

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Digitales
und Verkehr



Gefördert durch
Bayerisches Staatsministerium für
Wohnen, Bau und Verkehr

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Machbarkeitsstudie Oberfranken-Achse

Förderkennzeichen PTJ: 03TZ2031S

Machbarkeitsstudie über den Einsatz von emissionsfreien Fahrzeugen für das Expressverkehrsnetz Nordostbayern und das Regionalverkehrsnetz Oberfranken

Programmnummer STMB: DB343-(CIP)

Auftraggeber:

Landkreis Kulmbach
Konrad-Adenauer-Str. 5
95326 Kulmbach

Herausgeber:

Enotrac AG
Seefeldstrasse 8
CH-3600 Thun
Tel. +41 33 346 66 11
info@enotrac.com
www.enotrac.com

SMA + Partner AG
Grubelstrasse 28
CH-8050 Zürich
Tel. +41 44 317 50 60
info@sma-partner.com
www.sma-partner.com

hynes GmbH
Alexander-von-Engelberg-
Straße 12
65203 Wiesbaden
info@hynes.eu
www.hynes.eu

Freigegeben

14.10.2024

© Enotrac AG

Aktuelle Version

Version	Datum	Status	Erstellt	Geprüft	Freigegeben
1.0	14.10.2024	Freigegeben	S. Schnellmann, K. Gafner, J. Tschumi (Enotrac), D. Müller, D. Coleman (hynes), C. Bärtsch (SMA)	P. Leitl (LAO), M. Beck (LRA), F. Liese (StmB)	S. Nydegger (Enotrac)

Vorherige Version

Version	Datum	Status	Erstellt	Geprüft	Freigegeben

Änderungen seit der vorherigen Version

Urheberrecht

Dieses Dokument wurde durch Enotrac AG im Auftrag des Kunden erarbeitet. Für das Dokument und den darin dargestellten Gegenstand erhält der Kunde das Nutzungsrecht. Die Urheberrechte liegen bei Enotrac AG. Vervielfältigung, Bekanntgabe an Dritte oder Verwertung seines Inhalts über die vorgesehene Nutzung hinaus sind ohne schriftliche Zustimmung verboten.
 © Enotrac AG

Inhalt:

	Aktuelle Version	2
1	Einleitung, Zweck der Machbarkeitsstudie	7
2	Ergebnis der Studie	10
2.1	Zeithorizont 2032	10
2.2	Zeithorizont 2035	11
2.3	Zeithorizont 2040	13
2.4	Empfehlung / Ausblick	14
3	Projektrahmen	17
3.1	Geographische Übersicht	17
3.2	Zeitliche Übersicht	18
3.3	Vorgehen und Methodik	19
3.3.1	Phase 1: Projektorganisation / Erfassung Grunddaten	19
3.3.2	Phase 2: Zuglaufsimulation je Linie, Ermittlung Energiebedarf	19
3.3.3	Phase 3: Speise- und Fahrplankonzepte / 1. Entwurf	20
3.3.4	Phase 4: Verifizierung Speisekonzepte	21
3.3.5	Phase 5: Kostenschätzung / Vertiefte Prüfung Umsetzbarkeit	21
3.3.6	Phase 6: Erstellung Schlussdokumentation	21
3.4	Abkürzungen / Begriffe	21
3.5	Referenzen	23
3.5.1	Grundlagendokumente	23
3.5.2	Dokumente Enotrac / SMA / hynes	24
3.5.3	Weitere Dokumente / Unterlagen	24
3.5.4	Normen / Richtlinien	24
3.6	Beschreibung eingesetzte Simulations-Tools	25
3.6.1	Fabel	25
3.6.2	Viriato	26
4	Übersicht zu den Referenzfahrzeugen	27
5	Beschreibung der Linien und Strecken	29
5.1	Übersicht	29
5.2	Expressverkehr Nordostbayern (EVNO)	30
5.3	Regionalverkehr Oberfranken (RVOF)	32
5.4	Beschreibung der definierten Teilstrecken	33
5.5	Zuordnung der einzelnen Linien zu den Teilstrecken	36
5.6	Umlaufplanung	39
6	Betrachtete Prinzipien zur Elektrifizierung	41
6.1	Generell	41
6.2	Ausrüstung mit Oberleitung und Anschluss an das Bestandsnetz	42
6.3	Oberleitungsinselanlagen (OLIA)	42
6.4	Ladestationen, Laden über Stromabnehmer	43

6.5	Ladestationen, Laden über Ladekabel	44
7	Erarbeitung von Oberleitungskonzepten	45
7.1	Vorgehen generell	45
7.2	Basis für die Simulationen mit Fabel	46
7.2.1	Modelldaten Infrastruktur	46
7.2.2	Simulationsparameter	46
7.2.3	Übersicht Simulationsvarianten	46
7.3	Anforderungen und Annahmen	48
7.3.1	Abgrenzung zum übrigen Netz	48
7.3.2	Anforderungen an Redundanzen	48
7.3.3	Beurteilungskriterium Energiebilanz Fahrzeuge	48
7.3.4	Annahmen zu Reichweiten und Ladezeiten	49
7.3.5	Annahme zum Traktionsartwechsel	50
8	Oberleitungsvarianten für den Zeithorizont 2035	51
8.1	Ausgangslage und Vorgehensweise	51
8.2	Mögliche Maßnahmenpakete pro Linie	53
8.3	Erkenntnisse und Ableiten von Arbeitsvarianten	55
8.4	Arbeitsvarianten 1 – 3 für den RVOF 2035	56
8.4.1	Arbeitsvariante 1 (2035)	57
8.4.2	Arbeitsvariante 2 (2035)	58
8.4.3	Arbeitsvariante 3 (2035)	59
9	Oberleitungsvarianten für den Zeithorizont 2040	60
9.1	Ausgangslage und Vorgehensweise	60
9.2	Mögliche Maßnahmenpakete pro Linien	61
9.3	Erkenntnisse und Weiterentwicklung der Arbeitsvarianten 1-3	62
9.4	Arbeitsvarianten 1 – 3 für den EVNO 2040	62
9.4.1	Arbeitsvariante 1 (2040)	63
9.4.2	Arbeitsvariante 2 (2040)	64
9.4.3	Arbeitsvariante 3 (2040)	65
10	Verifikation der Arbeitsvarianten	66
10.1	Ziel und Zweck der Simulationen	66
10.2	Ergebnisse Energiebilanz der Züge	66
10.2.1	Minimaler SoC Arbeitsvarianten 1-3 für den Zeithorizont 2040	66
10.2.2	Bewertung / Interpretation	67
10.3	Ergebnisse Bahnstromversorgung	68
10.3.1	Allgemeine Beurteilungskriterien	68
10.3.2	Spannungshaltung	68
10.3.3	Unterwerk / Umrichter	71
10.3.4	Speisepunkt (Speiseleitung)	75
10.3.5	Oberleitung	80
10.4	Ergebnisse Betriebskonzept / Fahrzeiten	81
10.4.1	Beurteilungskriterien Fahr- und Haltezeiten	81
10.4.2	Ergebnisse	81

