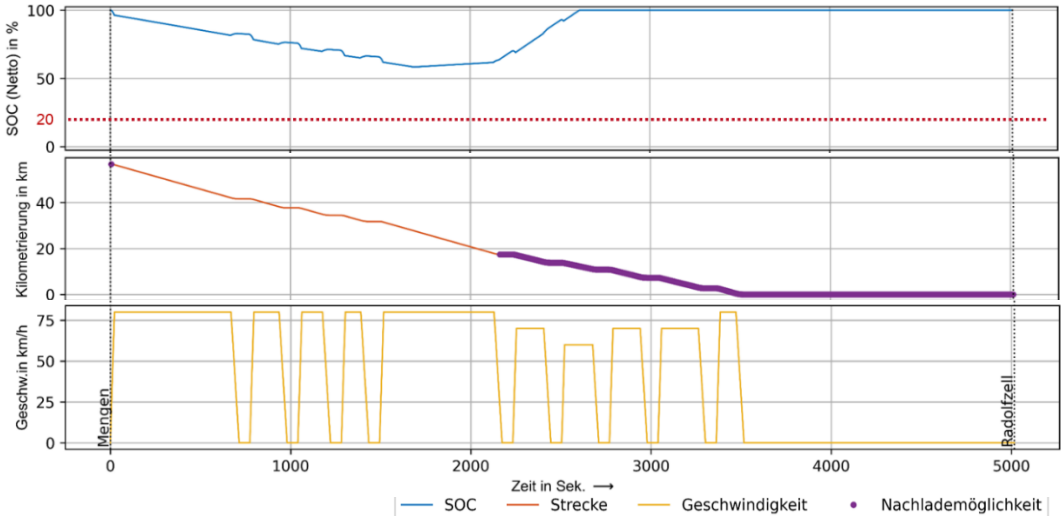


Abb. 156: SOC Mengen-Radolfzell (BEMU RB, Infrastrukturszenario 0)

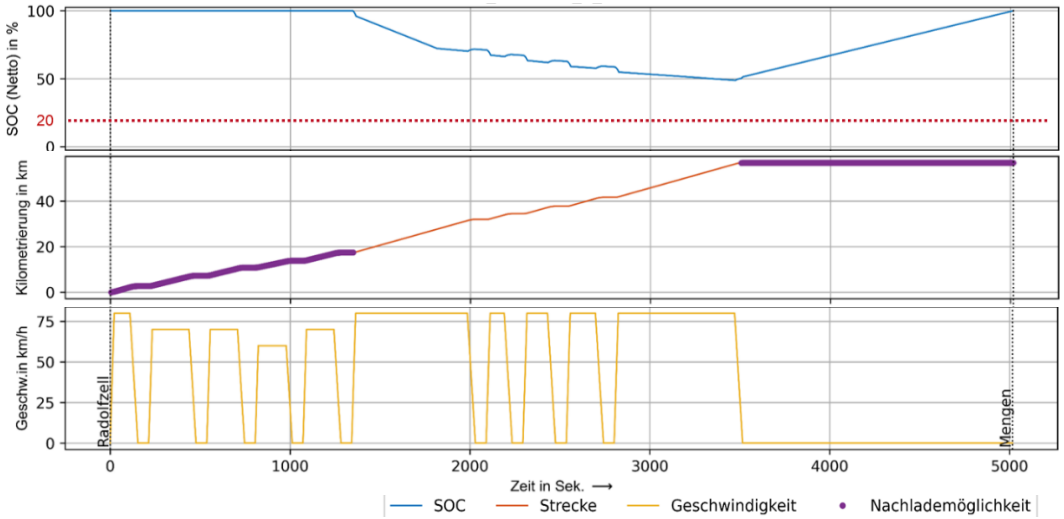


Abb. 157: SOC Radolfzell-Mengen (BEMU RB, Infrastrukturszenario 0)

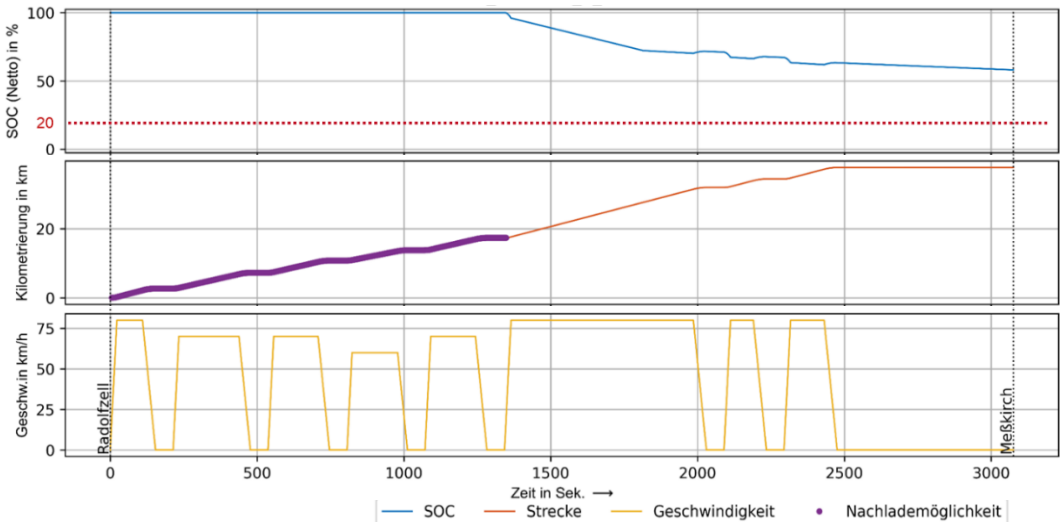


Abb. 158: SOC Radolfzell-Meßkirch (BEMU-RB, Infrastrukturszenario 0)

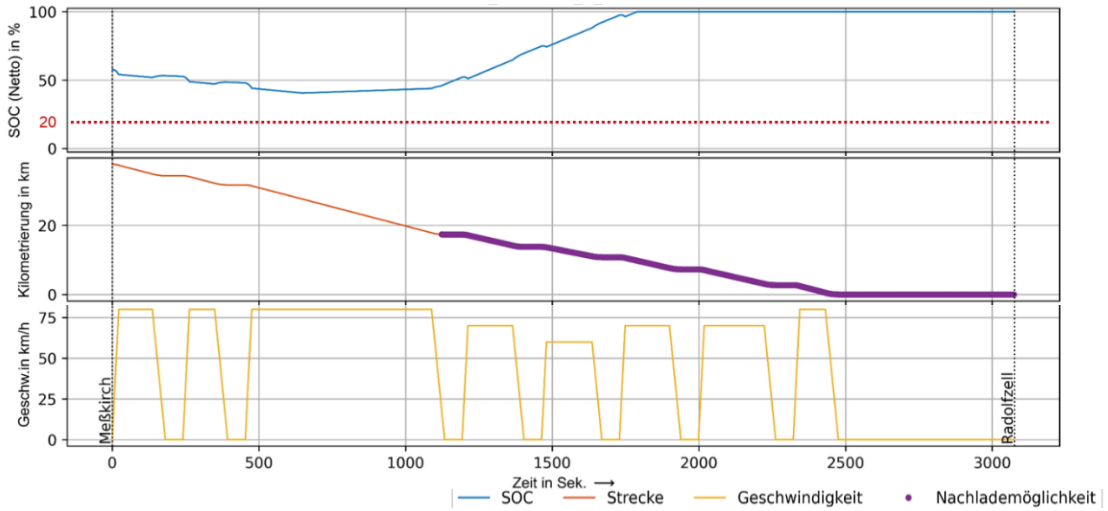


Abb. 159: SOC Meßkirch-Radolfzell (BEMU-RB, Infrastrukturszenario 0)

Der aktuelle Freizeitverkehr weist eine sehr niedrige Streckengeschwindigkeit auf. Es wurde festgelegt, eine Geschwindigkeit analog zum Abschnitt Radolfzell-Stockach vorzusehen, d.h. im Bereich 60-80 km/h. Ziel war, festzustellen, bis zu welcher Streckengeschwindigkeit ein Betrieb ohne zusätzliche Elektrifizierungsmaßnahmen möglich ist.

Im Ergebnis ist auf den drei untersuchten Linien ein BEMU-Betrieb mit einer Geschwindigkeit von 60 bis 80 km/h mit der „Bestandselektrifizierung“, d.h. der bereits in der Umsetzung befindlichen Elektrifizierung Radolfzell-Stockach und der für das Teilnetz 2 („Donautalbahn Plus“) benötigten Oberleitungsinsel Herbertingen-Mengen möglich.

9.2.6.3 Strecke Hechingen-Gammertingen-Sigmaringen (ZAB2)

Die Einbeziehung dieser Strecke erfolgte nach der Identifizierung des Elektrifizierungsabschnitts Sigmaringen Bahnhof bzw. Sigmaringen-Sigmaringendorf als Kernbestandteil von Teilnetz 2 (siehe 9.2.1.1 und 9.2.2.1) und der BEMU-Empfehlung für dieses Teilnetz. Ziel der Betrachtung war es, mögliche Synergien der damit in Sigmaringen künftig zu erwartenden Lademöglichkeit im Zusammenwirken mit der geplanten Elektrifizierung Tübingen-Hechingen-Albstadt/Ebingen im Hinblick auf einen BEMU-Betrieb auf dieser Strecke zu gewinnen.

Für den SPNV-Betrieb wird zwischen folgenden Linienwegen unterschieden:

- Hechingen <> Gammertingen
- Hechingen <> Sigmaringen

Der Strecken- bzw. Linienverlauf ist in Abb. 160 dargestellt, Tabelle 18 zeigt die wesentlichen Betriebscharakteristika.

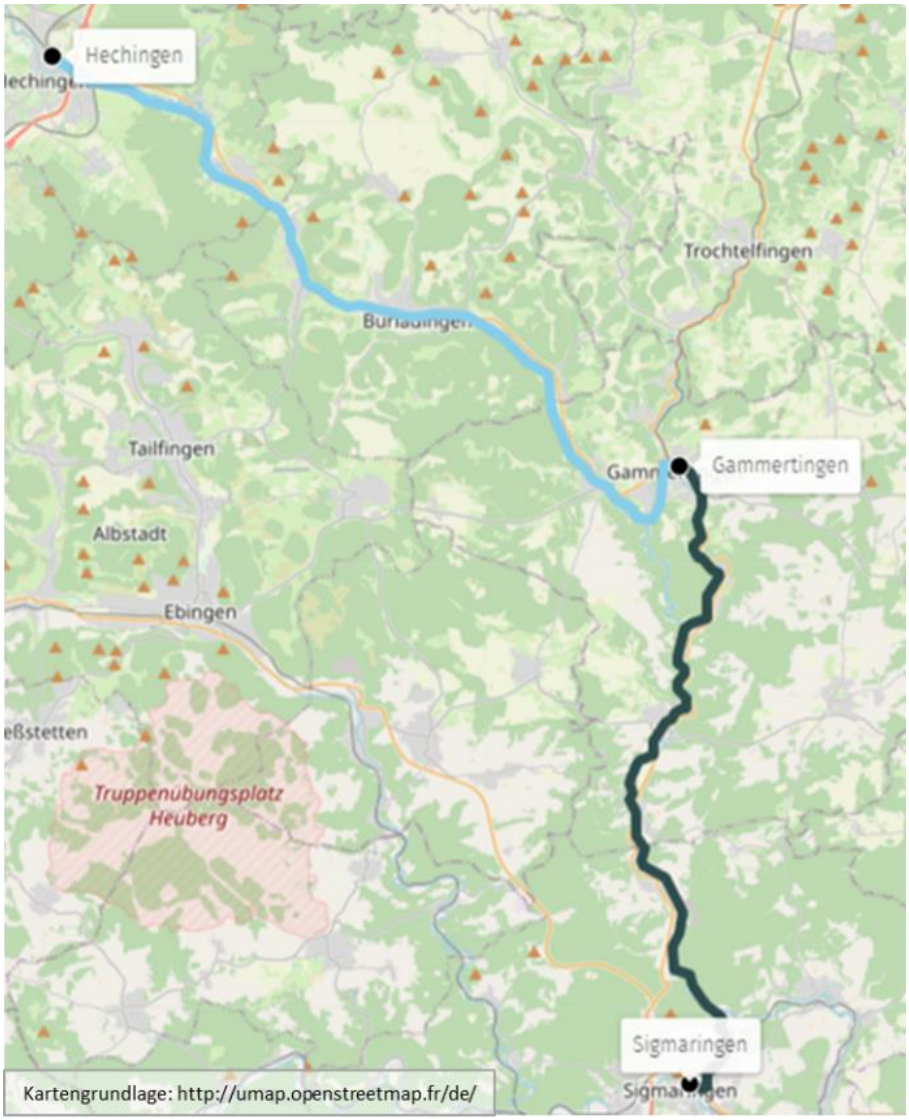


Abb. 160: Strecke Hechingen – Sigmaringen

Tabelle 18: Strecken-/Liniencharakteristika der Zollernalbbahn 2

Strecke	**Hechingen - Gammertingen**	**Hechingen - Sigmaringen**
∑Streckenlänge [km]	28	50
Nicht elektrifiziert [km]	Hechingen – Gammertingen, 28	Hechingen – Sigmaringen, 50
Zweigleisigkeit [km]	durchgehend eingleisig	durchgehend eingleisig
Δ Höhenmeter [m]	Hechingen>Gammertingen: 287 Gammertingen>Hechingen: 106	Hechingen>Sigmaringen: 296 Sigmaringen>Hechingen: 216
Ø Geschwindigkeit [km/h]	43,1	39,5
Takt [min]	120	120
Zugpaare Werktags (Hin- / Rückfahrten)	9	9
Zugpaare Wochenende (Hin- / Rückfahrten)	8	8
Haltanzahl	11	18
Ø Haltabstand [km]	2,5	2,8
Streckenklasse	D4	D4

Abb. 161 zeigt das Höhenprofil für die Strecke von Hechingen nach Sigmaringen, die Abbildungen 162 und 163 die Fahrpläne der Strecken Hechingen – Gammertingen und Hechingen – Sigmaringen.

.

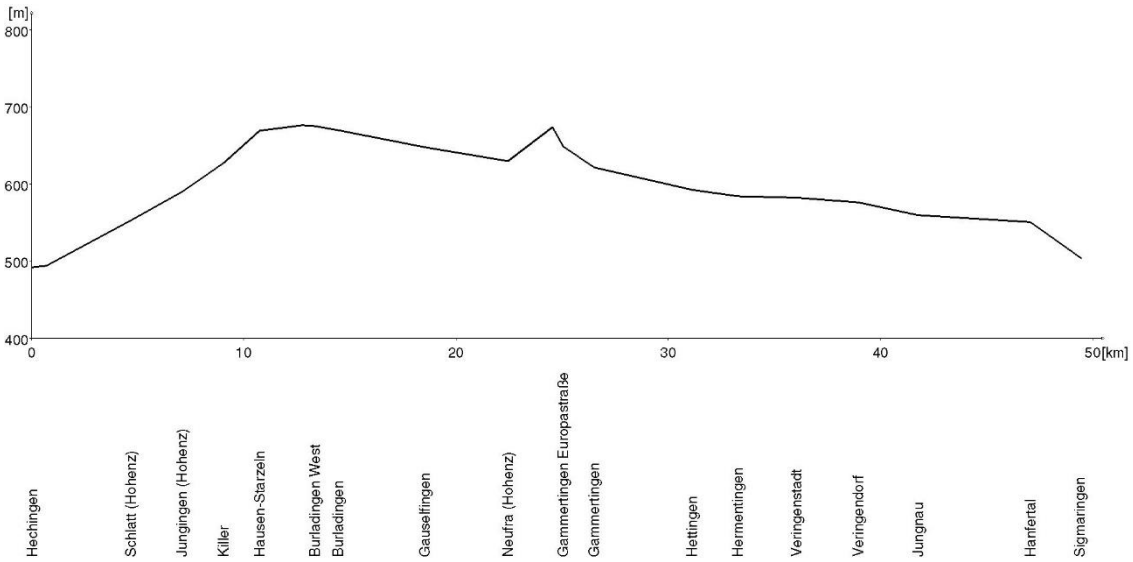


Abb. 161: Höhenprofil von Hechingen nach Sigmaringen

Zugtyp	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB
Zugnummer	86301	86000	86303	86305	86305	86307	86307	86309	86309	86311	86311	86313	86313	86315	86315	86317	86317	86319	
km																			
0 Hechingen	4:55	5:49	6:55	7:49	8:55	9:49	10:55	11:49	12:55	13:49	14:55	15:49	16:55	17:49	18:55	19:49	20:55	21:49	
5 Schlatt (Hohenz)	5:01	5:55	7:01	7:55	9:01	9:55	11:01	11:55	13:01	13:55	15:01	15:55	17:01	17:55	19:01	19:55	21:01	21:55	
7 Jungigen (Hohenz)	5:05	5:59	7:05	7:59	9:05	9:59	11:05	11:59	13:05	13:59	15:05	15:59	17:05	17:59	19:05	19:59	21:05	21:59	
9 Killer	5:08	6:02	7:08	8:02	9:08	10:02	11:08	12:02	13:08	14:02	15:08	16:02	17:08	18:02	19:08	20:02	21:08	22:02	
11 Hausen-Starzeln	5:11	6:05	7:11	8:05	9:11	10:05	11:11	12:05	13:11	14:05	15:11	16:05	17:11	18:05	19:11	20:05	21:11	22:05	
14 Burladingen-West	5:15	6:09	7:15	8:09	9:15	10:09	11:15	12:09	13:15	14:09	15:15	16:09	17:15	18:09	19:15	20:09	21:15	22:09	
15 Burladingen	5:18	6:12	7:18	8:12	9:18	10:12	11:18	12:12	13:18	14:12	15:18	16:12	17:18	18:12	19:18	20:12	21:18	22:12	
19 Gauselfingen	5:23	6:17	7:23	8:17	9:23	10:17	11:23	12:17	13:23	14:17	15:23	16:17	17:23	18:17	19:23	20:17	21:23	22:17	
23 Neufra (Hohenz)	5:28	6:22	7:28	8:22	9:28	10:22	11:28	12:22	13:28	14:22	15:28	16:22	17:28	18:22	19:28	20:22	21:28	22:22	
Gammertingen (Europastraße)	5:31	6:25	7:31	8:25	9:31	10:25	11:31	12:25	13:31	14:25	15:31	16:25	17:31	18:25	19:31	20:25	21:31	22:25	
28 Gammertingen	5:34	6:30	7:34	8:30	9:34	10:30	11:34	12:30	13:34	14:30	15:34	16:30	17:34	18:30	19:34	20:30	21:34	22:30	
32 Hettingen (Hohenz)		6:36		8:36		10:36		12:36		14:36		16:36		18:36		20:36		22:36	
34 Hermentingen		6:39		8:39		10:39		12:39		14:39		16:39		18:39		20:39		22:39	
37 Veringenstadt		6:45		8:45		10:45		12:45		14:45		16:45		18:45		20:45		22:45	
40 Veringendorf		6:49		8:49		10:49		12:49		14:49		16:49		18:49		20:49		22:49	
42 Jungnau		6:53		8:53		10:53		12:53		14:53		16:53		18:53		20:53		22:53	
48 Hanfertal		7:01		9:01		11:01		13:01		15:01		17:01		19:01		21:01		23:01	
50 Sigmaringen		7:05		9:05		11:05		13:05		15:05		17:05		19:05		21:05		23:05	
Fahrzeit	0:39	1:16	0:39	1:16	0:39	1:16	0:39	1:16	0:39	1:16	0:39	1:16	0:39	1:16	0:39	1:16	0:39	1:16	
Connexion	**86302**	**86003**	**86304**	**86005**	**86306**	**86007**	**86308**	**86009**	**86310**	**86011**	**86312**	**86013**	**86314**	**86015**	**86316**	**86017**	-	-	
nächste Abfahrt	**7:11**	**7:30**	**9:11**	**9:30**	**11:11**	**11:30**	**13:11**	**13:30**	**15:11**	**15:30**	**17:11**	**17:30**	**19:11**	**19:30**	**21:11**	**21:30**	-	-	
Wendezeit	**1:37**	**0:25**	**1:37**	**0:25**	**1:37**	**0:25**	**1:37**	**0:25**	**1:37**	**0:25**	**1:37**	**0:25**	**1:37**	**0:25**	**1:37**	**0:25**	-	-	

Abb. 162: Fahrplan Hechingen-Sigmaringen

Zugtyp	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB
Zugnummer	86300	86001	86302	86003	86304	86005	86306	86007	86308	86009	86310	86011	86312	86013	86314	86015	86316	86017	
km																			
50 Sigmaringen		5:30		7:30		9:30		11:30		13:30		15:30		17:30		19:30		21:30	
48 Hanfertal		5:34		7:34		9:34		11:34		13:34		15:34		17:34		19:34		21:34	
42 Jungnau		5:41		7:41		9:41		11:41		13:41		15:41		17:41		19:41		21:41	
40 Veringendorf		5:45		7:45		9:45		11:45		13:45		15:45		17:45		19:45		21:45	
37 Veringenstadt		4:49		6:49		8:49		10:49		12:49		14:49		16:49		18:49		20:49	
34 Hermentingen		5:55		7:55		9:55		11:55		13:55		15:55		17:55		19:55		21:55	
32 Hettingen (Hohenz)		5:58		7:58		9:58		11:58		13:58		15:58		17:58		19:58		21:58	
28 Gammertingen	5:11	6:06	7:11	8:06	9:11	10:06	11:11	12:06	13:11	14:06	15:11	16:06	17:11	18:06	19:11	20:06	21:11	22:06	
Gammertingen Europastraße	5:13	6:10	7:13	8:10	9:13	10:10	11:13	12:10	13:13	14:10	15:13	16:10	17:13	18:10	19:13	20:10	21:13	22:10	
23 Neufra (Hohenz)	5:17	6:12	7:17	8:12	9:17	10:12	11:17	12:12	13:17	14:12	15:17	16:12	17:17	18:12	19:17	20:12	21:17	22:12	
19 Gauselfingen	5:22	6:17	7:22	8:17	9:22	10:17	11:22	12:17	13:22	14:17	15:22	16:17	17:22	18:17	19:22	20:17	21:22	22:17	
15 Burladingen	5:28	6:23	7:28	8:23	9:28	10:23	11:28	12:23	13:28	14:23	15:28	16:23	17:28	18:23	19:28	20:23	21:28	22:23	
14 Burladingen West	5:31	6:25	7:31	8:25	9:31	10:25	11:31	12:25	13:31	14:25	15:31	16:25	17:31	18:25	19:31	20:25	21:31	22:25	
11 Hausen-Starzeln	5:34	6:29	7:34	8:29	9:34	10:29	11:34	12:29	13:34	14:29	15:34	16:29	17:34	18:29	19:34	20:29	21:34	22:29	
9 Killer	5:36	6:31	7:36	8:31	9:36	10:31	11:36	12:31	13:36	14:31	15:36	16:31	17:36	18:31	19:36	20:31	21:36	22:31	
7 Jungingen (Hohenz)	5:41	6:36	7:41	8:36	9:41	10:36	11:41	12:36	13:41	14:36	15:41	16:36	17:41	18:36	19:41	20:36	21:41	22:36	
5 Schlatt (Hohenz)	5:45	6:40	7:45	8:40	9:45	10:40	11:45	12:40	13:45	14:40	15:45	16:40	17:45	18:40	19:45	20:40	21:45	22:40	
0 Hechingen	5:51	6:46	7:51	8:46	9:51	10:46	11:51	12:46	13:51	14:46	15:51	16:46	17:51	18:46	19:51	20:46	21:51	22:46	
Fahrzeit	0:40	1:16	0:40	1:16	0:40	1:16	0:40	1:16	0:40	1:16	0:40	1:16	0:40	1:16	0:40	1:16	0:40	1:16	
Connexion	**86303**	**86305**	**86305**	**86307**	**86307**	**86309**	**86309**	**86311**	**86311**	**86313**	**86313**	**86315**	**86315**	**86317**	**86317**	**86319**	-	-	
nächste Abfahrt	**6:55**	**7:49**	**8:55**	**9:49**	**10:55**	**11:49**	**12:55**	**13:49**	**14:55**	**15:49**	**16:55**	**17:49**	**18:55**	**19:49**	**20:55**	**21:49**	-	-	
Wendezeit	**1:04**	**1:03**	**1:04**	**1:03**	**1:04**	**1:03**	**1:04**	**1:03**	**1:04**	**1:03**	**1:04**	**1:03**	**1:04**	**1:03**	**1:04**	**1:03**	-	-	

Abb. 163: Fahrplan Sigmaringen-Hechingen

Die Untersuchung weiterer Infrastrukturszenarien über Szenario 0 (siehe Abb. 164) hinaus erübrigte sich, da bereits mit diesem ein BEMU-Betrieb möglich ist.

Abb. 164: Infrastrukturszenario 0 Hechingen – Sigmaringen

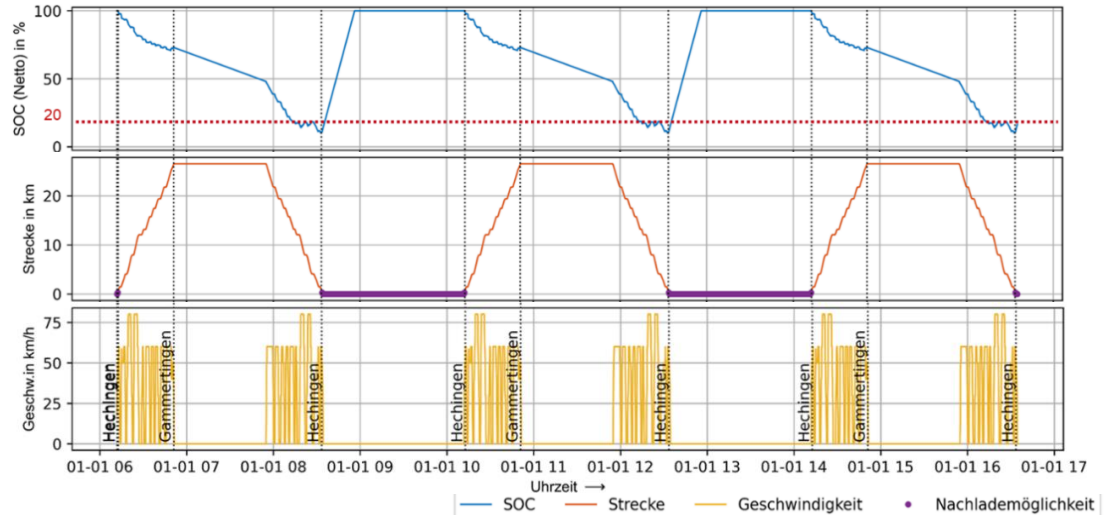


Abb. 165: Hechingen-Gammertingen (BEMU RB, Infrastrukturszenario 0)

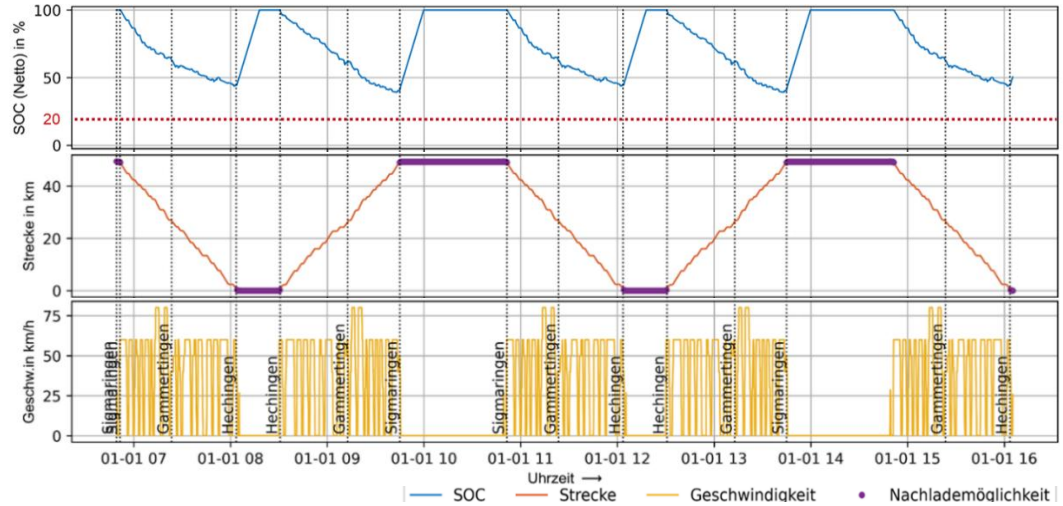


Abb. 166: Hechingen-Sigmaringen (BEMU RB, Infrastrukturszenario 0)

Die Abb. 165 und Abb. 166 stellen den SOC-Verlauf der Linie Hechingen – Gammertingen (Kurzläufer) sowie der Strecke Hechingen – Sigmaringen (Langläufer) dar. Für einen BEMU-Betrieb ist jeweils die Bestandselektrifizierung (d.h. die geplante Elektrifizierung des Bahnhofs Hechingen bzw. Hechingen und Sigmaringen) ausreichend.

9.3 Teilnetz 3 „RS Bodensee-Oberschwaben“ (TCO 3)

In Teilnetz 3 „RS Bodensee-Oberschwaben“ ist die hier zu betrachtende Strecke

- Aulendorf – Kißlegg

mit den zugrunde gelegten SPNV-Linien[96]

- Friedrichshafen < Aulendorf – Kißlegg > Leutkirch
- Aulendorf <> Wangen

zusammengefasst. Die betriebliche und energetische Betrachtung erfolgt zunächst auf Basis der Einzelstrecke bzw. der beiden SPNV-Linien (siehe Abb. 167).

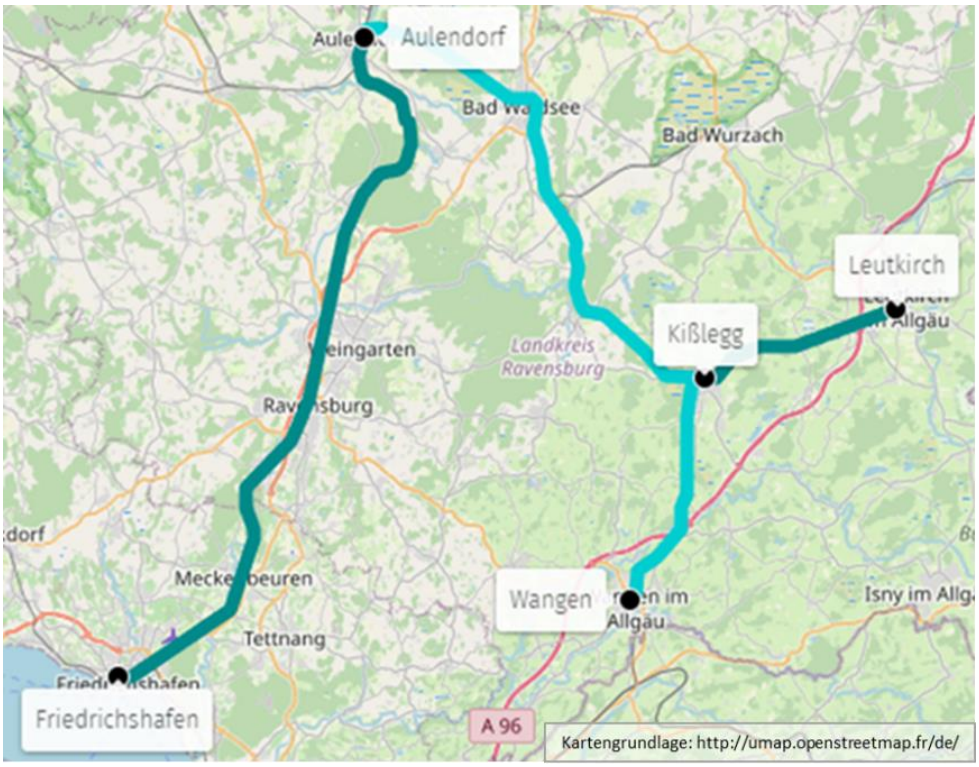


Abb. 167: Strecken bzw. Linien der RS Bodensee-Oberschwaben

Entsprechend den Festlegungen in Kapitel 7.6. werden für dieses Teilnetz nur die Technologiealternativen EMU und BEMU betrachtet (nicht HEMU).

In Abb. 168 ist nachstehend das Höhenprofil für die Strecke von Friedrichshafen nach Leutkirch dargestellt, in Abb. 169 das für die Strecke von Aulendorf nach Wangen.

[96] Siehe dazu auch der „Letter of Intent“, den die Landkreise Ravensburg, Bodenseekreis und Lindau sowie der Regionalverband Bodensee-Oberschwaben im Juni 2022 mit dem Land unterzeichnet haben https://vm.baden-wuerttemberg.de/de/service/presse/pressemitteilung/pid/regionaler-bahnverkehr-im-raum-oberschwaben-bodensee-soll-ausgebaut-werden

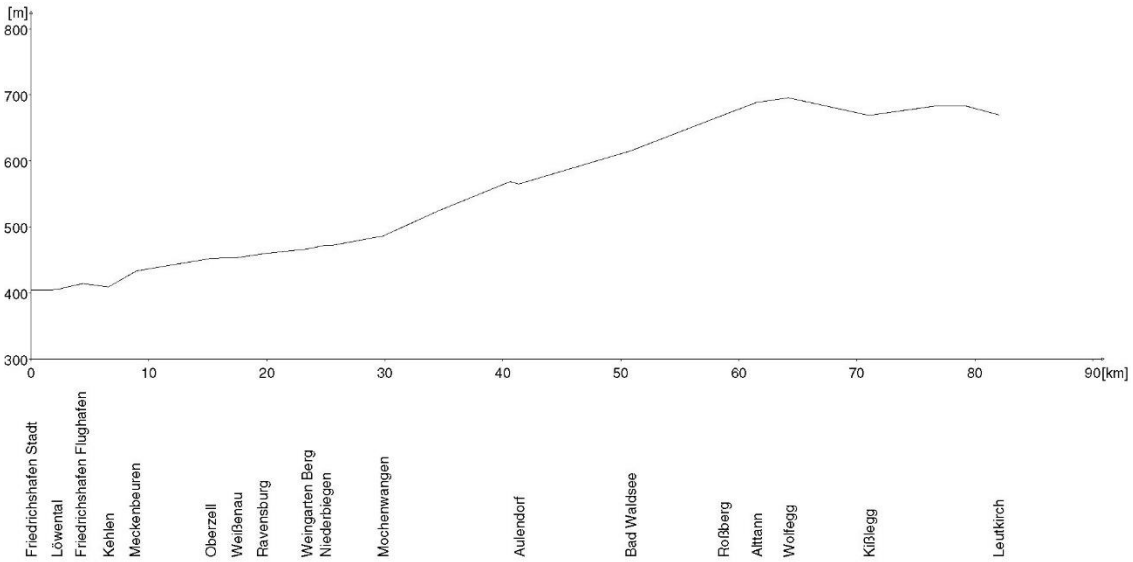


Abb. 168: Höhenprofil von Friedrichshafen nach Leutkirch

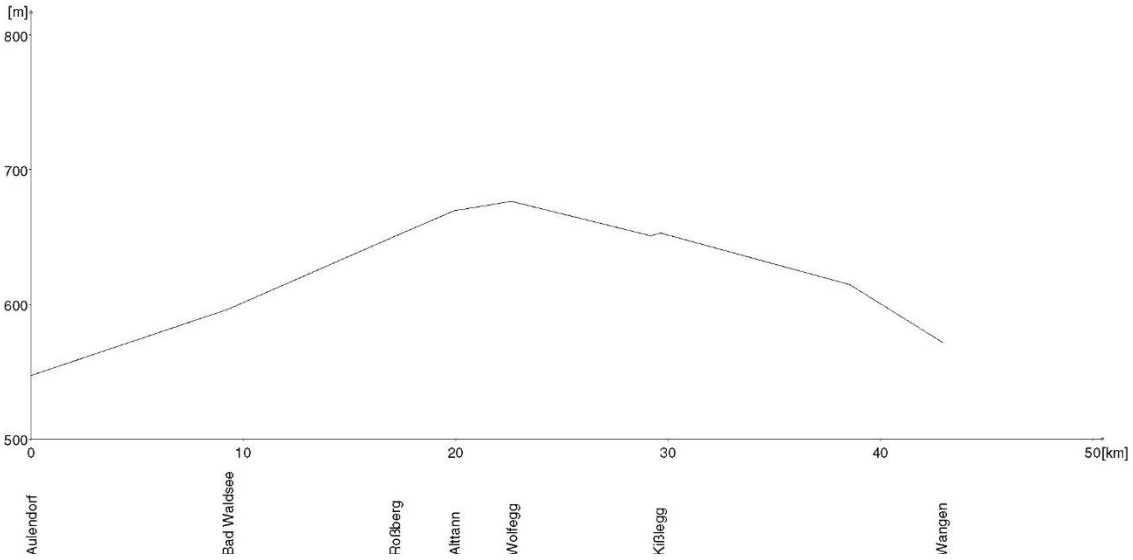


Abb. 169: Höhenprofil von Aulendorf nach Wangen

9.3.1 Infrastrukturszenarien

Für beide Linien erlaubt Szenario 0 (siehe Abb. 170 und Abb. 171) einen BEMU-Betrieb. Eine Untersuchung weiterer Infrastrukturszenarien war nicht nötig.

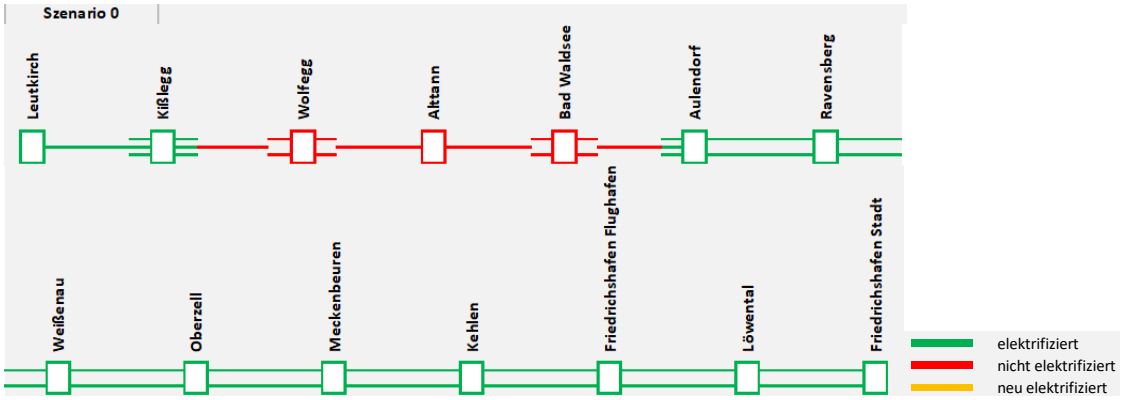


Abb. 170: Infrastrukturszenario 0 Leutkirch – Friedrichshafen Stadt

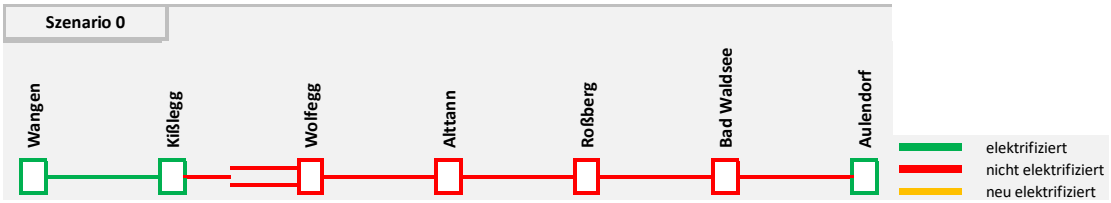


Abb. 171: Infrastrukturszenario 0 Aulendorf – Kißlegg – Wangen

9.3.2 Linie Friedrichshafen-Aulendorf-Kißlegg-Leutkirch

In Tabelle 19 sind die wesentlichen Strecken- bzw. Liniencharakteristika aufgeführt, die Abbildungen 172 und 173 zeigen die Fahrpläne der Linie Friedrichshafen – Leutkirch. Der SOC-Verlauf ist in Abb. 174 dargestellt. Die Bestandselektrifizierung ist für einen BEMU-Betrieb ausreichend.

Tabelle 19: Strecken- bzw. Liniencharakteristika der Linie Friedrichshafen-Leutkirch

Strecke	**Friedrichshafen-Leutkirch**
∑Streckenlänge [km]	82
Nicht elektrifiziert [km]	Aulendorf-Kißlegg, 30
Zweigleisigkeit [km]	Friedrichshafen – Aulendorf, 41
Δ Höhenmeter [m]	Friedrichshafen > Leutkirch: 292; Leutkirch > Friedrichshafen: 44
Ø Geschwindigkeit [km/h]	66,3
Takt [min]	60
Zugpaare Werktags (Hin-/Rückfahrten)	19
Zugpaare Wochenende (Hin-/Rückfahrten)	17
Haltanzahl	18
Ø Haltabstand [km]	4,6
Streckenklasse	D4

Zugtyp	RE	RE	RE	RE	RE	RE	RE	RE	RE	RE	RE	RE	RE	RE	RE	RE	RE	RE	RE	RE
Zugnummer	91000	91002	91004	91006	91008	91010	91012	91014	91016	91018	91020	91022	91024	91026	91028	91030	91032	91034	91036	
km																				
0 Leutkirch	5:08	6:08	7:08	8:08	9:08	10:08	11:08	12:08	13:08	14:08	15:08	16:08	17:08	18:08	19:08	20:08	21:08	22:08	23:08	
11 Kißlegg	5:16	6:16	7:16	8:16	9:16	10:16	11:16	12:16	13:16	14:16	15:16	16:16	17:16	18:16	19:16	20:16	21:16	22:16	23:16	
11 Kißlegg	5:24	6:24	7:24	8:24	9:24	10:24	11:24	12:24	13:24	14:24	15:24	16:24	17:24	18:24	19:24	20:24	21:24	22:24	23:24	
18 Wolfegg	5:29	6:29	7:29	8:29	9:29	10:29	11:29	12:29	13:29	14:29	15:29	16:29	17:29	18:29	19:29	20:29	21:29	22:29	23:29	
18 Wolfegg	5:31	6:31	7:31	8:31	9:31	10:31	11:31	12:31	13:31	14:31	15:31	16:31	17:31	18:31	19:31	20:31	21:31	22:31	23:31	
20 Alttann	5:37	6:37	7:37	8:37	9:37	10:37	11:37	12:37	13:37	14:37	15:37	16:37	17:37	18:37	19:37	20:37	21:37	22:37	23:37	
23 Roßberg	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|
31 Bad Waldsee	5:44	6:44	7:44	8:44	9:44	10:44	11:44	12:44	13:44	14:44	15:44	16:44	17:44	18:44	19:44	20:44	21:44	22:44	23:44	
41 Aulendorf	5:48	6:48	7:48	8:48	9:48	10:48	11:48	12:48	13:48	14:48	15:48	16:48	17:48	18:48	19:48	20:48	21:48	22:48	23:48	
41 Aulendorf	5:49	6:49	7:49	8:49	9:49	10:49	11:49	12:49	13:49	14:49	15:49	16:49	17:49	18:49	19:49	20:49	21:49	22:49	23:49	
52 Mochenwangen	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|
57 Niederbiegen	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|
59 Weingarten Berg	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|
62 Ravenburg	6:01	7:01	8:01	9:01	10:01	11:01	12:01	13:01	14:01	15:01	16:01	17:01	18:01	19:01	20:01	21:01	22:01	23:01	0:01	
62 Ravenburg	6:02	7:02	8:02	9:02	10:02	11:02	12:02	13:02	14:02	15:02	16:02	17:02	18:02	19:02	20:02	21:02	22:02	23:02	0:02	
65 Weißenau	6:05	7:05	8:05	9:05	10:05	11:05	12:05	13:05	14:05	15:05	16:05	17:05	18:05	19:05	20:05	21:05	22:05	23:05	0:05	
67 Oberzell	6:07	7:07	8:07	9:07	10:07	11:07	12:07	13:07	14:07	15:07	16:07	17:07	18:07	19:07	20:07	21:07	22:07	23:07	0:07	
73 Meckenbeuren	6:12	7:12	8:12	9:12	10:12	11:12	12:12	13:12	14:12	15:12	16:12	17:12	18:12	19:12	20:12	21:12	22:12	23:12	0:12	
75 Kehlen	6:15	7:15	8:15	9:15	10:15	11:15	12:15	13:15	14:15	15:15	16:15	17:15	18:15	19:15	20:15	21:15	22:15	23:15	0:15	
77 Friedrichshafen Flughafen	6:17	7:17	8:17	9:17	10:17	11:17	12:17	13:17	14:17	15:17	16:17	17:17	18:17	19:17	20:17	21:17	22:17	23:17	0:17	
80 Löwental	6:20	7:20	8:20	9:20	10:20	11:20	12:20	13:20	14:20	15:20	16:20	17:20	18:20	19:20	20:20	21:20	22:20	23:20	0:20	
82 Friedrichshafen Stadt	6:22	7:22	8:22	9:22	10:22	11:22	12:22	13:22	14:22	15:22	16:22	17:22	18:22	19:22	20:22	21:22	22:22	23:22	0:22	
Fahrzeit	1:14	1:14	1:14	1:14	1:14	1:14	1:14	1:14	1:14	1:14	1:14	1:14	1:14	1:14	1:14	1:14	1:14	1:14	1:14	
Connexion	91003	91005	91007	91009	91011	91013	91015	91017	91019	91021	91023	91025	91027	91029	91031	91033	91035	91037	-	
nächste Abfahrt	6:38	7:38	8:38	9:38	10:38	11:38	12:38	13:38	14:38	15:38	16:38	17:38	18:38	19:38	20:38	21:38	22:38	23:38	-	
Wendezeit	0:16	0:16	0:16	0:16	0:16	0:16	0:16	0:16	0:16	0:16	0:16	0:16	0:16	0:16	0:16	0:16	0:16	0:16	-	

Abb. 172: Fahrplan Leutkirch-Friedrichshafen

Zugtyp	RE	RE	RE	RE	RE	RE	RE	RE	RE	RE	RE	RE	RE	RE	RE	RE	RE	RE	RE
Zugnummer	91001	91003	91005	91007	91009	91011	91013	91015	91017	91019	91021	91023	91025	91027	91029	91031	91033	91035	91037
km																			
0 Friedrichshafen Stadt	5:38	6:38	7:38	8:38	9:38	10:38	11:38	12:38	13:38	14:38	15:38	16:38	17:38	18:38	19:38	20:38	21:38	22:38	23:38
2 Löwental	5:41	6:41	7:41	8:41	9:41	10:41	11:41	12:41	13:41	14:41	15:41	16:41	17:41	18:41	19:41	20:41	21:41	22:41	23:41
5 Friedrichshafen Flughafen	5:43	6:43	7:43	8:43	9:43	10:43	11:43	12:43	13:43	14:43	15:43	16:43	17:43	18:43	19:43	20:43	21:43	22:43	23:43
7 Kehlen	5:46	6:46	7:46	8:46	9:46	10:46	11:46	12:46	13:46	14:46	15:46	16:46	17:46	18:46	19:46	20:46	21:46	22:46	23:46
9 Meckenbeuren	5:49	6:49	7:49	8:49	9:49	10:49	11:49	12:49	13:49	14:49	15:49	16:49	17:49	18:49	19:49	20:49	21:49	22:49	23:49
15 Oberzell	5:54	6:54	7:54	8:54	9:54	10:54	11:54	12:54	13:54	14:54	15:54	16:54	17:54	18:54	19:54	20:54	21:54	22:54	23:54
17 Weißenau	5:56	6:56	7:56	8:56	9:56	10:56	11:56	12:56	13:56	14:56	15:56	16:56	17:56	18:56	19:56	20:56	21:56	22:56	23:56
20 Ravenburg	5:58	6:58	7:58	8:58	9:58	10:58	11:58	12:58	13:58	14:58	15:58	16:58	17:58	18:58	19:58	20:58	21:58	22:58	23:58
20 Ravenburg	5:59	6:59	7:59	8:59	9:59	10:59	11:59	12:59	13:59	14:59	15:59	16:59	17:59	18:59	19:59	20:59	21:59	22:59	23:59
23 Weingarten Berg	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|
25 Niederbiegen	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|
30 Mochenwangen	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|
41 Aulendorf	6:12	7:12	8:12	9:12	10:12	11:12	12:12	13:12	14:12	15:12	16:12	17:12	18:12	19:12	20:12	21:12	22:12	23:12	0:12
41 Aulendorf	6:13	7:13	8:13	9:13	10:13	11:13	12:13	13:13	14:13	15:13	16:13	17:13	18:13	19:13	20:13	21:13	22:13	23:13	0:13
51 Bad Waldsee	6:20	7:20	8:20	9:20	10:20	11:20	12:20	13:20	14:20	15:20	16:20	17:20	18:20	19:20	20:20	21:20	22:20	23:20	0:20
59 Roßberg	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|
62 Alttann	6:27	7:27	8:27	9:27	10:27	11:27	12:27	13:27	14:27	15:27	16:27	17:27	18:27	19:27	20:27	21:27	22:27	23:27	0:27
64 Wolfegg	6:29	7:29	8:29	9:29	10:29	11:29	12:29	13:29	14:29	15:29	16:29	17:29	18:29	19:29	20:29	21:29	22:29	23:29	0:29
64 Wolfegg	6:31	7:31	8:31	9:31	10:31	11:31	12:31	13:31	14:31	15:31	16:31	17:31	18:31	19:31	20:31	21:31	22:31	23:31	0:31
71 Kißlegg	6:36	7:36	8:36	9:36	10:36	11:36	12:36	13:36	14:36	15:36	16:36	17:36	18:36	19:36	20:36	21:36	22:36	23:36	0:36
71 Kißlegg	6:43	7:43	8:43	9:43	10:43	11:43	12:43	13:43	14:43	15:43	16:43	17:43	18:43	19:43	20:43	21:43	22:43	23:43	0:43
82 Leutkirch	6:51	7:51	8:51	9:51	10:51	11:51	12:51	13:51	14:51	15:51	16:51	17:51	18:51	19:51	20:51	21:51	22:51	23:51	0:51
Fahrzeit	1:13	1:13	1:13	1:13	1:13	1:13	1:13	1:13	1:13	1:13	1:13	1:13	1:13	1:13	1:13	1:13	1:13	1:13	1:13
Connexion	91004	91006	91008	91010	91012	91014	91016	91018	91020	91022	91024	91026	91028	91030	91032	91034	91036	-	-
nächste Abfahrt	7:08	8:08	9:08	10:08	11:08	12:08	13:08	14:08	15:08	16:08	17:08	18:08	19:08	20:08	21:08	22:08	23:08	-	-
Wendezeit	0:17	0:17	0:17	0:17	0:17	0:17	0:17	0:17	0:17	0:17	0:17	0:17	0:17	0:17	0:17	0:17	0:17	-	-

Abb. 173: Fahrplan Friedrichshafen–Leutkirch

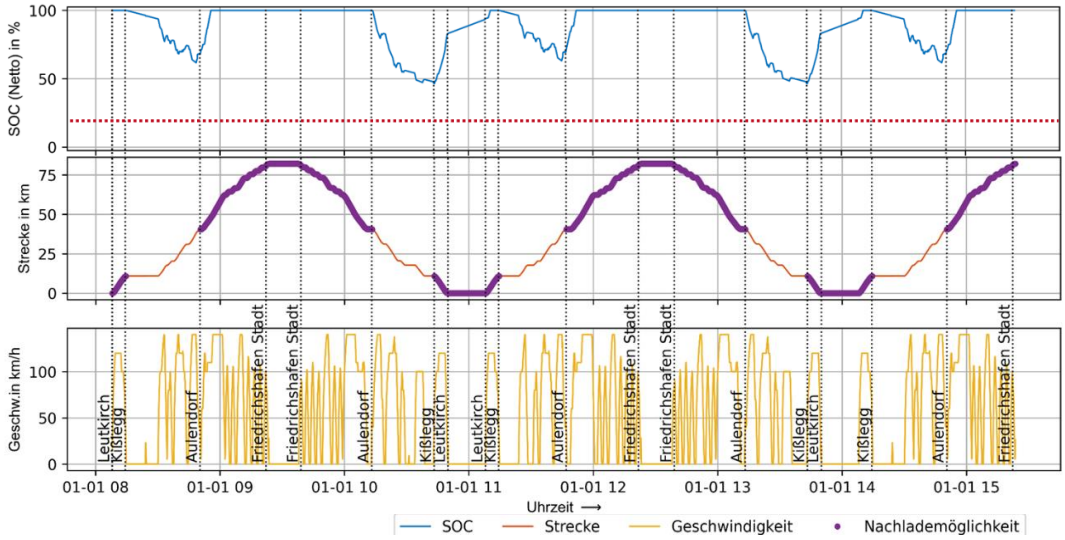


Abb. 174: SOC Leutkirch–Friedrichshafen (BEMU-RE, Infrastrukturszenario 0)

9.3.3 Linie Aulendorf-Kißlegg-Wangen

In Tabelle 20 sind die wesentlichen Strecken- bzw. Liniencharakteristika aufgeführt, die Abbildungen 175 und 176 zeigen die Fahrpläne der Linie Aulendorf – Wangen.

Tabelle 20: Strecken- bzw. Liniencharakteristika der Linie Aulendorf-Wangen

Strecke	**Aulendorf – Wangen**
∑ Streckenlänge [km]	43
Nicht elektrifiziert [km]	Aulendorf-Kißlegg, 30
Zweigleisigkeit [km]	Durchgehend eingleisig
Δ Höhenmeter [m]	Aulendorf>Wangen: 130, Wangen>Aulendorf: 107
Ø Geschwindigkeit [km/h]	71,7
Takt [min]	120
Zugpaare Werktags (Hin- / Rückfahrten)	9
Zugpaare Wochenende (Hin- / Rückfahrten)	8
Haltanzahl	4
Ø Haltabstand [km]	10,7
Streckenklasse	D4

Zugtyp	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB
Zugnummer	91500	91502	91504	91506	91508	91510	91512	91514	91516
km									
0 Wangen	5:22	7:22	9:22	11:22	13:22	15:22	17:22	19:22	21:22
13 Kißlegg	5:38	7:38	9:38	11:38	13:38	15:38	17:38	19:38	21:38
33 Bad Waldsee	5:51	7:51	9:51	11:51	13:51	15:51	17:51	19:51	21:51
43 Aulendorf	5:58	7:58	9:58	11:58	13:58	15:58	17:58	19:58	21:58
Fahrzeit	0:36	0:36	0:36	0:36	0:36	0:36	0:36	0:36	0:36
Connexion	91501	91503	91505	91507	91509	91511	91513	91515	91517
nächste Abfahrt	6:03	8:03	10:03	12:03	14:03	16:03	18:03	20:03	22:03
Wendezeit	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05

Abb. 175: Fahrplan Wangen-Aulendorf

Zugtyp	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB
Zugnummer	91501	91503	91505	91507	91509	91511	91513	91515	91517
km									
0 Aulendorf	6:03	8:03	10:03	12:03	14:03	16:03	18:03	20:03	22:03
9 Bad Waldsee	6:10	8:10	10:10	12:10	14:10	16:10	18:10	20:10	22:10
30 Kißlegg	6:23	8:23	10:23	12:23	14:23	16:23	18:23	20:23	22:23
43 Wangen	6:39	8:39	10:39	12:39	14:39	16:39	18:39	20:39	22:39
Fahrzeit	0:36	0:36	0:36	0:36	0:36	0:36	0:36	0:36	0:36
Connexion	91502	91504	91506	91508	91510	91512	91514	91516	-
nächste Abfahrt	7:22	9:22	11:22	13:22	15:22	17:22	19:22	21:22	-
Wendezeit	0:43	0:43	0:43	0:43	0:43	0:43	0:43	0:43	-

Abb. 176: Fahrplan Aulendorf-Wangen

Der SOC-Verlauf ist in Abb. 177 dargestellt. Auch für den BEMU-Betrieb auf der Strecke Wangen – Aulendorf ist die Bestandselektrifizierung ausreichend.

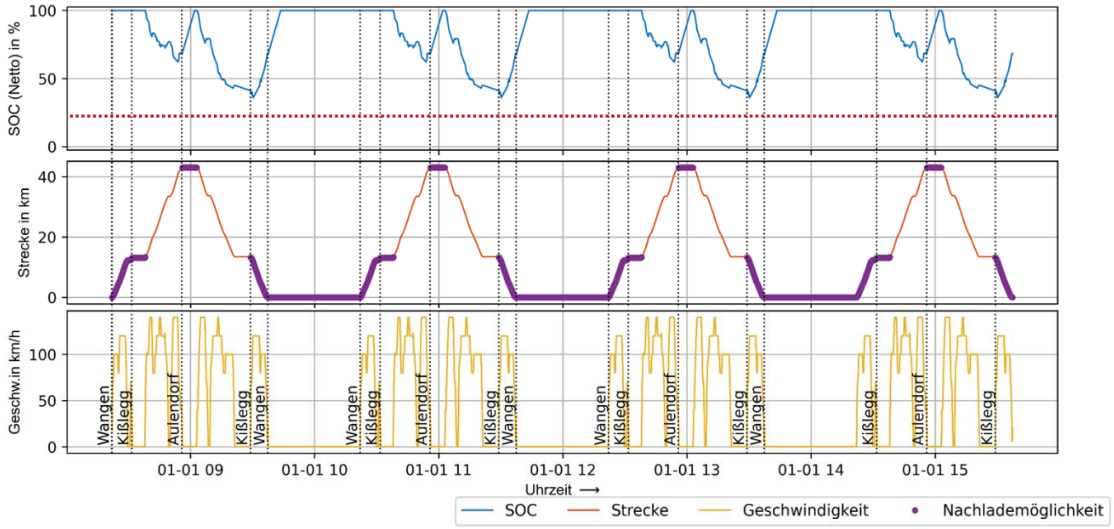


Abb. 177: SOC Wangen-Aulendorf (BEMU RB, Infrastrukturszenario 0)

9.3.4 Betriebsstatistik Teilnetz

Für den Betrieb der oben beschriebenen Strecken der RS Bodensee-Oberschwaben ergibt sich ein Fahrzeugbedarf von insgesamt vier Fahrzeugen. Die Fahrleistungen der jeweiligen Fahrzeuge sind in Abb. 178 dargestellt, hier für Werktage. Dabei beziehen sich die Fahrzeuge 1 bis 3 auf die Linie Friedrichshafen – Leutkirch und das Fahrzeug 4 bezieht sich auf die Strecke Aulendorf – Wangen.

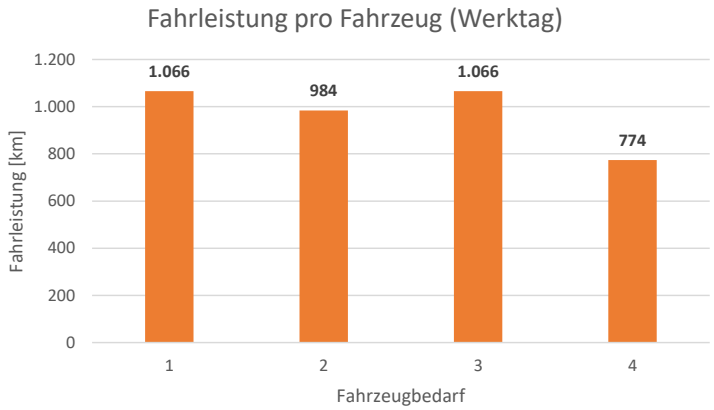


Abb. 178: Fahrleistung pro Fahrzeug der RS Bodensee-Oberschwaben

9.3.5 Infrastruktur- und Fahrzeugbedarf Teilnetz

9.3.5.1 Infrastrukturbedarf EMU

Für eine Elektrifizierung des Streckenabschnitts Aulendorf-Kißlegg sind 29,9 km zusätzliche Oberleitung notwendig. Diese setzen sich aus 28,5 km eingleisiger Strecke und 1,4 km zweigleisigen Abschnitten zusammen.

Zusätzliche Maßnahmen zur Anbindung an das Bahnstromnetz sind aufgrund des Lückenschlusses zwischen elektrifizierten Streckenabschnitten nicht erforderlich.

Die Elektrifizierungskomplexität (siehe 7.9.1) wird für die Gesamtstrecke als niedrig eingeschätzt. Hierfür ist zum einen eine nicht gegebene Tunnelproblematik und auch ansonsten unkritische Verhältnisse verantwortlich.

9.3.5.2 Infrastrukturbedarf BEMU

Für den BEMU-Betrieb ergibt sich kein zusätzlicher Elektrifizierungsbedarf. Zusätzliche Infrastrukturmaßnahmen (Kreuzungsbahnhöfe, Signaltechnik etc.) sind notwendig, um die allgemeine Fahrbarkeit sicherzustellen. Diese werden hier nicht betrachtet, da sie für jede Antriebsalternative gleichermaßen erforderlich sind.

9.3.5.3 Fahrzeugbedarfe

Entsprechend Kapitel 9.3.4 ergibt sich für den EMU- bzw. BEMU-Betrieb der beiden Linien ein Bedarf von vier Fahrzeugen. Mit einer entsprechenden Betriebs- und Instandhaltungsreserve erhöht sich der Bedarf durch je zwei Fahrzeuge als Reserve auf insgesamt acht Fahrzeuge.

9.3.6 Ergänzende Betrachtungen zum Teilnetz

9.3.6.1 Netzwirkung / Durchbindungsaspekte

Nach der erfolgten Elektrifizierung der Nord-Süd-Korridore Ulm-Friedrichshafen („Südbahn“) und München-Lindau hat sich die Einstufung des kurzen, nicht elektrifizierten Abschnitts Aulendorf-Kißlegg, der diese beiden elektrifizierten Korridore „trennt“, erheblich verändert. Auch wenn die Eingleisigkeit der Strecke die betrieblichen Möglichkeiten mindert, bietet ein elektrischer Lückenschluss einiges Potenzial, neben den Optionen im SPNV insbesondere auch im Güterverkehr.

Diese Lückenschluss- bzw. Umleitungsfunktion würde zusätzlich an Bedeutung gewinnen, wenn mittelfristig auch eine Elektrifizierung Aulendorf-Mengen und Mengen-Stockach erfolgen würde (siehe 9.2.5.1). Dieser Verbindung könnte sogar Relevanz für eine Entlastung der Rheintalbahn im Schweizverkehr zugesprochen werden[97].

9.3.6.2 Güterverkehrsaspekte

Eine Güterverkehrsbedeutung besteht sowohl lokal als auch überregional. Zu nennen sind z.B. der Verkehr Rossberg - Friedrichshafen/Kressbronn, bei Wiederaufnahme auch wieder Quarzzüge aus Bad Wurzach via Rossberg. Im Fernverkehr kämen nach der Elektrifizierung auch Ölverkehre aus Karlsruhe zum Tanklager Aichstetten in Betracht.

Nach der Elektrifizierung der Strecke München-Lindau ist bereits eine deutliche Güterverkehrszunahme in Richtung des Containerterminals in Wolfurt/Österreich festzustellen. Auch wenn diese Verkehre keinen direkten Bezug zum Lückenschluss Aulendorf-Kißlegg haben, können sie als Indiz dazu dienen, dass Elektrifizierungen mit überregionaler Relevanz positive Folgewirkungen initiieren können. Es wird empfohlen, bei den angedachten Infrastrukturergänzungen im Zusammenhang mit dem RS-Konzept ggf. auch Güterverkehrsaspekte in die Betrachtung einzubeziehen (u.a. Länge von Kreuzungsbahnhöfen).

9.3.6.3 Zeitschiene / Sonstige externe Einflüsse

Es sind keine besonderen Einflüsse erkennbar.

9.4 Teilnetz 4 „Westfrankenbahn“ (TCO 4)

In Teilnetz 4 „Westfrankenbahn“ sind die zwei hier zu betrachtenden Strecken

- Miltenberg - Lauda/Königshofen - Crailsheim
- Miltenberg - Seckach

zusammengefasst. Die betriebliche und energetische Betrachtung erfolgt nachstehend zunächst auf Basis der Einzelstrecken bzw. Linien.

Entsprechend den Festlegungen in Kapitel 7.6. werden für dieses Teilnetz alle Technologiealternativen betrachtet (EMU, BEMU und HEMU).

Das Strecken- bzw. Liniennetz ist in Abb. 179 dargestellt.

[97] Diese Möglichkeit besteht zwar grundsätzlich bereits mit der Elektrifizierung der Bodenseegürtelbahn, zu beachten ist allerdings die erhöhte Sensibilität der Bodenseeregion, die bei einer Umfahrung via Stockach weniger belastet würde.

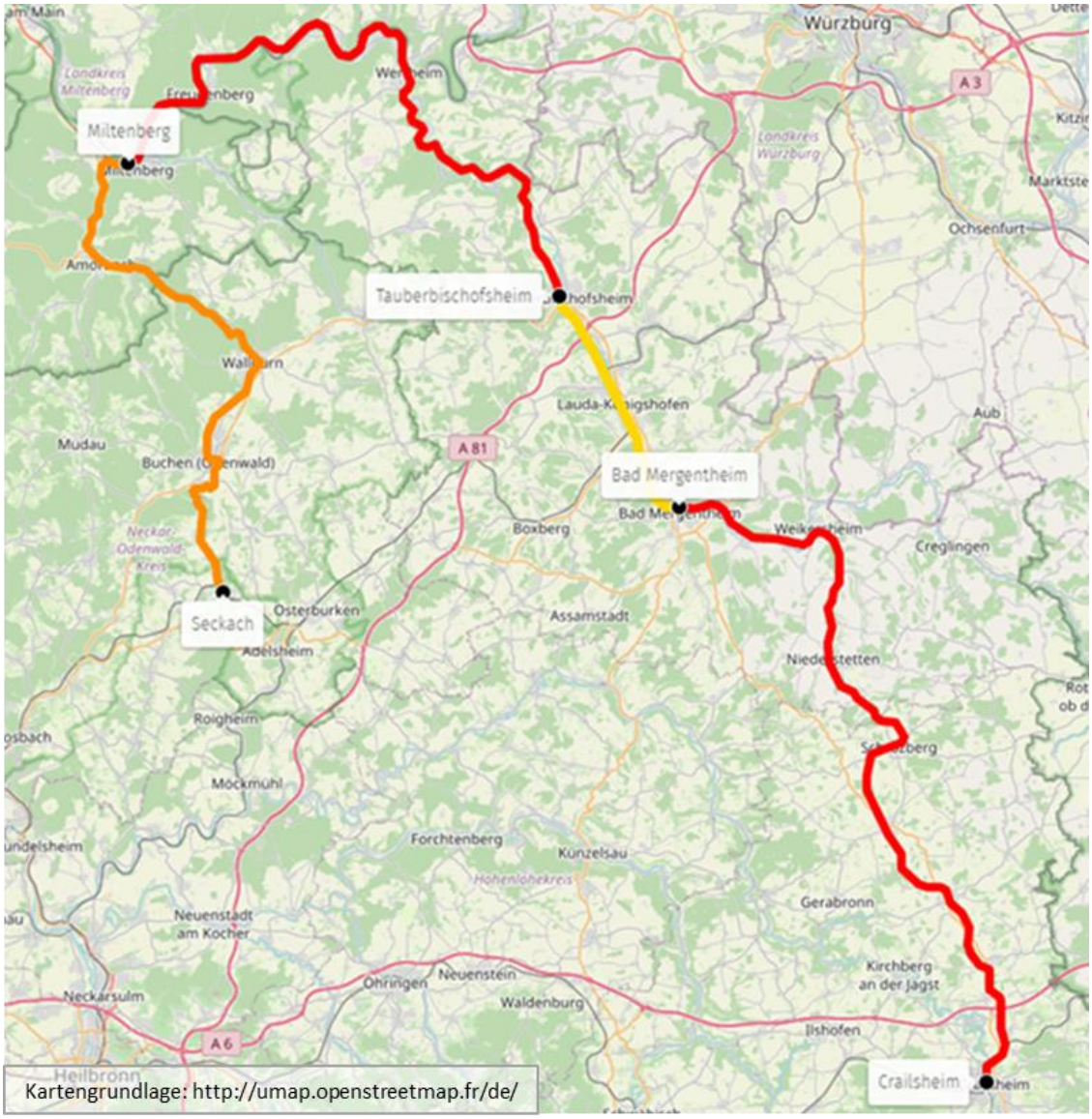


Abb. 179: Strecken der Westfrankenbahn

Abb. 180 zeigt das Höhenprofil für die Strecke Crailsheim-Miltenberg, Abb. 181 das für die Strecke Miltenberg-Seckach. Deutlich erkennbar ist hier, dass die Fahrtrichtung von Miltenberg in Richtung Crailsheim energetisch kritischer ist, auf der Madonnenlandbahn ist es die Fahrtrichtung Miltenberg-Seckach.

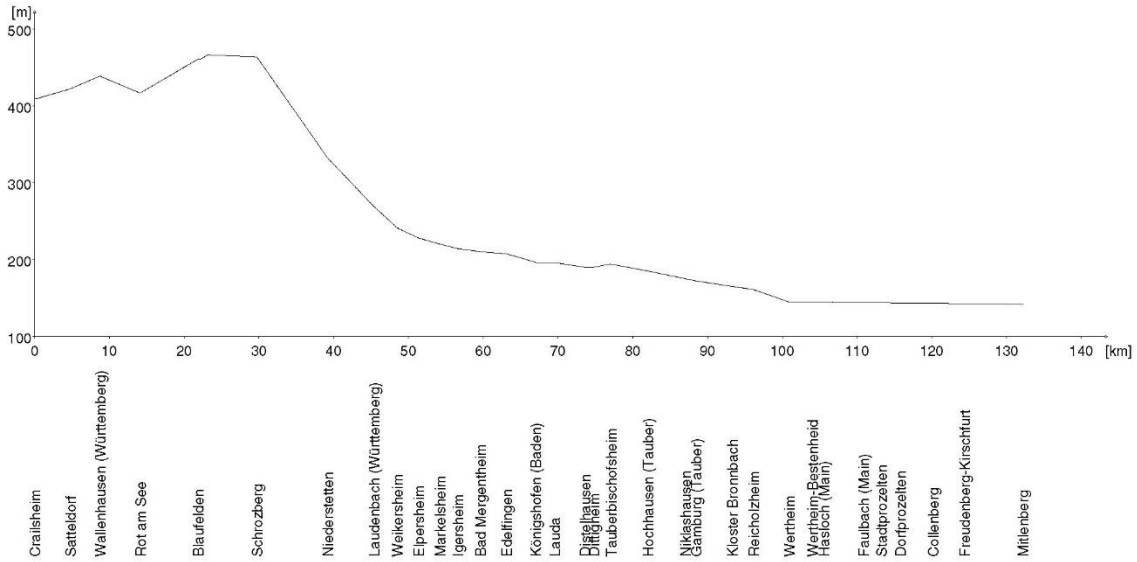


Abb. 180: Höhenprofil von Crailsheim nach Miltenberg

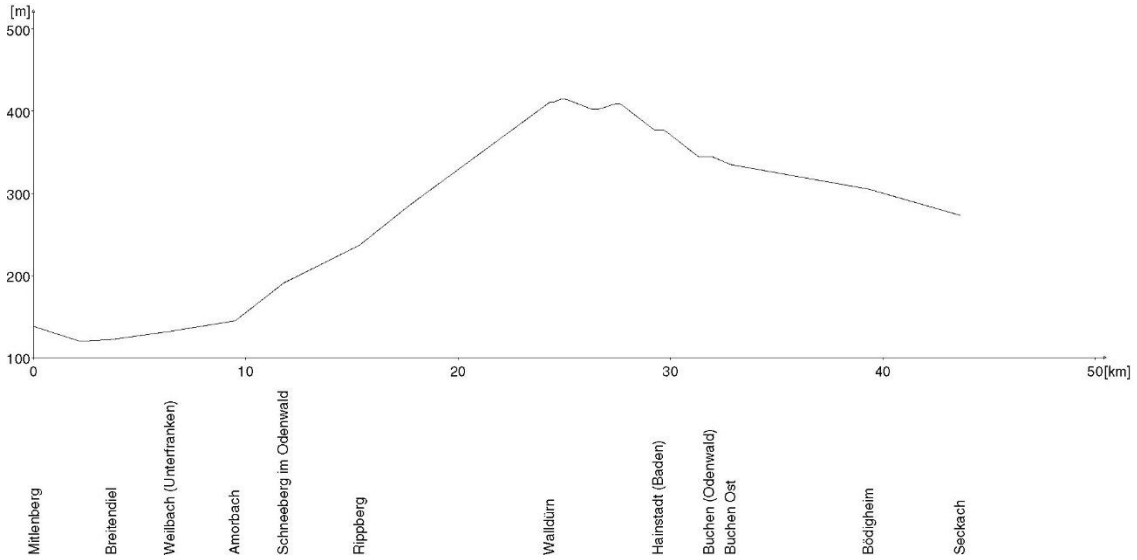


Abb. 181: Höhenprofil von Miltenberg nach Seckach

9.4.1 Strecke Miltenberg-Lauda/Königshofen-Crailsheim

Für den SPNV-Betrieb wird zwischen folgenden Linien unterschieden:

- Miltenberg <> Crailsheim
- Tauberbischofsheim <> Bad Mergentheim

In Tabelle 21 sind die wesentlichen Strecken- bzw. Liniencharakteristika aufgeführt.

Die Abbildungen 182 und 183 zeigen die Fahrpläne, bzw. Ausschnitte davon, mit Fahr- und Wendezeiten, für die Linien Miltenberg und Crailsheim, sowie Tauberbischofsheim und Bad Mergentheim.

Tabelle 21: Strecken- bzw. Liniencharakteristika Miltenberg-Lauda/Königshofen-Crailsheim

Strecke	**Miltenberg-Crailsheim**	**Tauberbischofsheim-Bad Mergentheim**
∑Streckenlänge [km]	131	17
Nicht elektrifiziert [km]	Miltenberg-Lauda; Königshofen-Crailsheim, 128	Bad Mergentheim-Königshofen; Tauberbischofsheim-Lauda, 14
Zweigleisigkeit [km]	Lauda – Königshofen, 3	Lauda – Königshofen, 3
Δ Höhenmeter [m]	Miltenberg>Crailsheim: 353 Crailsheim>Miltenberg: 79	Tauberbischofsheim>Bad Mergentheim: 19 Bad Mergentheim>Tauberbischofsheim: 4
Ø Geschwindigkeit [km/h]	54,6	52,2
Takt [min]	60	60
Zugpaare Werktags (Hin- / Rückfahrten)	19	19
Zugpaare Wochenende (Hin- / Rückfahrten)	17	17
Haltanzahl	33	7
Ø Haltabstand [km]	4,0	2,4
Streckenklasse	D4	D4

Zugtyp	RB	RE	RB	RE	RB	RE	RB	RE	RB	RE	RB	RE	RB	RE	RB	RE
Zugnummer	88501	88001	88501	88001	88503	88003	88505	88005	88507	88007	88509	88009	88511	88011	88513	88013
km																
0 Crailsheim		4:34		5:34		6:34		7:34		8:34		9:34		10:34		11:34
5 Satteldorf		4:38		5:38		6:38		7:38		8:38		9:38		10:38		11:38
9 Wallhausen (Württ)		4:42		5:42		6:42		7:42		8:42		9:42		10:42		11:42
14 Rot am See		4:47		5:47		6:47		7:47		8:47		9:47		10:47		11:47
22 Blaufelden		4:53		5:53		6:53		7:53		8:53		9:53		10:53		11:53
29 Schrozberg		4:59		5:59		6:59		7:59		8:59		9:59		10:59		11:59
29 Schrozberg		5:01		6:01		7:01		8:01		9:01		10:01		11:01		12:01
34 Niederstetten		5:10		6:10		7:10		8:10		9:10		10:10		11:10		12:10
45 Laudenbach (Württ)		5:15		6:15		7:15		8:15		9:15		10:15		11:15		12:15
48 Weikersheim		5:19		6:19		7:19		8:19		9:19		10:19		11:19		12:19
51 Elpersheim		5:22		6:22		7:22		8:22		9:22		10:22		11:22		12:22
54 Markelsheim		5:25		6:25		7:25		8:25		9:25		10:25		11:25		12:25
54 Markelsheim		5:29		6:29		7:29		8:29		9:29		10:29		11:29		12:29
56 Igersheim		5:31		6:31		7:31		8:31		9:31		10:31		11:31		12:31
59 Bad Mergentheim		5:35		6:35		7:35		8:35		9:35		10:35		11:35		12:35
59 Bad Mergentheim	5:04	5:36	6:04	6:36	7:04	7:36	8:04	8:36	9:04	9:36	10:04	10:36	11:04	11:36	12:04	12:36
62 Edelfingen	5:07	5:39	6:07	6:39	7:07	7:39	8:07	8:39	9:07	9:39	10:07	10:39	11:07	11:39	12:07	12:39
66 Königshofen (Baden)	5:11	5:43	6:11	6:43	7:11	7:43	8:11	8:43	9:11	9:43	10:11	10:43	11:11	11:43	12:11	12:43
69 Lauda	5:14	5:46	6:14	6:46	7:14	7:46	8:14	8:46	9:14	9:46	10:14	10:46	11:14	11:46	12:14	12:46
69 Lauda	5:18	5:52	6:18	6:52	7:18	7:52	8:18	8:52	9:18	9:52	10:18	10:52	11:18	11:52	12:18	12:52
73 Distelhausen	5:21	5:54	6:21	6:54	7:21	7:54	8:21	8:54	9:21	9:54	10:21	10:54	11:21	11:54	12:21	12:54
74 Dittigheim	5:24	5:55	6:24	6:55	7:24	7:55	8:24	8:55	9:24	9:55	10:24	10:55	11:24	11:55	12:24	12:55
76 Tauberbischofsheim	5:27	5:58	6:27	6:58	7:27	7:58	8:27	8:58	9:27	9:58	10:27	10:58	11:27	11:58	12:27	12:58
76 Tauberbischofsheim		5:59		6:59		7:59		8:59		9:59		10:59		11:59		12:59
81 Hochhausen (Tauber)		6:03		7:03		8:03		9:03		10:03		11:03		12:03		13:03
86 Niklashausen		6:08		7:08		8:08		9:08		10:08		11:08		12:08		13:08
88 Gamburg (Tauber)		6:11		7:11		8:11		9:11		10:11		11:11		12:11		13:11
93 Kloster Bronnbach		6:15		7:15		8:15		9:15		10:15		11:15		12:15		13:15
96 Reicholzheim		6:18		7:18		8:18		9:18		10:18		11:18		12:18		13:18
100 Wertheim		6:24		7:24		8:24		9:24		10:24		11:24		12:24		13:24
100 Wertheim		6:26		7:26		8:26		9:26		10:26		11:26		12:26		13:26
103 Wertheim-Bestenheid		6:29		7:29		8:29		9:29		10:29		11:29		12:29		13:29
105 Hasloch (Main)		6:32		7:32		8:32		9:32		10:32		11:32		12:32		13:32
110 Faulbach (Main)		6:37		7:37		8:37		9:37		10:37		11:37		12:37		13:37
113 Stadtprozelten		6:41		7:41		8:41		9:41		10:41		11:41		12:41		13:41
115 Dorfprozelten		6:44		7:44		8:44		9:44		10:44		11:44		12:44		13:44
120 Collenberg		6:48		7:48		8:48		9:48		10:48		11:48		12:48		13:48
124 Freudenberg-Kirschfurt		6:52		7:52		8:52		9:52		10:52		11:52		12:52		13:52
131 Miltenberg		6:58		7:58		8:58		9:58		10:58		11:58		12:58		13:58
Fahrzeit	0:23	2:24	0:23	2:24	0:23	2:24	0:23	2:24	0:23	2:24	0:23	2:24	0:23	2:24	0:23	2:24
Connexion	**88502**	**88008**	**88504**	**88010**	**88506**	**88012**	**88508**	**88014**	**88510**	**88016**	**88512**	**88018**	**88514**	**88020**	**88516**	**88022**
nächste Abfahrt	**5:36**	**8:00**	**6:36**	**9:00**	**7:36**	**10:00**	**8:36**	**11:00**	**9:36**	**12:00**	**10:36**	**13:00**	**11:36**	**14:00**	**12:36**	**15:00**
Wendezeit	**0:09**	**1:02**	**0:09**	**1:02**	**0:09**	**1:02**	**0:09**	**1:02**	**0:09**	**1:02**	**0:09**	**1:02**	**0:09**	**1:02**	**0:09**	**1:02**

Abb. 182: Auszug Fahrplan Crailsheim-Miltenberg

	Zugtyp	RB	RE	RB	RE	RB	RE	RB	RE	RB	RE	RB	RE	RB	RE	RB	RE
	Zugnummer	88500	88000	88502	88002	88504	88004	88506	88006	88508	88008	88510	88010	88512	88012	88514	88014
km																	
131	Miltenberg		4:00		5:00		6:00		7:00		8:00		9:00		10:00		11:00
124	Freudenberg-Kirschfurt		4:06		5:06		6:06		7:06		8:06		9:06		10:06		11:06
120	Collenberg		4:10		5:10		6:10		7:10		8:10		9:10		10:10		11:10
115	Dorfprozelten		4:14		5:14		6:14		7:14		8:14		9:14		10:14		11:14
113	Stadtprozelten		4:16		5:16		6:16		7:16		8:16		9:16		10:16		11:16
113	Stadtprozelten		4:18		5:18		6:18		7:18		8:18		9:18		10:18		11:18
110	Faulbach (Main)		4:21		5:21		6:21		7:21		8:21		9:21		10:21		11:21
105	Hasloch (Main)		4:26		5:26		6:26		7:26		8:26		9:26		10:26		11:26
103	Wertheim-Bestenheid		4:28		5:28		6:28		7:28		8:28		9:28		10:28		11:28
103	Wertheim-Bestenheid		4:30		5:30		6:30		7:30		8:30		9:30		10:30		11:30
100	Wertheim		4:33		5:33		6:33		7:33		8:33		9:33		10:33		11:33
100	Wertheim		4:34		5:34		6:34		7:34		8:34		9:34		10:34		11:34
96	Reicholzheim		4:38		5:38		6:38		7:38		8:38		9:38		10:38		11:38
93	Kloster Bronnbach		4:41		5:41		6:41		7:41		8:41		9:41		10:41		11:41
88	Gamburg (Tauber)		4:46		5:46		6:46		7:46		8:46		9:46		10:46		11:46
86	Niklashausen		4:48		5:48		6:48		7:48		8:48		9:48		10:48		11:48
81	Hochhausen (Tauber)		4:52		5:52		6:52		7:52		8:52		9:52		10:52		11:52
76	Tauberbischofsheim		4:58		5:58		6:58		7:58		8:58		9:58		10:58		11:58
76	Tauberbischofsheim	4:36	5:00	5:36	6:00	6:36	7:00	7:36	8:00	8:36	9:00	9:36	10:00	10:36	11:00	11:36	12:00
74	Dittigheim	4:38	5:02	5:38	6:02	6:38	7:02	7:38	8:02	8:38	9:02	9:38	10:02	10:38	11:02	11:38	12:02
73	Distelhausen	4:41	5:05	5:41	6:05	6:41	7:05	7:41	8:05	8:41	9:05	9:41	10:05	10:41	11:05	11:41	12:05
69	Lauda	4:45	5:06	5:45	6:06	6:45	7:06	7:45	8:06	8:45	9:06	9:45	10:06	10:45	11:06	11:45	12:06
69	Lauda	4:54	5:12	5:54	6:12	6:54	7:12	7:54	8:12	8:54	9:12	9:54	10:12	10:54	11:12	11:54	12:12
66	Königshofen (Baden)	4:57	5:15	5:57	6:15	6:57	7:15	7:57	8:15	8:57	9:15	9:57	10:15	10:57	11:15	11:57	12:15
62	Edelfingen	5:00	5:18	6:00	6:18	7:00	7:18	8:00	8:18	9:00	9:18	10:00	10:18	11:00	11:18	12:00	12:18
59	Bad Mergentheim	5:03	5:23	6:03	6:23	7:03	7:23	8:03	8:23	9:03	9:23	10:03	10:23	11:03	11:23	12:03	12:23
56	Igersheim		5:26		6:26		7:26		8:26		9:26		10:26		11:26		12:26
54	Markelsheim		5:29		6:29		7:29		8:29		9:29		10:29		11:29		12:29
54	Markelsheim		5:31		6:31		7:31		8:31		9:31		10:31		11:31		12:31
51	Elpersheim		5:34		6:34		7:34		8:34		9:34		10:34		11:34		12:34
48	Weikersheim		5:37		6:37		7:37		8:37		9:37		10:37		11:37		12:37
45	Laudenbach (Württ)		5:40		6:40		7:40		8:40		9:40		10:40		11:40		12:40
34	Niederstetten		5:46		6:46		7:46		8:46		9:46		10:46		11:46		12:46
29	Schrozberg		5:55		6:55		7:55		8:55		9:55		10:55		11:55		12:55
29	Schrozberg		6:01		7:01		8:01		9:01		10:01		11:01		12:01		13:01
22	Blaufelden		6:06		7:06		8:06		9:06		10:06		11:06		12:06		13:06
14	Rot am See		6:12		7:12		8:12		9:12		10:12		11:12		12:12		13:12
9	Wallhausen (Württ)		6:17		7:17		8:17		9:17		10:17		11:17		12:17		13:17
5	Satteldorf		6:21		7:21		8:21		9:21		10:21		11:21		12:21		13:21
0	Crailsheim		6:25		7:25		8:25		9:25		10:25		11:25		12:25		13:25
	Fahrzeit	0:27	2:25	0:27	2:25	0:27	2:25	0:27	2:25	0:27	2:25	0:27	2:25	0:27	2:25	0:27	2:25
	Connexion	**88501**	**88005**	**88503**	**88007**	**88505**	**88009**	**88507**	**88011**	**88509**	**88013**	**88511**	**88015**	**88513**	**88017**	**88515**	**88019**
	nächste Abfahrt	**6:04**	**7:34**	**7:04**	**8:34**	**8:04**	**9:34**	**9:04**	**10:34**	**10:04**	**11:34**	**11:04**	**12:34**	**12:04**	**13:34**	**13:04**	**14:34**
	Wendezeit	**1:01**	**1:09**	**1:01**	**1:09**	**1:01**	**1:09**	**1:01**	**1:09**	**1:01**	**1:09**	**1:01**	**1:09**	**1:01**	**1:09**	**1:01**	**1:09**

Abb. 183: Auszug Fahrplan Miltenberg-Crailsheim

9.4.1.1 Infrastrukturszenarien

Die Prüfung der Machbarkeit für den BEMU-Betrieb erfolgte wiederum anhand von Infrastrukturszenarien (siehe 7.8.2). Für die Taubertalbahn wurden zunächst sieben unterschiedliche Infrastrukturszenarien vorgesehen. Diese sind in Tabelle 22 beschrieben.