11	Prüfung der Standorte der Bahnstromanlagen	83
11.1	Ausbau Oberleitungsanlage	83
11.1.1	Allgemeines Fazit	83
11.1.2	Schiefe Ebene	83
11.1.3	Straßenbrücke in Untersteinach	84
11.2	Unterwerke / Umrichterwerke	84
11.2.1	Unterwerk Kirchenlaibach	84
11.2.2	Umrichterwerk im Knoten Neuenmarkt-Wirsberg	85
11.3	Ladestation / Ladeunterwerke	87
11.3.1	Standort Münchberg	87
11.3.2	Standort Bad Steben	88
11.3.3	Standort Weiden	89
11.3.4	Standort Neustadt an der Waldnaab	90
12	Kostenschätzung Bahnstromanlagen	91
12.1	Generelle Bemerkung	91
12.2	Kostenbasis	91
12.2.1	Übersicht	91
12.2.2	Unterwerk	92
12.2.3	Nachrüsten bestehendes Uw / Urw mit zusätzlichem 15-kV- Abgang	92
12.2.4	Umrichterwerk	92
12.2.5	110-kV-Bahnstromleitung	92
12.2.6	Oberleitung	93
12.2.7	Zuschlag Elektrifizieren eines Gleises im Bahnhof	94
12.2.8	Neuer Schaltposten	94
12.2.9	Traktionsartwechsel	94
12.3	Fahrleitungskosten der einzelnen betrachteten Teilstrecken	95
12.4	Investitionskosten bis 2035	97
12.5	Investitionskosten 2035 – 2040	98
12.6	Gesamt-Investitionskosten bis 2040	99
13	Umsetzungsplan	100
14	Grundlagenermittlung Wasserstoffinfrastruktur	103
14.1	Aufbereitung Basisdatenset (Linienpläne, Fahrzeugdaten, Einsatzpläne, sonst. Kartenmaterial)	103
14.1.1	Aufbereitung Fahrzeugdaten	103
14.2	Erstellen der Basiskarten	104
14.1.1	Hintergrundkarten	104
14.2.1	Schutzgebiete	104
14.2.2	Transport und Verkehr	104
14.2.3	Wasserstoffinfrastruktur	105
14.2.4	Tankstellen Analyse	105
14.2.5	Elektrolyseoptionen	106
14.2.6	Aufbereitung der H ₂ -Aktivitäten im Untersuchungsraum	106
14.2.7	Metropolregion Nürnberg	110
15	Berechnung des Wasserstoffbedarfs	111

15.1	Allgemein	111
15.2	Ergebnis Wasserstoffbedarf	113
15.3	Interpretation / Fazit	116
15.4	Modellierung der erforderlichen H ₂ -Betankungsmenge an den HRS-Standorten	117
16	HRS-Konzeptionierung	119
16.1	Wasserstoffbereitstellung	121
16.1.1	Gasförmiger Wasserstoff in MEGC-Trailern	121
16.1.2	Flüssiger Wasserstoff LH ₂	121
16.1.3	Pipeline	122
16.2	Wasserstoffaufbereitung	123
16.3	Dimensionierung der Komponenten (Versorgung, Speicherung, Verdichtung, Peripherie, Dispenser)	123
16.3.1	Betankungsprozess	124
16.3.2	Versorgung	125
16.3.3	Best Practice: Höchst und Bremervörde	126
17	Standortanalyse logistisch geeigneter HRS	130
17.1	Präferenzstandorte	130
17.2	Dieselbestandstankstellen	130
17.3	Neue Standorte	131
17.3.1	Genehmigungsrechtliche Parameter	132
17.3.2	Potenzialflächen	136
17.3.3	Bewertungsmatrix/Kriterienkatalog	136
17.3.4	Nürnberg	138
17.3.5	Bayreuth	143
17.3.6	Schwandorf	145
17.3.7	Hof	150
18	Individuelle HRS-Auslegung	155
18.1	H ₂ Mengen	155
18.2	H ₂ -Druckkaskaden	155
19	Versorgungskonzept Upstream	158
19.1	Wasserstoffherzeugung	158
19.1.1	Eigene Wasserstoffherzeugung	158
19.2	Distribution	163
19.3	Grundlegende Konzepte	167
19.4	Synergien mit anderen H ₂ -Anwendern	169
19.4.1	Synergiepotenziale im Untersuchungsgebiet	170
20	Kostenschätzung Wasserstoffinfrastruktur	173

1 EINLEITUNG, ZWECK DER MACHBARKEITSSTUDIE

Bis 2040 möchte der Freistaat Bayern den Einsatz von Dieselfahrzeugen im bayerischen SPNV-Netz beenden. Da davon auszugehen ist, dass bis dahin eine vollständige Elektrifizierung des Schienennetzes nicht umsetzbar ist, setzt dies den Einsatz von alternativen Antriebstechnologien voraus – ohne dabei das perspektivische Ziel der vollständigen Elektrifizierung außer Acht zu lassen.

Dies betrifft in besonderem Maße die Diesel-Insel in weiten Teilen Ober- und Mittelfrankens sowie der Oberpfalz, für deren Beseitigung die Anrainer seit Jahren kämpfen. Der sogenannten „Oberfranken-Achse“ kommt dabei aufgrund ihrer geostrategischen Lage und ihrer unterschiedlichen Streckenprofile zwischen den vier Oberzentren Bamberg, Coburg, Bayreuth und Hof eine Schlüsselrolle zu. Der Bundesverkehrswegeplan 2030 sieht bislang für die Oberfranken-Achse (8 ABS Hochstadt-Marktzeuln - Hof/Nürnberg - Bayreuth - Neuenmarkt-Wirsberg und die Teilstrecken 2-024-V01 und 2-024-V02) keine Elektrifizierung vor. Stattdessen wird dieser attestiert, „gut für eine Teilelektrifizierung mit Batterie-Hybridfahrzeugen“ geeignet zu sein.

Der Landkreis Kulmbach möchte daher in Zusammenarbeit mit dem Freistaat Bayern untersuchen lassen, wie die heutigen Dieserverkehre entlang der „Oberfranken-Achse“ und dem umgebenden Netz schon vor einer Vollelektrifizierung auf lokal emissionsfreie Antriebe umgestellt werden können. Das Ziel der vorliegenden Machbarkeitsstudie ist die Darstellung eines Konzeptes mit den notwendigen Maßnahmen, welche einen robusten, pünktlichen und störungsfreien Betrieb mit alternativen Antriebstechnologien für die Oberfranken-Achse und ihrem umgebenden Netz zu den gesetzten Zielen hinsichtlich der definierten Betriebszeiträume ermöglicht. Dabei sollen die betrieblichen, technischen und infrastrukturellen Voraussetzungen für die Umsetzung aufgezeigt und die damit einhergehenden Investitionskosten beziffert werden.

Die Machbarkeitsstudie Oberfranken-Achse wurde im Rahmen der "Richtlinie zur Förderung alternativer Antriebe im Schienenverkehr" durch das Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) gefördert. Das Projekt wurde darüber hinaus durch den Freistaat Bayern kofinanziert. Die Förderrichtlinie wird von der NOW GmbH koordiniert und durch den Projektträger Jülich (Ptj) umgesetzt.

Im Fokus dieser Machbarkeitsstudie stehen die Ausschreibungsnetze Expressverkehr Nordostbayern (EVNO) und Regionalverkehr Oberfranken (RVOF). Ende 2032 sollen die Dieselfahrzeuge im EVNO-Netz durch trimodale Wasserstoff-Akkuhybridfahrzeuge ersetzt werden. Die Umstellung auf reine Akkuhybridfahrzeuge im RVOF-Netz soll 2035 erfolgen. Ein weiterer festgesetzter Betriebszeitraum ist dann das Jahr 2040, in welchem auch der Schienengüterverkehr auf den Achsen Ostkorridor Süd und Franken-Sachsen-Magistrale emissionsfrei werden soll.

Die Enotrac AG, mit den Firmen SMA und Partner AG und hynes GmbH als Subunternehmungen, wurde damit beauftragt, einerseits ein Energieversorgungskonzept zu entwickeln, welches einen robusten Betrieb mit Akkuhybridfahrzeugen ermöglicht und andererseits die für den Einsatz eines Wasserstoffhybridzugs erforderliche H₂-Infrastruktur zu bestimmen. Dabei sollte unter anderem die generelle Umsetzbarkeit, die zu erwartenden Kosten, als auch ein möglicher Zeitplan zur Umsetzung untersucht und bewertet werden.

Als Grundlage der Untersuchung wurden Netzsimulationen mit dynamischen Lastflussberechnungen des zu betrachtenden Eisenbahnsystems durchgeführt. Hierzu wurde das von Enotrac entwickelte Simulationstool Fabel verwendet. Mithilfe des Fahrplan-Tools Viriato von SMA und Partner AG wurden anschließend die von den entwickelten Lade- und Speisekonzepten resultierenden Fahrzeiten des vorgegebenen Betriebskonzepts überprüft.

Im Rahmen einer vergleichbaren Machbarkeitsstudie für das Allgäu (genauer für die Region Schwaben und westliches Oberbayern) [26] wurden zusammen mit der Bayerischen Eisenbahngesellschaft mbH (BEG) und der DB InfraGO die Eigenschaften der zu Grunde legenden Referenzfahrzeuge für den SPNV und deren Einsatzplan auf den einzelnen Linien definiert. So wurde ein Fahrzeugtyp für konventionelle Verkehre und ein Fahrzeugtyp für die Neigetechnik-Verkehre festgelegt (in Klammern jeweils das in der vorliegenden Studie verwendete Kürzel für den entsprechenden Fahrzeugtyp):

- 45 m langer batterieelektrischer Triebzug (BEMU 45)
- 70 m langer trimodaler Neigetechnik-Hybridzug Wasserstoff / Batterie (NT-XEMU-70)

Die BEG plant die Beschaffung des Hybridzugs NT-XEMU-70 mit dem Ziel, bis zur Elektrifizierung der notwendigen Teilstrecken für einen BEMU-Betrieb bereits einen CO₂-neutralen Zugbetrieb für die Neigetechnik-Linien in den Regionen Oberfranken und Allgäu fahren zu können. Nach Fertigstellung der notwendigen Streckenelektrifizierungen für den BEMU-Verkehr soll das Fahrzeug als reiner BEMU weiterverkehren, d.h. Laden der installierten Batterien über die Oberleitung und Ausserbetriebnahme der Brennstoffzelle. Die Firma hynes hat ein Wasserstoffinfrastruktur-Konzept für den als Übergangslösung angedachten Betrieb der Neigetechnik-Hybridzüge mit Wasserstoff erstellt.

Die Grundlagendaten zur Studie, insbesondere für die Simulationsrechnungen, sind in einem separaten Bericht zur Studie, im Grundlagendatenbericht [23], beschrieben. In diesem wurden zu Beginn der Studie die zusammengetragenen Grundlagen sowie die getroffenen Annahmen dokumentiert. Im vorliegenden Bericht wird für die Grundlagen grundsätzlich auf diesen verwiesen und nur wenn es dem Verständnis dient, Daten oder Sachverhalte daraus wiederholt dokumentiert.

Die Studie selbst ist in 3 Zeithorizonte unterteilt, welche jeweils unterschiedlichen Ausgangslagen Rechnung tragen sollen:

Zeithorizont 2032: Umstellung des Neigetechniknetzes Expressverkehr Nordostbayern auf trimodale Fahrzeuge. Alle Linien mit Neigetechnik-Zügen werden ab diesem Zeitpunkt primär mit Wasserstoff und gestützt mit einer Traktionsbatterie betrieben. Überall wo Oberleitung vorhanden ist, kann die erforderliche Energie aus dem Oberleitungsnetz bezogen werden. Die Linien im konventionellen Netz sind noch nicht auf emissionsfreie Antriebe umgestellt.

Der Ausbau des elektrischen Bahnstromnetzes entspricht dem heutigen Ausbaustand, d.h. es sind noch keine Elektrifizierungsprojekte oder Maßnahmen realisiert.

Zeithorizont 2035: Ab 2035 wird im Regionalverkehrsnetz Oberfranken batterieelektrisch gefahren. Alle Neigetechnik-Linien werden nach wie vor primär mit Wasserstoff und gestützt mit einer Traktionsbatterie betrieben. Überall wo Oberleitung vorhanden ist, kann die erforderliche Energie aus dem Oberleitungsnetz bezogen werden.

Bis dahin soll die sich aktuell im Rahmen des Projekts aus dem Bundesverkehrswegeplan in Planung befindende Oberleitungselektrifizierung zwischen Hof und Marktredwitz umgesetzt sein.

Zeithorizont 2040: Alle SPNV-Linien werden batterieelektrisch betrieben, auch die Neigetechnik-Züge im Expressverkehrsnetz Oberfranken. Zudem sollen bis zu diesem Zeitpunkt wichtige Streckenrelationen wie die Franken-Sachsen-Magistrale, die Metropolenbahn und der Ostkorridor Süd gemäß Bundesverkehrswegeplan sowie die Strecke Schnabelwaid – Bayreuth elektrifiziert worden sein. Nach Umsetzung dieser Streckenelektrifizierungen sollen auch die entsprechenden Güter- und Fernverkehre elektrisch fahren, was auch dem Fernziel des Freistaats Bayern entspricht. Diese Verkehre wurden für die Bestimmung der Belastungen der Bahnstromversorgung mitberücksichtigt.

Vom Vorgehen her wurde chronologisch vorgegangen. Das heißt, zuerst wurde für den Zeithorizont 2032 ein Konzept für die Betankung der Wasserstoff-Züge im Expressverkehrsnetz Nordostbayern erstellt. Anschließend wurde ein Elektrifizierungskonzept für den Zeithorizont 2035 erarbeitet. Dieses wurde anschließend für den gewünschten Endzustand, also den Zeithorizont 2040, weiterentwickelt. Die Struktur des vorliegenden Berichtes entspricht weitgehend dem Studienverlauf. Er ist thematisch zudem wie folgt unterteilt:

1. Allgemeiner Teil: Kapitel 1 - 5
2. Teil Bahnstrom / Elektrifizierung: Kapitel 6 - 13
3. Teil Wasserstoff: Kapitel 14 - 20
4. Anhang 1 - 4: Analyse Teilstrecken [18], Resultatgrafiken [19], Bildfahrpläne, Netzgrafik und Umlaufpläne [20], Grafiken Wasserstoffinfrastruktur [21]

2 ERGEBNIS DER STUDIE

2.1 Zeithorizont 2032

Die aus dem Gutachten empfohlenen notwendigen Maßnahmen für einen robusten Betrieb mit Brennstoffzellen-Akkuhybridfahrzeugen (NT-XEMU-70) für den SPNV in Oberfranken zum Zeithorizont 2032 können wie folgt zusammengefasst werden:

Neue Wasserstofftankstellen: Nürnberg (2 Standorte), Hof, Bayreuth, Schwandorf

Zu diesem Zeitpunkt werden alle Züge wasserstoff-brennstoffzellenelektrisch betrieben und es bedarf täglicher Wasserstoffbetankungen.

Aus technischen und betrieblichen Kriterien ist die Versorgung von 51¹ wasserstoff-brennstoffzellenbetriebenen Hybrid-Neigetech-Zügen (NT-XEMU) im Projektraum grundsätzlich möglich. Für den Betrieb von 51 NT-XEMU ist die Errichtung von mindestens 5 Wasserstofftankstellen nötig. Im Rahmen einer Standortanalyse konnten logistisch geeignete Standorte in Nürnberg (2), Hof, Bayreuth und Schwandorf identifiziert werden. Die Standorte zeichnen sich durch einen hohen täglichen Wasserstoffbedarf zwischen 2 t und 4,5 t aus. Somit stellt die Lagerung von Wasserstoff einschließlich einer robusten Reserve eine genehmigungsrechtliche Herausforderung, vor allem hinsichtlich der Störfallverordnung dar.

Als Versorgungsoption weist die straßengebundene Traileranlieferung mit Multi-Element-Gas-Containern (MEGC) die größte technische- sowie Marktreife auf. Folglich ist für die Standorte in Bayreuth und Hof mit 2-3 Trailerlieferungen pro Tag zu rechnen. Für die Versorgung der Standorte in Nürnberg und Schwandorf ist hingegen eine leitungsgebundene Versorgung aufgrund von hohen täglichen Abnahmemengen und der Versorgungssicherheit zu empfehlen.

Für die Standorte in Nürnberg, Hof und Schwandorf liegen die Investitionen je zwischen 12 und 17 Mio. € bei einer Vorhaltung von 150 % des Tagesbedarfs. Der Standort Bayreuth weist geringfügig niedrigere Investitionen in Höhe von 10 bis 14 Mio. € auf. Nicht betrachtet wurde, ob die verschiedenen Kostenträger den Investitionsbedarf im entsprechenden Zeitrahmen und dem gegebenen Kostenteiler tragen können.