Das Infrastrukturszenario 0 (Abb. 184) gibt den derzeitigen Stand der Elektrifizierung der Strecke wieder (Ausnahme: Miltenberg wurde als elektrifiziert vorausgesetzt / Elektrifizierungsmaßnahme Aschaffenburg-Miltenberg der BEG). Szenario 3a setzt sich aus den Szenarien 2a und 2b zusammen, Szenario 3b (Abb. 185) erweitert Szenario 2b um eine Elektrifizierung zwischen Wertheim Bestenheid und Wertheim Bahnhof (als Alternative zu einer Elektrifizierung des Abschnitts Miltenberg-Wertheim).

Die Untersuchung weiterer Infrastrukturszenarien erübrigte sich, da innerhalb der genannten Szenarienauswahl die Machbarkeit nachgewiesen werden konnte.

Tabelle 22: BEMU-Infrastrukturszenarien Westfrankenbahn

Szenario 0	Elektrifizierung Lauda <> Königshofen, Bahnhöfe Miltenberg u. Crailsheim
Szenario 1	Elektrifizierung Tauberbischofsheim <> Bad Mergentheim, Bahnhöfe Miltenberg u. Crailsheim
Szenario 2a	Elektrifizierung Tauberbischofsheim <> Bad Mergentheim, Miltenberg <> Wertheim u. Bahnhof Crailsheim
Szenario 2b	Elektrifizierung Tauberbischofsheim <> Bad Mergentheim, Blaufelden <> Crailsheim u. Bahnhof Miltenberg
Szenario 2c	Elektrifizierung Tauberbischofsheim <> Crailsheim u. Bahnhof Miltenberg
Szenario 3a	Elektrifizierung Miltenberg <> Wertheim, Tauberbischofsheim <> Bad Mergentheim u. Blaufelden <> Crailsheim
Szenario 3b	Elektrifizierung Tauberbischofsheim <> Bad Mergentheim, Blaufelden <> Crailsheim, Wertheim Bestenheid <> Wertheim Bahnhof u. Bahnhof Miltenberg

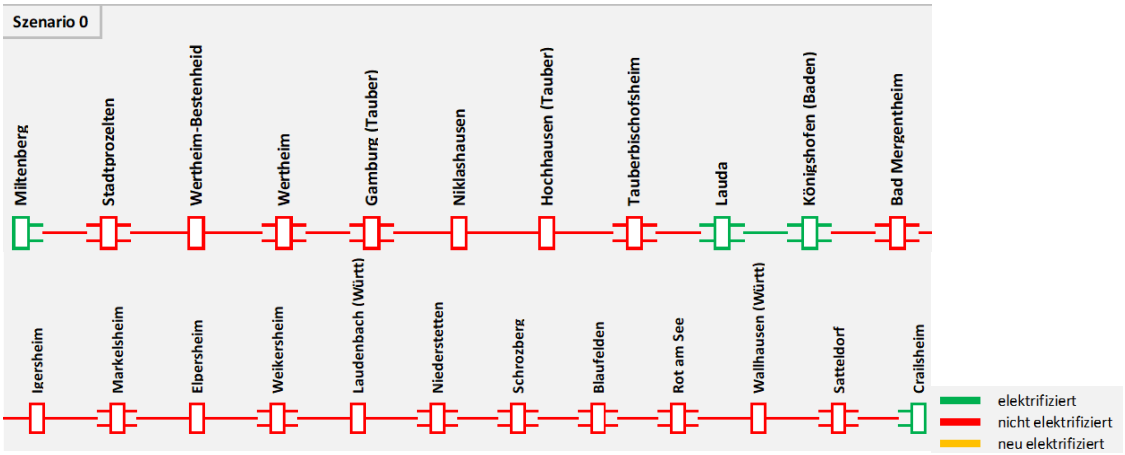


Abb. 184: Infrastrukturszenario 0 Miltenberg-Crailsheim („Taubertalbahn“)

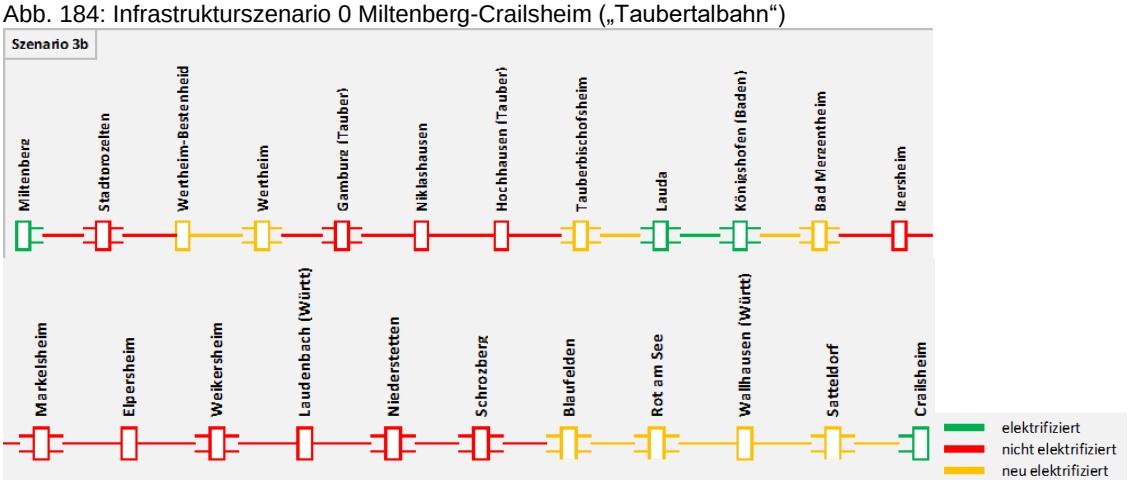


Abb. 185: Infrastrukturszenario 3b Miltenberg-Crailsheim („Taubertalbahn“)

9.4.1.2 Linie Miltenberg-Crailsheim

Abb. 186 zeigt den SOC-Verlauf für Szenario 3b mit einem RE-Fahrzeug. Es ist erkennbar, dass mit der zusätzlichen Elektrifizierung ein BEMU-Betrieb der Linie Miltenberg – Crailsheim möglich ist. In Abb. 187 ist der Energiebedarf für ein HEMU-RE-Fahrzeug dargestellt.

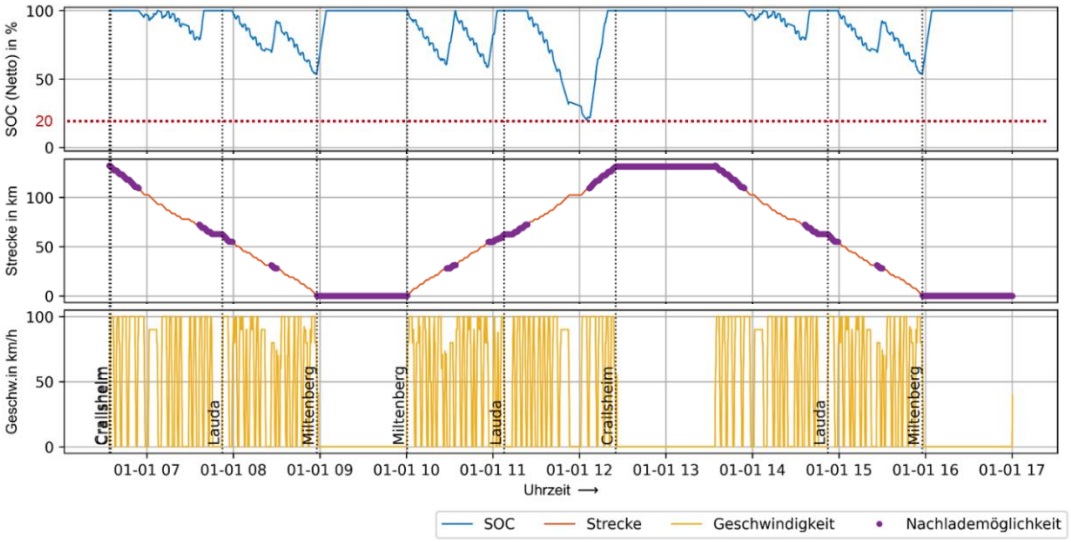


Abb. 186: SOC Miltenberg-Crailsheim (BEMU-RE, Infrastrukturszenario 3b)

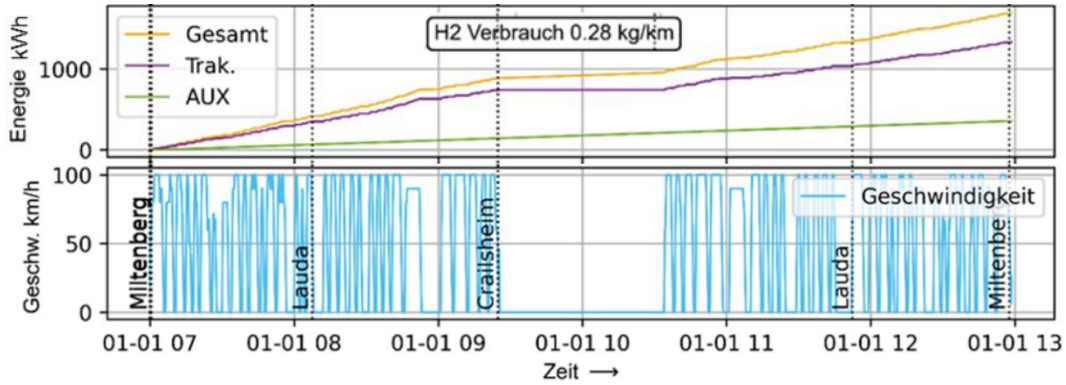


Abb. 187: Energiebedarf Miltenberg–Crailsheim (HEMU-RE)

9.4.1.3 Linie Tauberbischofsheim-Bad Mergentheim

Die Fahrpläne der SPNV-Linie Tauberbischofsheim – Bad Mergentheim sind in den Fahrplänen der Hauptstrecke Miltenberg-Crailsheim enthalten (siehe Abbildungen 182 und 183).

In Abb. 188 ist die Machbarkeit der einzelnen Infrastrukturszenarien der Taubertalbahn in einer Übersicht dargestellt. Hierbei wird u.a. deutlich, dass bereits ab Szenario 1 die Strecke Tauberbischofsheim – Bad Mergentheim (in Verlängerung des bestehenden Elektrifizierungsabschnittes Lauda-Königshofen) vollständig elektrifiziert ist und somit hier auch ein Betrieb mit EMU-Fahrzeugen möglich ist.

Für die weitere Betrachtung wurde Szenario 3b gewählt, die Aussagen zum Infrastrukturbedarf beziehen sich hierauf (siehe 9.4.4.2)

BEMU		Miltenberg ↕ Crailsheim *BEMU-RE*	Miltenberg ↕ Crailsheim *BEMU-RB*	Tauberbischofsheim ↕ Bad Mergentheim *BEMU-RE*	Tauberbischofsheim ↕ Bad Mergentheim *BEMU-RB*
Szenario 0	Elektrifizierung Lauda <> Königshofen, Bahnhöfe Miltenberg & Crailsheim	🔴	🔴	🔴	🔴
Szenario 1	Elektrifizierung Tauberbischofsheim <> Bad Mergentheim, Bahnhöfe Miltenberg & Crailsheim	🟡	🔴	🟢	🟢
Szenario 2a	Elektrifizierung Tauberbischofsheim <> Bad Mergentheim, Miltenberg <> Wertheim & Bahnhof Crailsheim	🟡	🔴	🟢	🟢
Szenario 2b	Elektrifizierung Tauberbischofsheim <> Bad Mergentheim, Blaufelden <> Crailsheim & Bahnhof Miltenberg	🟢	🟡	🟢	🟢
Szenario 2c	Elektrifizierung Tauberbischofsheim <> Crailsheim & Bahnhof Miltenberg	🟢	🟡	🟢	🟢
Szenario 3a	Elektrifizierung Miltenberg <> Wertheim, Tauberbischofsheim <> Bad Mergentheim & Blaufelden <> Crailsheim	🟢	🟢	🟢	🟢
Szenario 3b	Elektrifizierung Tauberbischofsheim <> Bad Mergentheim, Blaufelden <> Crailsheim, Wertheim Bestenheid <> Wertheim Bahnhof & Bahnhof Miltenberg	🟢	🟢	🟢	🟢

🔴 Betrieb unmöglich 🟢 Betrieb möglich (Grenzbereich)

🟡 Betrieb unmöglich (Grenzbereich) 🟢 Betrieb möglich

Abb. 188: Fazit Infrastrukturszenarien Miltenberg–Crailsheim

In Abb. 189 ist der Energiebedarf für die Strecke für den HEMU-Betrieb mit einem RB-Fahrzeug abgebildet.

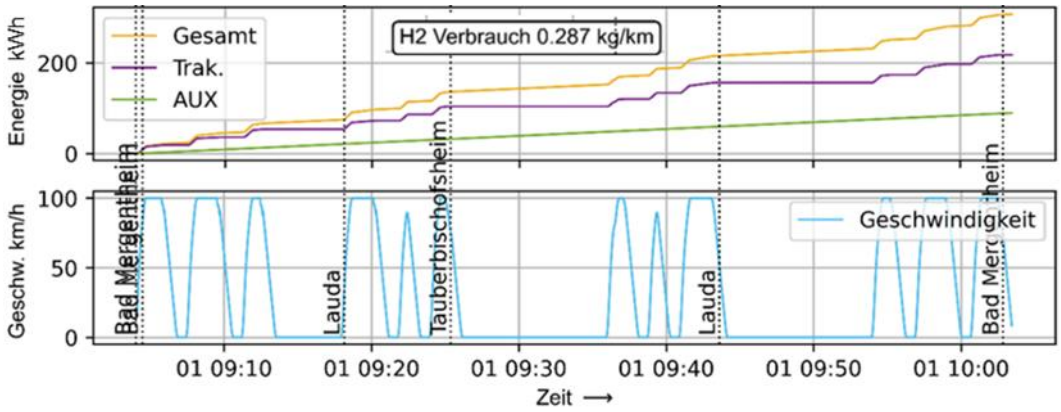


Abb. 189: Energiebedarf Tauberbischofsheim-Bad Mergentheim (HEMU-RB)

9.4.2 Strecke Miltenberg-Seckach

In Tabelle 23 sind die wesentlichen Strecken- bzw. Liniencharakteristika aufgeführt.

Tabelle 23: Strecken- bzw. Liniencharakteristika Miltenberg – Seckach

Strecke	**Miltenberg-Seckach**
∑ Streckenlänge [km]	39
Nicht elektrifiziert [km]	Miltenberg-Seckach, 39
Zweigleisigkeit [km]	Durchgehend eingleisig
Δ Höhenmeter [m]	Seckach>Miltenberg: 139, Miltenberg>Seckach: 281
Ø Geschwindigkeit [km/h]	45,3
Takt [min]	60
Zugpaare Werktags (Hin- / Rückfahrten)	19
Zugpaare Wochenende (Hin- / Rückfahrten)	17
Haltanzahl	12
Ø Haltabstand [km]	3,2
Streckenklasse	CE (Seckach–Miltenberg-Breitendiel, D4 (Miltenberg-Breitendiel–Miltenberg West)

Für den Betrieb zwischen Miltenberg und Seckach sind in den Abbildungen 190 und 191 die Fahrpläne mit Fahr- und Wendezeiten dargestellt.

km																			
0 Miltenberg	5:56	6:56	7:56	8:56	9:56	10:56	11:56	12:56	13:56	14:56	15:56	16:56	17:56	18:56	19:56	20:56	21:56	22:56	23:56
4 Breitendiel	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	0:00
11 Weilbach (Unterfr)	6:03	7:03	8:03	9:03	10:03	11:03	12:03	13:03	14:03	15:03	16:03	17:03	18:03	19:03	20:03	21:03	22:03	23:03	0:03
12 Amorbach	6:06	7:06	8:06	9:06	10:06	11:06	12:06	13:06	14:06	15:06	16:06	17:06	18:06	19:06	20:06	21:06	22:06	23:06	0:06
14 Amorbach	6:09	7:09	8:09	9:09	10:09	11:09	12:09	13:09	14:09	15:09	16:09	17:09	18:09	19:09	20:09	21:09	22:09	23:09	0:09
19 Schneeberg im Odenwald	6:12	7:12	8:12	9:12	10:12	11:12	12:12	13:12	14:12	15:12	16:12	17:12	18:12	19:12	20:12	21:12	22:12	23:12	0:12
19 Rippberg	6:16	7:16	8:16	9:16	10:16	11:16	12:16	13:16	14:16	15:16	16:16	17:16	18:16	19:16	20:16	21:16	22:16	23:16	0:16
28 Walldürn	6:23	7:23	8:23	9:23	10:23	11:23	12:23	13:23	14:23	15:23	16:23	17:23	18:23	19:23	20:23	21:23	22:23	23:23	0:23
32 Walldürn	6:25	7:25	8:25	9:25	10:25	11:25	12:25	13:25	14:25	15:25	16:25	17:25	18:25	19:25	20:25	21:25	22:25	23:25	0:25
34 Hainstadt (Baden)	6:31	7:31	8:31	9:31	10:31	11:31	12:31	13:31	14:31	15:31	16:31	17:31	18:31	19:31	20:31	21:31	22:31	23:31	0:31
34 Buchen (Odenw)	6:34	7:34	8:34	9:34	10:34	11:34	12:34	13:34	14:34	15:34	16:34	17:34	18:34	19:34	20:34	21:34	22:34	23:34	0:34
34 Buchen (Odenw)	6:36	7:36	8:36	9:36	10:36	11:36	12:36	13:36	14:36	15:36	16:36	17:36	18:36	19:36	20:36	21:36	22:36	23:36	0:36
37 Buchen Ost	6:39	7:39	8:39	9:39	10:39	11:39	12:39	13:39	14:39	15:39	16:39	17:39	18:39	19:39	20:39	21:39	22:39	23:39	0:39
40 Bödigheim	6:47	7:47	8:47	9:47	10:47	11:47	12:47	13:47	14:47	15:47	16:47	17:47	18:47	19:47	20:47	21:47	22:47	23:47	0:47
43 Seckach	6:53	7:53	8:53	9:53	10:53	11:53	12:53	13:53	14:53	15:53	16:53	17:53	18:53	19:53	20:53	21:53	22:53	23:53	0:53
Fahrzeit	0:57	0:57	0:57	0:57	0:57	0:57	0:57	0:57	0:57	0:57	0:57	0:57	0:57	0:57	0:57	0:57	0:57	0:57	0:57
Connexion	**84004**	**84006**	**84008**	**84010**	**84012**	**84014**	**84016**	**84018**	**84020**	**84022**	**84024**	**84026**	**84028**	**84030**	**84032**	**84034**	**84036**	-	-
nächste Abfahrt	**7:20**	**8:20**	**9:20**	**10:20**	**11:20**	**12:20**	**13:20**	**14:20**	**15:20**	**16:20**	**17:20**	**18:20**	**19:20**	**20:20**	**21:20**	**22:20**	**23:20**	-	-
Wendezeit	**0:26**	**0:26**	**0:26**	**0:26**	**0:26**	**0:26**	**0:26**	**0:26**	**0:26**	**0:26**	**0:26**	**0:26**	**0:26**	**0:26**	**0:26**	**0:26**	**0:26**	-	-

Abb. 190: Fahrplan Miltenberg-Seckach

Zugtyp	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB	RB
Zugnummer	84000	84002	84004	84006	84008	84010	84012	84014	84016	84018	84020	84022	84024	84026	84028	84030	84032	84034	84036
km																			
0 Seckach	5:20	6:20	7:20	8:20	9:20	10:20	11:20	12:20	13:20	14:20	15:20	16:20	17:20	18:20	19:20	20:20	21:20	22:20	23:20
4 Bödigheim	5:26	6:26	7:26	8:26	9:26	10:26	11:26	12:26	13:26	14:26	15:26	16:26	17:26	18:26	19:26	20:26	21:26	22:26	23:26
11 Buchen Ost	5:35	6:35	7:35	8:35	9:35	10:35	11:35	12:35	13:35	14:35	15:35	16:35	17:35	18:35	19:35	20:35	21:35	22:35	23:35
12 Buchen (Odenw)	5:36	6:36	7:36	8:36	9:36	10:36	11:36	12:36	13:36	14:36	15:36	16:36	17:36	18:36	19:36	20:36	21:36	22:36	23:36
12 Buchen (Odenw)	5:39	6:39	7:39	8:39	9:39	10:39	11:39	12:39	13:39	14:39	15:39	16:39	17:39	18:39	19:39	20:39	21:39	22:39	23:39
14 Hainstadt (Baden)	5:42	6:42	7:42	8:42	9:42	10:42	11:42	12:42	13:42	14:42	15:42	16:42	17:42	18:42	19:42	20:42	21:42	22:42	23:42
19 Walldürn	5:47	6:47	7:47	8:47	9:47	10:47	11:47	12:47	13:47	14:47	15:47	16:47	17:47	18:47	19:47	20:47	21:47	22:47	23:47
19 Walldürn	5:50	6:50	7:50	8:50	9:50	10:50	11:50	12:50	13:50	14:50	15:50	16:50	17:50	18:50	19:50	20:50	21:50	22:50	23:50
28 Rippberg	5:58	6:58	7:58	8:58	9:58	10:58	11:58	12:58	13:58	14:58	15:58	16:58	17:58	18:58	19:58	20:58	21:58	22:58	23:58
32 Schneeberg im Odenwald	6:01	7:01	8:01	9:01	10:01	11:01	12:01	13:01	14:01	15:01	16:01	17:01	18:01	19:01	20:01	21:01	22:01	23:01	0:01
34 Amorbach	6:04	7:04	8:04	9:04	10:04	11:04	12:04	13:04	14:04	15:04	16:04	17:04	18:04	19:04	20:04	21:04	22:04	23:04	0:04
34 Amorbach	6:04	7:04	8:04	9:04	10:04	11:04	12:04	13:04	14:04	15:04	16:04	17:04	18:04	19:04	20:04	21:04	22:04	23:04	0:04
37 Weilbach (Unterfr)	6:10	7:10	8:10	9:10	10:10	11:10	12:10	13:10	14:10	15:10	16:10	17:10	18:10	19:10	20:10	21:10	22:10	23:10	0:10
40 Breitendiel	6:13	7:13	8:13	9:13	10:13	11:13	12:13	13:13	14:13	15:13	16:13	17:13	18:13	19:13	20:13	21:13	22:13	23:13	0:13
43 Miltenberg	6:17	7:17	8:17	9:17	10:17	11:17	12:17	13:17	14:17	15:17	16:17	17:17	18:17	19:17	20:17	21:17	22:17	23:17	0:17
Fahrzeit	0:57	0:57	0:57	0:57	0:57	0:57	0:57	0:57	0:57	0:57	0:57	0:57	0:57	0:57	0:57	0:57	0:57	0:57	0:57
Connexion	**84003**	**84005**	**84007**	**84009**	**84011**	**84013**	**84015**	**84017**	**84019**	**84021**	**84023**	**84025**	**84027**	**84029**	**84031**	**84033**	**84035**	**84037**	-
nächste Abfahrt	**6:56**	**7:56**	**8:56**	**9:56**	**10:56**	**11:56**	**12:56**	**13:56**	**14:56**	**15:56**	**16:56**	**17:56**	**18:56**	**19:56**	**20:56**	**21:56**	**22:56**	**23:56**	-
Wendezeit	**0:38**	**0:38**	**0:38**	**0:38**	**0:38**	**0:38**	**0:38**	**0:38**	**0:38**	**0:38**	**0:38**	**0:38**	**0:38**	**0:38**	**0:38**	**0:38**	**0:38**	**0:38**	-

Abb. 191: Fahrplan Seckach-Miltenberg

9.4.2.1 Infrastrukturszenarien

Für die Strecke Miltenberg-Seckach wurden über das Basisszenario hinaus keine weiteren Infrastrukturszenarien vorgesehen. Das Infrastrukturszenario 0 ist in Abb. 192 dargestellt. Weitere Szenarien erübrigten sich, da die Machbarkeit für Szenario 0 nachgewiesen werden konnte.

Abb. 192: Infrastrukturszenario 0 Miltenberg-Seckach („Madonnenlandbahn“)

9.4.2.2 Linie Miltenberg-Seckach

Der SOC-Verlauf der Strecke Miltenberg-Seckach („Madonnenlandbahn“) ist in Abb. 193 dargestellt, der Energiebedarf für das HEMU RB Fahrzeug in Abb. 194. Der SOC-

Verlauf zeigt, dass für die Linie Miltenberg-Seckach die Bestandselektrifizierung (einschließlich Miltenberg!) für einen BEMU-Betrieb ausreichend ist.

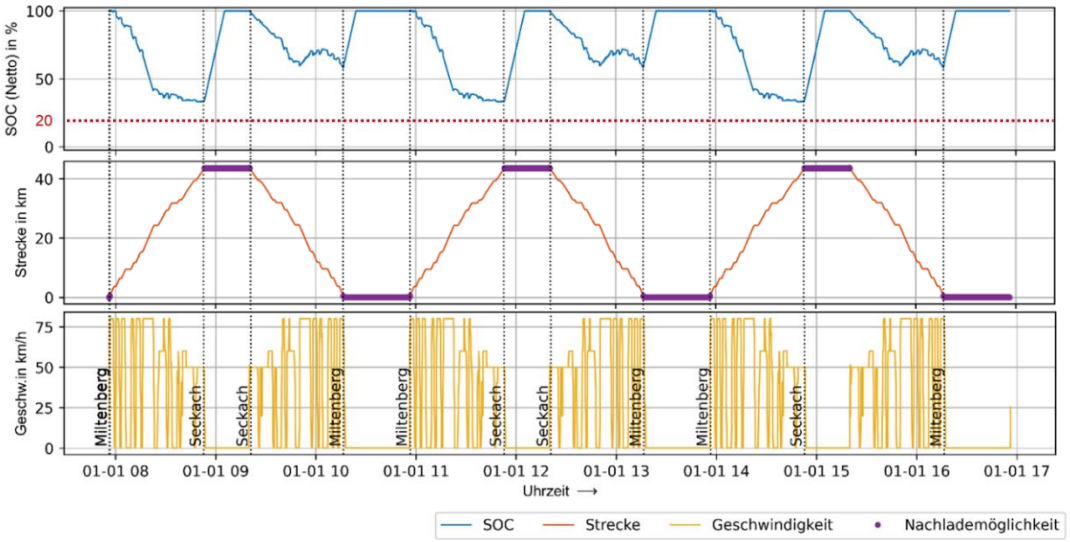


Abb. 193: SOC Miltenberg-Seckach (BEMU-RB, Infrastrukturszenario 0)

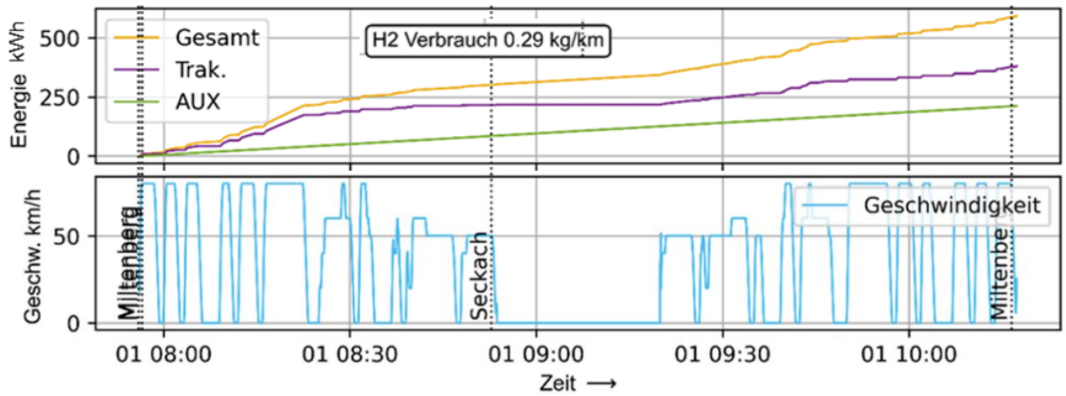


Abb. 194: Energiebedarf Miltenberg–Seckach (HEMU-RB)

9.4.3 Betriebsstatistik Teilnetz

Für den Betrieb der oben beschriebenen Strecken der Westfrankenbahn ergibt sich ein Fahrzeugbedarf von insgesamt 12 Fahrzeugen. Die Fahrleistungen der jeweiligen Fahrzeuge sind in Abb. 195 für Werktage dargestellt. Dabei beziehen sich die Fahrzeuge 1-3 auf die Madonnenlandbahn. Für den Betrieb der Strecke zwischen Crailsheim und Miltenberg werden sieben Fahrzeuge benötigt (Nummer 4-10). Die Fahrzeuge 11 und 12 beziehen sich auf den Betrieb zwischen Tauberbischofsheim und Bad Mergentheim.

Die zusätzlichen Leerfahrten für HEMU ergeben sich aus Tankfahrten.

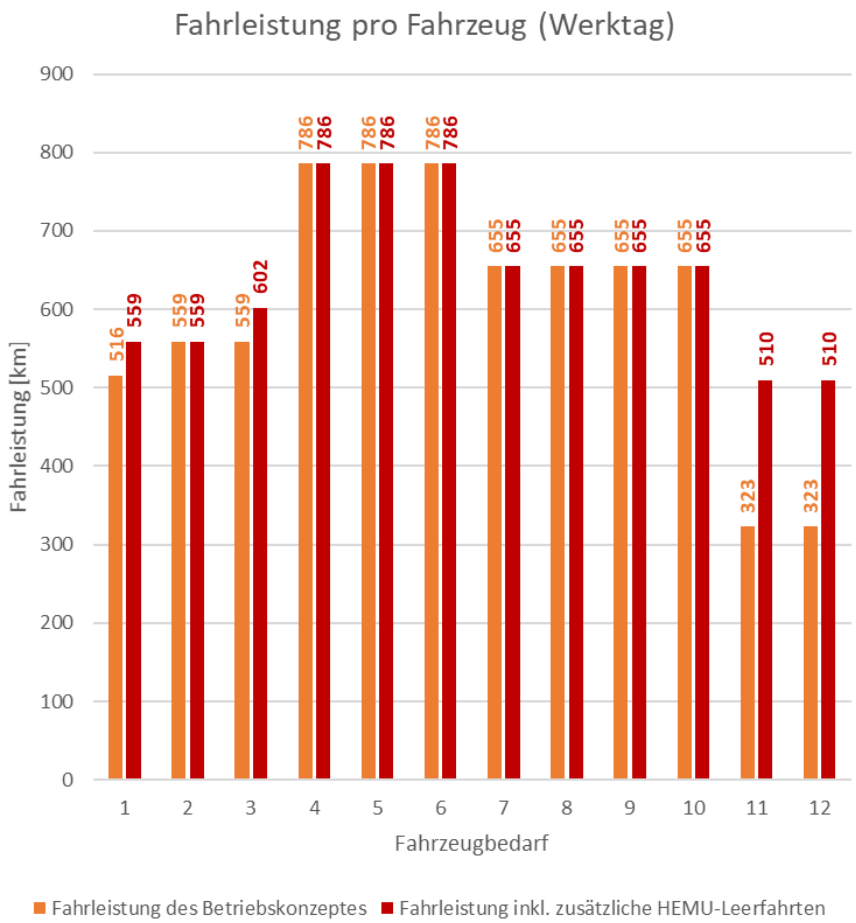


Abb. 195: Fahrleistung pro Fahrzeug der Westfrankenbahn

9.4.4 Infrastruktur- und Fahrzeugbedarf Teilnetz

9.4.4.1 Infrastrukturbedarf EMU

Für eine Vollelektrifizierung der Westfrankenbahn sind 191,6 km zusätzliche Oberleitung notwendig. Diese setzen sich aus 161,0 km eingleisige Strecke und 30,6 km zweigleisigen Abschnitten zusammen.

Zusätzliche Maßnahmen zur Anbindung an das Bahnstromnetz sind aufgrund des Lückenschlusses zwischen elektrifizierten Streckenabschnitten nicht erforderlich. Dies gilt unter der Voraussetzung, dass auf der bayrischen Seite in Miltenberg mit der Elektrifizierung der Strecke Aschaffenburg-Miltenberg ebenfalls ein Anknüpfungspunkt geschaffen wird.

Die Elektrifizierungskomplexität (siehe 7.9.1) wird für die Gesamtstrecke als durchschnittlich eingeschätzt. Kritisch erscheint allein der Abschnitt Tauberbischofsheim-Wertheim, in dem auch mehrere Tunnel liegen.

9.4.4.2 Infrastrukturbedarf BEMU

Für den BEMU-Betrieb ergibt sich insgesamt ein Bedarf von 44,6 km zusätzlicher Oberleitung. Davon entfallen 35,9 km auf eingleisige und 8,7 km auf zweigleisige Abschnitte.

Die zu elektrifizierenden Abschnitte sind, entsprechend dem gewählten Infrastrukturszenario 3b, Tauberbischofsheim – Bad Mergentheim, Blaufelden – Crailsheim, Wertheim Bestenheid – Wertheim Bahnhof und der Bahnhof Miltenberg.

Bei den Abschnitten Tauberbischofsheim – Bad Mergentheim handelt es um Verlängerungen vorhandener Bestandselektrifizierungen, womit keine ergänzenden Maßnahmen zur Anbindung an das Bahnstromnetz bzw. ein regionales Stromnetz erforderlich sind. Gleiches gilt für den Bahnhof Miltenberg im Zusammenhang mit dem Elektrifizierungsprojekt Aschaffenburg-Miltenberg. Allein für die Oberleitungsinsel Wertheim ist die dezentrale Stromversorgung sicherzustellen, ohne dass in dieser Phase eine detailliertere Betrachtung notwendig ist.

9.4.4.3 Infrastrukturbedarf HEMU

Um Tankfahrten möglichst gering zu halten, wurden für das räumlich ebenfalls sehr ausgedehnte Westfrankenbahn-Netz zwei Tankstellen einschließlich zugeordneter Produktionsanlagen (Elektrolyseure), in Miltenberg und Crailsheim, vorgesehen. Für beide wird von einer Anbindung an die Bahnstromversorgung ausgegangen.

9.4.4.4 Fahrzeugbedarfe

Entsprechend Kapitel 9.4.3 ergibt sich für den EMU bzw. BEMU-Betrieb der Strecken des Teilnetzes 4 ein Fahrzeugbedarf von 12 Fahrzeugen, davon fünf RB- und sieben RE-Fahrzeuge. Durch eine entsprechende Betriebs- und Instandhaltungsreserve erhöht sich der Bedarf auf neun RB- und neun RE-Fahrzeuge, d.h. 18 Fahrzeuge. Durch einen HEMU-Betrieb bleibt der Bedarf an RB-Fahrzeugen gleich. Der Bedarf an RE-Fahrzeugen erhöht sich auf 13, inklusive zweier Fahrzeuge als Betriebs- bzw. Instandhaltungsreserve. Insgesamt ergibt sich beim HEMU-Betrieb damit ein Fahrzeugbedarf von 22.

9.4.5 Ergänzende Betrachtungen zum Teilnetz

9.4.5.1 Netzwirkung / Durchbindungsaspekte

Eine Netzwirkung bzw. Umleitungsfunktion ist nur eingeschränkt festzustellen – wenn überhaupt betrifft diese den Abschnitt Crailsheim-Lauda, womit im Falle einer Vollelektrifizierung dieses Abschnittes eine Querverbindung zwischen den elektrifizierten Korridoren Stuttgart-Crailsheim-Nürnberg und Stuttgart-Heilbronn-Würzburg geschaffen würde.

9.4.5.2 Güterverkehrsaspekte

Güterverkehrsausprägungen sind aktuell, nach der Einstellung des Güterverkehrs in den 1990er Jahren, nur in sehr geringem Umfang zu erkennen. Die Rahmenbedingungen, insbesondere für überregionale Verkehre, sind zusätzlich erschwert durch zu geringe Gleislängen in Kreuzungsbahnhöfen, zum Teil auch durch die signaltechnische Auslegung (reiner Einrichtungsverkehr in Bahnhöfen).

Ansätze für Anschlussbedienungen, mit zum Teil erheblichem Jahresaufkommen, sind im Bereich Blaufelden, Satteldorf und Schrozberg zu erkennen. Diese könnten grundsätzlich von der für den Personenverkehr im BEMU-Konzept vorgesehenen Elektrifizierung im Streckenabschnitt Crailsheim-Blaufelden profitieren.

9.4.5.3 Zeitschiene / Sonstige externe Einflüsse

Es sind keine besonderen Einflüsse erkennbar. Zu beachten ist allerdings der Fortgang des bayrischen Elektrifizierungsprojekts Aschaffenburg – Miltenberg, welches die Rahmenbedingungen für die Ausgestaltung der Lademöglichkeit in Miltenberg beeinflusst.

9.5 Teilnetz 5 „Hohenlohebahn“ (TCO 5)

Das Teilnetz 5 „Hohenlohebahn“ umfasst die nicht elektrifizierte Strecke

- Öhringen – Schwäbisch Hall/Hessental

mit den zugrunde gelegten SPNV-Linien

- Öhringen <> Schwäbisch Hall/Hessental
- Heilbronn <> Schwäbisch Hall/Hessental

Die betriebliche und energetische Betrachtung erfolgt nachstehend zunächst auf Basis der Einzelstrecke bzw. der beiden SPNV-Linien.

Entsprechend den Festlegungen in Kapitel 7.6. werden für dieses Teilnetz nur die Technologiealternativen EMU und BEMU betrachtet (nicht HEMU)[98].

Strecke und Linienwege sowie das Höhenprofil für die Strecke Heilbronn-Schwäbisch Hall/Hessental sind in den Abbildungen 196 und 197 dargestellt.

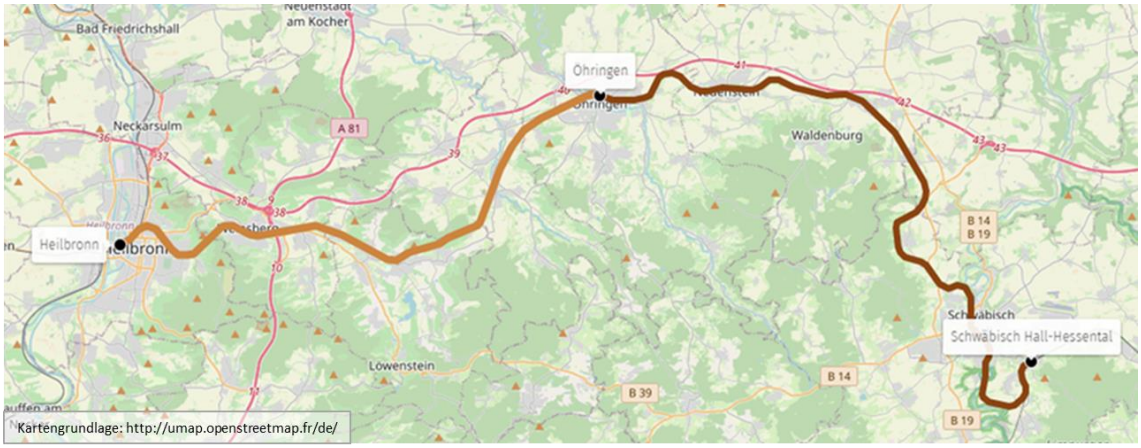


Abb. 196: Strecke und Linien der Hohenlohebahn

[98] Zu beachten ist, dass eine Elektrifizierung der Hohenlohebahn aktuell auch in einer Nutzen-Kosten-Untersuchung (NKU) im Zusammenhang mit der Reaktivierungsstrecke Waldenburg - Künzelsau thematisiert wird (siehe 9.7.3) – dort gegenübergestellt einem Dieselbetrieb im Ohnefall. Die vorläufigen Erkenntnisse aus dieser NKU ergänzen qualitativ die Betrachtungen im Rahmen der SteFanS-Studie (siehe Kapitel 11).

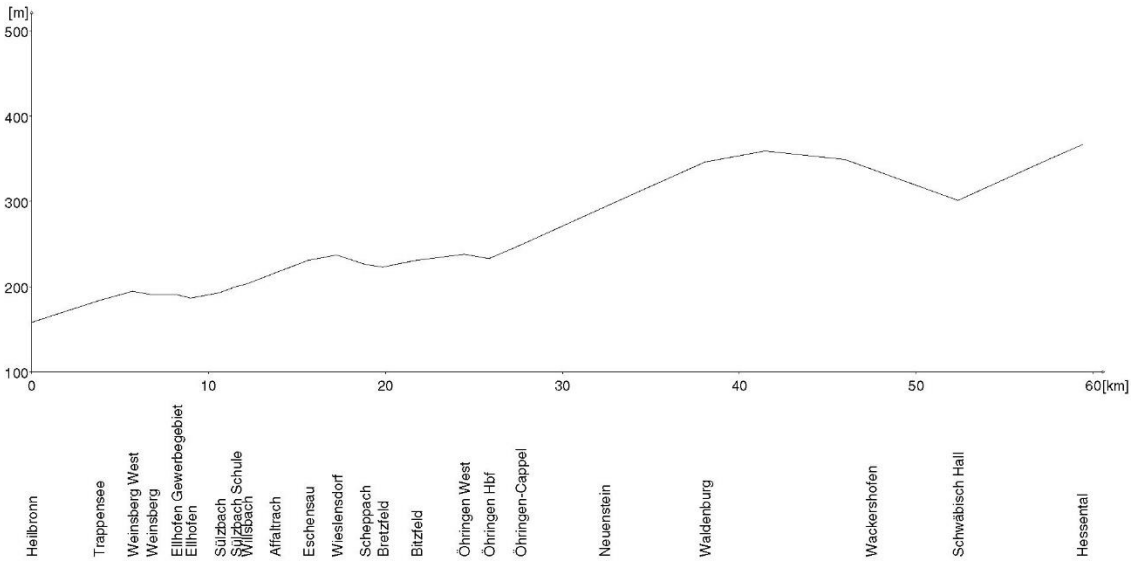


Abb. 197: Höhenprofil von Heilbronn nach Schwäbisch Hall/Hessental

9.5.1 Infrastrukturszenarien

Bei der Hohenlohebahn war eine Untersuchung weiterer Infrastrukturszenarien über das Szenario 0 (siehe Abb. 198) hinaus nicht erforderlich, da bereits mit Szenario 0 die Machbarkeit eines BEMU-Betriebs für beide Linienkonzepte festgestellt wurde.

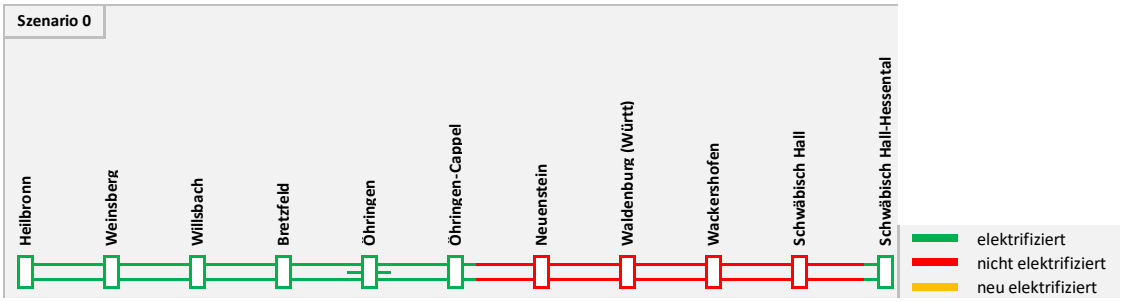


Abb. 198: Infrastrukturszenario 0 Heilbronn-Schwäbisch Hall-H'tal „Hohenlohebahn"

9.5.2 Linie Heilbronn-Schwäbisch Hall/Hessental

In Tabelle 24 sind die wesentlichen Charakteristika der Strecke/Linie aufgeführt.