Die Region zeichnet sich durch eine Vielzahl vergangener und laufender Projekte entlang der Wasserstoffwertschöpfungskette aus. Vor allem die identifizierten Projekte zur Wasserstoffherzeugung bieten das Potenzial die grünen Wasserstoffbezugsquellen zu diversifizieren.

Die Planung sieht vor, sobald ein ausreichender Elektrifizierungsgrad erreicht wird, die Brennstoffzelle zur Erzeugung der elektrischen Energie nicht mehr zu nutzen, sondern nur noch eine Kombination aus Oberleitung und der Nutzung des Akkus. In Anbetracht der Investitionen in eine innovative Wasserstoffinfrastruktur ist die Einführung der NT-XEMU-Fahrzeuge jedoch als Pfadentscheidung mit dazugehörigen Nutzungsdauern zu verstehen.

¹ Für den idealtypischen Fahrplan werden täglich 51 Fahrzeuge benötigt. Diese Anzahl Fahrzeuge stellt die Grundlage für den täglichen Wasserstoffbedarf für das vollständige fahrplanmäßige Angebot im Untersuchungsraum dar. Selbstverständlich sind weitere Fahrzeuge als Reserve erforderlich. Diese benötigen als Reserve keine relevanten Mengen Wasserstoff.

Aufgrund dessen weist das aktuelle Setup Projektrisiken hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit, des soliden Tankstellenbetriebs, der sicheren H₂-Versorgung und der Fahrzeugparameter (aktuell gibt es noch keine Neigetechnikfahrzeuge mit Wasserstoffantrieb auf dem Markt) auf.

2.2 Zeithorizont 2035

Die aus dem Gutachten empfohlenen notwendigen Maßnahmen für einen robusten Betrieb mit Akkuhybridfahrzeugen im Regionalverkehr Oberfranken (RVOF) können wie folgt zusammengefasst werden:

Neue Oberleitung: Untersteinach – Neuenmarkt-Wirsberg – Marktschorgast; Neuenmarkt-Wirsberg – Bayreuth – Kirchenlaibach; Oberkotzau – Rehau; Bahnhof- und Abstellgleise in Forchheim

Ladestationen: Bad Steben, Münchberg, Weiden

Unterwerk: Uw Kirchenlaibach; Im Rahmen der Elektrifizierung der Franken-Sachsen-Magistrale bis 2040 soll nach aktuellen Planungen in Schnabelwaid ein Unterwerk gebaut werden. Die vorliegende Untersuchung zeigt, dass dieses Unterwerk vorteilhaft in Kirchenlaibach errichtet werden sollte, damit das RVOF-Netz früher auf Akkuhybridverkehr umgestellt werden kann. Ansonsten wäre die teurere Variante mit einem zusätzlichen Unterwerk im Raum Neuenmarkt-Wirsberg erforderlich. Ebenfalls denkbar wäre der Verbleib des Unterwerks am Standort Schnabelwaid, wenn die vom Freistaat beauftragte Elektrifizierung Schnabelwaid – Bayreuth bis 2035 fertiggestellt würde. Mit der Elektrifizierung dieser Strecke würde das Unterwerk in Schnabelwaid über Bayreuth die Strecke Bayreuth – Kirchenlaibach versorgen. Diese Lösung wurde in vorliegender Studie jedoch nicht mit Simulationen verifiziert.

Zu diesem Zeitpunkt werden alle Züge auf den Strecken im RVOF batterieelektrisch betrieben. Auf den Strecken mit Neigetechnik werden die Züge noch mit Wasserstoffantrieb im Einsatz stehen.

Nachfolgende Abbildung 2-1 auf der nächsten Seite zeigt zusammenfassend die aus dem Gutachten empfohlenen notwendigen Maßnahmen auf einer Karte.

Damit beim vorgegebenen Linienkonzept und Fahrplan für den RVOF mit Akkuhybridfahrzeugen gefahren werden kann und vorerst keine Vollelektrifizierung des Netzes notwendig ist, sind 62 km Strecke respektive eine Gleislänge von 75 km mit Oberleitung auszurüsten. Zusätzlich sind in Forchheim das Gleis 8 sowie mindestens zwei Abstellgleise zu elektrifizieren, damit die RB22 aus Ebermannstadt im Bahnhof Forchheim laden kann. Desweiteren ist in den Bahnhöfen Bad Steben, Münchberg und Weiden je eine Ladestation erforderlich, damit dort Fahrzeuge während der Wendezeit die Akkumulatoren laden können. Die örtlichen Netzbetreiber haben nach ersten Einschätzungen bereits bestätigt, dass die erforderliche Anschlussleistung zur Verfügung steht.

Für die Umsetzung der Elektrifizierungsmaßnahmen inklusive Planung ergab die Kostenschätzung einen Investitionsbedarf von 107 Mio. €.

Für die Realisierung wird eine Zeitdauer von mindestens 7 Jahren geschätzt. Eine Realisierung bis zur Umstellung der Fahrzeuge ist somit grundsätzlich möglich. Es wird empfohlen, zeitnah mit der Planung und Projektierung zu starten. Nicht betrachtet wurde, ob die verschiedenen Kostenträger den Investitionsbedarf im entsprechenden Zeitrahmen und dem gegebenen Kostenteiler tragen können. Weiter wurden zeitliche Abhängigkeiten zu anderen Projekten, wie bspw. der stellenweise notwendige Stellwerkersatz, nicht berücksichtigt, da diese zum aktuellen Zeitpunkt nicht bewertbar sind.

Für den Betrieb der Neigetechnik-Züge mit Wasserstoff benötigt es gegenüber dem Szenario zum Zeithorizont 2032 keine zusätzliche Infrastruktur. Im Gegenteil, da die Züge auf den zusätzlich elektrifizierten Teilstrecken ihre Energie nun auch ab der Oberleitung beziehen können, wird damit der Wasserstoffverbrauch leicht reduziert. Gemäß den simulierten Energieverbräuchen reduziert sich dadurch der Tagesbedarf von insgesamt 12.6 t auf 11.8 kg Wasserstoff, also um rund 6 %. Dies bedeutet aber nicht, dass die für den Zeithorizont 2032 aufgebaute Wasserstoffinfrastruktur nach ein paar Jahren bereits wieder zurückgebaut werden sollte, sondern führt vielmehr zu größeren betrieblichen Reserven, was grundsätzlich positiv ist, da beim Zeithorizont 2032 die betrieblichen Reserven aufgrund der genehmigungsrechtlichen Einschränkungen knapp sind und ein Projektrisiko darstellen.

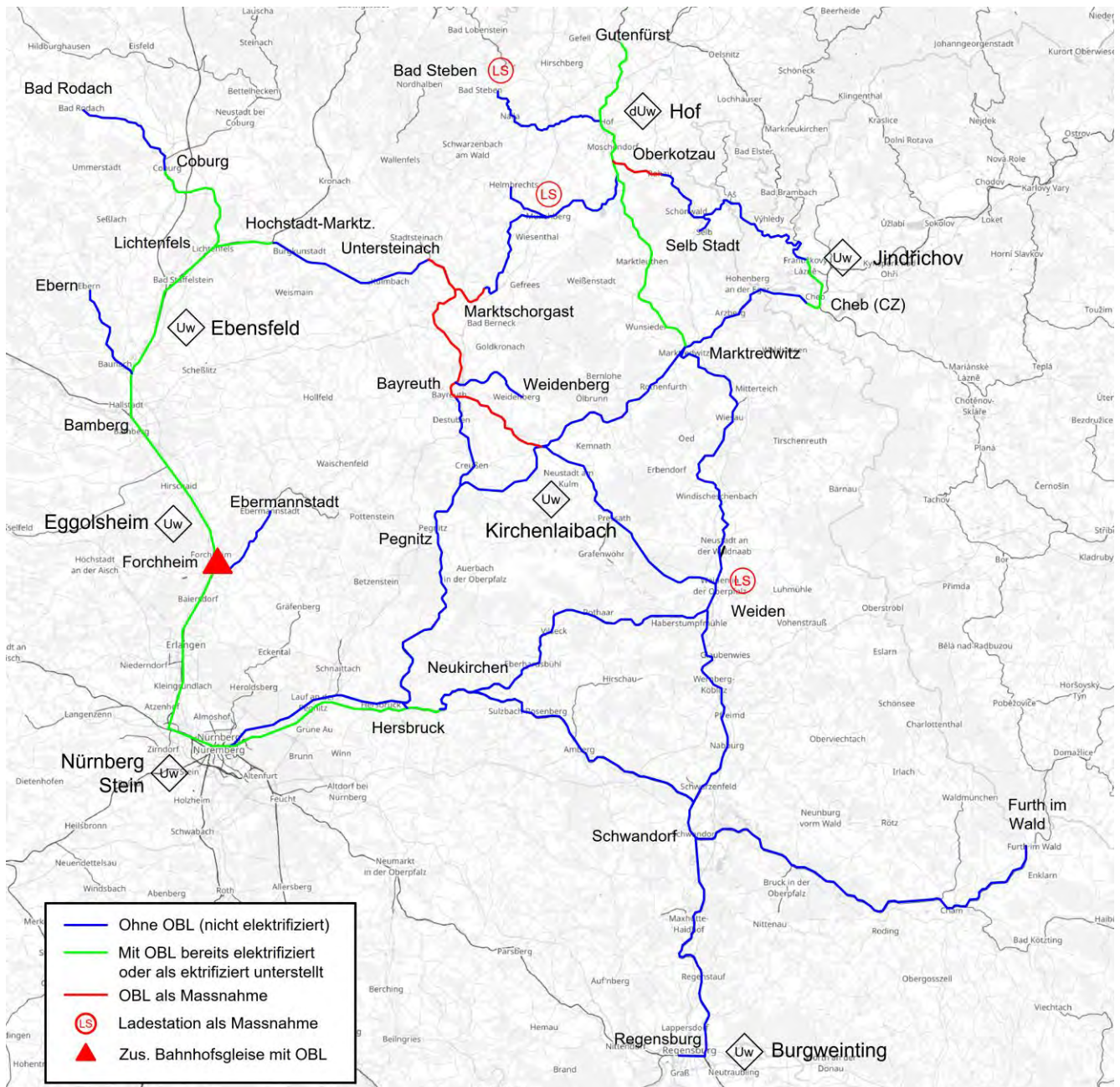


Abbildung 2-1: Ergebnis der Studie - Übersichtskarte notwendige Maßnahmen (mit Kostenfolgen) zur Elektrifizierung im Untersuchungsraum für Zeithorizont 2035

2.3 Zeithorizont 2040

Die gegenüber dem Zeithorizont 2035 zusätzlich erforderlichen Maßnahmen für einen robusten Betrieb mit Akkuhybridfahrzeugen im Expressverkehr Nordostbayern (EVNO) für den Zeithorizont 2040 können wie folgt zusammengefasst werden:

Neue Oberleitung: Kulmbach – Untersteinach; Marktschorgast – Stammbach; Neukirchen – Freihung

Neue Ladestation: Neustadt a.d. Waldnaab

Zu diesem Zeitpunkt sollen alle Züge in der Region Oberfranken elektrisch respektive batterieelektrisch betrieben werden, weshalb es daher keiner Wasserstoffbetankung mehr bedarf. Grundlage für einen robusten Betrieb der Akkuhybridzüge im Expressverkehrsnetz Nordostbayern ist zudem die zeitgerechte Umsetzung der Streckenelektrifizierungen aus dem Bundesverkehrswegeplan:

- Nürnberg – Marktredwitz – Schirnding-Grenze (Franken-Sachsen-Magistrale)
- Nürnberg – Schwandorf – Furth im Wald (Metropolenbahn)
- Regensburg – Marktredwitz – Hof (Ostkorridor Süd)

Nachfolgende Abbildung 2-2 zeigt zusammenfassend die aus dem Gutachten empfohlenen notwendigen Maßnahmen auf einer Karte.

Damit beim vorgegebenen Linienkonzept und Fahrplan für das EVNO mit Akkuhybridfahrzeugen gefahren werden kann und vorerst keine Vollelektrifizierung des Netzes notwendig ist, sind zusätzlich zu den 62 km für den RVOF nochmals 47 km Strecke respektive eine Gleislänge von 53 km mit Oberleitung auszurüsten. Zusätzlich ist in Neustadt an der Waldnaab eine Ladestation erforderlich. Da im Rahmen der Elektrifizierung des Ostkorridors Süd zum Zeithorizont 2040 in Weiden ein Unterwerk mit entsprechender Bahnstromleitung gebaut wird, wird dort die Ladestation, welche für den RVOF und den Zeithorizont 2035 notwendig ist, obsolet und kann deshalb nach Neustadt an der Waldnaab verschoben werden. Der örtliche Netzbetreiber hat bereits bestätigt, dass die erforderliche Anschlussleistung nach ersten Einschätzungen zur Verfügung steht.

Für die Umsetzung der für den Zeithorizont 2040 zusätzlich notwendigen Maßnahmen inklusive Planung ergab die Kostenschätzung einen Investitionsbedarf von 45 Mio. € (Kostenbasis 2022). In der Summe resultieren somit für den Akkuhybridverkehr im RVOF und EVNO Investitionen von 152 Mio. €.

Eine Realisierung innerhalb von 10 Jahren wird zudem als machbar beurteilt. Nicht betrachtet wurde jedoch, ob die verschiedenen Kostenträger den Investitionsbedarf im entsprechenden Zeitrahmen und dem gegebenen Kostenteiler tragen können. Weiter wurden zeitliche Abhängigkeiten zu anderen Projekten, wie bspw. der stellenweise notwendige Stellwerkersatz, nicht berücksichtigt, da diese zum aktuellen Zeitpunkt nicht bewertbar sind.