Tabelle 24: Strecken- bzw. Liniencharakteristika Heilbronn – Schwäbisch Hall/Hessental

Strecke	**Heilbronn-Schwäbisch Hall/Hessental**
∑ Streckenlänge [km]	61
Nicht elektrifiziert [km]	Öhringen-Schwäbisch Hall/Hessental, 32
Zweigleisigkeit [km]	durchgehend zweigleisig
Δ Höhenmeter [m]	Heilbronn > Schwäbisch Hall/Hessental: 300 Schwäbisch Hall/Hessental > Heilbronn: 87
Ø Geschwindigkeit [km/h]	71,8
Takt [min]	60
Zugpaare Werktags (Hin- / Rückfahrten)	19
Zugpaare Wochenende (Hin- / Rückfahrten)	17
Haltanzahl	8
Ø Haltabstand [km]	9
Streckenklasse	D4

In den Abbildungen 199 und 200 sind Auszüge der Fahrpläne mit Fahr- und Wendezeiten des Betriebs zwischen Schwäbisch Hall/Hessental und Heilbronn, sowie für den Betrieb zwischen Schwäbisch Hall/Hessental und Öhringen, dargestellt.

Zugtyp	RE	RB	RE	RB	RE	RB	RE	RB	RE	RB	RE	RB	RE	RB	RE	RB	RE	RB
	1	3	2	4	1	3	2	4	1	3	2	4	1	3	2	4	1	3
Zugnummer	83000	83100	83002	83102	83004	83104	83006	83106	83008	83108	83010	83110	83012	83112	83014	83114	83016	83116
km																		
0 Schwäbisch Hall-Hessental	5:03	5:34	6:03	6:34	7:03	7:34	8:03	8:34	9:03	9:34	10:03	10:34	11:03	11:34	12:03	12:34	13:03	13:34
7 Schwäbisch Hall	5:10	5:41	6:10	6:41	7:10	7:41	8:10	8:41	9:10	9:41	10:10	10:41	11:10	11:41	12:10	12:41	13:10	13:41
12 Wackershofen	|	5:46	|	6:46	|	7:46	|	8:46	|	9:46	|	10:46	|	11:46	|	12:46	|	13:46
22 Waldenburg (Württ)	5:21	5:54	6:21	6:54	7:21	7:54	8:21	8:54	9:21	9:54	10:21	10:54	11:21	11:54	12:21	12:54	13:21	13:54
27 Neuenstein	5:27	5:58	6:27	6:58	7:27	7:58	8:27	8:58	9:27	9:58	10:27	10:58	11:27	11:58	12:27	12:58	13:27	13:58
34 Öhringen	5:33	6:06	6:33	7:06	7:33	8:06	8:33	9:06	9:33	10:06	10:33	11:06	11:33	12:06	12:33	13:06	13:33	14:06
34 Öhringen	5:33		6:33		7:33		8:33		9:33		10:33		11:33		12:33		13:33	
49 Sülzbach Schule	5:43		6:43		7:43		8:43		9:43		10:43		11:43		12:43		13:43	
54 Weinsberg	5:48		6:48		7:48		8:48		9:48		10:48		11:48		12:48		13:48	
61 Heilbronn	5:54		6:54		7:54		8:54		9:54		10:54		11:54		12:54		13:54	
Fahrzeit	0:51	0:32	0:51	0:32	0:51	0:32	0:51	0:32	0:51	0:32	0:51	0:32	0:51	0:32	0:51	0:32	0:51	0:32
Connexion	**83003**	**83103**	**83005**	**83105**	**83007**	**83107**	**83009**	**83109**	**83011**	**83111**	**83013**	**83113**	**83015**	**83115**	**83017**	**83117**	**83019**	**83119**
nächste Abfahrt	**6:05**	**6:53**	**7:05**	**7:53**	**8:05**	**8:53**	**9:05**	**9:53**	**10:05**	**10:53**	**11:05**	**11:53**	**12:05**	**12:53**	**13:05**	**13:53**	**14:05**	**14:53**
Wendezeit	**0:11**	**0:47**	**0:11**	**0:47**	**0:11**	**0:47**	**0:11**	**0:47**	**0:11**	**0:47**	**0:11**	**0:47**	**0:11**	**0:47**	**0:11**	**0:47**	**0:11**	**0:47**

Abb. 199: Auszug Fahrplan Schwäbisch Hall/Hessental-Heilbronn

Zugtyp	RE	RB	RE	RB	RE	RB	RE	RB	RE	RB	RE	RB	RE	RB	RE	RB	RE	RB
	2	4	1	3	2	4	1	3	2	4	1	3	2	4	1	3	2	4
Zugnummer	83001	83101	83003	83103	83005	83105	83007	83107	83009	83109	83011	83111	83013	83113	83015	83115	83017	83117
km																		
61 Heilbronn	5:05		6:05		7:05		8:05		9:05		10:05		11:05		12:05		13:05	
54 Weinsberg	5:12		6:12		7:12		8:12		9:12		10:12		11:12		12:12		13:12	
49 Sülzbach Schule	5:17		6:17		7:17		8:17		9:17		10:17		11:17		12:17		13:17	
34 Öhringen	5:27		6:27		7:27		8:27		9:27		10:27		11:27		12:27		13:27	
34 Öhringen	5:27	5:53	6:27	6:53	7:27	7:53	8:27	8:53	9:27	9:53	10:27	10:53	11:27	11:53	12:27	12:53	13:27	13:53
27 Neuenstein	5:34	6:00	6:34	7:00	7:34	8:00	8:34	9:00	9:34	10:00	10:34	11:00	11:34	12:00	12:34	13:00	13:34	14:00
22 Waldenburg (Württ)	5:40	6:05	6:40	7:05	7:40	8:05	8:40	9:05	9:40	10:05	10:40	11:05	11:40	12:05	12:40	13:05	13:40	14:05
12 Wackershofen	|	6:13	|	7:13	|	8:13	|	9:13	|	10:13	|	11:13	|	12:13	|	13:13	|	14:13
7 Schwäbisch Hall	5:50	6:18	6:50	7:18	7:50	8:18	8:50	9:18	9:50	10:18	10:50	11:18	11:50	12:18	12:50	13:18	13:50	14:18
0 Schwäbisch Hall-Hessental	5:56	6:24	6:56	7:24	7:56	8:24	8:56	9:24	9:56	10:24	10:56	11:24	11:56	12:24	12:56	13:24	13:56	14:24
Fahrzeit	0:51	0:31	0:51	0:31	0:51	0:31	0:51	0:31	0:51	0:31	0:51	0:31	0:51	0:31	0:51	0:31	0:51	0:31
Connexion	**83002**	**83102**	**83004**	**83104**	**83006**	**83106**	**83008**	**83108**	**83010**	**83110**	**83012**	**83112**	**83014**	**83114**	**83016**	**83116**	**83018**	**83118**
nächste Abfahrt	**6:03**	**6:34**	**7:03**	**7:34**	**8:03**	**8:34**	**9:03**	**9:34**	**10:03**	**10:34**	**11:03**	**11:34**	**12:03**	**12:34**	**13:03**	**13:34**	**14:03**	**14:34**
Wendezeit	**0:07**	**0:10**	**0:07**	**0:10**	**0:07**	**0:10**	**0:07**	**0:10**	**0:07**	**0:10**	**0:07**	**0:10**	**0:07**	**0:10**	**0:07**	**0:10**	**0:07**	**0:10**

Abb. 200: Auszug Fahrplan Heilbronn-Schwäbisch Hall/Hessental

Der SOC-Verlauf für den Betrieb auf der Strecke zwischen Heilbronn und Schwäbisch Hall-Hessental ist in Abb. 201 dargestellt. Erkennbar ist, dass die Bestandselektrifizierung für einen BEMU-Betrieb auf der Linie ausreichend ist.

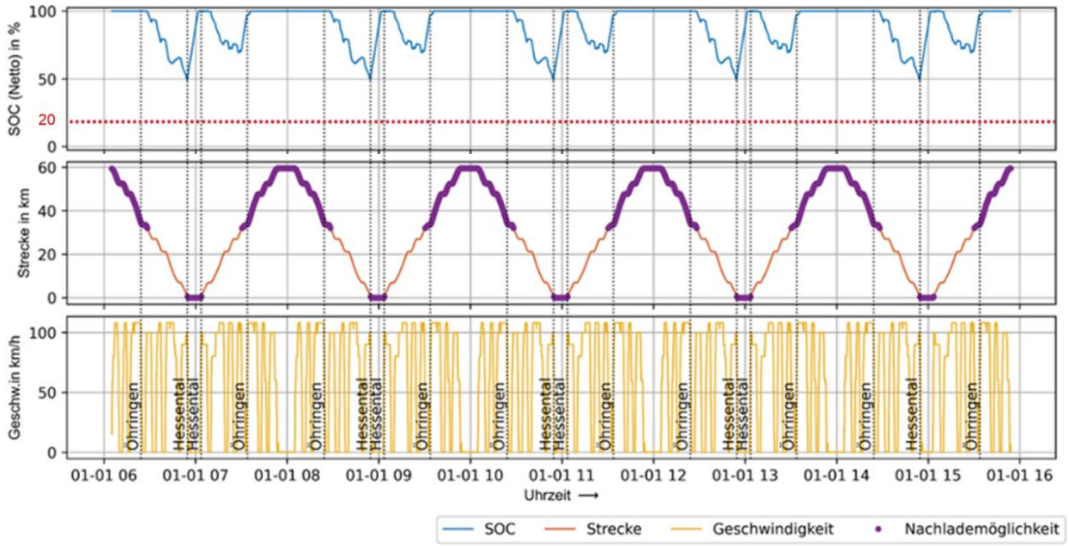


Abb. 201: SOC Heilbronn–Schwäbisch Hall/H'tal (BEMU RB, Infrastrukturszenario 0)

9.5.3 Linie Öhringen-Schwäbisch Hall/Hessental

Tabelle 25: Charakteristika der Linie Öhringen – Schwäbisch Hall/Hessental zeigt die wesentlichen Charakteristika der Strecke/Linie Öhringen – Schwäbisch Hall/Hessental.

Tabelle 25: Charakteristika der Linie Öhringen – Schwäbisch Hall/Hessental

Strecke	**Öhringen-Schwäbisch Hall/Hessental**
∑ Streckenlänge [km]	32
Nicht elektrifiziert [km]	Öhringen/Cappel-Schwäbisch Hall/Hessental, 32
Zweigleisigkeit [km]	durchgehend zweigleisig, 32
Δ Höhenmeter [m]	Öhringen>Schwäbisch Hall/Hessental: 195 Schwäbisch Hall/Hessental>Öhringen: 59
Ø Geschwindigkeit [km/h]	65,8
Takt [min]	60
Zugpaare Werktags (Hin- / Rückfahrten)	19
Zugpaare Wochenende (Hin- / Rückfahrten)	17
Haltanzahl	6
Ø Haltabstand [km]	7
Streckenklasse	D4

Der SOC-Verlauf für die Strecke Öhringen-Schwäbisch Hall/Hessental ist in Abb. 202 dargestellt. Auch für die Linie Hessental-Öhringen ist die Bestandselektrifizierung für einen BEMU-Betrieb ausreichend.

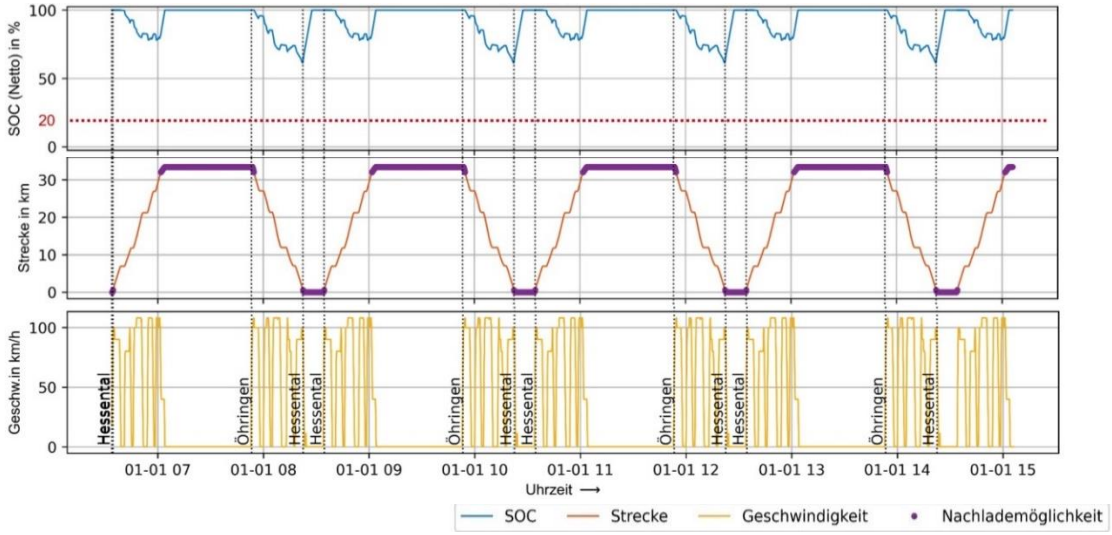


Abb. 202: SOC Öhringen-Schwäbisch Hall/H'tal (BEMU RB, Infrastrukturszenario 0)

9.5.4 Betriebsstatistik Teilnetz

Für den Betrieb der oben beschriebenen Linien der Hohenlohebahn ergibt sich ein Fahrzeugbedarf von insgesamt vier Fahrzeugen. Die Fahrleistungen der jeweiligen Fahrzeuge sind in Abb. 203 dargestellt. Dabei beziehen sich die Fahrzeuge 1 und 2 auf die Strecke bis nach Heilbronn. Die Fahrleistung der Fahrzeuge 3 und 4 beziehen sich auf den Betrieb bis nach Öhringen. Die Fahrleistungen der Strecken/Linien ergeben sich jeweils durch die Anzahl der Zugpaare, hier für Werktage.

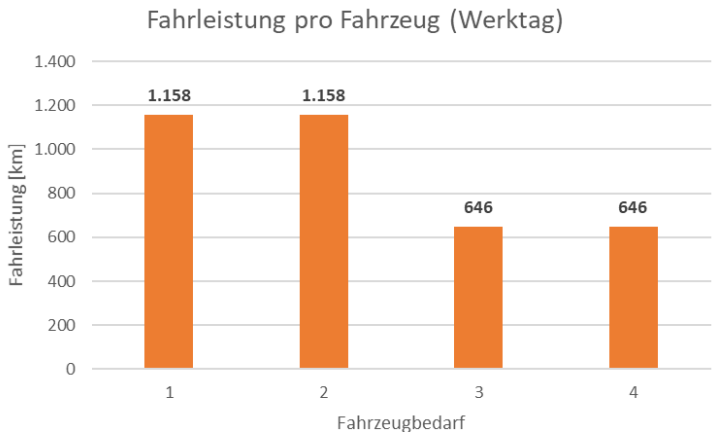


Abb. 203: Fahrleistung je Fahrzeug der Hohenlohebahn

9.5.5 Infrastrukturbedarf und Fahrzeugbedarf Teilnetz

9.5.5.1 Infrastrukturbedarf EMU

Für eine Elektrifizierung des Streckenabschnitts Öhringen-Cappel – Schwäbisch Hall-Hessental müssen 31,5 km zweigleisige Strecke elektrifiziert werden. Daraus ergibt sich eine Länge von 63 km zusätzlicher Elektrifizierung. Zusätzliche Maßnahmen zur Anbindung an das Bahnstromnetz sind aufgrund des Lückenschlusses zwischen elektrifizierten Streckenabschnitten nicht erforderlich.

Die Elektrifizierungskomplexität (siehe 7.9.1) wird für die Gesamtstrecke als durchschnittlich eingeschätzt. Eine erhöhte Komplexität besteht im Abschnitt Wackershofen-Schwäbisch Hall-Hessental, bei dem auch mehrere Tunnel in die Bewertung eingehen.

9.5.5.2 Infrastrukturbedarf BEMU

Für den BEMU-Betrieb ergibt sich kein zusätzlicher Elektrifizierungsbedarf.

9.5.5.3 Fahrzeugbedarfe

Entsprechend Kapitel 9.5.4 ergibt sich für den EMU- bzw. BEMU-Betrieb der Linien ein Fahrzeugbedarf von vier Fahrzeugen. Für die zwei RB- und zwei RE-Fahrzeuge werden jeweils zwei Fahrzeuge als Betriebs- und Instandhaltungsreserve benötigt. Dadurch ergibt sich ein Bedarf von insgesamt acht Fahrzeugen.

9.5.6 Ergänzende Betrachtungen zum Teilnetz

9.5.6.1 Netzwirkung / Durchbindungsaspekte

Die Strecke Heilbronn-Schwäbisch Hall/Hessental stellt, insbesondere auch aufgrund der durchgehenden Zweigleisigkeit eine wichtige Querverbindung zwischen den elektrifizierten Korridoren Stuttgart-Heilbronn-Würzburg („Frankenbahn“) und dem ebenfalls elektrifizierten Korridor Stuttgart-Schwäbisch Hall-Crailsheim-Nürnberg („Murrbahn“) dar. Zusätzlich sind die elektrifizierten Strecken Heilbronn-Heidelberg/Mannheim („Neckartalbahn“) und Crailsheim-Aalen („obere Jagstbahn“) mit ihren Verzweigungen Richtung Stuttgart und Ulm sowie die Strecke Heilbronn-Karlsruhe („Kraichgaubahn“) einzubeziehen. Ein elektrischer Lückenschluss zwischen Öhringen und Schwäbisch Hall würde hier erhebliche, betriebliche Möglichkeiten, sowohl im SPNV als auch im Güterverkehr, bieten.

9.5.6.2 Güterverkehrsaspekte

Für eine Anschlussbedienung erscheint insbesondere Waldenburg im Hinblick auf eine heute über die Straße aus dem Rheintal erfolgende Versorgung von Betonwerken interessant, ggf. auch im Zusammenhang mit der Reaktivierung der Strecke nach Künzelsau.

Im Sinne einer überregionalen Funktion als Umleitungsstrecke kommt der Verbindung, wie oben beschrieben (siehe 9.5.6.1), durchaus größere Bedeutung zu.

9.5.6.3 Zeitschiene / Sonstige externe Einflüsse

Es sind keine besonderen Einflüsse erkennbar. Zu beachten ist das Elektrifizierungsprojekt der BEG auf der Strecke Aschaffenburg-Miltenberg, das Auswirkungen auf den Knoten Miltenberg und die dort im BEMU-Betrieb zu schaffende Oberleitungsinsel hat.

9.6 Teilnetz 6 „Raum Stuttgart“ (TCO 6)

In Teilnetz 6 „Raum Stuttgart“ sind drei Strecken zusammengefasst

- Korntal-Weissach („Strohgäubahn“),
- Kirchheim/Teck-Oberlenningen („Teckbahn“),
- Nürtingen-Neuffen („Tälesbahn“)

Die Strecken bzw. Linienwege der drei Strecken sind in Abb. 204 dargestellt.

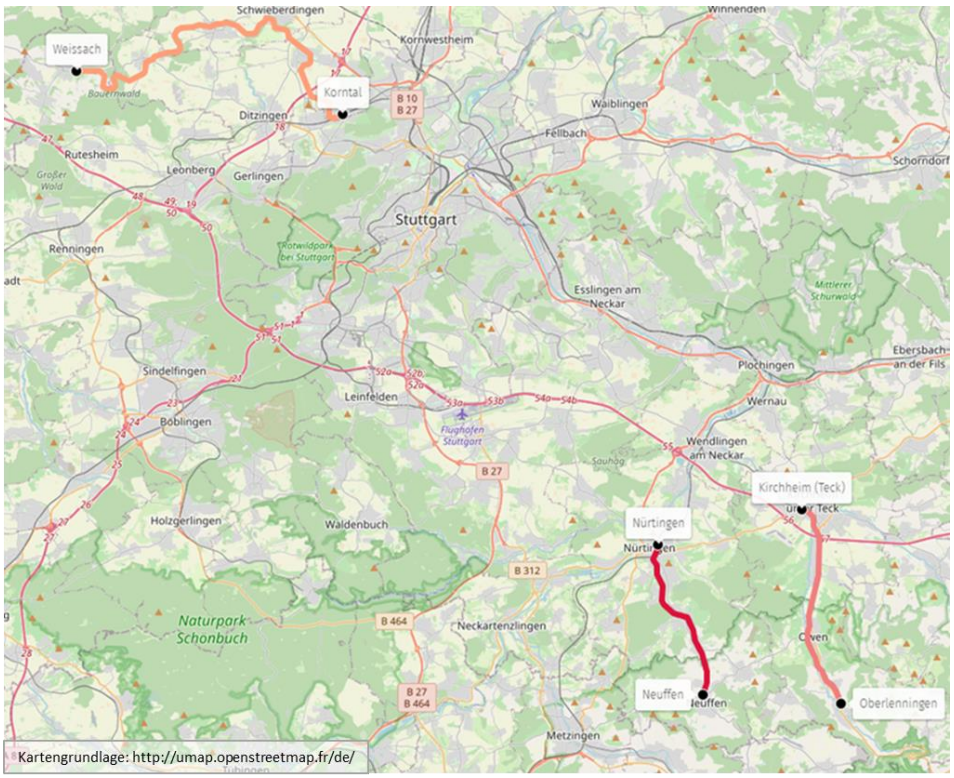


Abb. 204: Strecken der Strohgäubahn, der Teckbahn und der Tälesbahn

Die betriebliche und energetische Betrachtung erfolgt nachstehend zunächst auf Basis der Einzelstrecken bzw. Linien (hier identisch). Entsprechend den Festlegungen in Kapitel 7.6. werden für dieses Teilnetz nur die Technologiealternativen EMU und BEMU betrachtet (nicht HEMU).

9.6.1 Strecke / Linie Korntal-Weissach („Strohgäubahn“)

Die wesentlichen Strecken- bzw. Liniencharakteristika sind in Tabelle 26 dargestellt.

Tabelle 26: Strecken- bzw. Liniencharakteristika der Strohgäubahn

Strecke	**Korntal-Weissach**
∑ Streckenlänge [km]	22
Nicht elektrifiziert [km]	Korntal-Weissach, 22
Zweigleisigkeit [km]	durchgehend eingleisig
Δ Höhenmeter [m]	Korntal>Weissach: 128; Weissach>Korntal: 41
Ø Geschwindigkeit [km/h]	54,3
Takt [min]	30
Zugpaare Werktags (Hin- / Rückfahrten)	38
Zugpaare Wochenende (Hin- / Rückfahrten)	34
Haltanzahl	8
Ø Haltabstand [km]	3,2
Streckenklasse	CE (Korntal–Heimerdingen), C2 (Heimerdingen–Weissach)

9.6.1.1 Infrastrukturszenarien

In Bezug auf die Untersuchung der Machbarkeit des BEMU-Betriebs wurden bei der Strohgäubahn drei Szenarien betrachtet, die über das Ausgangsszenario (siehe Abb. 205) hinausgehen. Abb. 206 zeigt das Infrastrukturszenario, das einen BEMU-Betrieb ermöglicht und für die weitere Betrachtung gewählt wurde.

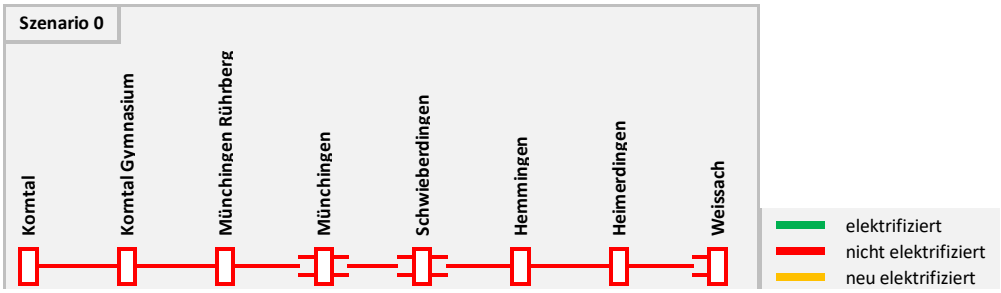


Abb. 205: Infrastrukturszenario 0 der Strohgäubahn

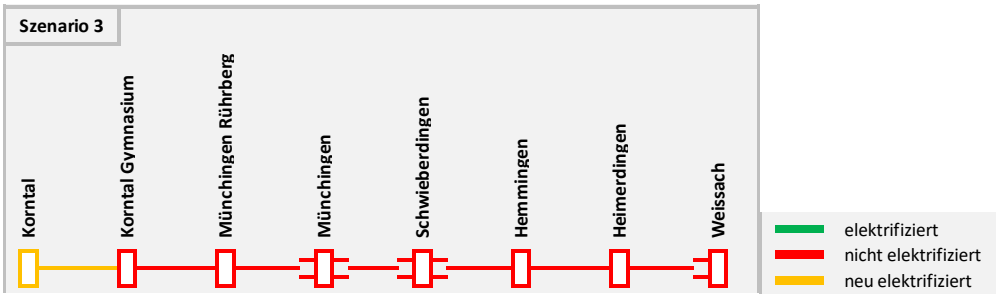


Abb. 206: Infrastrukturszenarien 3 der Strohgäubahn

9.6.1.2 Linie Korntal-Weissach („Strohgäubahn“)

Aufgrund der nicht vorhandenen Ladeinfrastruktur im Infrastrukturszenario 0 (DB-Hauptstrecke elektrifiziert, nicht aber das Gleis der Strohgäubahn) ist hier ein Betrieb nicht möglich, auch die Elektrifizierung in Szenario 1 ist nicht ausreichend. Für einen BEMU-Betrieb ausreichende Elektrifizierung ist bei Szenario 2 und 3 vorhanden, siehe auch eine Übersicht der Infrastrukturszenarien in Abb. 207. Für die weitere Betrachtung wurde Szenario 3 gewählt. In den Abbildungen 208 und 209 wird für dieses Szenario der SOC-Verlauf des RB-Fahrzeugs dargestellt.

BEMU		Korntal ↕ Weissach *BEMU-RB*	Korntal ↕ Weissach *BEMU-RE*
Szenario 0	Keine Elektrifizierung	🔴	🔴
Szenario 1	Elektrifizierung Bahnhof Korntal	🔴	🔴
Szenario 2	Elektrifizierung Bahnhöfe Korntal und Weissach	🟢	🟢
Szenario 3	Elektrifizierung Korntal <> Korntal Gymnasium	🟢	🟢

Abb. 207: Infrastrukturszenarien Strohgäubahn

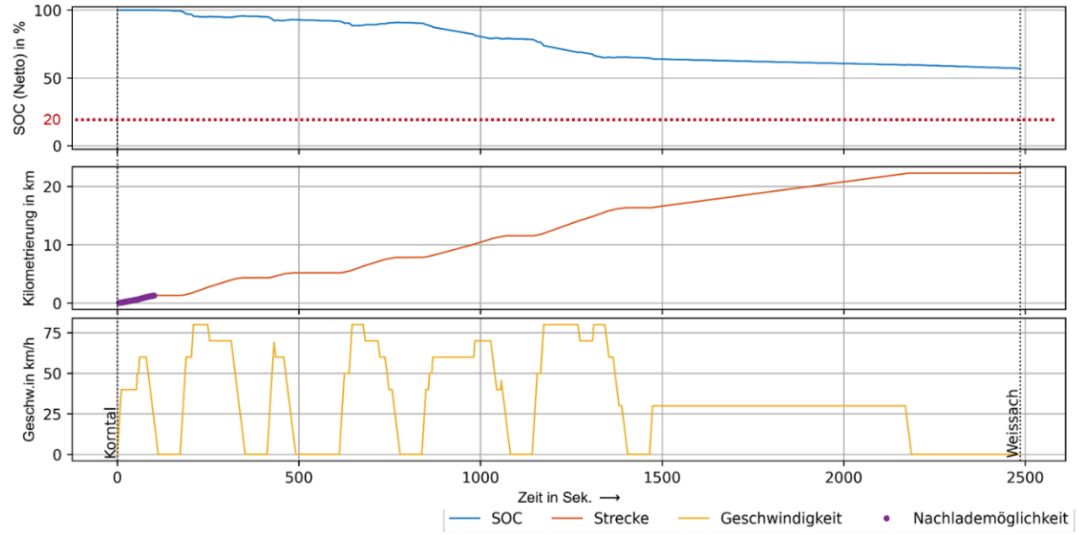


Abb. 208: SOC Korntal-Weissach (BEMU-RB, Infrastrukturszenario 3)

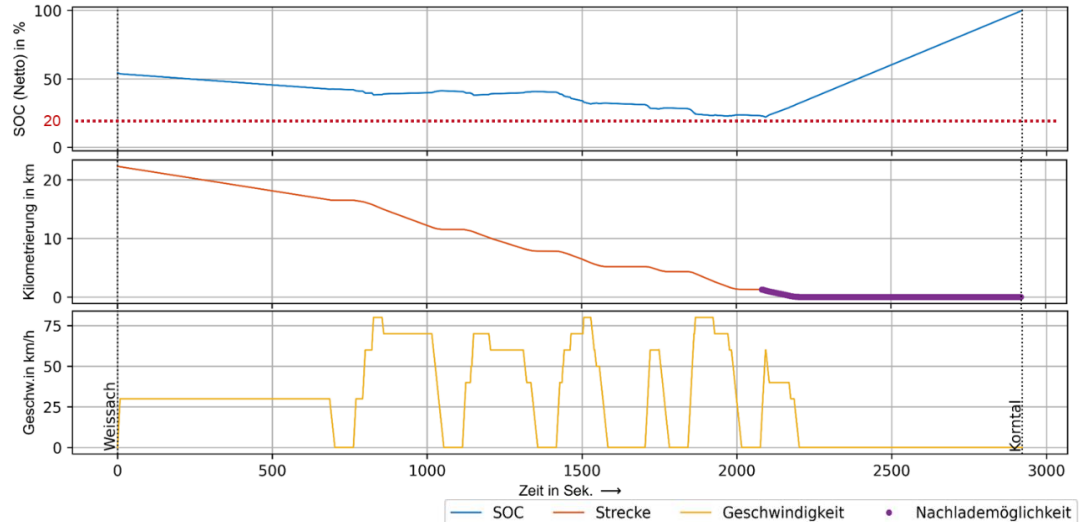


Abb. 209: SOC Weissach-Korntal (BEMU-RB, Infrastrukturszenario 3)

9.6.2 Strecke / Linie Kirchheim/Teck-Oberlenningen („Teckbahn“)

Die wesentlichen Strecken- bzw. Liniencharakteristika sind in Tabelle 27 dargestellt.

Tabelle 27: Strecken- bzw. Liniencharakteristika der Teckbahn

Strecke	**Kirchheim (Teck)-Oberlenningen**
∑ Streckenlänge [km]	11
Nicht elektrifiziert [km]	Kirchheim (Teck)-Oberlenningen, 11
Zweigleisigkeit [km]	durchgehend eingleisig
Δ Höhenmeter [m]	Kirchheim > Oberlenningen: 137; Oberlenningen > Kirchheim: 0
Ø Geschwindigkeit [km/h]	50,7
Takt [min]	30
Zugpaare Werktags (Hin- / Rückfahrten)	38
Zugpaare Wochenende (Hin- / Rückfahrten)	34
Haltanzahl	7
Ø Haltabstand [km]	1,8
Streckenklasse	D4

9.6.2.1 Infrastrukturszenarien

Bei der Teckbahn ist im Ausgangsinfrastrukturszenario keine Elektrifizierung vorhanden (siehe Abb. 210). Mit der zusätzlichen Elektrifizierung des Teckbahn-Gleises im Bahnhofsbereich von Kirchheim (Teck) ist ein BEMU-Betrieb möglich (siehe Abb. 211).

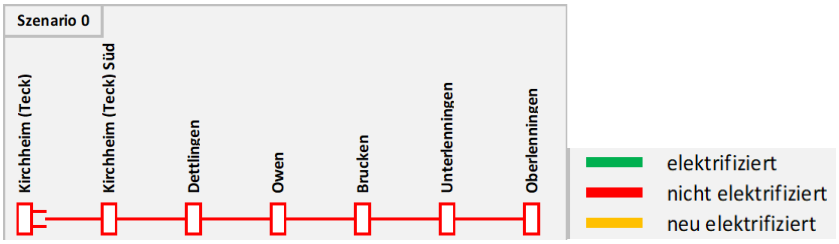


Abb. 210: Infrastrukturszenario 0 Kirchheim/Teck-Oberlenningen („Teckbahn“)

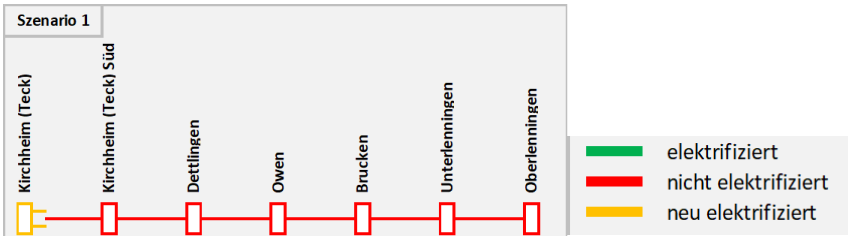


Abb. 211: Infrastrukturszenario 1 Kirchheim/Teck-Oberlenningen („Teckbahn“)

9.6.2.2 Linie Kirchheim/Teck-Oberlenningen („Teckbahn“)

Die SOC-Verläufe für Hin- /Rückfahrt sind den Abbildungen 212 und 213 zu entnehmen.

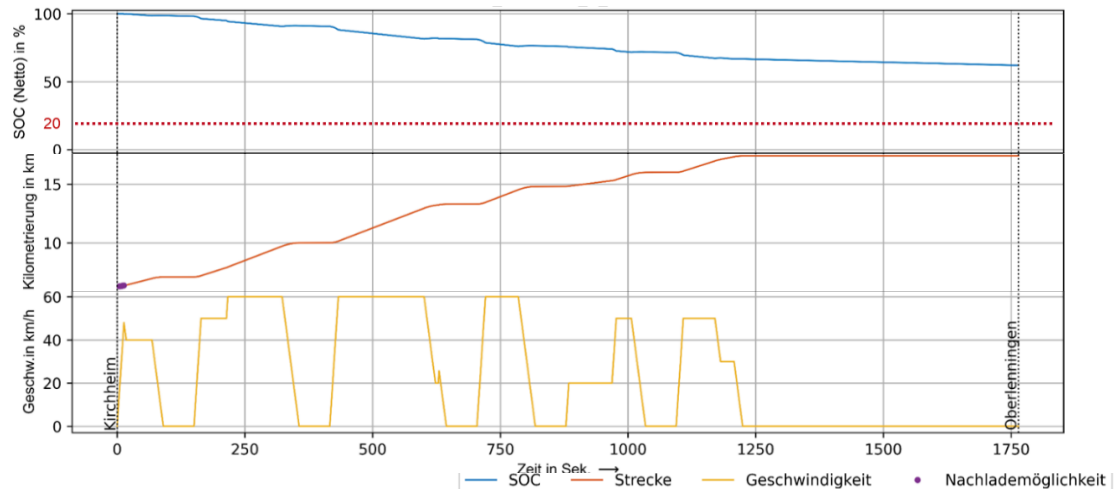


Abb. 212: SOC Kirchheim/Teck-Oberlenningen (BEMU-RB, Infrastrukturszenario 1)

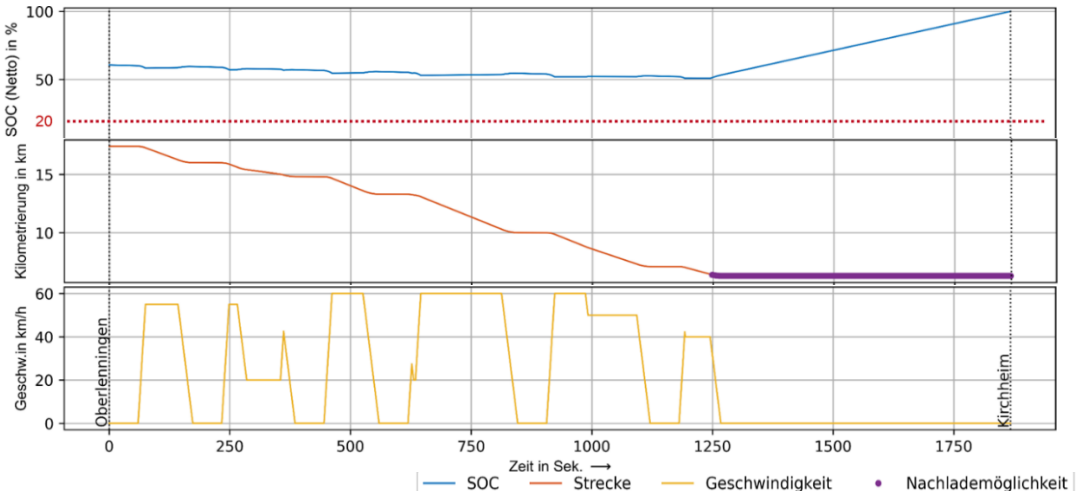


Abb. 213: SOC Oberlenningen-Kirchheim/Teck (BEMU-RB, Infrastrukturszenario 1)

Es ist erkennbar, dass die Elektrifizierung im Bereich des Bahnhofs Kirchheim (Teck) für einen BEMU-Betrieb auf der Linie ausreichend ist.

9.6.3 Strecke Nürtingen-Neuffen („Tälesbahn“)

Tabelle 28 stellt die wesentlichen Strecken- bzw. Liniencharakteristika dar.

Tabelle 28: Strecken- bzw. Liniencharakteristika der Tälesbahn

Strecke	**Nürtingen-Neuffen**
∑ Streckenlänge [km]	9
Nicht elektrifiziert [km]	Nürtingen-Neuffen, 8,5
Zweigleisigkeit [km]	durchgehend eingleisig
Δ Höhenmeter [m]	Nürtingen > Neuffen: 113, Neuffen > Nürtingen: 0
Ø Geschwindigkeit [km/h]	62
Takt	30
Zugpaare Werktags (Hin- / Rückfahrten)	38
Zugpaare Wochenende (Hin- / Rückfahrten)	34
Haltanzahl	7
Ø Haltabstand [km]	1,47
Streckenklasse	D2

9.6.3.1 Infrastrukturszenarien

Eine weitergehende Szenarienuntersuchung war nicht nötig, da ein BEMU-Betrieb bereits mit der Bestandselektrifizierung (Infrastrukturszenario 0, Abb. 214) möglich ist.

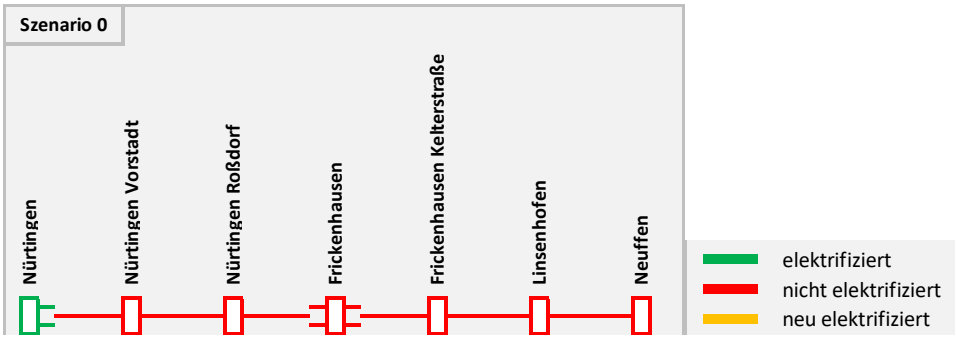


Abb. 214: Infrastrukturszenario 0 Nürtingen-Neuffen („Tälesbahn“)

9.6.3.2 Linie Nürtingen-Neuffen („Tälesbahn“)

Abb. 215 zeigt den SOC-Verlauf des RB-Fahrzeugs auf der Strecke von Nürtingen nach Neuffen, Abb. 216 den Verlauf für den Rückweg. Insgesamt zeigt sich, dass die Bestandselektrifizierung ausreicht, um einen BEMU-Betrieb zu ermöglichen.

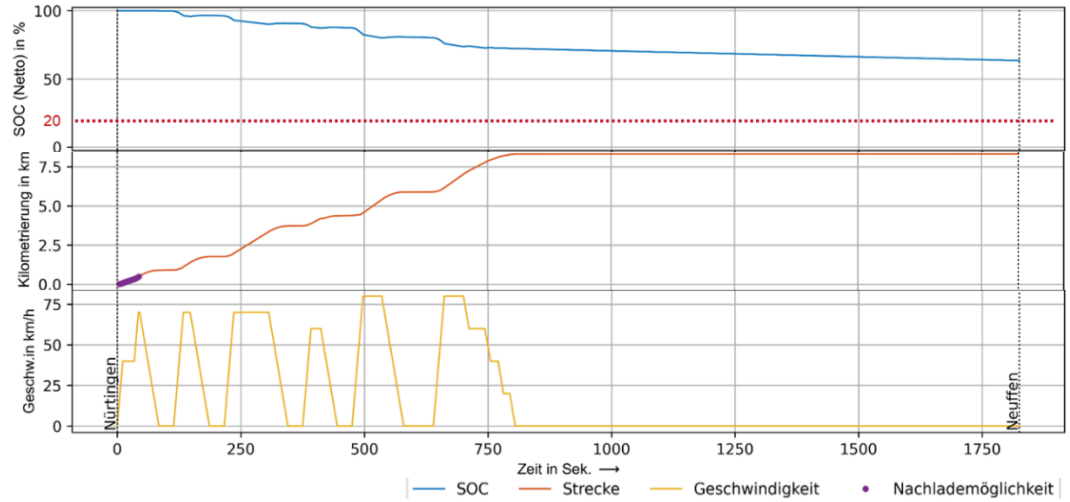


Abb. 215: SOC Nürtingen-Neuffen (BEMU-RB, Infrastrukturszenario 0)

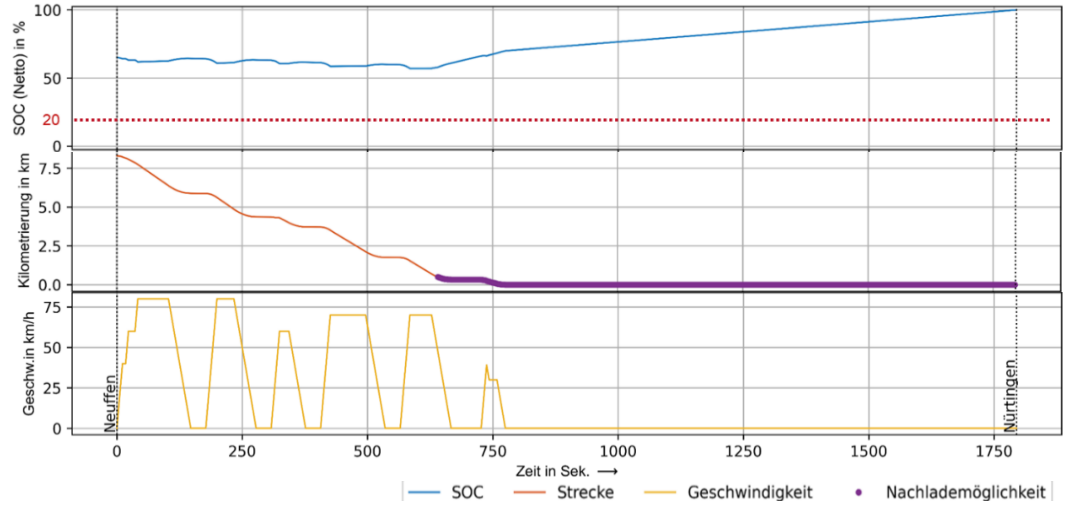


Abb. 216: SOC Neuffen-Nürtingen (BEMU-RB, Infrastrukturszenario 0)

9.6.4 Betriebsstatistik Teilnetz

Tabelle 29 gibt die Fahrzeit der jeweiligen Strecke an. Mit Hin- und Rückfahrt, sowie der Wendezeit ergibt sich eine Umlaufzeit. Im Zusammenspiel mit dem Zieltakt berechnet sich daraus der jeweilige Fahrzeugbedarf.