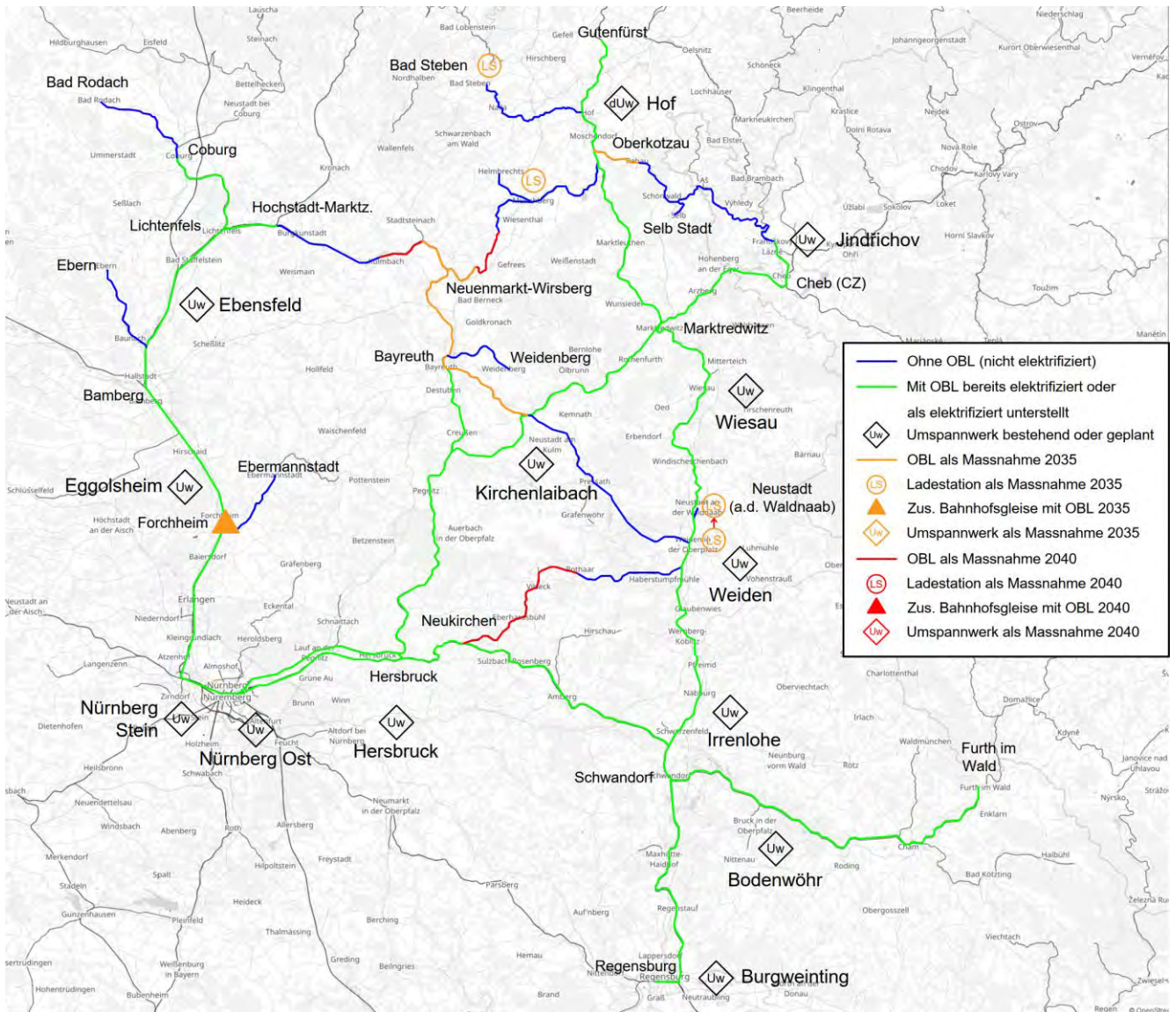


Abbildung 2-2: Ergebnis der Studie - Übersichtskarte notwendige Maßnahmen im Untersuchungsraum für Zeithorizont 2040

2.4 Empfehlung / Ausblick

Die Gutachter empfehlen für das weitere Vorgehen:

1. Die Umstellung des RVOF-Netzes auf Akku-Betrieb mit dem Zeithorizont 2035 sollte weiterverfolgt und die Planung der hierfür erforderlichen Maßnahmen zeitnah in Auftrag gegeben werden.
2. Der Aufbau und die temporäre Nutzung einer Betankungsinfrastruktur in der dargestellten Größenordnung (Betrieb bis die ermittelte Elektrifizierung für BEMU fertiggestellt ist) ist wirtschaftlich in Frage zu stellen. Da die H₂-Infrastruktur für die Anforderungen der Bahn ausgelegt werden muss, kann diese nicht ohne weiteres durch andere Anwender bspw. aus dem Straßengüterverkehr genutzt werden. Die Mehrkosten, damit die NT-XEMU elektrisch

fahren können, betragen rund 45 Mio. Euro. Dem gegenüber stehen die Investitionskosten für die H₂-Infrastruktur von 60 – 80 Mio. Euro, welche beim vorgegebenen Szenario nur der zeitlichen Überbrückung von 8 Jahren bis zur Realisation der notwendigen Elektrifizierung dienen. Es wird eine weitergehende Analyse empfohlen, welche die Kosten der NT-XEMU (Betriebskosten und Zusatzkosten aufgrund der Trimodalität, siehe auch Punkt 4) vollständig ermittelt und Fahrzeughersteller, H₂-Tankstellenerrichter und mögliche Versorgungsunternehmen miteinbezieht.

3. Basierend auf der Frage nach der Wirtschaftlichkeit wird empfohlen, zu überprüfen, ob der Betrieb der Neigetechnik-Fahrzeuge über die gesamte Lebensdauer mit Wasserstoff erfolgen kann. Das heißt, es wäre nur der Ausbau des Netzes gemäß Zeithorizont 2035 vorzusehen, welcher folgendes Investitionsvolumen zur Folge hat:
 - a. Elektrische Energieversorgung: 107 Mio. €
 - b. Wasserstoffbetankung: 60 – 80 Mio. €.
4. Weiter wird empfohlen, für die angestrebte Übergangslösung anstelle von Wasserstoffzügen ein alternatives Fahrzeugkonzept (Antriebskonzept) für die Neigetechnik-Linien zu prüfen, beispielsweise ein BEMU mit einer Batterie mit großem Energieinhalt.
5. Die frühzeitige Koordination des Akkuhybrid-Projekts mit den Projekten zu den Themen Stellwerk-Ersatz und Streckenklassen wird nahegelegt.

Allgemeine Anmerkungen:

Die konzeptionelle Herleitung der vorgenannten Bestvarianten zur Elektrifizierung basiert auf folgenden Rahmenbedingungen:

- Unterstellung von zwei vorgegebenen herstellernerutralen Referenzfahrzeugtypen (davon ein Typ mit Neigetechnik; im Rahmen der „Nachbarstudie Allgäu“ [26] erfolgte eine Detailfestlegung der Fahrzeugeigenschaften in Zusammenarbeit mit dem Auftraggeber).
- Vorgegebener Fahrplan für alle Linien, die auf Akkuhybrid-Fahrzeuge umgestellt werden sollen. Dies bedeutet z.B. auch, dass für gewisse Linien Neigetechnik zur Einhaltung des integrierten Taktfahrplans zwingend notwendig ist.
- Der Betrieb der Akkuhybrid-Fahrzeuge soll robust sein. Die Simulationen erfolgten unter Bedingungen, die zu einem hohen Energiebedarf führen: Vollbesetzte Fahrzeuge², maximale Klimatisierung, maximale Beschleunigungen (nicht energieoptimierte Fahrweise). Zudem wurde in Absprache mit dem Auftraggeber festgelegt, dass auf allen Linien jederzeit 30 % der Batteriekapazität³ als Reserve für Verspätungen oder Betriebsstörungen vorhanden sein sollen.
- Eine spätere durchgängige Elektrifizierung mittels Oberleitung wird so berücksichtigt, dass möglichst alle Maßnahmen, die den Betrieb mit Akkuhybrid-Fahrzeugen ermöglichen, nachhaltig sind und auch mit durchgängiger Oberleitung noch von Nutzen sind. Oberleitungsinseln schneiden deshalb schlecht ab, wenn sie nicht ab einem später ohnehin notwendigen Unterwerk / Umrichterwerk versorgt werden können.
- Für die Beurteilung der Kosten waren nur die einmaligen Investitionskosten in die Bahnstromversorgung und die Oberleitung zu berücksichtigen. Es wurden deshalb auch keine Betriebskosten bestimmt oder LCC-Betrachtungen durchgeführt.

² Belegung aller Fest- und Klappsitze mit je 75 kg gemäß Anforderungsprofil für fahrdynamische Triebfahrzeugdaten der DB InfraGO.

³ Gemessen an der am Lebensende der Batterie noch nutzbaren Batteriekapazität.

Es wird darauf hingewiesen, dass das Akkuhybrid-Projekt auch noch wichtige Schnittstellen zu laufenden Projekten und damit Koordinationsbedarf in den nachfolgend aufgelisteten Bereichen aufweist. Diese wurden im Rahmen des vorliegenden Gutachtens zwar identifiziert, da sie außerhalb des Projektrahmens sind, jedoch nicht im Detail behandelt. Folglich wurden sie in der Erarbeitung der Kostenschätzung und des Umsetzungsplans vernachlässigt. Diesen Punkten ist in einem weiteren Schritt Rechnung zu tragen:

Stellwerkersatz: Bei einer Elektrifizierung einer Strecke muss die Kompatibilität mit den Sicherungsanlagen und den streckenseitigen Kommunikationsleitungen geprüft werden (Beeinflussung durch induzierte Spannungen oder Rückströme im Gleis). Im Untersuchungsraum existieren noch zahlreiche alte Stellwerksanlagen, die unabhängig von einer Elektrifizierung für den Akkuhybrid-Einsatz ohnehin ersetzt oder erneuert werden müssen. In einem weiteren Schritt sind die konkreten Stellwerkersatz-Maßnahmen zu prüfen und zeitlich mit den einzelnen Elektrifizierungsprojekten zu koordinieren.

Streckenklassen: Aufgrund der Akkuhybridtechnik haben die Fahrzeuge eine Tendenz zu höheren Achslasten und Metergewichten. Es muss daher geprüft werden, ob die neuen Achslasten bei einzelnen Strecken zusätzliche Maßnahmen erfordern.

Folgende Erkenntnisse bedürfen noch einer speziellen Erwähnung:

- Unter dem Aspekt der Synergien zwischen den verschiedenen Verkehren (Fernverkehr, Güterverkehr, SPNV), jedoch weiterhin unter Vernachlässigung der Finanzierbarkeit, erscheint es als sinnvoll, wenn nebst den vorgeschlagenen Elektrifizierungsmaßnahmen für den Einsatz von Akkuhybrid-Fahrzeugen im SPNV mit erhöhter Priorität auch die verbleibenden Lücken zwischen Hochstadt-Marktzeuln und Kulmbach sowie Stammbach – Oberkotzau geschlossen würden. Damit wäre die Oberfranken-Achse durchgängig an Oberleitung befahrbar.
- Die Analyse der Ergebnisse zur Batterieladung der einzelnen Linien zeigt, dass auf den folgenden Linien eine Umstellung auf Akkuhybridverkehr auch ohne zusätzliche Elektrifizierungsmaßnahmen, also bereits heute möglich ist:
 - RB 18 Coburg – Bad Rodach,
 - RB 26 Bamberg – Ebern
 - sowie der HVZ-Umlauf der RB 22 und RB 26 von Ebermannstadt über Bamberg nach Ebern

Es ist daher naheliegend, bei der Umstellung auf den BEMU-Betrieb, welcher Schritt für Schritt erfolgen wird, möglichst mit diesen Linien zu beginnen.

3 PROJEKTRAHMEN

3.1 Geographische Übersicht

Im Fokus der vorliegenden Machbarkeitsstudie steht die Oberfranken-Achse (8 ABS Hochstadt-Marktzeuln – Hof/Nürnberg – Bayreuth – Neuenmarkt-Wirsberg nach BVWP 2030 mit den Teilstrecken 2-024-V01 ABS Hochstadt-Marktzeuln-Hof und 2-024-V02 ABS Nürnberg – Bayreuth – Hof) sowie das umgebende Netz. Nachfolgende Grafik zeigt den Untersuchungsraum, welcher der Studie unterstellt wurde. Die rot markierten Linien kennzeichnen die Streckenrelationen, welche vom Expressverkehr Nordostbayern (EVNO) und dem Regionalverkehr Oberfranken (RVOF) und ab 2040 von elektrisch betriebenen Güterverkehr befahren werden.



Abbildung 3-1: Übersichtsgrafik mit dem Untersuchungsbereich für das vorliegende Gutachten.

3.2 Zeitliche Übersicht

Die Umstellung auf einen emissionsfreien Schienenpersonennahverkehr im Studiengebiet soll mehrstufig erfolgen. Entsprechend wurden für die vorliegende Studie drei Zeiträume vorgegeben, die differenziert betrachtet werden sollen. Die Vorgabe der Zeithorizonte orientierte sich dabei insbesondere an den Ausschreibungsnetzen und den damit verbundenen Durchführungsverträgen, die für das EVNO-Netz 2032 und das RVOF-Netz 2035 auslaufen. In einer ersten Phase sollen ab Ende 2032 im EVNO trimodale Neigetechnikfahrzeuge (sogenannte NT-XEMU) eingesetzt werden. Diese Fahrzeuge beziehen ihre Energie primär aus einer wasserstoffgespeisten Brennstoffzelle oder aus der Oberleitung. Zusätzlich verfügen diese NT-XEMU-Fahrzeuge auch über einen Traktions-Akkumulator⁴, welcher jedoch in vorliegender Studie ausschließlich als Puffer für einen optimalen Betrieb der Brennstoffzelle berücksichtigt wurde. Das Resultat zu diesem Zeithorizont ist einerseits der für den EVNO anfallende Wasserstoffbedarf sowie die daraus abgeleitete notwendige Wasserstoffinfrastruktur.

2035 erfolgt dann in einem zweiten Schritt die Umstellung der heutigen Dieselfahrzeuge im RVOF auf batterie-elektrische Triebzüge (BEMU). Dazu sind die erforderlichen Elektrifizierungsmaßnahmen zu ermitteln und ein entsprechendes Speisekonzept zu erarbeiten.

In einer dritten Phase sollen ab 2040 mit den dann zu unterstellenden Elektrifizierungen der Franken-Sachsen-Magistrale (Nürnberg – Marktredwitz – Chev), des Ostkorridors Süd (Hof – Regensburg), sowie der Metropolenbahn (Nürnberg – Schwandorf – Furth im Wald) und der Strecke Schnabelwaid – Bayreuth auch Güter- und Fernverkehre auf lokal emissionsfreie Antriebsformen umgestellt werden. Im EVNO sollen gemäß Studienvorgabe zudem die Neigetechnikfahrzeuge vom Wasserstoff- auf Batterie-elektrischen Betrieb umgestellt werden, was bedeutet, dass den Fahrzeugen keine Wasserstoffausrüstung mehr zur Verfügung steht. Als Ergebnis dieser Betrachtung resultiert ein um den Elektrifizierungsbedarf der Neigetechnikfahrzeuge erweitertes Speisekonzept.

Für alle drei Phasen sind zudem die identifizierten Maßnahmen hinsichtlich der Machbarkeit sowie den zu erwartenden Investitionskosten zu bewerten. Basierend auf diesen Ergebnissen ist pro Zeithorizont eine Bestvariante zu ermitteln.

Zeit-horizont	Zu berücksichtigende Verkehre	Antriebsart	Ergebnis zum Zeithorizont
2032	Expressverkehr Nordostbayern (EVNO)	Wasserstoff-Batterie-Elektrisch	Wasserstoffbedarf im EVNO und erforderliche Wasserstoff-Infrastruktur mit entsprechender Kostenschätzung
2035	Regionalverkehr Oberfranken (RVOF)	Batterie-Elektrisch	Erforderliche Elektrifizierungsmaßnahmen für den RVOF mit entsprechender Kostenschätzung
2040	EVNO und RVOF sowie weitere SPNV im Untersuchungsraum; Schienenpersonenfernverkehr (SPFV) und Schienengüterverkehr (SGV)	Batterie-Elektrisch (EVNO und RVOF) Elektrisch (Zusatzverkehre)	Zusätzlich erforderliche Elektrifizierungsmaßnahmen für den EVNO und Bewertung aller Bahnstromanlagen im Studiengebiet, wiederum inkl. entsprechender Kostenschätzung

Tabelle 3-1: Übersicht der betrachteten Zeithorizonte und den zugehörigen Verkehren sowie den Ergebnissen

⁴ Im Sinne einer Vereinfachung wird in vorliegendem Bericht für den Begriff Akkumulator gleichermaßen die Bezeichnung Batterie verwendet.

3.3 Vorgehen und Methodik

Der Ablauf der Studie ist, wie nachfolgend dargestellt, grundsätzlich in sechs Phasen aufgeteilt. Die einzelnen Phasen sind in den anschließenden Unterkapiteln näher erläutert.