Tabelle 29: Fahrzeugbedarf der Strohgäubahn, Teckbahn und Tälesbahn

Zieltakt [Min]	Verbindung			Excel-Tool Fahrzeit [Min]	Hin- und Rück-fahrt [Min]	Wende-zeit [Min]	Umlauf-zeit [Min]	Fahr-zeug-bedarf
30	Oberlenningen	>	Kirchheim (Teck)	21	41	19	60	2
	Kirchheim (Teck)	>	Oberlenningen	20				
30	Weissach	>	Korntal	36	73	17	90	3
	Korntal	>	Weissach	37				
30	Nürtingen	>	Neuffen	13	26	34	60	2
	Neuffen	>	Nürtingen	13				

9.6.5 Infrastrukturbedarf und Fahrzeugbedarf Teilnetz

9.6.5.1 Infrastrukturbedarf EMU

Für eine Elektrifizierung der drei Streckenabschnitte Korntal-Weissach, Kirchheim/Teck-Oberlenningen und Nürtingen-Neuffen sind 41,3 km zusätzliche Oberleitung notwendig. Diese setzen sich aus 39,8 km eingleisiger Strecke und 1,5 km zweigleisigen Abschnitten zusammen.

Zusätzliche Maßnahmen zur Anbindung an das Bahnstrom- bzw. regionale Stromversorgungsnetz sind aufgrund der jeweiligen Anbindung an elektrifizierte Streckenabschnitte nicht erforderlich.

Die Elektrifizierungskomplexität (siehe 7.9.1) wird für die Gesamtstrecke als niedrig eingeschätzt. Hierfür ist zum einen eine nicht gegebene Tunnelproblematik und auch ansonsten unkritische Verhältnisse verantwortlich.

9.6.5.2 Infrastrukturbedarf BEMU

Der Bedarf an zusätzlicher Oberleitung bei einem BEMU-Betrieb beläuft sich aufgrund der Elektrifizierung von Korntal bis Korntal Gymnasium auf 1,4 km.

9.6.5.3 Fahrzeugbedarfe

Entsprechend Kapitel 9.6.4 ergibt sich für den EMU- bzw. BEMU-Betrieb der drei Linien ein Fahrzeugbedarf von sieben RB-Fahrzeugen. Mit einer entsprechenden Betriebs- und Instandhaltungsreserve erhöht sich der Bedarf auf insgesamt 11 Fahrzeuge.

Gerade für die Fahrzeugbeschaffung und -unterhaltung beinhalten derartige Einzelstrecken die besondere Problematik, dass die Erstellung einer Werkstattinfrastruktur für jede Einzelstrecke bei sehr kleinen Flottengrößen aus wirtschaftlicher Sicht ungünstig ist. Beim Einsatz von elektrischen Fahrzeugen bzw. insbesondere solchen mit alternativen Antrieben stellen sich dabei noch zusätzliche Anforderungen, die in bestehenden, für Dieselfahrzeuge konzipierten Werkstätten nicht ohne größere Anpassungen erfüllt werden können. Umgekehrt würde eine „zentrale“ Werkstatt im Stuttgarter Raum (auf einer der drei Strecken oder komplett separiert) zusätzliche Zuführungsfahrten in einem sehr stark befahrenen Netz verursachen. Der Gutachter empfiehlt daher für derartige Strecken mögliche Synergien mit Nachbarstrecken bzw. Nachbarnetzen wo immer möglich zu nutzen und Einzelbeschaffungen von „Sondertypen“ möglichst zu vermeiden[99].

9.6.6 Ergänzende Betrachtungen zum Teilnetz

9.6.6.1 Netzwirkung / Durchbindungsaspekte

Aufgrund der Stichstreckencharakteristik aller drei Strecken im Teilnetz „Raum Stuttgart“ besteht keine Netzwirkung.

9.6.6.2 Güterverkehrsaspekte

Der Anschluss Gnida auf der Strecke Nürtingen-Neuffen stellt aktuell die einzige, allerdings hochwertige, Güterverkehrsbedienung in diesem Teilnetz dar.

[99] Das Beispiel der Fahrzeugbeschaffung für die Schönbuchbahn unterstützt diese Argumentation.

9.6.6.3 Zeitschiene / Sonstige externe Einflüsse

Es sind keine besonderen Einflüsse erkennbar. Zu beachten ist das Reaktivierungsprojekt im Korridor Schwäbisch Gmünd-Göppingen-Kirchheim/Teck, das Einfluss auf die weitere Vorgehensweise für die Teckbahn haben kann.

9.7 Zusammenfassende Betrachtungen

9.7.1 Energieverbrauch im Streckenvergleich

Zu Vergleichszwecken und einer Ergebnisplausibilisierung wurden die in den Simulationen ermittelten und in den Kapiteln 9.1 bis 9.6 dargestellten Energieverbräuche der Einzelstrecken in einer Übersichtstabelle zusammengefasst (siehe nachstehende Tabelle). Es handelt sich dabei um den Verbrauch im Antriebsstrang (einschließlich Hilfsenergie). Die dargestellten Verbräuche sind die der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung. Fragen der Energieerzeugung, Wirkungsgrade etc. sind hier nicht erfasst.

Tabelle 30: Streckenspezifische Energieverbräuche

	Strecken / Teilnetze / SPNV-Linien		EMU RB (45m, 94 t) [kWh/km]	EMU RE (60m, 121 t) [kWh/km]	BEMU RB (45m, 102 t) [kWh/km]	BEMU RE (60m, 131 t) [kWh/km]	HEMU RB (45m, 101 t) [kWh/km]*	HEMU RE (60m, 130 t) [kWh/km]*
TCO1	Nagoldtalbahn	Pforzheim-Horb (RB)	4,14		4,48		4,47	
		Pforzheim-Nagold (RB)	4,57		4,89		4,87	
TCO2	Donautalbahn	Ulm-Blaubeuren (RB)	6,49		6,91		6,89	
		Ulm-Munderkingen (RB)	4,60		4,96		4,95	
		Ulm-Tuttlingen (RE)		6,19		6,51		6,50
		Herbertingen-Ehingen (RB)	4,60		4,88		4,87	
	Aulendorf-Sigmaringen	Aulendorf-Sigmaringen (RB)	4,62		4,97		4,95	
TCO3	RSB Bodensee-Oberschwaben	Friedrichshafen-Leutkirch (RE)		6,20		6,97		
		Aulendorf-Wangen (RB)	4,01		4,28			
TCO4	Westfrankenbahn	Miltenberg-Crailsheim (RE)		4,92		5,44		5,43
		Miltenberg-Seckach (RB)	3,70		4,07		4,05	
		Tauberbischofsheim-Bad Mergentheim (RB)	6,02		6,51		6,49	
TCO5	Hohenlohebahn	Heilbronn-Schwäbisch Hall (RE)		4,23		4,65		
		Öhringen-Schwäbisch-Hall (RB)	4,17		4,55			
TCO6	Strohgäubahn	Korntal-Weissach (RB)	4,25		4,50			
	Teckbahn	Kirchheim/Teck-Oberlenningen (RB)	3,45		3,65			
	Tälesbahn	Nürtingen-Neuffen (RB)	4,98		5,28			

Unterschiede im Energieverbrauch der Fahrzeuge auf unterschiedlichen Einsatzstrecken resultieren im Wesentlichen aus drei Einflussfaktoren:

- Fahrzeugcharakteristika, insbesondere Gewicht
- Unterschiedliche Streckencharakteristika (Höhenverhältnisse/Topografie, Streckengeschwindigkeiten, …)
- Unterschiedliche Haltemuster und resultierende Fahrgeschwindigkeiten.

Um einen direkten Vergleich zu ermöglichen wurde der HEMU-Energieverbrauch hier ebenfalls in kWh/km und nicht in kg H2/km ausgewiesen[100]. Energieverbräuche im Bereich von ca. 4-5 kWh/km finden sich regelmäßig auch in anderen Quellen, diese Werte erscheinen plausibel. Zu beachten ist, dass die Ermittlung eines Energieverbrauchs pro Kilometer auch immer dann höhere Werte liefert, wenn hohe Hilfsenergieverbräuche aufgrund hoher Wendezeitanteile vorliegen, d.h. Energieverbrauch ohne „Kilometerverbrauch“. Siehe dazu auch die Bemerkung in 9.2.1.2. Diese Problematik betrifft aber zunächst grundsätzlich alle Antriebstechnologien.

[100] Entsprechend des Wirkungsgrades der Brennstoffzelle (siehe 4.2.2.1) können pro Kilo Wasserstoff ca. 16-18 kWh Strom erzeugt werden (theoretischer Heizwert 33,3 kWh=100 %); dieser Trendkanal wurde auch bei den iLint-Testfahrten in Baden-Württemberg bestätigt.

Die erstellte Übersicht erlaubt auch die Überprüfung der Mehrverbräuche zwischen untersuchten Technologien.

Mehrverbräuche im Vergleich BEMU vs EMU sind nachstehend für die Untersuchungsstrecken dargestellt. Die Angaben RB bzw. RE kennzeichnen allein die Bemessungsfahrzeuge, die für die Simulationen zugrunde gelegt wurden; sie implizieren nicht zwangsläufig diese Bedienungsformen im engeren SPNV-Sinne[101].

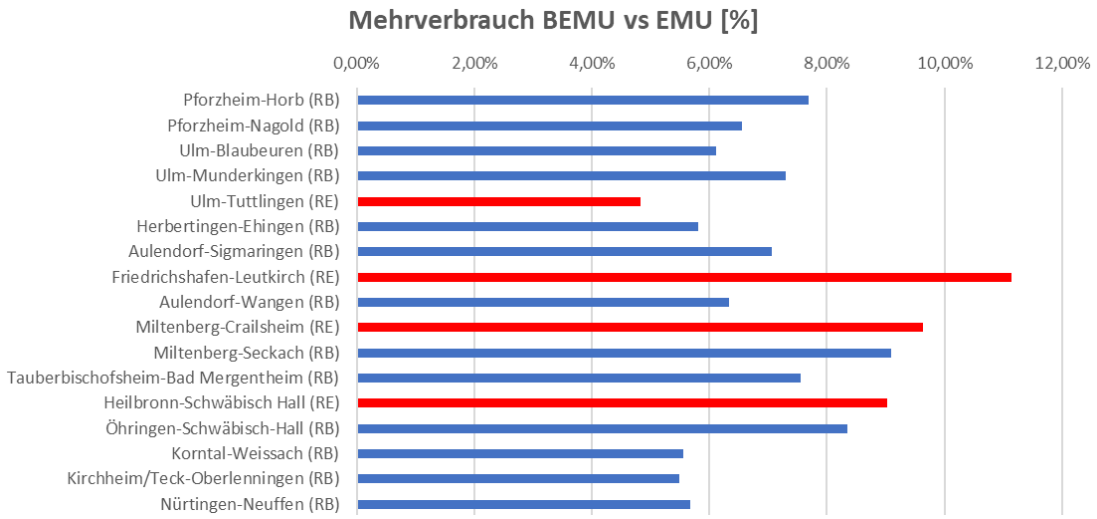


Abb. 217: Vergleich Mehrverbrauch BEMU vs EMU

Obenstehende Grafik lässt nur wenige deutlich abweichende Mehrverbräuche erkennen, hiervon betreffen drei RE-Fahrzeuge.

Im Durchschnitt der Strecken ergibt sich ein um 7,25 % höherer Energieverbrauch der BEMU-Fahrzeuge. Dieser ggf. höher erwartete Wert profitiert von Vorteilen der BEMU-Fahrzeuge im Bereich Rekuperation[102], die Gewichtsnachteile zum Teil kompensieren. Die optimale Ausnutzung dieses Vorteils erfordert eine Auslegung des Batteriemanagements der Fahrzeuge so, dass eine Rekuperation in die Batterie „immer“ möglich ist. Dies bedeutet z.B., dass eine prinzipiell mögliche Ladung an einem Endhalt (z.B. nach Bergfahrt) nicht oder nur teilweise genutzt wird, um für die Rückfahrt genügend „freie“ Kapazität in der Batterie zu gewährleisten.

Abb. 218 zeigt für die Untersuchungsstrecken sehr deutlich den erwartbaren, nahezu linearen Zusammenhang zwischen Haltabständen und Fahrgeschwindigkeiten auf. Eine Ausnahme bildet hier die Linie Aulendorf – Wangen, wo eine im Verhältnis zu den Haltabständen niedrige Geschwindigkeit vorliegt[103].

Diese „Sonderrolle“ wird auch in Abb. 219 deutlich, in der die Korrelation durchschnittlicher Haltabstände mit dem Energiemehrverbrauch geprüft wird.

[101] RE-Bemessungsfahrzeuge wurden dabei schon auf längeren Strecken angesetzt.
[102] BEMU-Fahrzeuge (aber auch HEMU) ermöglichen über ihre Traktions- bzw. Pufferbatterien eine sehr effektive Rekuperation, die grundsätzlich effektiver ist als eine Rückspeisung in die Oberleitung beim EMU. Letztere ist beim BEMU-Fahrzeug alternativ ebenfalls möglich, beim HEMU-Fahrzeug aufgrund des fehlenden Stromabnehmers (bei deutschen Produktlinien, siehe 5.3) nicht.
[103] Die maximale Streckengeschwindigkeit ist hier der limitierende Faktor.

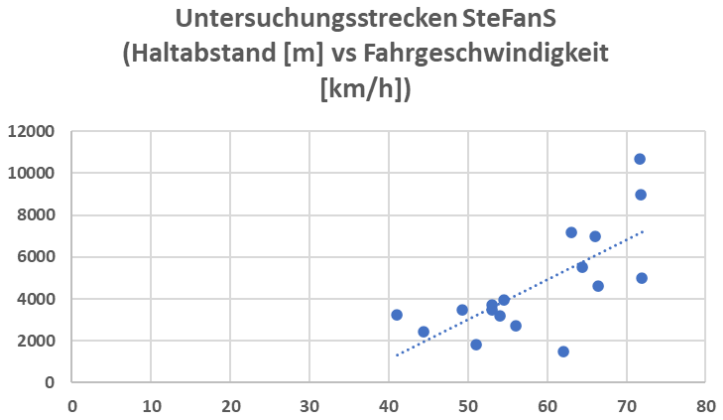


Abb. 218: Haltabstand vs Fahrgeschwindigkeit Untersuchungsstrecken

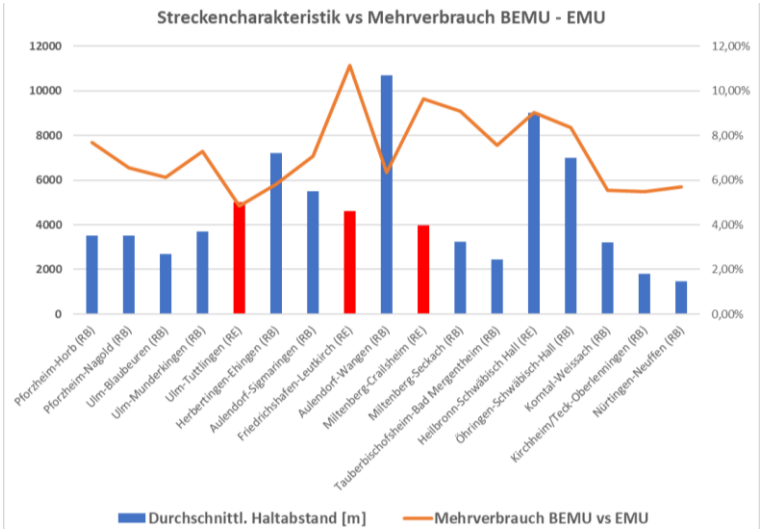


Abb. 219: Streckencharakteristika vs Mehrverbrauch (BEMU vs EMU)

Ein eindeutiger Zusammenhang ist nicht abzuleiten, da absehbar weitere Einflussfaktoren wirken und im Zusammenspiel zu unterschiedlichen Ausprägungen führen.

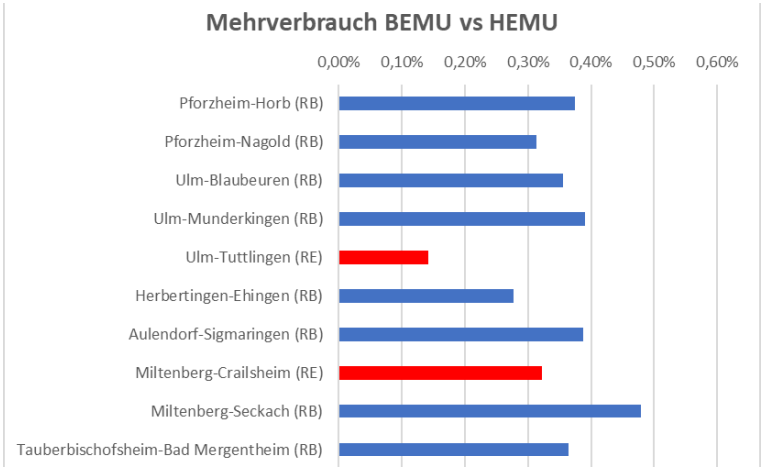


Abb. 220: Vergleich Mehrverbrauch BEMU vs HEMU

Vorstehende Darstellung zeigt Mehrverbräuche im Vergleich BEMU vs HEMU für die Untersuchungsstrecken, der Durchschnitt zeigt einen sehr geringen, im Prinzip vernachlässigbaren BEMU-Mehrverbrauch von 0,34 %[104].

9.7.2 Einfluss zeitlicher Aspekte

Der Status Quo der Verkehrsverträge in Baden-Württemberg ist dem „Vergabekalender" zu entnehmen (siehe: https://www.nvbw.de/ausschreibungen/vergabekalender). Hier ist erkennbar, dass die Umstellung auf alternative Antriebe für die Untersuchungsstrecken der SteFanS-Studie zum Teil sehr unterschiedliche Dringlichkeit hat. Eine Zusammenfassung für die Untersuchungsstrecken bzw. ggf. beeinflussende Nachbarnetze gibt nachstehende Tabelle.

Tabelle 31: Betriebsaufnahmen für Untersuchungsstrecken gemäß Vergabekalender

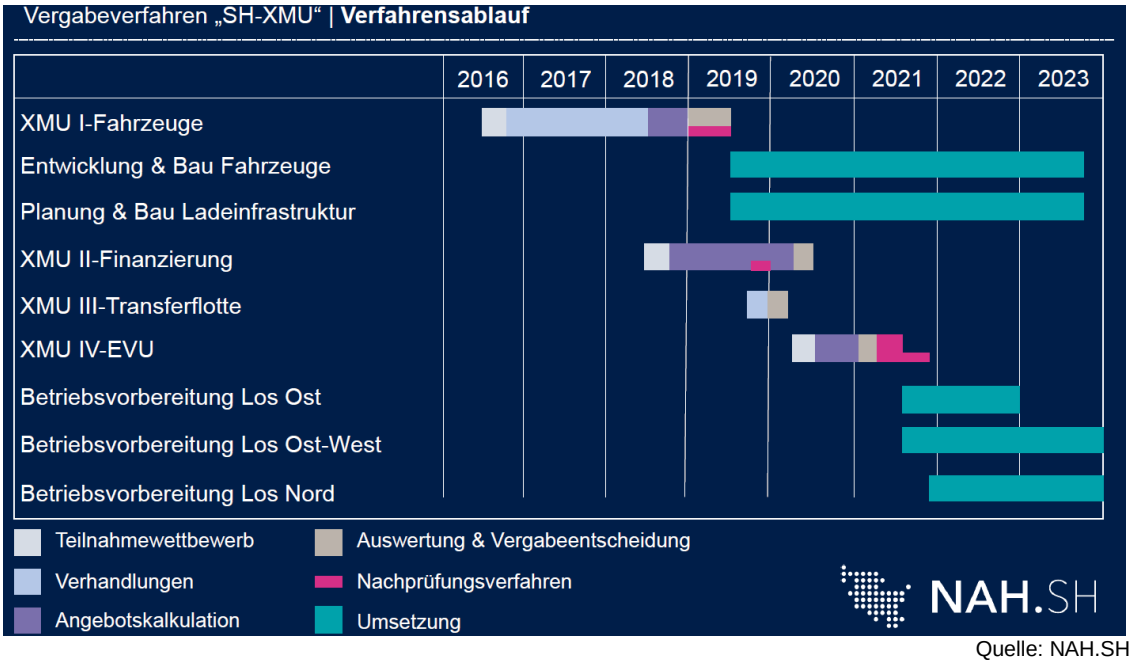
abgeschlossene Vergabeverfahren	Zuordnung zum Netz	Netz -Nr.	Vergabe	Betriebs-start	Fahrzeuge	Laufzeit bis	Bemerkungen
Pforzheim - Nagold (Nagoldtalbahn)	Nordschwarzwald					12/2025	
Öhringen-Cappel – Schwäbisch Hall-Hessental	Hohenlohe-Franken-Untermain	11	10/2015	12/2019	gebraucht	12/2031	gemeinsam mit BEG ausgeschrieben
Crailsheim – Königshofen (Baden)	Hohenlohe-Franken-Untermain	11	10/2015	12/2019	gebraucht	12/2031	
Lauda – Miltenberg	Hohenlohe-Franken-Untermain	11	10/2015	12/2019	gebraucht	12/2031	
Seckach – Miltenberg	Hohenlohe-Franken-Untermain	11	10/2015	12/2019	gebraucht	12/2031	
Aulendorf – Kißlegg	Aulendorfer Kreuz (neu: Württ.-Allgäubahn)	16a	12/2015	12/2017	gebraucht	12/2026	bei (Teil-)Elektrifizierungen Umstellung auf Elektro-Fz
Sigmaringen – Aulendorf (RB = Netz 16a)	Aulendorfer Kreuz	16a	12/2014	12/2017	gebraucht	12/2026	
Sigmaringen – Aulendorf (RE = Netz 5)	Donau-Ostalb (neu: Donautal)	5	12/2014	12/2016	Neigetechnik	12/2029 (max!)	Neuausschreibung ggf. 2024
Ulm – Munderkingen (Donautalbahn)	Donau-Ostalb (neu: Donautal)	5	12/2014	12/2016	Neigetechnik	12/2029 (max!)	
Munderkingen – Herbertingen (Donautalbahn)	Donau-Ostalb (neu: Donautal)	5	12/2014	12/2016	Neigetechnik	12/2029 (max!)	
Immendingen – Tuttlingen (RB = Ringzug)	Ringzug						
Immendingen – Tuttlingen (RE = Netz 5)	Donau-Ostalb (neu: Donautal)	5	12/2014	12/2016	Neigetechnik	12/2029 (max!)	
Sigmaringen – Fridingen	Donau-Ostalb (neu: Donautal)	5	12/2014	12/2016	Neigetechnik	12/2029 (max!)	
Fridingen – Tuttlingen (RB = Ringzug)	Donau-Ostalb (neu: Donautal)						
Fridingen – Tuttlingen (RE = Netz 5)	Donau-Ostalb (neu: Donautal)	5	12/2014	12/2016	Neigetechnik	12/2029 (max!)	
Hechingen-Gammertingen-Sigmaringen	Zollernalbbahn ZAB 2	14b	4/2016	12/2016	gebraucht/ beigestellt	12/2025	
Ermstalbahn	Ermstal- und Ammertalbahn	18	3/2020	12/2022		12/2035	vorzeitige Kündigung möglich ab 12/2030
Ammertalbahn	Ermstal- und Ammertalbahn	18	3/2020	12/2022		12/2035	
Nürtingen – Neuffen (Tälesbahn)						offen	NE-Bahn (WEG/Transdev); Aufgabenträger: Lkr. Esslingen
Kirchheim (Teck) – Oberlenningen (Teckbahn)						offen	Aufgabenträger: Verband Region Stuttgart
Korntal – Weissach (Strohgäubahn)						offen	NE-Bahn (WEG/Transdev); Aufgabenträger: ZV Strohgäubahn
geplante / laufende Vergabeverfahren							
Bodenseegürtelbahn	Bodenseegürtelbahn	16b	2021	12/2023		vsl. 12/2030	Laufzeit abhängig von Elektrifizierung
ZAB1 (Tübingen-Sigmaringen)	Zollernalbbahn	14a/14b	2023?	12/2025	??	12/2037	bei (Teil-)Elektrifizierungen Umstellung auf Elektro-Fz
ZAB2 (Hechingen-Gammertingen-Sigmaringen)							
Württemberg-Allgäubahn (ex Aulendorfer Kreuz)	Regionalbahn Bodensee-Oberschwaben	54	2022?	12/2023	gebraucht/ beigestellt	12/2033	mehrere Betriebsaufnahmestufen, vorz. Kündigung ab 12/2029
Nordschwarzwald	Nordschwarzwald		2022/23?	12/2025	??	offen	in Vorbereitung
Hochrein	Wiesental/Hochrhein	10	2023?	12/2026	neu	12/2038	in Vorbereitung
Ringzug Schwarzwald-Baar-Heuberg	Ringzug Schwarzwald-Baar-Heuberg		2024/25?	12/2027	neu	offen	abhängig von Infrastrukturausbau
Donautal	Donautal		2023	12/2025	??	offen	in Vorbereitung

Eine Verschiebung einer endgültigen Technologieempfehlung für Strecken bzw. Teilnetze, die auf den ersten Blick „noch Zeit haben" (z.B. Westfrankenbahn, 2031), um ggf. noch mehr Erfahrungen mit den aktuell und bis 2024 erfolgenden Betriebsaufnahmen zu sammeln, erscheint aber keine zielführende Strategie. Dies insbesondere im Hinblick auf die zu erwartenden langen Vorlaufzeiten für Baumaßnahmen im DB Netz-Bereich. Aus diesem Grund erscheint es umgekehrt empfehlenswert, möglichst schnell in die Umsetzung einzusteigen, da, insbesondere für größere Maßnahmen mit einer Planungs- und Umsetzungszeit von nicht unter 6-7 Jahren gerechnet werden muss[105].

[104] Diese Abweichung kann auch rein in der Simulationsmethodik begründet sein, in jedem Fall ergibt sich technisch kein Mehrverbrauch für HEMU-Fahrzeuge.

[105] Die Zeitabläufe von bereits realisierten Elektrifizierungsmaßnahmen (Beispiel: Südbahn) oder weiteren, fest geplanten Maßnahmen liefern hier Anschauungsmaterial.

Der Gesamt-Zeitbedarf für die Umsetzung des XMU-Netzes in Schleswig-Holstein (siehe 6.1.1) liefert hierfür einen weiteren Beleg (siehe Abb. 221).



Quelle: NAH.SH

Abb. 221: Verfahrensablauf und Zeitbedarf für das XMU-Netz in Schleswig-Holstein

Zu beachten ist dabei im Vergleich, dass das jetzt erarbeitete SteFanS-Gutachten die Technologieentscheidung vorwegnimmt, die in Schleswig-Holstein noch als Bestandteil bzw. Ergebnis der technologieoffenen Ausschreibung getroffen wurde. Dies könnte grundsätzlich eine Vereinfachung der Fahrzeugausschreibung bewirken und etwas mehr Zeit für die Infrastrukturumsetzung geben.

Für kurzfristiger anstehende Vergabeverfahren für Verkehrsverträge (z.B. Nagoldtalbahn, 2025) muss geprüft werden, ob eine Umsetzung von Infrastrukturmaßnahmen bis zum gewünschten Zeitpunkt einer Betriebsaufnahme realistisch möglich ist.

9.7.3 Relevanz Reaktivierungsstrecken

Die Reaktivierung ehemaliger Eisenbahntrassen steht in Baden-Württemberg hoch auf der Agenda, mit dem Reaktivierungskonzept wurde damit eine erste planerische Grundlage geschaffen (siehe Abb. 222). Aktuell laufen in vielen Regionen Machbarkeitsstudien, die seitens des Landes finanziell unterstützt werden.

Bei einer Ausklammerung der Reaktivierungsstrecken in Kategorie D (Gelegenheitsverkehr und touristische Verkehre) stehen nachfolgende Strecken in direktem oder erweitertem Zusammenhang mit den Untersuchungskorridoren der SteFanS-Studie:

<u>Kategorie A:</u>

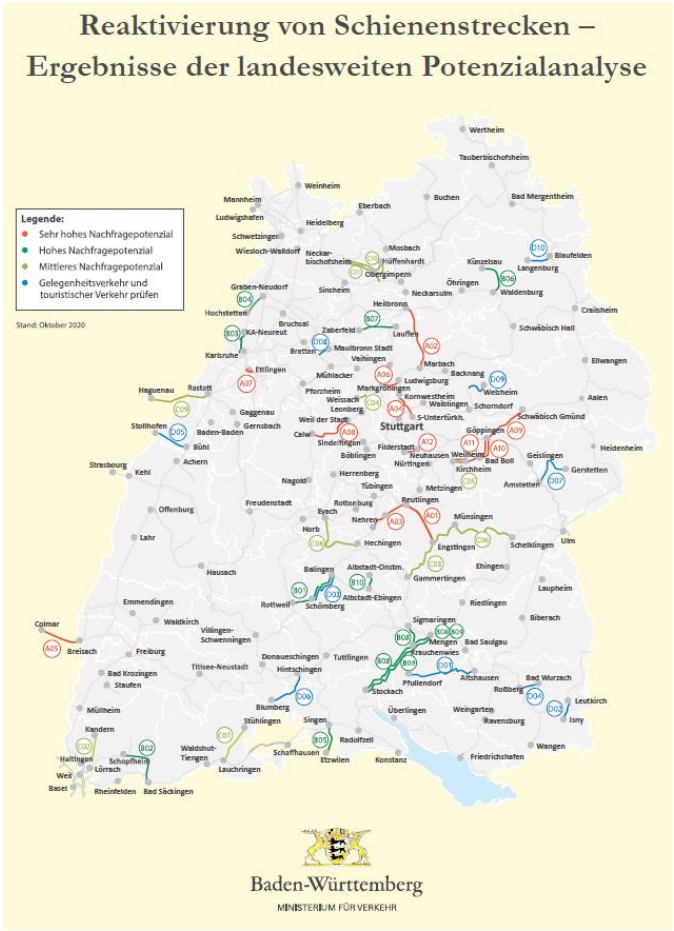
- Kirchheim/Teck – Göppingen (– Schwäbisch Gmünd)

<u>Kategorie B:</u>

- Mengen/Sigmaringen – Stockach („Ablachtalbahn“)
- Künzelsau – Waldenburg

<u>Kategorie C:</u>

- Gammertingen – Engstingen – Schelklingen („Schwäbische Alb-Bahn“)



Quelle: Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg

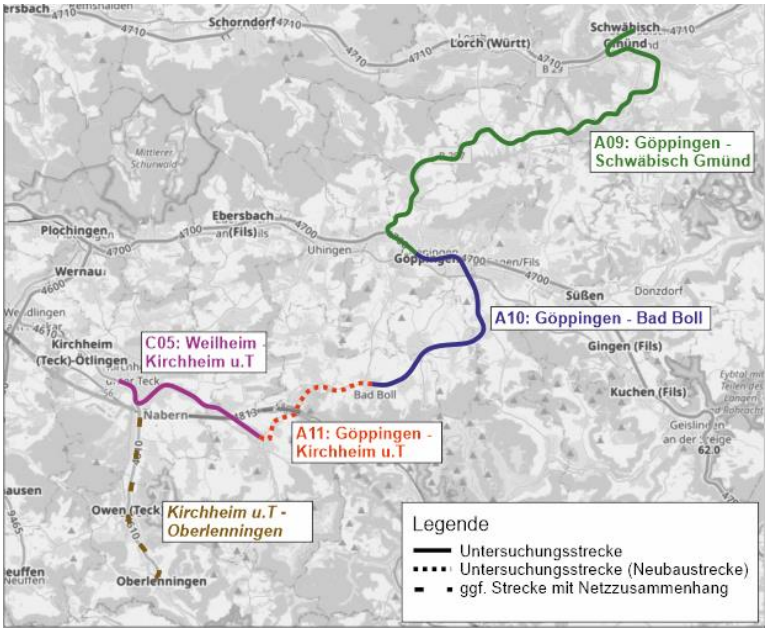
Abb. 222: Potenzialanalyse zu Reaktivierungen in Baden-Württemberg

Die Einbeziehung von Reaktivierungsstrecken im Rahmen der SteFanS-Studie erfolgt nicht im Sinne einer „technologieoffenen“ Betrachtung weiterer Einzelstrecken, sondern allein im Hinblick auf denkbare Netzzusammenhänge mit den Untersuchungsstrecken der Studie und einer ersten, groben Einschätzung, welche Relevanz die SteFanS-Empfehlungen in einzelnen Teilnetzen für räumlich zugeordnete Reaktivierungskorridore haben. Im Normalfall ist dabei davon auszugehen, dass die Wirkung vom Teilnetz (in Betrieb befindliche Strecke bzw. Strecken) auf den zu reaktivierenden Korridor ausstrahlt. Eine Beeinflussung oder Veränderung der Technologieentscheidung in einem Teilnetz aufgrund eines Reaktivierungskorridors ist im Regelfall nicht zu erwarten.

Die Strecke Mengen – Stockach („Ablachtalbahn“) wurde im Rahmen der SteFanS-Studie ergänzend im Hinblick auf einen BEMU-Betrieb betrachtet (siehe 9.2.6.2); Auslöser war das Vorliegen einer BEMU-Empfehlung für das Teilnetz 2 „Donautalbahn Plus“, das u.a. eine Oberleitungsinsel im Abschnitt Mengen-Herbertingen vorsieht (siehe 9.2.4.2). Ziel war zu ermitteln, ob mit den künftigen Lademöglichkeiten in Stockach und Mengen auch ein BEMU-Betrieb auf der Ablachtalbahn möglich ist.

Der Korridor Kirchheim/Teck – Göppingen – Schwäbisch Gmünd, der mehrere Einzelreaktivierungen zusammenfasst, steht in direktem Zusammenhang mit der Untersuchungsstrecke Kirchheim/Teck-Oberlenningen (Teilnetz 6, siehe 9.6.2). Für den Reaktivierungskorridor läuft aktuell eine Machbarkeitsstudie. Ergebnisse oder „Empfehlungstrends“ sind dem Gutachter zum Zeitpunkt der Bearbeitung nicht bekanntgeworden. Die Aufgabenstellung der Machbarkeitsstudie beinhaltete die Gegenüberstellung einer rein

eisenbahnmäßigen („klassischen“) Reaktivierung mit einer Stadtbahnlösung; der letztere Ansatz begründete sich insbesondere aufgrund einer komplexen Trassensituation im Neubauabschnitt zur Verbindung der Teilstrecken Kirchheim/Teck - Weilheim und Göppingen - Bad Boll (siehe Abb. 223)



Quelle: TTK

Abb. 223: Reaktivierungskorridor Kirchheim/Teck-Göppingen-Schwäbisch Gmünd

Der Inselcharakter der Strecke Kirchheim/Teck – Oberlenningen empfiehlt aus Sicht des Gutachters, eine abschließende Entscheidung zur weiteren Vorgehensweise im Zusammenhang mit dem benachbarten Reaktivierungskorridor zu treffen. Sollte dort eine Stadtbahn-Reaktivierung vorgesehen werden, wäre die Einbeziehung der Strecke nach Oberlenningen naheliegend. Im Falle einer Entscheidung für eine eisenbahnmäßige Reaktivierung müsste ohnehin die Frage geklärt werden, wie der Reaktivierungskorridor, wenn man Dieselbetrieb ausschließt, betrieben werden soll. Hier wäre dann die Strecke nach Oberlenningen in die Gesamtbetrachtung einzubeziehen. Im Falle einer Nichtweiterverfolgung der Reaktivierungspläne ist eine eigenständige Entscheidung zu treffen, siehe dazu Kapitel 11.

Die Reaktivierungsstrecke Künzelsau-Waldenburg steht in direktem Zusammenhang mit der in der SteFanS-Studie betrachteten Strecke Heilbronn – Öhringen – Schwäbisch Hall/Hessental („Hohenlohebahn“). Die vorläufigen Erkenntnisse der Machbarkeitsstudie bzw. Nutzen-Kosten-Untersuchung für die Reaktivierung liegen dem Gutachter vor. Zu beachten ist hierbei, dass die Untersuchung nicht nur die eigentliche Reaktivierungsstrecke zum Thema hatte, sondern sich auch mit einer Elektrifizierung der Hohenlohebahn selbst befasste (hier verglichen mit einem Dieselbetrieb im Ohnefall). Die Erkenntnisse aus dieser Studie ergänzen damit auch die Betrachtungen der SteFanS-Studie zum Teilnetz 5, in dem die Vollelektrifizierung („Lückenschluss“) mit einem BEMU-Betrieb verglichen wurde (siehe 9.5, 10.5 und 11). Der die Reaktivierungsstrecke selbst betreffende Planfall befindet sich aktuell noch in der abschließenden Bearbeitung, er geht von einem elektrischen Betrieb auf der Gesamtstrecke Heilbronn-Waldenburg-Künzelsau (Stadtbahn) aus[106].

[106] Die Planfälle für die Hohenlohebahn selbst lassen eine positive Empfehlung für eine Elektrifizierung derselben erwarten.

Die Strecke Gammertingen – Engstingen – Schelklingen („Schwäbische Alb-Bahn“) steht zunächst in direktem Zusammenhang mit der in Teilnetz 2 betrachteten Strecke Ulm-Sigmaringen („Donautalbahn“, siehe 9.2.1). Ein zweiter Zusammenhang besteht mit der ergänzend untersuchten Strecke Hechingen – Gammertingen – Sigmaringen („ZAB 2“, siehe 9.2.6.3). Die Infrastrukturmaßnahmen, die für beide Strecken entsprechend der TCO-Empfehlung und der Gesamtempfehlung (siehe 10.2.4 und 11), vorgesehen sind, schaffen Rahmenbedingungen für diese Reaktivierungsstrecke.

9.7.4 Relevanz Güterverkehr

Betrachtungen zum Güterverkehr im Rahmen der SteFanS-Studie auf den einzelnen Untersuchungsstrecken (siehe 9.1.6.2 und weitere) haben grundsätzlich zwei Ziele:

- Feststellung von Güterverkehrszielen (Anschlussbedienung)
- Beurteilung der Bedeutung von Strecken im Hinblick auf Umleitungsverkehre im Güterfernverkehr

Die Identifizierung des lokalen Güterverkehrs dient dabei nicht dem Ziel, allein aufgrund dessen Bedeutung eine Technologieentscheidung herbeizuführen oder zu beeinflussen – der Personenverkehr ist hierfür der entscheidende Faktor. Sinnvoll erscheint aber die Beurteilung zur Fragestellung, welche Synergien für den Güterverkehr mit einer aus SPNV-Sicht getätigten Technologie-Empfehlung für BEMU oder HEMU auf der jeweiligen Strecke möglich sind, z.B. für „Last Mile“-Bedienungen, Rangierverkehr etc.

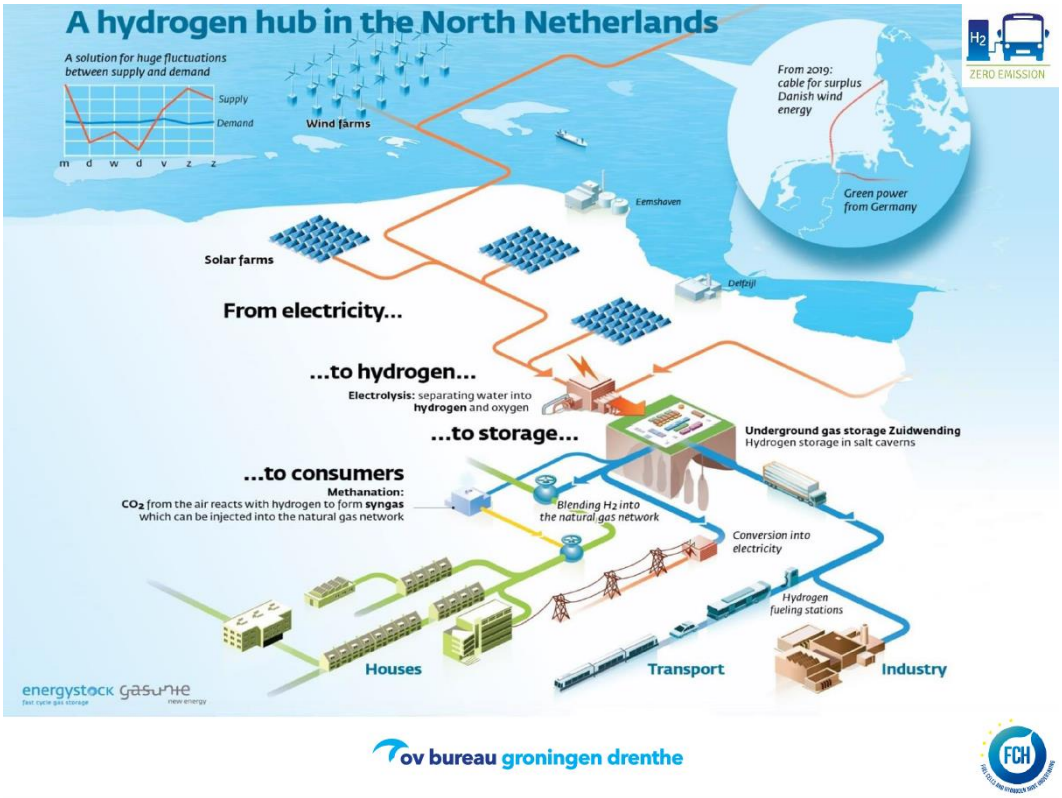
In Kapitel 5.6 wurde ein kurzer Überblick zu aktuellen Fahrzeugentwicklungen im Lokomotivbereich gegeben. Festgestellt wurde u.a., dass bereits einige Voraussetzungen existieren, auch eine Dekarbonisierung im Anschlussverkehr bzw. Rangierverkehr anzugehen.

Wie in Kapitel 7.7 dargestellt, sieht die Vorgehensweise des Gutachters vor, die rein wirtschaftlichen Ergebnisse (TCO-Betrachtung, siehe 10.1.7 und weitere) mit zusätzlichen strategischen und zum Teil qualitativen Aspekten zu ergänzen und damit ggf. zu einer abgewandelten Gesamtempfehlung zu erweitern (siehe Kapitel 11). In diesem Zusammenhang kann die Bedeutung einer Strecke für den Güterfernverkehr bzw. für Umleitungen im Güterfernverkehr ein wichtiges Kriterium im Vergleich der Alternativen Vollelektrifizierung (EMU) bzw. Batteriebetrieb (BEMU) darstellen.

Entsprechende Aspekte sind in den jeweiligen Teilnetzbetrachtungen dargestellt und fließen, soweit gegeben, in die Weiterentwicklung der TCO-Empfehlung zur Gesamtempfehlung ein (siehe Kapitel 11).

9.7.5 Synergieeffekte

Das Thema Synergieeffekte ist im Wesentlichen ein Wasserstoffthema. Im Vordergrund steht hier die Kombination einer „grünen“ Stromproduktion mit einer lokalen Wasserstoffproduktion und einer breitgefächerten Nutzung des erzeugten Wasserstoffs innerhalb der Region. Derartige Projekte werden in zahlreichen Ländern vorangetrieben und es finden sich eine ganze Reihe sogenannter „hydrogen valleys“. Der Maßstab ist dabei sehr unterschiedlich. Das Projekt (besser „die Projekte“) im Raum Groningen (siehe Abb. 224) steht dabei weit oben auf der europäischen Skala.



Quelle: OV Bureau Groningen-Drenthe

Abb. 224: Hydrogen hub Groningen

Ein SPNV-Betrieb mit Brennstoffzellenfahrzeugen findet in einem derartigen Projektumfeld deutlich günstigere Rahmenbedingungen vor, als dies in Regionen der Fall ist, die keine derartigen Strukturen aufweisen bzw. planen. Ein deutsches Beispiel kann hier die Region Jülich sein (siehe Abb. 225), wo entsprechend für das sogenannte „Dürener Netz“ der Rurtalbahn dann auch die Umstellung auf Wasserstoffbetrieb diskutiert wird.

Quelle: Dürener Zeitung (Medienhaus Aachen) / © Siemens

Abb. 225: Jülich - Beispiel für den Aufbau einer regionalen Wasserstoffwirtschaft

Einige der in Kapitel 6.2 dargestellten Wasserstoffprojekte haben ebenfalls eine vergleichbare Zielrichtung. In Deutschland ist dies insbesondere das Projekt der Heidekrautbahn (siehe 6.2.3), international das Projekt in Groningen (siehe 6.2.7.4). Aber

auch den Projekten in Brescia (siehe 6.2.7.2) oder im Zillertal (siehe 6.2.7.1) kann man einen erweiterten Projektansatz über den reinen SPNV-Betrieb hinaus zusprechen.

Eine entscheidende Frage scheint dabei aber zu sein, wer „den ersten Schritt macht", d.h. ob der SPNV-Projektteil „Gast" in einem auf ganz anderen Schultern ruhenden Gesamtkonzept sein kann oder eine „Gastgeber"- oder Vorreiterrolle übernehmen muss. Das zuletzt gescheiterte Projekt in Thüringen (Schwarzatal, siehe 6.2.4) beinhaltete ebenfalls, zumindest im erweiterten Projektansatz, die Überlegung eines regional angelegten Sektorkopplungsprojekts; man überließ aber offenbar, so wie dann die SPNV-Ausschreibung erfolgte, die finanzielle Verantwortung für den ersten Schritt in die „Wasserstoffwelt" allein „dem Markt", d.h. dem Anbieter der Verkehrsleistungen.

Eine zweite Spielart unter dem Oberbegriff Synergieeffekte sind industriepolitische Überlegungen wie die Förderung regional ansässiger Industriestandorte. Hier lassen sich sowohl das Pilotprojekt der LNVG im EVB-Netz (siehe 6.2.1), als auch das hessische Projekt (siehe 6.2.2) zuordnen. Zitieren lässt sich hier z.B. der hessische Staatssekretär Deutschendorf, der folgendes formulierte:

> *„… das Land, ebenfalls ein RMV-Gesellschafter, greift bei seinem Engagement für das H2-Taunusnetz weit über die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des Verkehrsvertrages hinaus: Hessen denkt Chemie und Mobilität zusammen".*

Der Gutachter sieht beide dargestellten Strategieansätze grundsätzlich als gangbare Wege. Für das SteFanS-Gutachten war, ganz vereinfacht, die Frage zu beantworten, ob in Baden-Württemberg Voraussetzungen vorliegen, sei es in der Landespolitik, sei es über regionale Wasserstoffinitiativen, sei es im Zusammenhang mit Industriestandorten, die dem Einsatz von Brennstoffzellenfahrzeugen in Baden-Württemberg generell oder in einzelnen Teilnetzen besondere Rahmenbedingungen verschaffen, die die wirtschaftliche Technologiebewertung (aus SPNV-Sicht) beeinflussen.

Dies muss aus Sicht des Gutachters verneint werden. Weder setzt die Landespolitik spezifische Schwerpunkte für den Wasserstoffeinsatz im SPNV (Fraunhofer-Institute (IAO, ISE, ISI), 2020), noch ist erkennbar, angesichts massiver Probleme beim weiteren Windkraftausbau, dass eine einheimische Produktion grünen Wasserstoffs in größerem Stil (wie z.B. in der Region Groningen) erfolgen kann[107]. Die Situation wurde in einem vom Gutachter geführten Gespräch so skizziert: „Baden-Württemberg war immer Energie-Importland und wird es auch bleiben". Damit stellt sich die Frage, zu welchem Zeitpunkt „grüner" Wasserstoff in genügenden Mengen und zu attraktiven Preisen für den lokalen Einkauf, d.h. im Nahbereich in Frage kommender Strecken, zur Verfügung stehen kann.

Bei jeder auf „Einkauf" beruhenden Strategie darf die Frage der Transportwege zum Bedarfsort, d.h. der jeweiligen Wasserstofftankstelle, in der Gesamtbetrachtung nicht vernachlässigt werden, weder wirtschaftlich noch verkehrlich noch aus Umweltsicht. Dies wäre auch ein Thema, wenn man den Chemiestandort Ludwigshafen (BASF) analog zur hessischen Vorgehensweise mit dem Industriepark Höchst in die Überlegungen einbinden wollte[108].

[107] Wozu dann die Frage zu stellen wäre, ob nachhaltig produzierte elektrische Energie dann am sinnvollsten in der Wasserstoffproduktion einzusetzen ist.
[108] Unabhängig von der Frage, ob dort erhältlicher Nebenprodukt-Wasserstoff die Nachhaltigkeitsanforderungen erfüllt (Stichwort: „grüner Wasserstoff).

Weder Verfügbarkeit noch verbundene Transportwege lassen sich für den zu betrachtenden 30-Jahres-Zeitraum seriös einschätzen. Als Vorgehensweise für das gegenständliche Gutachten wurde daher ausschließlich eine lokale Wasserstoffproduktion aus einzukaufendem Grünstrom am Tankstellenstandort betrachtet (siehe 7.3).

Der Gutachter kann und will nicht ausschließen, dass in einzelnen Teilräumen ggf. künftig Rahmenbedingungen vorliegen können, die die wirtschaftliche Beurteilung eines SPNV-Betriebs mit Brennstoffzellenfahrzeugen positiv beeinflussen bzw. ergänzende strategische Argumente liefern. Für das in der SteFanS-Studie betrachtete Streckennetz sieht der Gutachter aktuell aber keine Berechtigung für einen wie auch immer gearteten „Wasserstoffbonus“.

Im Zusammenhang mit den zwischenzeitlich eingestellten Überlegungen für eine Umstellung des SPNV im Großraum Toronto (Kanada) auf Wasserstoffbetrieb formulierte ein Kritiker der Pläne folgende Sätze (Quelle: www.tvo.org, John Michael McGrath):

> *The argument for hydrogen trains was always a heady brew of high-tech boosterism and industrial policy with the barest seasoning of actual merit.*
>
> *But the more basic problem with Ontario’s hydrail dreams was always that, instead of answering the question “how can we best move people around the GTHA quickly and economically?” it was an attempt to answer the question “how can we spend tens of billions of dollars in a way that will specifically enrich a handful of Ontario companies?”*

Ohne diese Aussagen in Bezug auf das dortige Projekt verifizieren und unterschreiben zu können, teilt der Gutachter aber einen leicht modifizierten Grundtenor: Eine Technologieentscheidung sollte nicht in erster Linie auf „Technologieverliebtheit“ beruhen, sondern sich zunächst ganz elementar darauf konzentrieren, mit den zur Verfügung stehenden Finanzmitteln einen möglichst hochwertigen und attraktiven SPNV anzubieten.

9.7.6 Fahrzeugbeschaffung / Werkstattstandorte

Überlegungen zur künftigen Fahrzeugbeschaffung, d.h. auch der Konfiguration der Fahrzeuge und damit zusammenhängender Werkstattkonzepte waren im Rahmen der SteFanS-Studie kein Kernbestandteil der Aufgabenstellung des Gutachters. Es ergaben sich im Rahmen der Bearbeitung allerdings Erkenntnisgewinne[109] und resultierende Einschätzungen, die der Gutachter hier zumindest nachrichtlich anreißen möchte.

Aktuell verfügbare EMU/BEMU-Fahrzeuge weisen eine Mindestlänge von ca. 45m auf (in kleinster Konfiguration), was für einige betrachtete Strecken gegenüber den aktuell eingesetzten Bestandsfahrzeugen einen Kapazitätssprung bedeutet[110]. Dieser wäre nochmals größer, wenn noch längere, ggf. dreiteilige Fahrzeuge (ca. 60m Länge) zum Einsatz kämen.
Selbstverständlich kann das Verharren in Bestandsgrößen kein Ziel sein, ganz unabhängig von der Tatsache, dass die Industrie derartige „Kleinfahrzeuge“ nicht mehr anbietet[111]. Die verkehrspolitischen Ziele des Landes sehen im Sinne der Verkehrswende erhebliche Angebots- und Kapazitätssteigerungen vor, zusätzlich erzeugen verstärkte

[109] So z.B. aus der Befassung mit einer Vielzahl weiterer Projekte im BEMU/HEMU-Segment.
[110] Insbesondere für Strecken, die aktuell noch mit Regioshuttle-Fahrzeugen mit 25 m Länge bedient werden.
[111] Die Mindestgröße bei Einbeziehung von Stadtbahnfahrzeugen liegt bei ca. 37m.

Bestrebungen zu multimodalen Angeboten für entsprechenden Platzbedarf in SPNV-Fahrzeugen (Stichwort Fahrradmitnahme).

Die vom Gutachter in der vorliegenden Studie konfigurierten Bemessungsfahrzeuge (RB-Typ: 45m RE-Typ: 60m) greifen die beschriebene Bandbreite auf (siehe 7.8.1), sind zunächst einmal nur ein Werkzeug zur Machbarkeitsprüfung und keinesfalls als Präjudizierung von Fahrzeugtypen für kommende Ausschreibungen zu verstehen. Deren Konfiguration bedarf ergänzender Überlegungen, auch zu der Frage, ob ein einheitlicher Fahrzeugtyp für alle Strecken beschafft werden soll oder ggf. eine Variierung sinnvoll sein kann[112].

Gewährleistungsvereinbarungen für Fahrzeuge, insbesondere bei Reichweiten- und Performance-kritischen Fahrzeugen, wie hier betrachtet, basieren regelmäßig auf klar definierten Streckenparametern. Ein Fahrzeugtyp, der eine Vielzahl unterschiedlicher Strecken abdecken soll, müsste sich zwangsläufig an den Charakteristika der schwierigsten Strecke orientieren und wäre für andere Strecken ggf. deutlich überdimensioniert. Hier empfiehlt sich aus Gutachtersicht eine Abwägung zwischen den Skaleneffekten, die ein Fahrzeug-Großauftrag preislich verspricht und einer ggf. auf Teilnetze (nicht Einzelstrecken!) zugeschnittenen Fahrzeugkonfiguration.

Die in der Studie definierten Teilnetze dienten zunächst allein dem Zweck, eine strukturierte Bearbeitung der Aufgabenstellung, insbesondere im Sinne der wirtschaftlichen Betrachtungen, zu ermöglichen. Es ist jedoch davon auszugehen, wie auch die Struktur des Vergabekalenders Baden-Württemberg zeigt (siehe 9.7.2), dass eine Umsetzung des SteFanS-Konzeptes die Vorhaltung von Teilflotten in Teilnetzen, in welcher Form auch immer, beinhalten muss. Dies ist aktuell auch für das Ortenaunetz, die erste Beschaffungsmaßnahme für BEMU-Fahrzeuge in Baden-Württemberg, so in der Realisierung (siehe 6.1.2).

Die Untersuchungen des Gutachters haben u.a. auch die Auswirkungen von Tankstellenkonzepten im Hinblick auf Leerfahrten („Tankfahrten“, d.h. Tankstellenzuführungen) aufgezeigt (siehe 7.8.5, 7.10 und in den einzelnen Teilnetz-Betrachtungen). Ähnliche, hier nicht untersuchte, Auswirkungen ergeben sich grundsätzlich auch im Hinblick auf Werkstattstandorte und beeinflussen mittelbar über die Reservehaltung auch den Fahrzeugbedarf. So können günstig angeordnete Werkstattstandorte ggf. auch Synergien für die Betriebsreserve mehrerer einen Standort nutzender Strecken bieten, während Einzelstrecken ohne direkten Werkstattzugang hier Nachteile aufweisen. Diese Problematik ist u.a. auch Gegenstand der gutachterlichen Einschätzung zu Teilnetz 6 („Raum Stuttgart“), siehe dazu auch 9.6.5.3.

Die Konfiguration anstehender Fahrzeugbeschaffungen bzw. Fahrzeugausschreibungen in einem nächsten Schritt sollte daher, angesichts der zum Teil räumlich sehr weit auseinanderliegenden Teilnetze bzw. Einzelstrecken, auch Überlegungen zum Werkstattkonzept beinhalten. Dies gilt umso mehr, wenn Ausschreibungen dann auch nach dem LCC-Modell erfolgen, d.h. der Fahrzeughersteller für die Lebensdauer der Fahrzeuge für deren Unterhaltung zuständig wird[113].

---

[112] Es wird darauf verwiesen, dass z.B. die aktuelle Ausschreibung und Bestellung des VRR für BEMU-Fahrzeuge zwei Größenkategorien zugrunde legte (siehe 6.1.5)

[113] Die gemeinsame BEMU-Fahrzeugbeschaffung für das Ortenaunetz und die Hermann-Hesse-Bahn ist diesbezüglich ein gutes Beispiel. Die Fahrzeugunterhaltung ist in Offenburg vorgesehen (siehe Kapitel 6.1.2). Für letztere Strecke ist die Werkstattzuführung dabei aktuell aufgrund der fehlenden physischen Verknüpfung von Hermann-Hesse-Bahn und Nagoldtalbahn in Calw eher aufwändig (Umweg über Gäubahn).

Damit zusammenhängende Fragen stellen sich unterschiedlich, wenn Fahrzeug-Ausschreibungen für einzelne Teilnetze erfolgen bzw. wenn diese ggf. zu einer Gesamtausschreibung zusammengefasst werden. Insbesondere bei letzterem Fall bedarf das zugrunde zulegende Werkstattkonzept nach Auffassung des Gutachters besonderer Beachtung, da ein zentraler Werkstattstandort im Hinblick auf Reservehaltung und Zuführungsfahrten zu jeweiligen Einsatzregionen betrieblich ggf. Probleme aufwirft.

Neben Baden-Württemberg mit der vorliegenden Studie hat bisher nur Schleswig-Holstein eine landesweite Strategie zum Ersatz von Dieselverkehren entwickelt. Die dortige Vorgehensweise (siehe 6.1.1) ist ein Beispiel für einen möglichen Umgang mit der beschriebenen Thematik. Sie sah auf der einen Seite eine einheitliche Fahrzeugbeschaffung vor (55 Fahrzeuge, 46m), für die Fahrzeugunterhaltung errichtet der Hersteller Stadler zwei Werkstattstandorte in Neumünster und Rendsburg, zugeordnet zu 2 von 3 der dort konfigurierten Teilnetze.

10 Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die Strecken wurden wie dargestellt zu 6 Teilnetzen zusammengefasst und entsprechend der in Kapitel 7.11.4 dargelegten Systematik verschiedenen Betrachtungen unterzogen (Standard, Spezial 1, usw.).

Die TCO-Empfehlung des Gutachters basiert auf den Ergebnissen der Betrachtungsstufen „Standard“ (klassische TCO-Betrachtung) und „Spezial 1“ (TCO klassisch ergänzt durch Restwertbetrachtung zur Elektrifizierung).

Die in den nachstehenden Kapiteln dargestellten TCO-Grafiken verwenden Abkürzungen, die wie folgt zu verstehen sind:

- EK = Energiekosten,
- IK = Investitionskosten (Infrastruktur- und Fahrzeugkosten)
- BK = Betriebskosten (summiert alle Kosten für Wartung und Personal)

10.1 Teilnetz 1 „Nagoldtalbahn“ (TCO 1)

Nachstehend sind die wesentlichen Eingangsgrößen für die Wirtschaftlichkeitsbewertung kurz zusammengestellt:

- Fahrzeugbedarf: EMU: 11, BEMU: 11, HEMU: 19[114]
- Infrastrukturkosten: erschwerte Bedingungen für Elektrifizierung angenommen: +100 % der Kosten.
- Elektrifizierung unter laufendem Betrieb: Zuschlag der Kosten von 30 %.
- BEMU: Tausch der Traktionsbatterie alle 15 Jahre (LTO), Sensitivprüfung zu NMC-Wirkung (8 Jahre, siehe 10.1.5).
- HEMU: Tausch der Brennstoffzelle alle 8 Jahre, der Pufferbatterie alle 15 Jahre und des Wasserstofftanks alle 15 Jahre.
- Annahme GVFG Förderung der Infrastruktur: 90 % (Elektrifizierung, Ladestellen, Tankstellen).
- Fahrzeugförderung ausgeklammert: derzeit nur sporadisch und über 30-Jahreszeitraum in der jeweiligen Höhe nicht bestimmbar.

Entsprechend der dargelegten Systematik erfolgten für das Teilnetz 1 (TCO 1) nachstehende Betrachtungen.

10.1.1 Betrachtung „Standard“

Die Standardbetrachtung umfasst die klassische TCO-Vorgehensweise ohne Restwertbetrachtung zur Elektrifizierung.

Die Zusammenführung der festgelegten Kostenparameter (siehe Kapitel 8), der aus der Strecken- bzw. Teilnetz-Analyse resultierenden Eingangswerte zum Infrastruktur- und Fahrzeugbedarf (siehe 9.1.5) und der betriebsstatistischen Ergebnisse (siehe 9.1.4) ergeben für die Technologiealternativen Gesamtkosten über 30 Jahre wie folgt:

- HEMU: 476 Mio. €
- BEMU: 268 Mio. €
- EMU: 356 Mio. € (+ 32 % gegenüber BEMU, vergleiche 10.1.2)

[114] Der große Unterschied beim Fahrzeugbedarf resultiert aus den Tagesfahrleistungen sowie der Tankfahrtenproblematik, siehe 7.8.5

Abb. 226 zeigt die Summenentwicklung über den Betrachtungszeitraum.

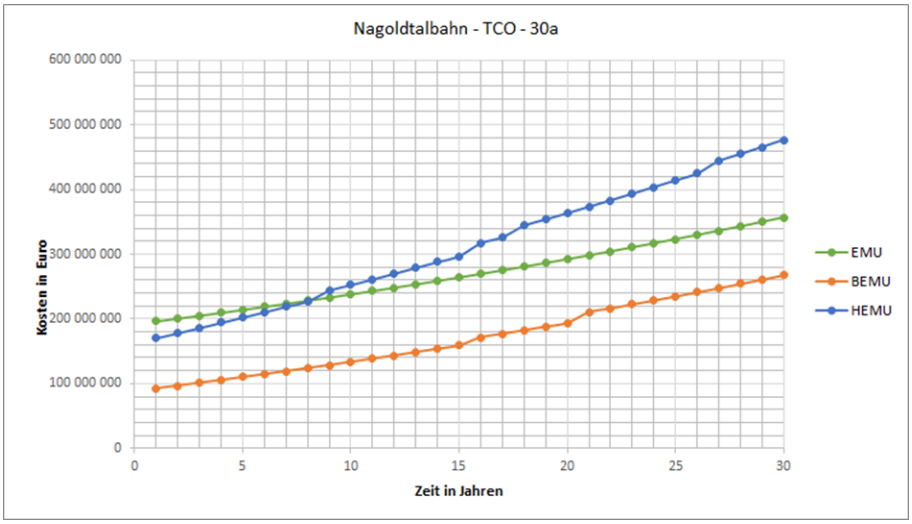


Abb. 226: Kosten EMU-BEMU-HEMU (TCO 1, Nagoldtalbahn, Standard)

10.1.2 Betrachtung „Spezial 1“

Die Betrachtung „Spezial 1“ umfasst die Ergänzung der klassischen TCO-Vorgehensweise für einen 30-Jahres-Zeitraum mit einer Restwertbetrachtung zur Elektrifizierung. Damit ergeben sich für die Technologiealternativen Gesamtkosten wie folgt:

- HEMU: 476 Mio. €
- BEMU: 262 Mio. €
- EMU: 286 Mio. € (+ 9 % gegenüber BEMU, vergleiche 10.1.1)

Abb. 227 zeigt die Kostensummen über den Betrachtungszeitraum für Kostengruppen.

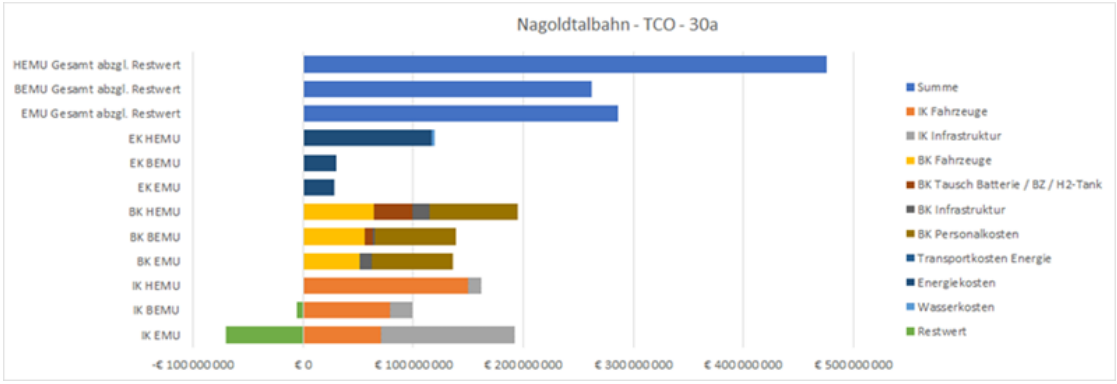


Abb. 227: Kosten EMU-BEMU-HEMU (TCO 1, Nagoldtalbahn, Spezial 1)

10.1.3 Betrachtung „Spezial 2“

Die Betrachtung „Spezial 2“ umfasst die klassische TCO-Vorgehensweise für einen 75-Jahres-Zeitraum, d.h. ausgehend von der maximalen Lebensdauer von Elektrifizierungskomponenten. Damit ergeben sich für die Technologiealternativen Gesamtkosten wie folgt:

- HEMU: 1.826 Mio. €
- BEMU: 1.065 Mio. €
- EMU: 1.093 Mio. € (+ 3 % gegenüber BEMU)

In der Kostenermittlung wurde die Neuanschaffung von Fahrzeugen alle 30 Jahre und ein Restwert der Fahrzeuge von 15 Jahren berücksichtigt. Wie bereits dargestellt, liegt der große Unsicherheitsfaktor bei dieser Vorgehensweise in der seriösen Abschätzung langfristiger Kostenentwicklungen (insbesondere auch im Energiebereich).

Bei Vernachlässigung der Restwertbetrachtung ergeben sich folgende Gesamtkosten:

- HEMU: 2.107 Mio. €
- BEMU: 1.215 Mio. €
- EMU: 1.221 Mio. €

Die Abbildungen 228 und 229 zeigen die Summenentwicklung über den Betrachtungszeitraum (ohne Restwerte) bzw. Kostensummen (mit Restwert) für Kostengruppen.

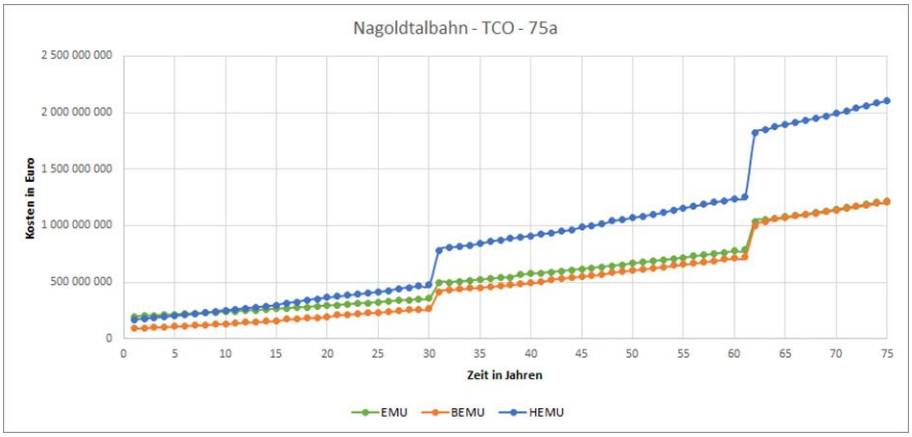


Abb. 228: Kosten EMU-BEMU-HEMU (TCO 1, Nagoldtalbahn, Spezial 2 ohne Restwert)

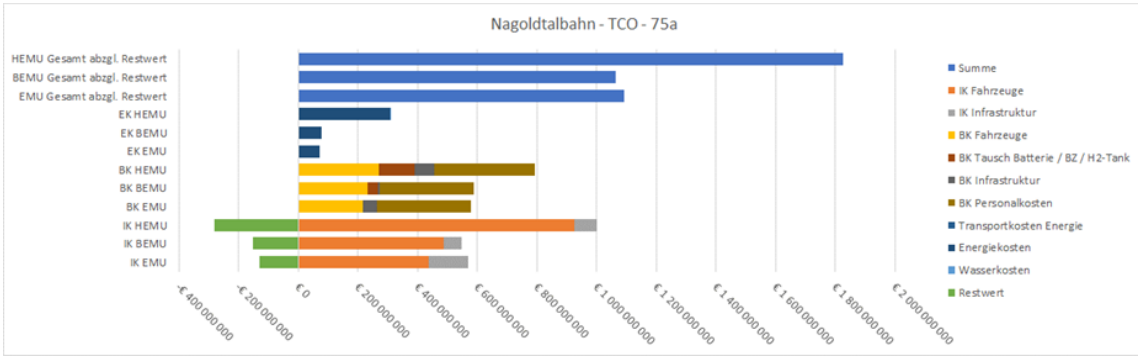


Abb. 229: Kosten EMU-BEMU-HEMU (TCO 1, Nagoldtalbahn, Spezial 2 mit Restwert)

10.1.4 Betrachtung „Spezial 3“

Die Betrachtung „Spezial 1“ umfasst die Ergänzung der klassischen TCO-Vorgehensweise für einen 30-Jahres-Zeitraum mit einer Restwertbetrachtung zur Elektrifizierung unter Einbeziehung der Förderungsperspektiven. Damit ergeben sich für die Technologiealternativen Gesamtkosten wie folgt:

- HEMU: 465 Mio. €
- BEMU: 250 Mio. €
- EMU: 240 Mio. €

Abb. 230 zeigt die Kostensummen über den Betrachtungszeitraum für Kostengruppen.

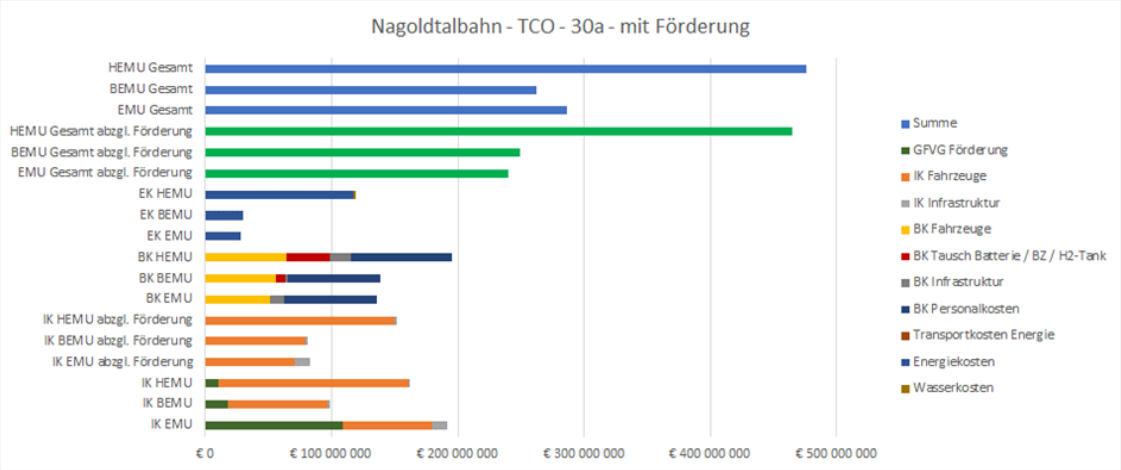


Abb. 230: Kosten EMU-BEMU-HEMU (TCO 1, Nagoldtalbahn, Spezial 3)

10.1.5 Betrachtung „Spezial 4 („BEMU light“)“

In Kapitel 4.2.1.1 wurden u.a. auch die Unterschiede der augenblicklich meistverwendeten Batterietechnologien im Bereich alternativer SPNV-Antriebe, NMC und LTO, dargestellt. Diese unterscheiden sich in der Lebensdauer, dem Preis und dem Gewicht. Die Standardbetrachtung des Gutachters beruht auf der Verwendung von LTO-Batterien, es erschien aber sinnvoll, den Einsatz von NMC-Batterien einmal gegenüberzustellen (Eingangswerte siehe nachstehende Tabelle).

Tabelle 32: Angesetzte Parameter für TCO-Vergleich LTO vs. NMC

	LTO	NMC
Lebensdauer (Jahre)	15	8
Kosten (€/kWh)	1000	600
Gewicht (kg/kWh)	15	9
Fahrzeuggewicht (t)	94	90
Fahrzeugkosten (€/m)	160000	155500

Die Gegenüberstellung erfolgte anhand des TCO 1 Nagoldtalbahn[115], wo sich bei der NMC-Betrachtung für 30 Jahre folgende Gesamtkosten summieren:

- HEMU: 476 Mio. €
- BEMU „Light“: 264 Mio. € (+ 2 Mio. € gegenüber BEMU „Normal“)
- EMU: 286 Mio. €

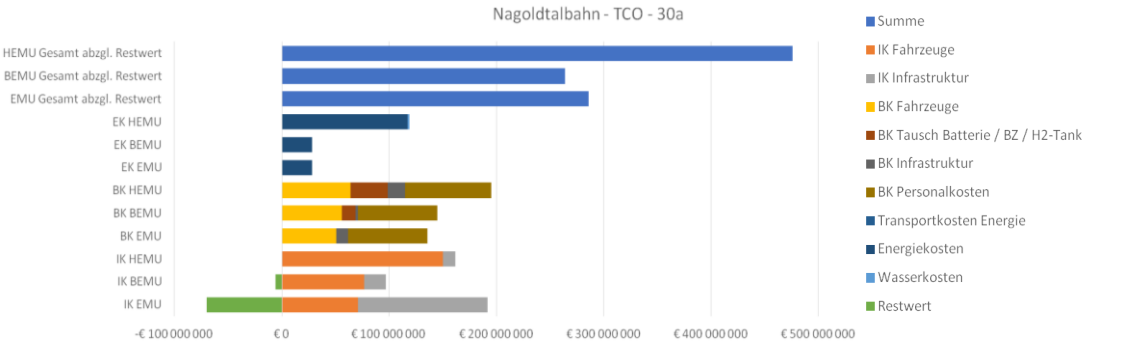


Abb. 231 zeigt die Kostensummen über den Betrachtungszeitraum für Kostengruppen.

[115] Ein reduzierter Energieverbrauch aufgrund des reduzierten Fahrzeuggewichts wurde ermittelt und bei der TCO-Rechnung berücksichtigt.

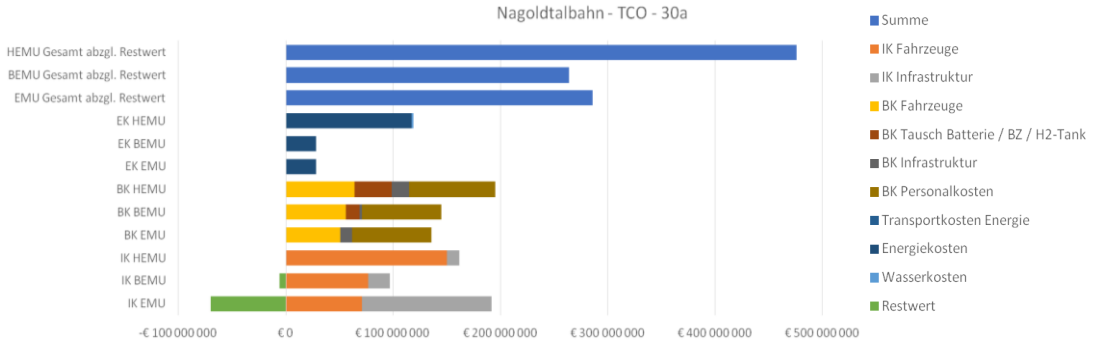


Abb. 231: Kosten EMU-BEMU-HEMU (TCO 1, Nagoldtalbahn, Spezial 4)

10.1.6 Betrachtung „Spezial 4 („HEMU günstig“)“

In einer Sensitivitätsanalyse im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsberechnung der Nagoldtalbahn wurde angenommen, dass Tankfahrten für HEMU wegfallen und es dadurch zu keinem Mehrbedarf an Fahrzeugen im Vergleich zum BEMU und EMU kommt. Daher wurde der Fahrzeugbedarf HEMU identisch zu EMU/BEMU behandelt, d.h. ohne Mehrbedarf. Der Fahrzeugbedarf für diese Betrachtung ist: EMU: 11, BEMU: 11, HEMU: 11

Zusätzlich ist zu beachten:

- In der Realität würde sich dieses günstige Szenario nur dann realisieren lassen, wenn die Anzahl an Tankstellen erhöht wird (mindestens auf 2 wie bei Donautalbahn (Ulm + Sigmaringen) oder Westfrankenbahn (Miltenberg + Crailsheim).
- Eine zweite Tankstelle bedingt entweder einen zweiten Elektrolyseur an der zweiten Tankstelle oder es wären Transportkosten für die Verbringung des Wasserstoffs von Tankstelle A (mit Elektrolyseur) zu Tankstelle B (ohne) einzurechnen.
- Für diese Analyse wurde weder Infrastruktur-Mehrbedarf noch Transportkosten eingerechnet, d.h. Wasserstoff wird zusätzlich begünstigt.

In der Betrachtung „Spezial 4“ ergibt sich für die Technologiealternativen folgendes Bild:

- HEMU: 381 Mio. € (statt 476 Mio. € in „Spezial 1))
- BEMU: 268 Mio. €
- EMU: 356 Mio. €

Abb. 232 zeigt die Summenentwicklung über den Betrachtungszeitraum, Abb. 233 die Kostensummen über den Betrachtungszeitraum für Kostengruppen.

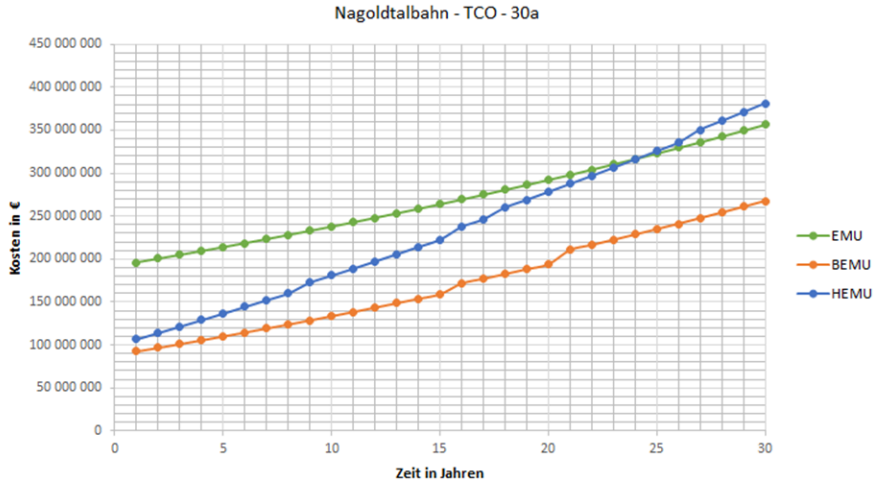


Abb. 232: Kosten EMU-BEMU-HEMU (TCO 1, Nagoldtalbahn, Spezial 4 „HEMU günstig“)

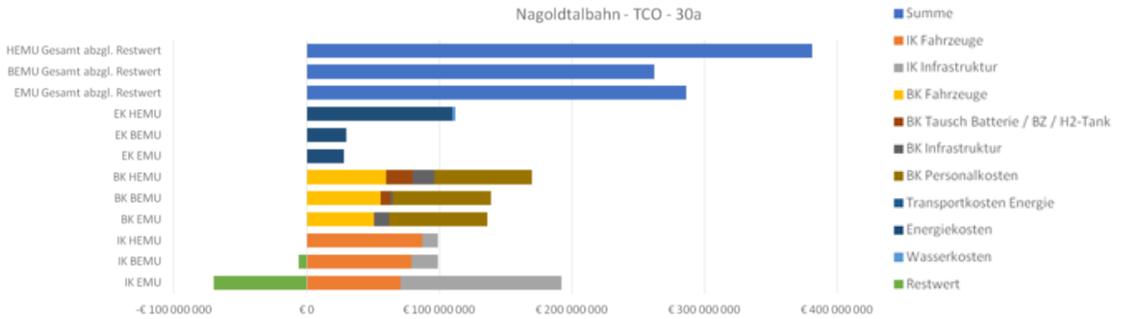


Abb. 233: Kosten EMU-BEMU-HEMU (TCO 1, Nagoldtalbahn, Spezial 4 „HEMU günstig“)

Trotz der deutlichen „Günstigstellung“ von HEMU, bleibt diese die deutlich teuerste Technologiealternative für die Nagoldtalbahn.

10.1.7 Empfehlung

Auf Basis der Wirtschaftlichkeitsberechnung und hier der Betrachtungen „Standard“ und „Spezial 1“ erfolgt die Empfehlung für die Umsetzung eines BEMU-Konzepts.

Förderungsaspekte (siehe „Spezial 3“) wurden dargestellt, gehen aber nicht in die Empfehlung ein.

Die Einbindung der wirtschaftlichen (Teil-)Empfehlung in eine Gesamtempfehlung wird nachstehend in Kapitel 11 diskutiert.

10.2 Teilnetz 2 „Donautalbahn Plus“ (TCO 2)

Nachstehend sind die wesentlichen Eingangsgrößen für die Wirtschaftlichkeitsbewertung kurz zusammengestellt:

- Fahrzeugbedarf RB: EMU: 15, BEMU: 15, HEMU: 18
- Fahrzeugbedarf RE: EMU: 11, BEMU: 11, HEMU: 15
- Infrastrukturkosten: erschwerte Bedingungen für Elektrifizierung im Abschnitt Fridingen – Sigmaringen (24 km) angenommen: +50 % der Kosten
- Elektrifizierung unter laufendem Betrieb: Zuschlag der Kosten von 30 %
- BEMU: Tausch der Traktionsbatterie alle 15 Jahre (LTO)
- HEMU: Tausch der Brennstoffzelle alle 8 Jahre, der Pufferbatterie alle 15 Jahre und des Wasserstofftanks alle 15 Jahre
- Annahme GVFG Förderung der Infrastruktur: 90 % (Elektrifizierung, Ladestellen, Tankstellen)

10.2.1 Betrachtung „Standard“

Die Standardbetrachtung umfasst die klassische TCO-Vorgehensweise ohne Restwertbetrachtung zur Elektrifizierung.

Die Zusammenführung der festgelegten Kostenparameter (siehe Kapitel 8), der aus der Strecken- bzw. Teilnetz-Analyse resultierenden Eingangswerte zum Infrastruktur- und Fahrzeugbedarf (siehe 9.2.4) und der betriebsstatistischen Ergebnisse (siehe 9.2.3) ergeben für die Technologiealternativen Gesamtkosten über 30 Jahre wie folgt:

- HEMU: 1.198 Mio. €
- BEMU: 713 Mio. €
- EMU: 818 Mio. €

Abb. 234 zeigt die Summenentwicklung über den Betrachtungszeitraum.

Abb. 234: Kosten EMU-BEMU-HEMU (TCO 2, Donautalbahn Plus, Standard)

10.2.2 Betrachtung „Spezial 1“

Die Betrachtung „Spezial 1“ umfasst die Ergänzung der klassischen TCO-Vorgehensweise für einen 30-Jahres-Zeitraum mit einer Restwertbetrachtung zur Elektrifizierung. Damit ergeben sich für die Technologiealternativen Gesamtkosten wie folgt:

- HEMU: 1.198 Mio. €
- BEMU: 664 Mio. €
- EMU: 680 Mio. € (+ 2 % gegenüber BEMU)

Abb. 235 zeigt die Kostensummen über den Betrachtungszeitraum für Kostengruppen.

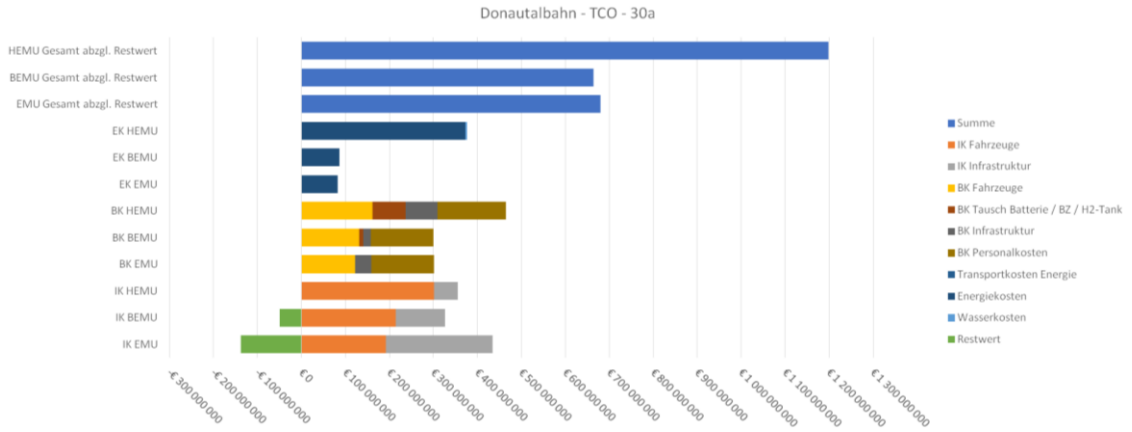


Abb. 235: Kosten EMU-BEMU-HEMU (TCO 2, Donautalbahn Plus, Spezial 1)

10.2.3 Betrachtung „Spezial 3“

Die Betrachtung „Spezial 1“ umfasst die Ergänzung der klassischen TCO-Vorgehensweise für einen 30-Jahres-Zeitraum mit einer Restwertbetrachtung zur Elektrifizierung unter Einbeziehung der Förderungsperspektiven. Damit ergeben sich für die Technologiealternativen Gesamtkosten wie folgt:

- HEMU: 1.148 Mio. €
- BEMU: 607 Mio. €
- EMU: 586 Mio. €

Abb. 236 zeigt die Kostensummen über den Betrachtungszeitraum für Kostengruppen.

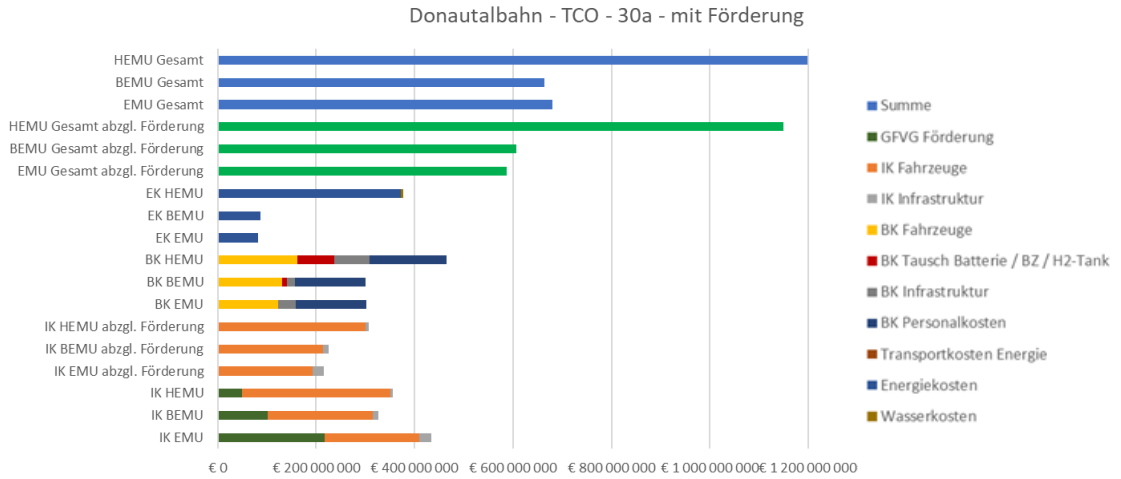


Abb. 236: Kosten EMU-BEMU-HEMU (TCO 2, Donautalbahn Plus, Spezial 3)

10.2.4 Empfehlung

Auf Basis der Wirtschaftlichkeitsberechnung und hier der Betrachtungen „Standard“ und „Spezial 1“ erfolgt die Empfehlung für die Umsetzung eines BEMU-Konzepts

Förderungsaspekte (siehe „Spezial 3“) wurden dargestellt, gehen aber nicht in die Empfehlung ein.

Die Einbindung der wirtschaftlichen (Teil-)Empfehlung in eine Gesamtempfehlung wird nachstehend in Kapitel 11 diskutiert.

10.3 Teilnetz 3 „RS Bodensee-Oberschwaben“ (TCO 3)

Nachstehend sind die wesentlichen Eingangsgrößen für die Wirtschaftlichkeitsbewertung kurz zusammengestellt:

- HEMU wurde nicht betrachtet (siehe 7.6).
- Fahrzeugbedarf RB: EMU: 3; BEMU: 3
- Fahrzeugbedarf RE: EMU: 6; BEMU: 6
- BEMU: Tausch der Traktionsbatterie alle 15 Jahre (LTO).
- BEMU: keine zusätzlichen Infrastrukturkosten angenommen.
- Infrastrukturkosten: keine erschwerten Bedingungen für die Elektrifizierung.
- Elektrifizierung unter laufendem Betrieb: Zuschlag der Kosten um 30 %.
- Annahme GVFG-Förderung der Infrastruktur: 90 % (Elektrifizierung, Ladestellen, Tankstellen).

10.3.1 Betrachtung „Standard“

Die Standardbetrachtung umfasst die klassische TCO-Vorgehensweise ohne Restwertbetrachtung zur Elektrifizierung.

Die Zusammenführung der festgelegten Kostenparameter (siehe Kapitel 8), der aus der Strecken- bzw. Teilnetz-Analyse resultierenden Eingangswerte zum Infrastruktur- und Fahrzeugbedarf (siehe 9.3.5) und der betriebsstatistischen Ergebnisse (siehe 9.3.4) ergeben für die Technologiealternativen Gesamtkosten über 30 Jahre wie folgt:

- BEMU: 206 Mio. €
- EMU: 233 Mio. €

Abb. 237 zeigt die Summenentwicklung über den Betrachtungszeitraum.

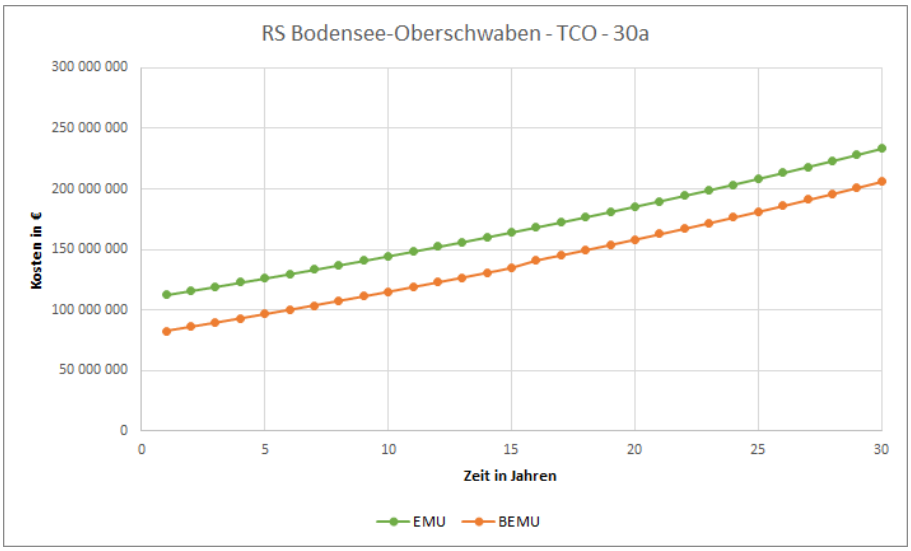


Abb. 237: Kosten EMU-BEMU (TCO 3, RS Bodensee-Oberschwaben, Standard)

10.3.2 Betrachtung „Spezial 1“

Die Betrachtung „Spezial 1“ umfasst die Ergänzung der klassischen TCO-Vorgehensweise für einen 30-Jahres-Zeitraum mit einer Restwertbetrachtung zur Elektrifizierung. Damit ergeben sich für die betrachteten Technologiealternativen Gesamtkosten wie folgt:

- BEMU: 206 Mio. €
- EMU: 211 Mio. € (+ 2 % gegenüber BEMU)

Abb. 238 zeigt die Kostensummen über den Betrachtungszeitraum für Kostengruppen.

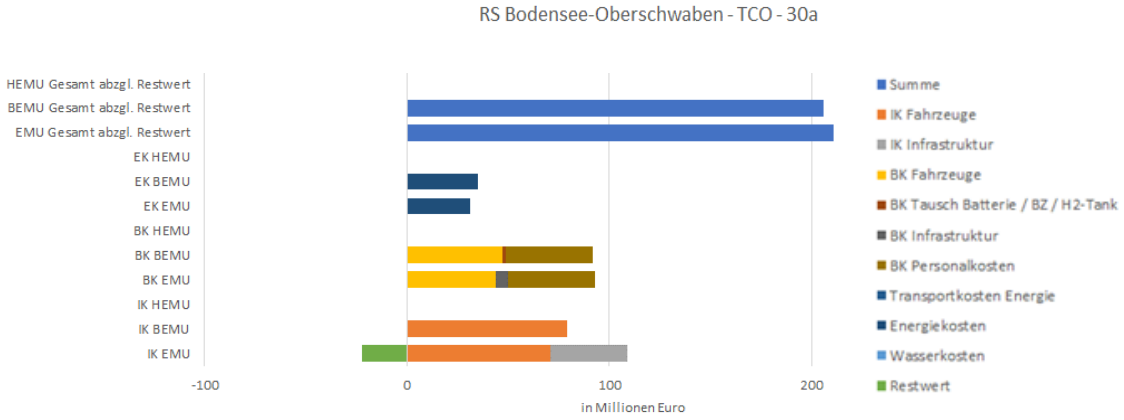


Abb. 238: Kosten EMU-BEMU (TCO 3, RS Bodensee-Oberschwaben, Spezial 1)

10.3.3 Betrachtung „Spezial 3“

Die Betrachtung „Spezial 3“ umfasst die Ergänzung der klassischen TCO-Vorgehensweise für einen 30-Jahres-Zeitraum mit einer Restwertbetrachtung zur Elektrifizierung unter Einbeziehung der Förderungsperspektiven. Damit ergeben sich für die Technologiealternativen Gesamtkosten wie folgt:

- BEMU: 206 Mio. €
- EMU: 197 Mio. €

Abb. 239 zeigt die Kostensummen über den Betrachtungszeitraum für Kostengruppen.

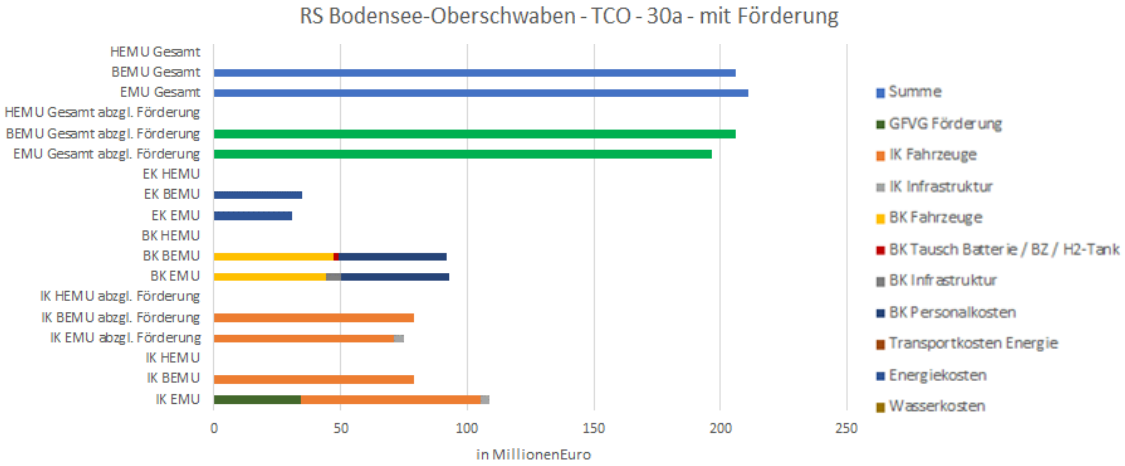


Abb. 239: Kosten EMU-BEMU (TCO 3, RS Bodensee-Oberschwaben, Spezial 3)

10.3.4 Empfehlung

Auf Basis der Wirtschaftlichkeitsberechnung und hier der Betrachtungen „Standard“ und „Spezial 1“ erfolgt die Empfehlung für die Umsetzung eines BEMU- bzw. EMU-Konzepts (Doppelempfehlung aufgrund nahezu identischer Kosten).

Förderungsaspekte (siehe „Spezial 3“) wurden dargestellt, gehen aber nicht in die Empfehlung ein.

Die Einbindung der wirtschaftlichen (Teil-)Empfehlung in eine Gesamtempfehlung wird nachstehend in Kapitel 11 diskutiert.

10.4 Teilnetz 4 „Westfrankenbahn“ (TCO 4)

Nachstehend sind die wesentlichen Eingangsparameter für die Wirtschaftlichkeitsbewertung kurz zusammengestellt:

- Fahrzeugbedarf RB: EMU: 11; BEMU: 11; HEMU: 11
- Fahrzeugbedarf RE: EMU: 11; BEMU: 11; HEMU: 15
- BEMU: Tausch der Traktionsbatterie alle 15 Jahre (LTO),
- HEMU: Tausch der Brennstoffzelle alle 8 Jahre, der Pufferbatterie alle 15 Jahre und des Wasserstofftanks alle 15 Jahre
- Infrastrukturkosten: erschwerte Bedingungen für die Elektrifizierung im Abschnitt Miltenberg – Lauda (24 km) angenommen: +50 % der Kosten
- Elektrifizierung unter laufendem Betrieb: Zuschlag der Kosten um 30 %

- Annahme GVFG Förderung der Infrastruktur: 90 % (Elektrifizierung, Ladestellen, Tankstellen)

10.4.1 Betrachtung „Standard“

Die Standardbetrachtung umfasst die klassische TCO-Vorgehensweise ohne Restwertbetrachtung zur Elektrifizierung.

Die Zusammenführung der festgelegten Kostenparameter (siehe Kapitel 8), der aus der Strecken- bzw. Teilnetz-Analyse resultierenden Eingangswerte zum Infrastruktur- und Fahrzeugbedarf (siehe 9.4.4) sowie der betriebsstatistischen Ergebnisse (siehe 9.4.3) ergeben für die Technologiealternativen Gesamtkosten über 30 Jahre wie folgt:

- HEMU: 847 Mio. €
- BEMU: 536 Mio. €
- EMU: 739 Mio. €

Abb. 240 zeigt die Summenentwicklung über den Betrachtungszeitraum.

Abb. 240: Kosten EMU-BEMU-HEMU (TCO 4, Westfrankenbahn, Standard)

10.4.2 Betrachtung „Spezial 1“

Die Betrachtung „Spezial 1“ umfasst die Ergänzung der klassischen TCO-Vorgehensweise für einen 30-Jahres-Zeitraum mit einer Restwertbetrachtung zur Elektrifizierung. Damit ergeben sich für die Technologiealternativen Gesamtkosten wie folgt:

- HEMU: 849 Mio. €
- BEMU: 506 Mio. €
- EMU: 588 Mio. € (+16 % gegenüber BEMU)

Abb. 241 zeigt die Kostensummen über den Betrachtungszeitraum für Kostengruppen.

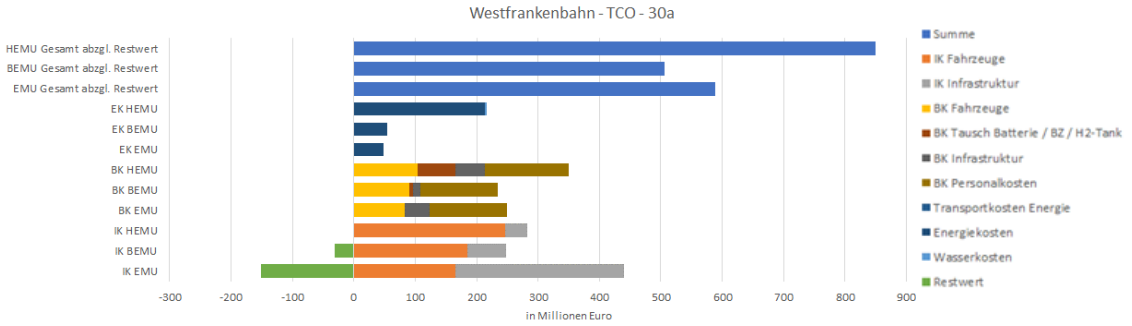


Abb. 241: Kosten EMU-BEMU-HEMU (TCO 4, Westfrankenbahn, Spezial 1)

10.4.3 Betrachtung „Spezial 3“

Die Betrachtung „Spezial 3“ umfasst die Ergänzung der klassischen TCO-Vorgehensweise für einen 30-Jahres-Zeitraum mit einer Restwertbetrachtung zur Elektrifizierung unter Einbeziehung der Förderungsperspektiven. Damit ergeben sich für die Technologiealternativen Gesamtkosten wie folgt:

- HEMU: 816 Mio. €
- BEMU: 477 Mio. €
- EMU: 477 Mio. €

Abb. 242 zeigt die Kostensummen über den Betrachtungszeitraum.

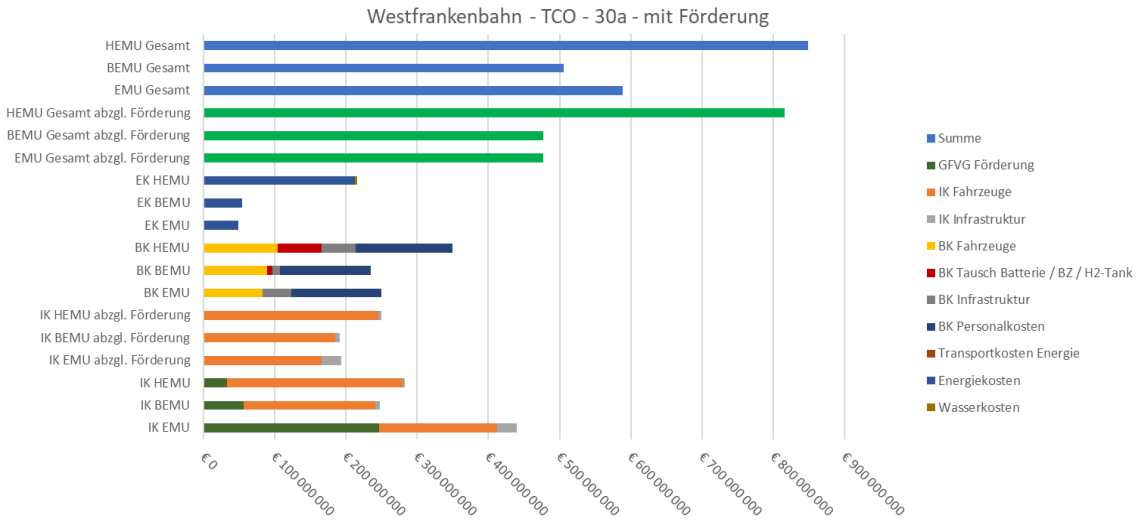


Abb. 242: Kosten EMU-BEMU-HEMU (TCO 4, Westfrankenbahn, Spezial 3)

10.4.4 Empfehlung

Auf Basis der Wirtschaftlichkeitsberechnung und hier der Betrachtungen „Standard“ und „Spezial 1“ erfolgt die Empfehlung für die Umsetzung eines BEMU-Konzepts.

Förderungsaspekte (siehe „Spezial 3“) wurden dargestellt, gehen aber nicht in die Empfehlung ein.

Die Einbindung der wirtschaftlichen (Teil-)Empfehlung in eine Gesamtempfehlung wird nachstehend in Kapitel 11 diskutiert.

10.5 Teilnetz 5 „Hohenlohebahn“ (TCO 5)

Nachstehend sind die wesentlichen Eingangsgrößen für die Wirtschaftlichkeitsbewertung kurz zusammengestellt:

- Fahrzeugbedarf RB: EMU: 5, BEMU: 5
- Fahrzeugbedarf RE: EMU: 5, BEMU: 5
- Infrastrukturkosten: erschwerte Bedingungen für Elektrifizierung im Abschnitt Wackershofen – Schwäbisch Hall/Hessental (12 km) angenommen: +50 % der Kosten
- Elektrifizierung unter laufendem Betrieb: Zuschlag der Kosten von 30 %
- BEMU: Tausch der Traktionsbatterie alle 15 Jahre (LTO);
- Annahme GVFG Förderung der Infrastruktur: 90 % (Elektrifizierung, Ladestellen)

10.5.1 Betrachtung „Standard“

Die Standardbetrachtung umfasst die klassische TCO-Vorgehensweise ohne Restwertbetrachtung zur Elektrifizierung.

Die Zusammenführung der festgelegten Kostenparameter (siehe Kapitel 8), der aus der Strecken- bzw. Teilnetz-Analyse resultierenden Eingangswerte zum Infrastruktur- und Fahrzeugbedarf (siehe 9.5.5) und der betriebsstatistischen Ergebnisse (siehe 9.5.4) ergeben für die Technologiealternativen Gesamtkosten über 30 Jahre wie folgt:

- BEMU: 200 Mio. €
- EMU: 235 Mio. €

Abb. 243 zeigt die Summenentwicklung über den Betrachtungszeitraum.

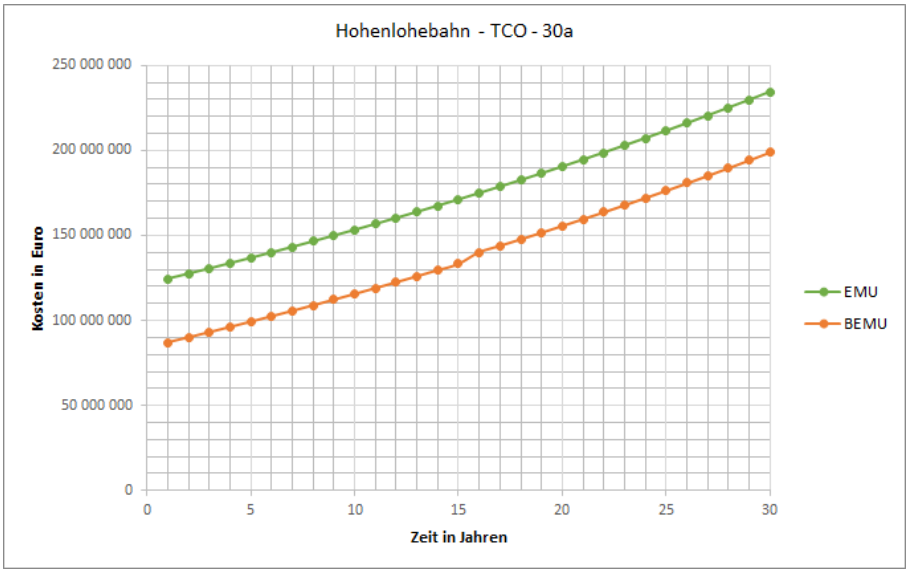


Abb. 243: Kosten EMU-BEMU (TCO 5, Hohenlohebahn, Standard)

10.5.2 Betrachtung „Spezial 1“

Die Betrachtung „Spezial 1“ umfasst die Ergänzung der klassischen TCO-Vorgehensweise für einen 30-Jahres-Zeitraum mit einer Restwertbetrachtung zur Elektrifizierung. Damit ergeben sich für die Technologiealternativen Gesamtkosten wie folgt:

- BEMU: 200 Mio. €
- EMU: 209 Mio. € (+ 4 % gegenüber BEMU)

Abb. 244 zeigt die Kostensummen über den Betrachtungszeitraum für Kostengruppen.

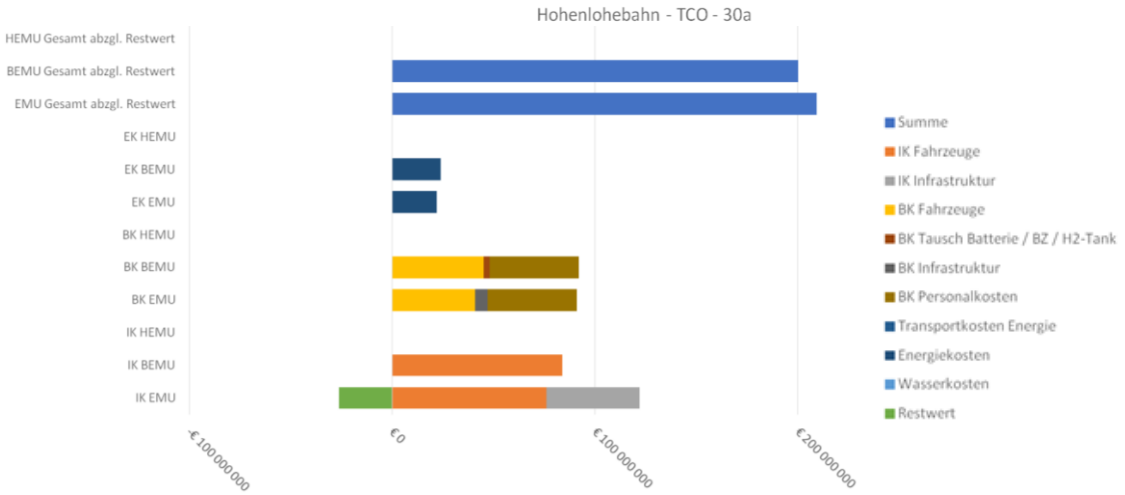


Abb. 244: Kosten EMU-BEMU (TCO 5, Hohenlohebahn, Spezial 1)

10.5.3 Betrachtung „Spezial 3“

Die Betrachtung „Spezial 3“ umfasst die Ergänzung der klassischen TCO-Vorgehensweise für einen 30-Jahres-Zeitraum mit einer Restwertbetrachtung zur Elektrifizierung unter Einbeziehung der Förderungsperspektiven. Damit ergeben sich für die Technologiealternativen Gesamtkosten wie folgt:

- BEMU: 200 Mio. €
- EMU: 191 Mio. €

Abb. 245 zeigt die Kostensummen über den Betrachtungszeitraum.

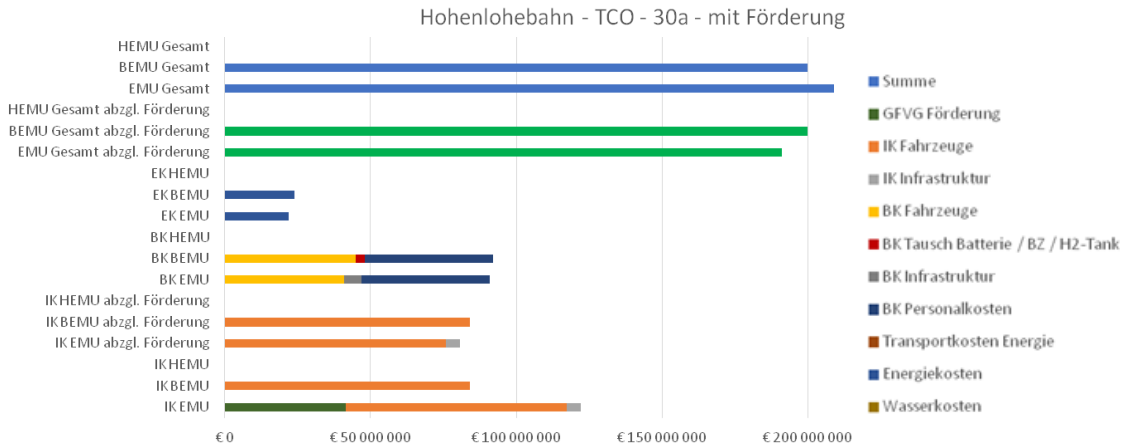


Abb. 245: Kosten EMU-BEMU (TCO 5, Hohenlohebahn, Spezial 3)

10.5.4 Betrachtung „Spezial 4“ („Langläufer“)

In einer weiteren Sensitivitätsbetrachtung wurde eine Detailbetrachtung für eine Verbindung Mannheim – Nürnberg über die Hohenlohebahn („Langläufer“) betrachtet. Diese Detailbetrachtung wurde nur für EMU und BEMU durchgeführt.

Hierfür wurden auf Basis des vorgeschlagenen Fahrplans für die durchgebundenen Züge folgende Daten zu Grunde gelegt:

- Zusätzlich 2,75 Mio. Zug-km pro Jahr für die Abschnitte Mannheim – Heilbronn und Hessental – Nürnberg außerhalb der Hohenlohebahn

Für den Vergleich in der Wirtschaftlichkeitsberechnung wurden vereinfacht die Differenzkosten aus den Berechnungen der Hohenlohebahn übernommen. Die Wirtschaftlichkeitsberechnung ergab eine Kostendifferenz zwischen EMU und BEMU über 30 Jahre von ca. 11 Mio. €. Die Differenz der Fahrzeuganschaffungskosten (BEMU für Gesamtstrecke!) wurde dabei vernachlässigt. Diese wirkt tendenziell aber zusätzlich.

Die Sensitivbetrachtung unterstützt Elektrifizierung (EMU) als Gesamtempfehlung.

10.5.5 Empfehlung

Auf Basis der Wirtschaftlichkeitsberechnung und hier der Betrachtungen „Standard“ und „Spezial 1“ erfolgt die Empfehlung für die Umsetzung eines BEMU- bzw. EMU-Konzepts (Doppelempfehlung aufgrund nahezu identischer Kosten).

Förderungsaspekte (siehe „Spezial 3“) wurden dargestellt, gehen aber nicht in die Empfehlung ein.

Die Einbindung der wirtschaftlichen (Teil-)Empfehlung in eine Gesamtempfehlung wird nachstehend in Kapitel 11 diskutiert.

10.6 Teilnetz 6 „Raum Stuttgart“ (TCO 6)

Nachstehend sind die wesentlichen Eingangsgrößen für die Wirtschaftlichkeitsbewertung kurz zusammengestellt:

- Fahrzeugbedarf RB: EMU: 13, BEMU: 13
- Infrastrukturkosten: keine erschwerten Bedingungen für Elektrifizierung
- Elektrifizierung unter laufendem Betrieb: Zuschlag der Kosten von 30 % für in Betrieb befindlichen Abschnitt bis Heimerdingen
- BEMU: Tausch der Traktionsbatterie alle 15 Jahre (LTO)
- Annahme GVFG Förderung der Infrastruktur: 90 % (Elektrifizierung, Ladestellen)

10.6.1 Betrachtung „Standard“

Die Standardbetrachtung umfasst die klassische TCO-Vorgehensweise ohne Restwertbetrachtung zur Elektrifizierung.

Die Zusammenführung der festgelegten Kostenparameter (siehe Kapitel 8), der aus der Strecken- bzw. Teilnetz-Analyse resultierenden Eingangswerte zum Infrastruktur- und Fahrzeugbedarf (siehe 9.6.5) und der betriebsstatistischen Ergebnisse (siehe 9.6.4) ergeben für die Technologiealternativen Gesamtkosten über 30 Jahre wie folgt:

- BEMU: 223 Mio. €
- EMU: 254 Mio. €

Abb. 246 zeigt die Summenentwicklung über den Betrachtungszeitraum.

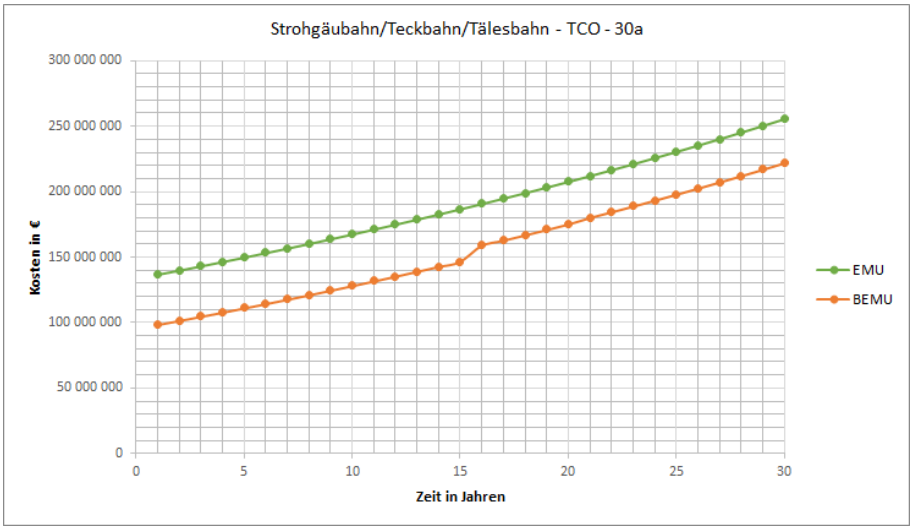


Abb. 246: Kosten EMU-BEMU (TCO 6 „Raum Stuttgart“, „Standard“)

10.6.2 Betrachtung „Spezial 1“

Die Betrachtung „Spezial 1“ umfasst die Ergänzung der klassischen TCO-Vorgehensweise für einen 30-Jahres-Zeitraum mit einer Restwertbetrachtung zur Elektrifizierung. Damit ergeben sich für die Technologiealternativen Gesamtkosten wie folgt:

- BEMU: 222 Mio. €
- EMU: 226 Mio. € (+ 2 % gegenüber BEMU)

Abb. 247 zeigt die Kostensummen über den Betrachtungszeitraum.

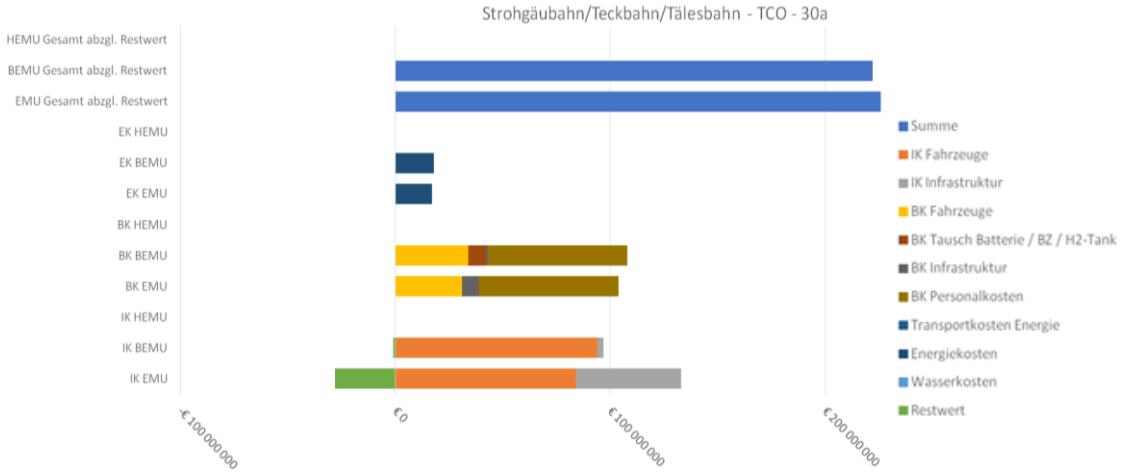


Abb. 247: Kosten EMU-BEMU (TCO 6, Raum Stuttgart, Spezial 1)

10.6.3 Betrachtung „Spezial 3“

Die Betrachtung „Spezial 3“ umfasst die Ergänzung der klassischen TCO-Vorgehensweise für einen 30-Jahres-Zeitraum mit einer Restwertbetrachtung zur Elektrifizierung unter Einbeziehung der Förderungsperspektiven. Damit ergeben sich für die Technologiealternativen Gesamtkosten wie folgt:

- BEMU: 220 Mio. €
- EMU: 207 Mio. €

Abb. 248 zeigt die Kostensummen über den Betrachtungszeitraum für Kostengruppen.

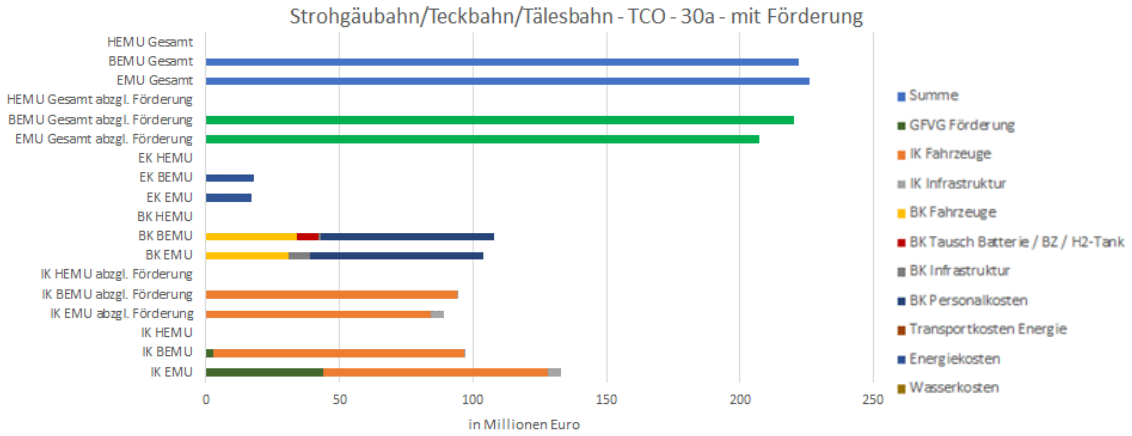


Abb. 248: Kosten EMU-BEMU (TCO 6, Raum Stuttgart, Spezial 3)

10.6.4 Empfehlung

Auf Basis der Wirtschaftlichkeitsberechnung und hier der Betrachtungen „Standard“ und „Spezial 1“ erfolgt die Empfehlung für die Umsetzung eines BEMU- bzw. EMU-Konzepts (Doppelempfehlung aufgrund nahezu identischer Kosten).

Förderungsaspekte (siehe „Spezial 3“) wurden dargestellt, gehen aber nicht in die Empfehlung ein.

Die Einbindung der wirtschaftlichen (Teil-)Empfehlung in eine Gesamtempfehlung wird nachstehend in Kapitel 11 diskutiert.

11 Erweiterung der TCO-Empfehlungen zu einer Gesamtempfehlung

Wie dargestellt, sieht die Vorgehensweise des Gutachters vor, die klassische, wirtschaftliche Betrachtung anhand weiterer, zum Teil qualitativer und strategischer Überlegungen zu ergänzen und zu einer Gesamtempfehlung weiterzuentwickeln.

Für die sechs Teilnetze erfolgt nachstehend eine Kurzzusammenfassung der qualitativen / strategischen Aspekte mit Verweis auf die jeweiligen Fachkapitel und eine Darstellung bzw. Begründung der Gesamtempfehlung.

Aufgrund des Ausscheidens eines HEMU-Betriebs aufgrund der wirtschaftlichen Betrachtung beschränken sich ergänzende Betrachtungen im Sinne einer Gesamtempfehlung auf EMU und BEMU.

Teilnetz 1 „Nagoldtalbahn“:

Das Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsberechnung (TCO) ist eine deutliche Empfehlung für BEMU (siehe 10.1.7).

Infrastrukturbedarf im Technologievergleich EMU vs. BEMU (siehe 9.1.5):

- Geringer BEMU-Infrastrukturbedarf.
- Hoher EMU-Infrastrukturbedarf (insbesondere Tunnelsanierungen), damit hohe Elektrifizierungskomplexität.

Lückenschluss- bzw. Netzfunktion:

- Ein Lückenschluss im elektrifizierten Netz ist bei einer Vollelektrifizierung zwar gegeben, die Netzfunktion (z.B. für Umleitungsfahrten) aufgrund der weitgehenden Eingleisigkeit und eines dichten SPNV-Taktes aber sehr eingeschränkt (siehe 9.1.6.1).

Güterverkehrsbedeutung:

- Die Güterverkehrsbedeutung ist als gering einzuschätzen (siehe 9.1.6.2).

Sonstige Aspekte:

- Zeitschiene für Vollelektrifizierung kritisch (starke Abhängigkeit von Tunnelanpassungen).
- Sturmschaden-Problematik für diese Strecke als erhöht einzuschätzen.
- Potenzielle Synergien mit dem BEMU-Betrieb auf der Hermann-Hesse-Bahn (Berührungspunkt Calw) sowie dem Ortenaunetz (BEMU), ggf. auch im Hinblick auf Fahrzeugunterhaltung.

Gesamtempfehlung: BEMU

Teilnetz 2 „Donautalbahn Plus“

Das Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsberechnung (TCO) ist eine Empfehlung für BEMU (siehe 10.2.4). Hierbei ist festzustellen, dass die stark diversifizierten Betriebskonzepte mit mehreren Endpunkten für ein BEMU-Konzept (im Vergleich zu anderen Strecken / Teilnetzen) erhöhten Elektrifizierungsaufwand erfordern, der den Kostenvorteil gegenüber einer Gesamtelektrifizierung (EMU) insbesondere bei einer Restwertbetrachtung reduziert bzw. relativiert.

Infrastrukturbedarf im Technologievergleich EMU vs. BEMU (siehe 9.2.4):

- Hoher EMU-Infrastrukturbedarf (Streckenlänge!), erhöhte Elektrifizierungskomplexität nur auf Teilstrecken.
- BEMU-Infrastrukturbedarf aufgrund betrieblicher Anforderungen vergleichsweise hoch; Maßnahmen eröffnen aber Synergien für mehrere Strecken.

Lückenschluss- bzw. Netzfunktion:

- keine echte Lückenschlussfunktion bzw. nur auf Teilstrecken bzw. im Zusammenhang mit weiteren Elektrifizierungen in angrenzenden Teilnetzen bzw. auf angrenzenden Strecken (siehe 9.2.5.1).

Güterverkehrsbedeutung:

- Eine erhöhte Güterverkehrsbedeutung besteht nur eingeschränkt im Hinblick auf Anschlussverkehre, die ggf. auch durch geeignete Hybridlokomotiven abgedeckt werden könnte (siehe 9.2.5.2).

Sonstige Aspekte:

- Zeitschiene für Vollelektrifizierung kritisch (Gesamtumfang).

Gesamtempfehlung: BEMU

Teilnetz 3 „RS Bodensee-Oberschwaben“

Das Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsberechnung (TCO) ist eine Empfehlung für BEMU/EMU (siehe 10.3.4). Die „Doppelempfehlung“ BEMU/EMU begründet sich in sehr geringen Kostenunterschieden zwischen EMU und BEMU.

Infrastrukturbedarf im Technologievergleich EMU vs. BEMU (siehe 9.3.5):

- Kein BEMU-Infrastrukturbedarf.
- Überschaubarer EMU-Infrastrukturbedarf (kurze Streckenlänge), geringe Elektrifizierungskomplexität.

Lückenschluss- bzw. Netzfunktion:

- Hohe Lückenschluss- und Netzfunktion (siehe 9.3.6.1).

Güterverkehrsbedeutung:

- Eine Güterverkehrsbedeutung besteht sowohl lokal als auch regional. Weitere Zunahmen des Güterverkehrs erscheinen aufgrund der Netzfunktion denkbar und sollten bei Infrastrukturmaßnahmen im Rahmen des Regio-S-Bahn-Konzeptes strategisch berücksichtigt werden (siehe 9.3.6.2).

Sonstige Aspekte:

- BEMU-Betrieb zwar grundsätzlich ohne zusätzliche Elektrifizierungsmaßnahmen machbar, für das RS-Betriebskonzept sind aber Infrastrukturmaßnahmen erforderlich, woraus sich ein Zeitfaktor ergibt (d.h. ein BEMU-Betrieb unter Zugrundelegung des betrachteten Betriebskonzeptes wäre kurzfristig nicht möglich!).
- RE-ähnliche Konzepte („Langläufer“) mit BEMU-Fahrzeugen bedingen betriebliche Mehrkosten aufgrund langer EMU-tauglicher Abschnitte.

Gesamtempfehlung: EMU

Teilnetz 4 „Westfrankenbahn“:

Das Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsberechnung (TCO) ist eine deutliche Empfehlung für BEMU (siehe 10.4.4).

Infrastrukturbedarf im Technologievergleich EMU vs. BEMU (siehe 9.4.4):

- Gesamtnetz mit hohem Elektrifizierungsaufwand (Streckenlänge).
- Erhöhte Tunnel- / Bauwerksdichte auf Teilstrecken, erhöhte Komplexität bei Gesamt-Elektrifizierung.
- Insgesamt überschaubarer BEMU-Infrastrukturbedarf; Miltenberg mit Synergien im Zusammenhang mit Elektrifizierung Aschaffenburg-Miltenberg (Projekt des Freistaates Bayern).
- Erweiterte Oberleitungsinsel Tauberbischofsheim-Bad Mergentheim für BEMU-Betrieb erlaubt EMU-Betrieb auf Teilstrecke (Synergie!).

Lückenschluss- bzw. Netzfunktion:

- Keine echte Lückenschlussfunktion bzw. nur auf Teilstrecken (siehe 9.4.5.1).

Güterverkehrsbedeutung:

- Nur geringe Güterverkehrsbedeutung (siehe 9.4.5.2).

Sonstige Aspekte:

- Zeitschiene für Vollelektrifizierung kritisch (Gesamtumfang).

Gesamtempfehlung: BEMU (EMU auf Teilstrecke)

Teilnetz 5 „Hohenlohebahn“

Das Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsberechnung (TCO) ist eine Empfehlung für BEMU/EMU (siehe 10.5.5). Die „Doppelempfehlung“ BEMU/EMU begründet sich in sehr geringen Kostenunterschieden zwischen EMU und BEMU.

Infrastrukturbedarf im Technologievergleich EMU vs. BEMU:

- Kein BEMU-Infrastrukturbedarf.
- Überschaubarer EMU-Infrastrukturbedarf (kurze Streckenlänge), höhere Elektrifizierungskomplexität nur auf Teilstrecke.

Lückenschluss- bzw. Netzfunktion:

- Hohe Lückenschlussfunktion, durchgängig zweigleisige Strecke (siehe 9.1.6.1).

Güterverkehrsbedeutung:

- Eingeschränkte lokale Bedeutung, größere Bedeutung für Umleitungsverkehre (siehe 9.5.6.2).

Sonstige Aspekte:

- RE-ähnliche Konzepte („Langläufer“) mit BEMU-Fahrzeugen bedingen betriebliche Mehrkosten aufgrund langer EMU-tauglicher Abschnitte.
- Stadtbahnverlängerung gemäß Machbarkeitsstudie Hohenlohe (TTK GmbH, 2022) liefert zusätzliche Elektrifizierungsargumentation.

Gesamtempfehlung: EMU

Teilnetz 6 „Raum Stuttgart“

Das Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsberechnung (TCO) ist eine Empfehlung für BEMU/EMU (siehe 10.6.4). Die „Doppelempfehlung“ BEMU/EMU begründet sich in sehr geringen Kostenunterschieden zwischen EMU und BEMU.

Infrastrukturbedarf im Technologievergleich EMU vs. BEMU (siehe 9.6.5):

- Geringer BEMU-Infrastrukturbedarf (nur auf einer Strecke).

Lückenschluss- bzw. Netzfunktion:

- Es handelt sich um reine Stichstrecken, eine Netzfunktion im überregionalen Sinne ist nicht gegeben (siehe 9.6.6.1).

Güterverkehrsbedeutung:

- Sehr gering / nicht gegeben (siehe 9.6.6.2).

Sonstige Aspekte:

- Eher kurze Einzelstrecken mit größerer Instandhaltungsproblematik für Fahrzeuge mit alternativen Antrieben (siehe 9.7.6).
- Eignung marktgängiger BEMU-Fahrzeuge für derartige Nebenstrecken zu hinterfragen (siehe 9.7.6), TramTrain-Fahrzeuge als Alternative denkbar.
- Teckbahn / Tälesbahn mit räumlicher Nähe zu RSB Neckar-Alb, für Teckbahn ggf. auch Zusammenhang mit Reaktivierungskorridor Schwäbisch Gmünd-Göppingen-Kirchheim gegeben (falls dort Stadtbahnlösung präferiert).
- Für die Strohgäubahn ggf. Synergien mit der Reaktivierung Markgröningen (Schwieberdingen).

Gesamtempfehlung: EMU

Bei der Entwicklung einer Gesamtempfehlung ist strategisch auch folgende Überlegung einzubeziehen. Die gerade aktualisierte Standardisierte Bewertung lässt aufgrund der jetzt deutlich stärkeren Positivbewertung von klimarelevanten Maßnahmen (Verbesserungen) grundsätzlich erwarten, dass eine Förderung von Elektrifizierungsmaßnahmen nach dem GVFG künftig erleichtert wird. Die Realisierung einer BEMU-Lösung als Zwischenschritt und die GVFG-Förderung der damit verbundenen, ggf. eher geringen Infrastrukturmaßnahmen, kann im Einzelfall bedeuten, dass der „Klimanutzen“ bereits „verwendet“ wurde und bei späteren Überlegungen zu einer Vollelektrifizierung dann nicht mehr angesetzt werden kann (im Ohnefall dann bereits enthalten!).

Diese Überlegung kann als zusätzliches Argument gelten, sofort den „großen“ Schritt in Richtung Vollelektrifizierung zu gehen (siehe Teilnetze 3, 5 und 6).

12 Zusammenfassung / Gesamtempfehlung

Hoher Elektrifizierungsgrad – eine wesentliche Rahmenbedingung

Das Elektrifizierungskonzept für Baden-Württemberg aus dem Jahr 2018 bildete zunächst einen Rahmen für die mit der SteFanS-Studie durchgeführte Untersuchung zum Einsatz alternativer Antriebstechnologien. Gemäß diesen Planungen soll der mit heute 71 % bereits hohe Elektrifizierungsgrad in den kommenden Jahren weiter steigen.

Die damit verbundene hohe Affinität zum elektrischen Betrieb war u.a. ursächlich dafür, die klassische Elektrifizierung in der Untersuchung gleichberechtigt neben den alternativen Antrieben zu betrachten. Die erarbeiteten Ergebnisse erlauben damit auch eine Aktualisierung des Elektrifizierungskonzeptes. Die Untersuchungskonzeption erlaubt damit auch, anders als bei dem noch vor einigen Jahren beschrittenen Weg über technologieoffene Fahrzeugausschreibungen, die Technologiewahl vorab auf Seiten des Aufgabenträgers zu treffen. Zu betonen ist hierbei, dass es kein Ziel war, eine gemeinsame, identische Grundsatzentscheidung für alle Strecken bzw. Teilnetze zu treffen.

Strecke - Linie - Teilnetz

Betrachtet wurden 16 nicht elektrifizierte und heute noch mit Dieselfahrzeugen betriebene Strecken bzw. Streckenabschnitte mit über 500 km Gesamtlänge. Die Studie umfasst damit eigentlich eine Reihe von Einzelstudien.

Hier ist zusätzlich zu beachten, dass zahlreiche SPNV-Linienwege, sei es im Bestand bzw. Plan, zum Teil deutlich über die nicht elektrifizierten Strecken hinausgehen. Dieser Sachverhalt war u. a. bei der grundsätzlichen Beurteilung der Sinnhaftigkeit der einzelnen Technologien relevant. So erlaubt das Befahren elektrifizierter Streckenabschnitte im BEMU-Betrieb die Batterieladung, beim HEMU-Betrieb aber nicht, da für den deutschen Markt hier angebotene Fahrzeuge keine Stromabnehmer aufweisen.

Die 16 Einzelstrecken wurden zu sechs Teilnetzen zusammengefasst, um betrieblichen Zusammenhängen und gemeinsam genutzten Infrastrukturen gerecht zu werden, insbesondere aber auch um die Problematik separater/unterschiedlicher Technologieempfehlungen für zusammenhängende Strecken oder überlappende Betriebskonzepte zu vermeiden.

Bearbeitung

Die Bearbeitung der Studie erfolgte in einem Zeitraum von 12 Monaten nach der Auftragsvergabe im Sommer 2021. Ein internationales Quellenstudium und ein intensiver Austausch mit einer Vielzahl von Unternehmen und Organisationen im Themenfeld „Alternative Antriebe“ erlaubten, ein umfassendes Bild zum Stand der Technik, zur Marktsituation und zu absehbaren Entwicklungstrends (technologisch/kostenmäßig) für die betrachteten Technologien zu gewinnen.

Ergebnisse

Betrachtungen und Empfehlungen erfolgten nach Feststellung der betrieblichen / technischen Machbarkeit zunächst aus rein wirtschaftlicher Sicht. In einem zweiten Schritt wurden ergänzende qualitative und strategische Aspekte für eine Gesamtempfehlung herangezogen (siehe Kapitel 11 bzw. nachstehende Zusammenfassung in Abb. 249).

Teilnetz		Empfehlung TCO	Ergänzende Aspekte	Gesamt-empfehlung
1	Nagoldtalbahn	BEMU	Hohe Elektrifizierungskomplexität, eher geringe Lückenschlussfunktion (u.a. wegen Eingleisigkeit), geringe Güterverkehrsbedeutung, potenzielle Synergien mit BEMU-Betrieb Hermann-Hesse-Bahn/Ortenaunetz.	**BEMU**
2	Donautalbahn Plus	BEMU	Netzgröße bedingt großen Aufwand für Gesamtelektrifizierung, eingeschränkte Lückenschlussqualität. Stark diversifizierte Betriebskonzepte bedingen erhöhten Elektrifizierungsaufwand im BEMU-Konzept, dadurch Kostenvorteil insbesondere bei Restwertbetrachtung reduziert/relativiert.	**BEMU**
3	RS Bodensee-Oberschwaben	BEMU (EMU)	Geringe Kostenunterschiede in TCO-Betrachtung. Kein zusätzlicher Infrastrukturbedarf für BEMU-Betrieb, EMU-Infrastrukturbedarf überschaubar. Im Verbund mit realisierten Elektrifizierungsmaßnahmen Ulm-Friedrichshafen und München-Lindau hohe Lückenschluss- bzw. Netzfunktion zu, auch im Güter(fern)verkehr.	**EMU**
4	Westfrankenbahn	BEMU	Netzgröße bedingt großen Aufwand für Gesamtelektrifizierung, auf Teilstrecken erhöhte Komplexität, geringe Lückenschlussqualität. BEMU-Infrastrukturbedarf überschaubar; Synergien in Miltenberg mit mögl. Elektrifizierung Aschaffenburg-Miltenberg. Für BEMU-Betrieb zu erweiternde Oberleitungsinsel Tauberbischofsheim-Bad Mergentheim erlaubt EMU-Einsatz auf Teilstrecke.	**BEMU (EMU für Teilstrecke)**
5	Hohenlohebahn	BEMU (EMU)	Geringe Kostenunterschiede in TCO-Betrachtung. Kein zusätzlicher Infrastrukturbedarf für BEMU-Betrieb, EMU-Infrastrukturbedarf überschaubar. Erhöhte Elektrifizierungskomplexität auf Teilstrecke, gleichzeitig hohe Lückenschlussfunktion bei durchgängiger Zweigleisigkeit. Lange EMU-taugliche Abschnitte resultieren in betriebl. Mehrkosten für BEMU-Langläufer. Stadtbahnverlängerung profitiert von Elektrifizierung.	**EMU**
6	Raum Stuttgart	BEMU (EMU)	Geringe Kostenunterschiede in TCO-Betrachtung. Geringer BEMU-Infrastrukturbedarf, aufgrund Stichstreckencharakteristika keine Netzfunktion, Güterverkehrsbedeutung sehr gering. Erhöhte Instandhaltungs-/Reserve-Problematik für BEMU-Fahrzeuge wg. kurzer, räumlich separierter Einzelstrecken. Marktgängige BEMU-Fahrzeuge ggf. „zu groß“, TramTrain-Fahrzeuge als Alternative denkbar (Nähe zur RSB Neckar-Alb).	**EMU**

Abb. 249: Entwicklung der TCO-Empfehlung zu einer Gesamtempfehlung

Die gutachterliche Empfehlung beinhaltet damit für jeweils drei Teilnetze eine EMU- bzw. BEMU-Empfehlung.

Vergleichbare Ergebnisse für SPNV-bezogene Technologievergleiche finden sich in mehreren aktuellen Studien in Deutschland. Auch anhand der Fahrzeugbestellungen in einer ganzen Reihe von Bundesländern ist eine deutliche „BEMU-Tendenz“ zu erkennen (siehe Kapitel 5.5). In jüngster Zeit haben auch zwei öffentliche Ausschreibungen für Verkehrsleistungen, die den Einsatz von Brennstoffzellenfahrzeugen zugrunde legten (Schwarzatal/Thüringen, Mühldorfer Stern/Bayern), kein positives Ergebnis gefunden. Dies erlaubt die Schlussfolgerung, dass der wirtschaftliche Aspekt derzeit dominiert und damit den Ausbau weiterer Wasserstoffprojekte deutlich behindert.

Diese Empfehlung zur künftigen Ausrichtung des SPNV in Baden-Württemberg, die aktuell keinen Einstieg in einen Betrieb mit Brennstoffzellen-Fahrzeugen vorsieht, sollte keinesfalls als technologiefeindlich (in Bezug auf Wasserstoff) interpretiert werden. Die grundsätzliche Marktreife von Brennstoffzellenfahrzeugen kann als gegeben angenommen werden. Fahrzeuge wurden und werden umfangreich getestet und erste Serienfahrzeuge nehmen aktuell den Betrieb auf (siehe ergänzende Wasserstoffdiskussion nachstehend).

Die Umsetzung der Empfehlungen erfordert insgesamt die zusätzliche Elektrifizierung von 195 km Strecke. Hierbei benötigt das EMU-Konzept 104 km und das BEMU-Konzept 91 km (von 399 km, d. h. ca. 25 %). Mit der Schaffung dieser Infrastrukturvoraussetzungen können dann SPNV-Linien von insgesamt 565 km BEMU und 277 km EMU, d. h. in der Summe 842 km, betrieben werden (siehe Abb. 250).

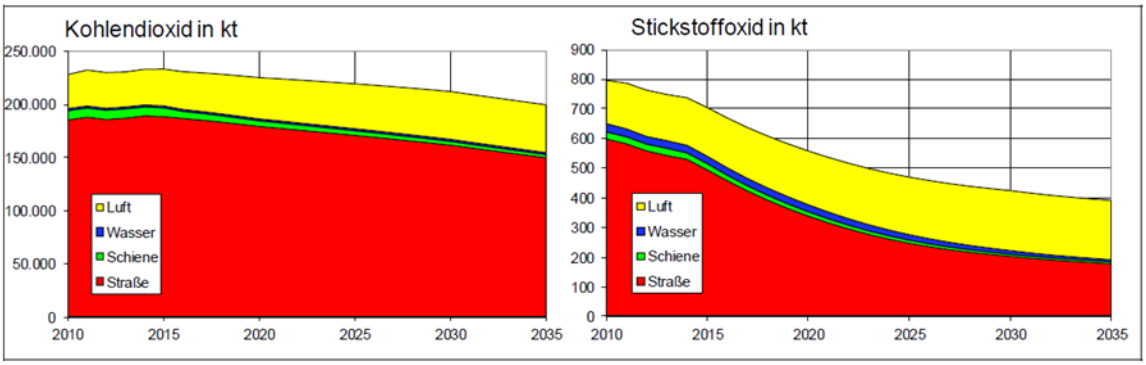
Teilnetz	Name Teilnetz / SPNV-Linien im Teilnetz		Gesamt-empfehlung	Linienlänge [km] (BEMU)	Linienlänge [km] (EMU)	Streckenlänge [km] (nicht elektrifiziert)	Streckenlänge [km] (zu elektrifizieren)	Anmerkung
1	Nagoldtalbahn	Pforzheim-Horb (+Kurzläufer Pforzheim-Nagold*)	BEMU	112	0	56	1	*Kurzläufer Pforzheim-Nagold in Linienlängen enthalten
2	Donautalbahn Plus	Ulm-Tuttlingen (+Kurzläufer auf Teilstrecken*)	BEMU	239	0	146	50	*Kurzläufer auf Teilstrecken in Linienlängen enthalten
		Aulendorf-Sigmaringen		44	0		0*	*in Ulm-Tuttlingen enthalten
3	RS Bodensee-Oberschwaben	Friedrichshafen-Leutkirch*	EMU	0	82	30	30	*Strecke nur Aulendorf-Kisslegg
		Aulendorf-Wangen*		0	43		0**	*Strecke nur Aulendorf-Kisslegg **in Friedrichshafen-Leutkirch enthalten
4	Westfrankenbahn	Miltenberg-Crailsheim (+Kurzläufer Tauberbischofsheim-Bad Mergentheim*)	BEMU (EMU für Teilstrecke)	131	17	167	40	*Kurzläufer Tauberbischofsheim-Bad Mergentheim in Linienlängen enthalten
		Miltenberg-Seckach		39	0		0*	*Lademöglichkeit Miltenberg in Miltenberg-Crailsheim enthalten
5	Hohenlohebahn	Heilbronn-Schwäbisch Hall (+Kurzläufer Öhringen-Schwäbisch Hall*)	EMU	0	93	32	32	*Kurzläufer Öhringen-Schwäbisch Hall in Linienlängen enthalten
6	Raum Stuttgart	Korntal-Weissach	EMU	0	22	42	22	
		Kirchheim/Teck-Oberlenningen		0	11		11	
		Nürtingen-Neuffen		0	9		9	
		Summen über alle Teilnetze		565	277	473	195	

Abb. 250: Zusammenfassung profitierender SPNV-Linienlängen und des Elektrifizierungsbedarfs

Wasserstoff – warum nicht?

Wasserstoff als Energieträger bzw. der Einsatz von Brennstoffzellen-Fahrzeugen stellen für die gewünschte Dekarbonisierung des SPNV eine von drei Technologiealternativen dar – man konkurriert mit Batteriefahrzeugen und der klassischen Elektrifizierung. Andere zur Dekarbonisierung gezwungene Bereiche, so z.B. die Industrie, haben diese Alternativen nicht. Die vielzitierte „Wasserstoffleiter“ von Liebreich Associates (siehe: https://solarlago.de/die-h2-leiter-zeigt-wo-wasserstoff-sinn-macht/) definiert sieben Kategorien (A-G) für Einsatzgebiete grünen Wasserstoffs, von alternativlos („unavoidable“) bis unwirtschaftlich („uncompetitive“). Während der Schienen-Fernverkehr in Kategorie C eingereiht wird, taucht der regionale SPNV erst in Kategorie F auf. In den Kategorien A und B finden sich wichtige Industriezweige wie Düngemittel, Chemie- und Stahlindustrie sowie Schifffahrt.

Ein Blick in einige der zahlreichen „Wasserstoff-Roadmaps“ bestätigt, dass der Schienenverkehr darin keinesfalls beherrschendes Thema ist. Unterschieden werden z.B. für Baden-Württemberg (Fraunhofer-Institute (IAO, ISE, ISI), 2020) drei Bereiche für den Einsatz von Wasserstoff: Industrie, Verkehr und Mobilität sowie Gebäude. Innerhalb des Bereiches Verkehr und Mobilität dominiert der Straßenverkehr (PKW, LKW) sehr deutlich. Dieser ist auch für erheblich höhere Treibhausgasemissionen verantwortlich (siehe Abb. 251). Eine explizite Betrachtung zum Schienenverkehr findet sich nicht, nur auf Seite 20 ist er überhaupt erwähnt.



Anmerkung: Berechnungen mit TREMOD; Energieverbrauch INLAND inkl. Energiebereitstellungskette

Quelle: Umweltbundesamt

Abb. 251: CO2 und NOx-Emissionen des Verkehrs in Deutschland 2010-2035

Diese Schwerpunktsetzung bestätigt sich u.a. auch in einer Umfrage, die im Rahmen einer Untersuchung zu Potenzialen der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie in Baden-Württemberg (Roland Berger, 2020) durchgeführt wurde:

Quelle: Roland Berger, 2020

Abb. 252: Erwartete Marktentwicklung im Wasserstoff- bzw. Brennstoffzellensegment

Die auf der genannten Potenzialstudie aufbauende Wasserstoff-Roadmap Baden-Württemberg formuliert als wesentlichen Ansatz, „die Wirtschaft im Land insbesondere mit den Branchen Mobilität sowie Maschinen- und Anlagenbau im Transformationsprozess weg von der Nutzung fossiler Energien hin zu klimaneutralen Technologien zu unterstützen." Im Weiteren werden insgesamt 29 Maßnahmen formuliert, von denen die Maßnahmen 25-27 dem Sektor Mobilität zugeordnet sind:

- Maßnahme 25: Ausbau des Tankstellennetzes
- Maßnahme 26: Wasserstoffbasierter ÖPNV (Brennstoffzellenbusse)

- Maßnahme 27: Industrialisierung der Produktion Brennstoffzellen-Nutzfahrzeugen und Bussen (Stärkung der heimischen Automobil- und Zulieferindustrie)

Unabhängig von dieser Maßnahmenformulierung bestehen, wie dargestellt, keine Zweifel an der grundsätzlichen Marktreife der Wasserstofftechnologie für den SPNV-Betrieb.

Unbestreitbar ist aber auch, dass Wasserstoff unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten aktuell keine attraktive Alternative darstellt. Dies umso weniger, wenn die Verwendung von „grünem" Wasserstoff gefordert wird. Die Rahmenbedingungen können sich mittelfristig positiver darstellen, wenn die generelle Marktumsetzung weiter fortschreitet und ein SPNV-Projekt im Zusammenspiel mit anderen Projektinitiativen deutliche Unterstützung erfährt, d.h. in gewissem Sinne „mitfahren" kann, nicht aber die Bürde der Etablierung einer Wasserstoffproduktion oder des Wasserstofftransportes zunächst weitgehend allein tragen muss. Derartige Voraussetzungen, d.h. der Aufbau einer regionalen Wasserstoffwirtschaft („Sektorkopplung"), die ein SPNV-Projekt einbindet, finden sich z.B. im Projekt der Heidekrautbahn in Berlin/Brandenburg (siehe 4.1.6). Die Projektentscheidungen in Niedersachsen (siehe 4.1.1) bzw. Hessen (siehe 4.1.2), der beiden anderen deutschen Projekte dieser Art, liegen bereits einige Jahre zurück und waren durch ihren Pilotcharakter bzw. Synergien mit der einheimischen Industrie geprägt.

In einer Veröffentlichung zum hessischen Wasserstoffprojekt des RMV (Quelle: Bus und Bahn) formulierte Staatssekretär Deutschendorf: „*Aber das Land, ebenfalls ein RMV-Gesellschafter, greift bei seinem Engagement für das H2-Taunusnetz weit über die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des Verkehrsvertrages hinaus: Hessen denkt Chemie und Mobilität zusammen. Infraserv Höchst ist der größte Chemiestandort in Hessen und liegt in unmittelbarer Nähe des Flughafens.*"

Die niedersächsischen oder hessischen Überlegungen erscheinen auf den ersten Blick nicht so unterschiedlich zu den formulierten Bestrebungen in Baden-Württemberg, nur dass hier eben die Förderung der Automobilindustrie absolut im Vordergrund steht. Wesentliche Synergieeffekte oder gewichtige strategische Überlegungen, die es erlauben würden, die direkten, wirtschaftlichen Bewertungsergebnisse für SPNV-Projekte im Hinblick auf die Wasserstofftechnologie zu ergänzen und damit ggf. zu anderen Empfehlungen zu gelangen, sieht der Gutachter in Baden-Württemberg aktuell nicht.

Da Finanzmittel für den SPNV-Betrieb, den weiteren Ausbau des SPNV und weitere Angebotsverbesserungen limitiert sind, muss immer geprüft werden, ob Mehrausgaben in einem Teilbereich des Netzes aufgrund einer aktuell „teuren" Technologiewahl verantwortbar sind bzw. ob diese Mittel nicht aus der Gesamtsicht besser anders eingesetzt werden sollten.

Der Spielraum für Einzelentscheidungen, z.B. im Zusammenhang mit Reaktivierungsstrecken, die ggf. in ihrem regionalen Umfeld günstigere Rahmenbedingungen vorweisen können, soll damit aber keinesfalls eingeschränkt werden.

Güterverkehr – ein ergänzendes Thema

Die Betrachtung von Güterverkehrsaspekten stand im Rahmen der SteFans-Studie nicht im Vordergrund, wurde aber ergänzend berücksichtigt. Das bedeutet, dass der Güterverkehr eine Technologieentscheidung auf einzelnen Strecken nicht dominierte, dass aber eine im Hinblick auf den Personenverkehr getroffene Entscheidung hinsicht-

lich ihrer Auswirkungen auf den Güterverkehr beurteilt wurde und dieser ggf. als Zusatzaspekt die finale Abwägung beeinflusst hat. Dies war z.B. bei den Gesamtempfehlungen für oder gegen eine klassische Elektrifizierung der Fall.

Die Fahrzeugindustrie bietet im Lokomotivbereich bereits heute eine Reihe interessanter Lösungen an („Hybridlokomotiven"), die es erlauben, auch im Güterverkehr eine Dekarbonisierung stärker ins Blickfeld zu nehmen. Da im Güterverkehr keine „Bestellerfunktion" des Landes gegeben ist, über die eine Technologiewahl direkt beeinflusst werden kann, kommt es hier stärker darauf an, entsprechende Initiativen zu fördern und ggf. finanziell zu unterstützen. Das Land Baden-Württemberg hat seine Innovationsfreundlichkeit im Bereich alternativer Antriebe im Personenverkehr durch die mehrfache Unterstützung von Testbetrieben sehr deutlich unterstrichen. Die Gutachter regen an, dies auf den Güterverkehr auszuweiten.

Streckenreaktivierung ja, aber mit welchen Fahrzeugen?

Der in der Vergangenheit regelmäßig beschrittene Weg einer Streckenreaktivierung „mit einfachen Mitteln", d.h. eines Betriebs mit Dieselfahrzeugen, um eine Elektrifizierung zu vermeiden, steht heute so nicht mehr offen. Die Überlegungen, die die SteFanS-Studie für derzeit befahrene Dieselstrecken angestellt hat, sind sinngemäß für Reaktivierungsstrecken anzustellen. Diese neue Aufgabenstellung im Rahmen von Reaktivierungsprojekten wird aktuell bereits in einigen Projekten angegangen.

Die Empfehlungen für das aktuelle SPNV-Netz beeinflussen dort, wo direkte Berührungspunkte mit Reaktivierungsstrecken bestehen, ggf. die Technologiewahl auf denselben. In Einzelfällen kann aber auch die Technologieempfehlung, die sich für eine Reaktivierungsstrecke ergibt, auch Auswirkungen auf aktuell betriebene Strecken haben (siehe 9.7.3). Wichtig ist hier auch die Betonung, dass die Rahmenbedingungen für einzelne Strecken ggf. auch eine Entscheidung „pro-HEMU" zulassen können, wenn dort der Aufbau einer lokalen/regionalen Wasserstoffwirtschaft für den SPNV günstigere Bedingungen schafft (siehe 9.7.5).

Gutachten in Zeiten der Krise

Die aktuellen Krisen (Corona-Pandemie, Ukraine-Krieg …) beeinflussen auch den SPNV-Markt in mehrfacher Weise. Erkennbar sind Störungen von Lieferketten, Preissteigerungen für Rohstoffe und Energie und deutliche Veränderungen im Energiemarkt. Letzterer wird in den kommenden Jahren absehbar auch die Technologiewahl im SPNV zusätzlich beeinflussen, insbesondere auch was die zielgerichtete Verwendung verfügbaren Wasserstoffs angeht. Der SPNV verfügt hier über den Vorteil, nicht von Wasserstoff abhängig zu sein (z.B. als Gasersatz), sondern mit dem elektrischen Betrieb, ergänzt durch Batteriebetrieb, über Alternativen zu verfügen.

Inflationsauswirkungen werden in den nächsten Jahren aller Voraussicht nach auf Personalkosten und damit Fertigungskosten durchschlagen, was zusammen mit gestiegenen Rohstoffkosten z.B. auch Fahrzeugkosten erheblich beeinflussen sollte.

Die SteFanS-Studie konnte diese Zusammenhänge in ihren konkreten, zukünftigen Auswirkungen nicht abbilden. Die Gutachter sind jedoch überzeugt, dass die Empfehlungen in ihrer Tendenz (und im relativen Vergleich) nicht an Wert verlieren werden. Im Gegenteil besteht die Einschätzung, dass die Empfehlung für klassische Elektrifizierung und ergänzenden Batteriebetrieb in künftigen Energieszenarien eher an Wert gewinnt.

13 Literatur

ALSTOM. (2019). *Coradia iLint.*

Arcadis/Ricardo. (2018). *Haalbaarheidsstudie: Zero emissie treinen met opportunity charging.* Amersfoort/Utrecht (Niederlande).

Aufschlaeger, F., Doelling, A., & Stephan, A. (08 2019). Modellierung der Lebenszykluskosten. *Eurailpress*, S. 12-17.

Banedanmark. (2021). *Omstilling af jernbaneinfrastruktur til batteridrift - Elektrificeringsprogrammet.* Kopenhagen.

Bauhaus Universität Weimar. (2019). *Pilotprojekt Einsatz von H2BZ-Triebwagen in Thüringen.* Weimar.

Benoit Simian, CGEDD, CGE, IFSTTAR, SNCF. (2018). *Le verdissement des matériels roulants du transport ferroviaire en France.* Paris (Frankreich).

Bernecker, P. D., Kuch, F., Speiser, J., Heinzelmann, J., Neumann, D. L., Koch, D. J., . . . Doderer, H. (09. 07 2020). Güterverkehrskonzept Baden-Württemberg - Grundlagen und Empfehlungen. Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg.

Bombardier. (2017). *Trains on Batteries.* RailCph; Banekonferencen 2017.

Brey, P. D.-I.-M. (2021). *Alternative Antriebe im SPNV.* Salzgitter: Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften, Fakultät Verkehr-Sport-Tourismus-Medien.

CH2M HILL, Ernst & Young, Canadian Nuclear Laboratories. (2018). *Regional Express Rail Program – Hydrail Feasibility Study Report.* Toronto.

Cihlar, J., Villar Lejarreta, A., Wang, A., Melgar, F., Jens, J., Rio, P., & Leun, K. v. (2020). *Hydrogen generation in Europe : overview of costs and key benefits.* Europäische Kommission, Generaldirektion Energie. doi:10.2833/122757

Claus, S. (2017). *EcoTrain: Vom dieselmechanischen Triebwagen zum intelligenten Mehrsystemfahrzeug. Intelligent die Umwelt schonen.* Berlin: DB RegioNetz Verkehrs GmbH.

Costagli, G. (2021). *L'infrastruttura a servizio di un nuovo vettore energetico per la trazione ferroviaria: lo stato dell'arte ed i progetti in corso.* RFI.

Culemann, C.-R., Dschung, F., Frixen, A., Klein, S., Lichtenberg, Daniel, . . . Zimmermann, U. (2021). *Emissionsfreie Mobilität - eine Strategie für den Einsatz von batterieelektrischen Triebzügen und Ladeinfrastruktur in Deutschlands Schienenpersonennahverkehr.* VDB - Verband der Bahnindustrie in Deutschland E.V.

DB Energie GmbH; DB Cargo BTT GmbH; Infraserv GmbH & Co. Höchst KG; NPROXX Jülich GmbH; ESWE Verkehrsgesellschaft mbH. (2020). *Potentialbeschreibung - Wasserstofftransport über das Schienennetz.* Frankfurt: Landesenergieagentur Hessen.

DB Netze. (2018). *Machbarkeitsstudie. Aufbau einer Ladeinfrastruktur für alternative Fahrzeugkonzepte (Akkuzüge) im Pfalznetz.* Kaiserslautern: im Auftrag von Zweckverband Schienenpersonennahverkehr.

DB Netze; DB Energie;. (2019). *Beitrag der DB Energie zur Energiewende im Verkehrssektor – Energieversorgung alternativ angetriebener Schienenfahrzeuge.*

DLR. (2018). *Design and Analysis of a Regio-Shuttle RS1 Diesel Railcar Converted to Fuel Cell Hybrid Propulsion.* Rom: Hydrail-Konferenz.

FH Erfurt. (2021). *Betrachtung der Gestehungskosten von grünem Wasserstoff.* Erfurt.

FNM/TRENORD. (2020). *Progetto di mobilità sostenibile e creazione di una "Hydrogen Valley" in Val Camonica lungo l'asse ferroviario Brescia-Iseo-Edolo.* Mailand (Italien).

Forschungszentrum Jülich. (2019). *Neue Optionen für einen wirtschaftlichen Betrieb von Wasserstoffzügen durch Nutzung der LOHC-Technologie?* Jülich.

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

Fraunhofer Institut (IWU), C. e. (2020). *Wasserstoffwirtschaft in der Lausitz – Perspektiven und Potentiale einer sektorenübergreifenden Wasserstoffwirtschaft in der Wirtschaftsregion Lausitz.* Zittau, Cottbus.

Fraunhofer-Institute (IAO, ISE, ISI). (2020). *Wasserstoff-Roadmap Baden-Württemberg - Klimaschutz und Wertschöpfung kombinieren.* Stuttgart: Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg.

Fraunhofer-Institute (ISI, ISE, IMWS, IKTS). (2019). *Eine Wasserstoff Roadmap für Deutschland.* Karlsruhe, Freiburg.

frontier economics. (2021). *Grundlage für die Positionierung zu Wasserstoff. Bericht für OesterreichsEnergie.*

Goudappel Coffeng. (2018). *Implementation Study for Optimization of Cross-border Rail Infrastructure in the Port area Ghent – Terneuzen.* im Auftrag von Passagiersvervoer Rail Gent – Terneuzen | Eindrapport.

Guidehouse, Tractebel. (2020). *Hydrogen generation in Europe: Overview of key costs and benefits.* Luxembourg: commissioned by European Commission.

Herder, R. (kein Datum). *Hydrogen train pilot - Toward a hydrogen economy.* 2019: Province of Groningen.

Herwartz, S., Pagenkopf, J., & Streuling, C. (18. August 2021). Sector coupling potential of wind-based hydrogen production and fuel cell train operation in regional rail transport in Berlin and Brandenburg. *International Journal of Hydrogen Energy*, S. 29597-29615.

HyCenta; EVT; Energieinstitut JKU Linz; Synergesis Consult; TU Graz;. (2017). *HYTRAIL Hydrogen Technology for Railway Infrastructure.* Graz, Leoben, Linz.

Hydrogen Council; Mc Kinsey;. (2020). *Path to hydrogen competitiveness – A cost perspective.*

IPP, SKL. (2019). *POTENZIALSTUDIE WASSERSTOFFWIRTSCHAFT.* Kiel: im Auftrag von EE.SH Netzwerkagentur erneuerbare Energien (im Auftrag des Kreises Nordfriesland).

IRENA. (2020). *reen Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5ºC Climate Goal.* Abu Dhabi: commissioned by International Renewable Energy Agency.

Jacqmaer, P., & Van der Spiegel, B. (13. November 2019). Alternatives for railway electrification. UIC Best Practice Workshop - The end of fossil fuels in the railway sector. Zürich, Schweiz.

Jülich Forschungszentrum. (2012). *Konzept und Kosten eines Pipelinesystems zur Versorgung des deutschen Straßenverkehrs mit Wasserstoff.* Jülich.

kcw. (2021). *Alternative Antriebe im öffentlichen Verkehr.* Berlin, Wien.: im Auftrag des Verkehrsverbund Ost-Region (VOR) GmbH.

Knörr, W., Heidt, C., Gores, S., & Bergk, F. (2016). *„Aktualisierung „Daten- und Rechenmodell: Ener-gieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2035“ (TREMOD) für die Emissionsberichterstattung 2016 (Berichtsperiode 1990-2014).* Umweltbundesamt.

Konstanz, I. e., & BWPLUS, F. (2019). *Emissionsfreier ÖPNV auf Basis der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie – regionale Konzeptentwicklung zur Vorbereitung des Aufbaus einer Infrastruktur.* Konstanz.

Kreiswerke Barnim. (2018). *Einsatz von Wasserstoff-Brennstoffzellenantrieben im Nahverkehr des Landkreises Barnim, betrieben mit 100% EE-Wasserstoff.* Leipzig.

Landesnahverkehrsgesellschaft Niedersachsen. (2018). *Zero-Emission-Antriebe für den Schienenverkehr - Darstellung der LNVG-Aktivitäten.* Berlin.

Leclanché. (2021). *Commercial Vehicle and Rail Battery Systems. High-performance, European-made lithium-ion battery systems for commercial vehicle and rail applications.*

Leclanché. (2021). *LT34. Power cell 34Ah.*

Lenz, P. D.-I., Sander, D., & Köhler, F. (2021). *Betrachtung der Gestehungskosten von grünem Wasserstoff.* Erfurth: Fachhochschule Erfurt, Fakultät Gebäudetechnik und Informatik, Fachrichtung Gebäude- und Energietechnik.

Ludwig Bölkow Systemtechnik; Alstom; TÜV SÜD. (2018). *Machbarkeitsstudie H2-Schienenverkehr Mitteldeutschland - Eine Expertise für ZVNL & Metropolregion Mitteldeutschland.* Leipzig.

Mott MacDonald. (2019). *ZEMU Concept Feasibility Study - Detailed Evaluation of Battery and Hydrogen Technologies for the Arrow Service.* San Bernardino County Transportation Authority.

Network Rail. (2020). *TRACTION DECARBONISATION NETWORK STRATEGY - Interim Programme Business Case.*

NOW GmbH. (2018). *Studie IndWEDe Industrialisierung der Wasserelektrolyse in Deutschland: Chancen und Herausforderungen für nachhaltigen Wasserstoff für Verkehr, Strom und Wärme.* Berlin: im Auftrag des Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur.

NOW GmbH. (2020). *Marktanalyse alternativer Antriebe im deutschen Schienenpersonennahverkehr.* Berlin.

NOW GmbH; Ernst&Young; Ludwig Bölkow Systemtechnik, SIGNON; TÜV SÜD; Becker Büttner Held; IFOK;. (2016). *Auf dem Weg zur Emissionsfreiheit im Zugverkehr, Wasserstoff-Infrastruktur für die Schiene;.* Berlin, Hamburg.

NOW GmbH; TU Berlin. (2018). *Zero Emission ohne Oberleitung - Technologievergleich Batterie vs Brennstoffzelle.* Berlin.

ÖBB Personenverkehr, AIT, Hycenta. (2021). *Pionierprojekt H2-Aspangbahn.* Wien.

Peli, J. (2018). *Applicazione delle fuel cell per l'alimentazione di veicoli ferroviari.* Polentico Milano, Scuola di Ingegneria Industriale e dell'Informazione, Ingegneria Elettrica.

Provincie Groningen; ProRail; Alstom; Dekra; Arriva; Engie. (2020). *Haalbaarheidsonderzoek waterstoftrein groningen.* Groningen (Niederlande).

PTV Transport Consult GmbH. (2020). *Potenzialanalyse zur Reaktivierung von Schienenstrecken in Baden-Württemberg. Vergleichende relationsbezogene Ermittlung des Fahrgastpotenzials.* Karlsruhe.

Ragazzini, S. (2021). *La transizione tecnologica dalla trazione diesel ai nuovi treni a batteria e idrogeno.* CAF.

Rambøll. (2020). *Trafikselskabet Movia - Nulemissionstog pa lokalbanerne i region hovedstaden og region sjaelland.*

Rambøll. (2021). *Machbarkeitsstudie alternative Antriebe im ZV SPNV RP Nord.*

Roland Berger. (2019). *Study on the use of fuel cells & hydrogen in the railway environment. State of the art & business case and market potential.* shift2rail.

Roland Berger. (2020). *Potenziale der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie in Baden-Württemberg.* Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft des Landes Baden-Württemberg.

Ruf, Y., Zorn, T., Akcayoz De Neve, P., Andrae, P., Erofeeva, S., & Garrison, F. (2019). *Study on the use of Fuel Cells and Hydrogen in the Railway*

Environment. Report 1. State of the art & business case and market potential. Publications Office of the European Union.
SCI Verkehr GmbH. (2021). *Innovatives Triebfahrzeug - Abschlussbericht.* Köln: im Auftrag des Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI).
SINTEF. (2016). *Analyse av alternative driftsformer for ikke-elektrifiserte baner.* Trondheim (Norwegen).
SMA, ENOTRAC. (2009). *Elektrifizierung der Hochrheinstrecke und Bodensee-Gürtelbahn.* Zürich: im Auftrag der Nahverkehrsgesellschaft Baden-Württemberg, Kanton Schaffhausen.
Stephan, P. D., Thomas Wittemann, N., Bregulla, T., Ebrecht, B., Zimmermann, U., Nolte, J., . . . Fischer, S. (2021). *Entscheidungspapier zum einsatz einer alternativen Antriebsform im VVO-Dieselnetz und Handlungsempfehlung für das Ostachsennetz.* Verkehrsverbund Oberelbe VVO.
Stoker, E. (2020). *The future is green - Moving towards a zero-emission bus fleet.* Ov bureau groningen drenthe.
Transport & Mobility Leuven TML. (2020). *Elektrificatie van het Belgische spoorwegnet of het gebruik van andere duurzamere vervoerswijzen om de dieseltractie te vervangen.* Leuven (Belgien).
Transport & Mobility Leuven TML. (2021). *Electrification and other Alternatives to Diesel Traction - an Application for Belgium.* Union Internationale des Chemins UIC.
Transport- og Boligministeriet. (2019). *Analyse af batteritogsdrift i Nordvestsjælland.* Kopenhagen.
TTK GmbH. (2022). *Bericht Machbarkeitsstudie. Elektrifizierung der Hohenlohebahn und.* Karlsruhe.
TU Dresden. (2017). *Wissenschaftliche Bewertung von alternativen, emissionsarmen Antriebskonzepten für den bayerischen SPNV.* Dresden: im Auftrag der Bayerischen Eisenbahngesellschaft mbH (BEG).
TU Dresden. (2019). *Bewertung von konventionellen und alternativen Antrieben für den Rheinland-Pfalz Takt 2030 unter besonderer Betrachtung des Pilotprojektes "Pfalznetz".* Dresden: Zweckverband Schienenpersonennahverkehr Rheinland-Pfalz Süd.
TU Dresden. (2020). *Wissenschaftliche Bewertung von alternativen, emissionsarmen Antriebskonzepten für den bayerischen SPNV (Phase 2).* Dresden: im Auftrag von Bayerische Eisenbahngesellschaft mbH (BEG).
TU Dresden, TU Berlin, PTV Group. (2021). *Wissenschaftliche Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie. Abschlussbericht zur Studie „Elektrifizierungsvarianten für das deutsche Schienennetz“.* Karlsruhe: im Auftrag des Bundesministerium für Digitales und Verkehr .
UIC. (2019). *Alternatives for railway electricification. UIC Best Practice Workshop – The end of fossil fuels in the railway sector.*
UIC. (19. 05 2021). Best Practice Workshop Battery Trains. Online.
VDE. (2018). *Battery Systems for Multiple Units. Emission-free drives powered by lithium-ion cells.*
VDE. (2020). *Bewertung klimaneutraler Alternativen zu Dieseltriebzügen.*
VDE. (2020). *Bewertung klimaneutraler Alternativen zu Dieseltriebzügen. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung am Praxis-Beispiel >Netz Düren<.* Frankfurt am Main.
VDI, & VDE. (2019). *Brennstoffzellen – und Batteriefahrzeuge – Bedeutung für die Elektromobilität.* Düsseldorf.
Verkehrswissenschaftliches Institut Stuttgart VWI. (2013). *Gesamtwirtschaftliche Bewertung der Elektrifizierung von Dieselstrecken in Baden-Württemberg.* Stuttgart.

Verzeichnis der Bestimmungsstellen für Güterwagen - VBG - 715.1001. (12. 12 2021). Deutsche Bahn AG.

Vivarail. (2019). *Flexible Power Systems for Rail Vehicles - Development of discrete and interchangeable power packs to provide a range of alternative power source options.*

Vogt, M. (2021). *The Green Battery Concept.* Leclanché.

Wittig, K. (2021). *Energieversorgung für abgestellte Elektrotriebzüge mit Akkumulator (ETA) - Rückkehr der Zugvorheizanlagen oder Neuauftritt der Elektranten?* Eurailpress.

Wuppertal Institut; DIW-Econ. (2020). *Bewertung der Vor- und Nachteile von Wasserstoffimporten im Vergleich zur heimischen Erzeugung.* Wuppertal, Berlin.

Zillertalbahn; Helmut Schreiner. (2019). *Sektorkopplung – grüner Wasserstoff für das Projekt Zillertalbahn 2020+.*