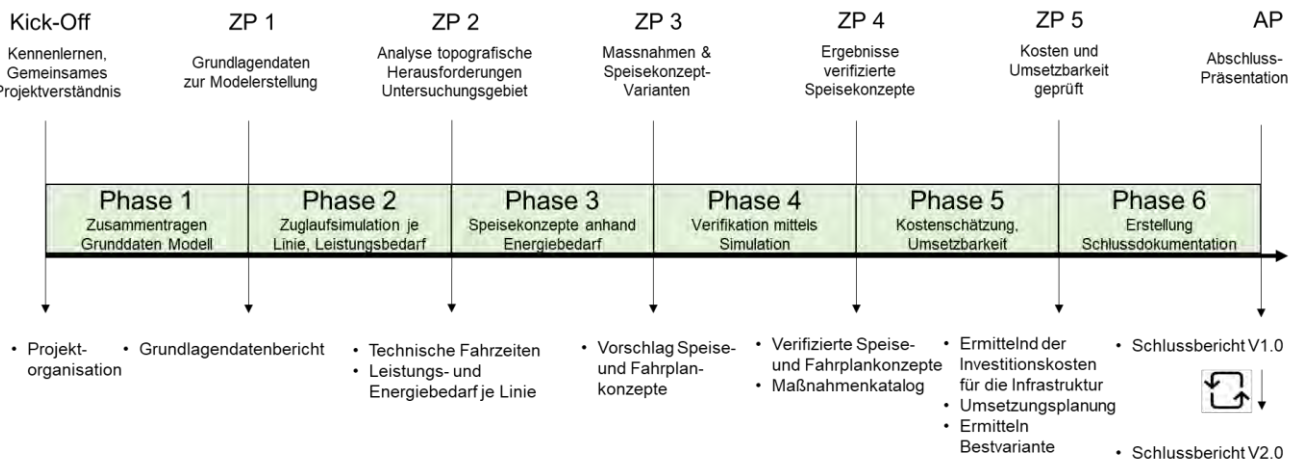


Abbildung 3-2: Projektphasen der Studie, Erläuterung siehe nachfolgende Kapitel

3.3.1 Phase 1: Projektorganisation / Erfassung Grunddaten

Diese Phase umfasst:

- Aufgleisen des Projekts, Definieren Konzept zur Projektorganisation (Rollen, Ansprechpartner, Entscheidungsträger, Kommunikation).
- Beschaffen und Aufarbeiten der erforderlichen Grundlagendaten für die Modellerstellung.
- Erstellen eines Grundlagendatenberichts (siehe [23]), welcher die verwendeten Grundlagendaten beschreibt.

3.3.2 Phase 2: Zuglaufsimulation je Linie, Ermittlung Energiebedarf

Diese Phase umfasst:

- Erstellen Simulationsmodell in Fabel.
- Durchführung der Zuglaufrechnungen zur Ermittlung der technischen Fahrzeiten und des Energiebedarfs pro zu untersuchender Linie für die Zeithorizonte 2035 und 2040 sowie des Energiebedarfs pro Betriebstag und Fahrzeug im Expressverkehr Nordostbayern für den Zeithorizont 2032. Diese Simulationen werden noch ohne Zuschaltung des elektrischen Traktionsversorgungsnetzes berechnet (Simulationen bei Nennspannung ohne Rückwirkung auf das elektrische Netz).
- Ermitteln und erste Analyse der topografischen und infrastrukturseitigen Herausforderungen im Untersuchungsraum.

- Basierend auf den Ergebnissen zu den technischen Fahrzeiten erfolgen erste betriebliche Betrachtungen und Berechnungen mit dem Simulationstool Viriato.

3.3.3 Phase 3: Speise- und Fahrplankonzepte / 1. Entwurf

Diese Phase umfasst:

- Für den Zeithorizont 2032 wird mit dem Neigetechnikfahrzeug (NT-XEMU: Betrieb mit Brennstoffzelle und Akkumulator) im Expressverkehr Nordostbayern der Wasserstoffbedarf pro Fahrzeug / Umlauf bestimmt. Dieser dient als Grundlage für die Erarbeitung des Wasserstoff-Infrastrukturkonzepts.
- Auf Basis der ersten Ergebnisse aus der Phase 2 werden mehrere Speisekonzeptvarianten für den Betrieb mit Akkuhybridzügen (BEMU) erarbeitet. Dies für die beiden Zeithorizonte 2035 (RVOF) und 2040 (EVNO und RVOF). Als mögliche Maßnahmen werden unter anderem berücksichtigt:
 - Erweiterung konventionelle Fahrleitung
 - Oberleitungsinseln gespeist durch Ladeunterwerke
 - Stationäre Lademöglichkeiten (klassisch über den Stromabnehmer unter Fahrleitung, Steckerlösung für längere Abstellzeiten)
- Über ein iteratives Verfahren werden anschließend mögliche Speisekonzepte für den Untersuchungsraum konkretisiert.
- Erste Beurteilung der einzelnen Maßnahmen, unter anderem anhand der folgenden Kriterien:
 - Generelle Machbarkeit
 - Genehmigungsfähigkeit
 - Systemkapazität
 - Netzflexibilität / Ladeflexibilität
 - Kompatibilität mit anderen Systemen / Rollmaterial
 - Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit (Redundanz)
 - Verspätungsrisiko / betriebliche Stabilität
 - Investitionskosten
 - Akzeptanz bei Bevölkerung (Eingriff ins Landschaftsbild)
- Anschließend durchführen / wiederholen der Zuglaufrechnungen mit Fabel für die erarbeiteten Konzeptvarianten. Dabei immer noch ohne Zuschaltung des elektrischen Netzes. Ziel dieses Schrittes ist die Ermittlung einer Bestvariante in Bezug auf den notwendigen Elektrifizierungsgrad. Die Bewertung geschieht anhand des pro Linie resultierenden Füllstandverlaufs. Ein übergeordnetes Speisekonzept (Anzahl, Leistung und Standorte neuer Bahnstromversorgungsanlagen) wird erst in der Phase 4 detailliert betrachtet.
- Die daraus resultierenden technischen Fahrzeiten sowie allfällige Haltezeitenzuschläge aufgrund von Ladezeiten dienen als Grundlagen für die Überprüfung des gegebenen Betriebskonzepts mittels Viriato.

3.3.4 Phase 4: Verifizierung Speisekonzepte

Diese Phase umfasst:

- Modellierung der Fahrpläne für einen ganzen Tagesbetrieb in Fabel. Dies umfasst sowohl die Akkuhybridfahrzeuge als auch den weiteren, heute elektrisch betriebenen Verkehr im Betrachtungsgebiet (d.h. inklusive Fern- und Güterverkehr).
- Definieren eines geeigneten übergeordneten Speisekonzepts (Anzahl, Standorte neuer Bahnstromversorgungsanlagen im Untersuchungsraum).
- Durchführen der Lastflussberechnungen für die erarbeiteten Speisekonzepte als Basis zur Verifizierung und Optimierung.
- Allfällige Optimierung der Speisekonzepte basierend auf den Erkenntnissen aus den Simulationsrechnungen
- Zusammenstellen eines Maßnahmenkatalogs je Variante als Basis für die detaillierten Betrachtungen in der nächsten Phase

3.3.5 Phase 5: Kostenschätzung / Vertiefte Prüfung Umsetzbarkeit

Diese Phase umfasst:

- Ermitteln / Schätzen Kosten der einzelnen Maßnahmen.
- Vertiefte Prüfung Umsetzbarkeit (anhand der Kriterien, wie zu Phase 3 beschrieben).
- Zusammenstellen Argumentation zur Wahl einer Bestvariante; Ableiten einer Empfehlung zur Umsetzung.

3.3.6 Phase 6: Erstellung Schlussdokumentation

Diese Phase umfasst:

- Erstellung Schlussdokumentation und Kurzfassung der Ergebnisse.
- Präsentation der Ergebnisse und Abgabe einer Erstfassung des Berichts zur Prüfung durch die Auftraggeber und den projektbegleitenden Arbeitskreis.
- Anschließend Fertigstellung des vorliegenden Berichts entsprechend den Rückmeldungen.

3.4 Abkürzungen / Begriffe

Begriff	Erläuterung
AC	Wechselstrom
BEG	Bayerische Eisenbahngesellschaft mbH
BEMU	Battery Electrical Multiple Unit (Batterie-elektrischer Triebzug)
Bhf	Bahnhof

Begriff	Erläuterung
BOL	„Begin of Life“ (nutzbare Kapazität der Batterie zu Beginn der Nutzung)
BÜ	Bahnübergang
DC	Gleichstrom
dUw	Dezentrales Unterwerk
EOL	„End of Life“ (nutzbare Kapazität der Batterie am Lebensende)
EVNO	Expressverkehr Nordostbayern
Fabel	Simulationssoftware der Enotrac AG (siehe auch Kapitel 3.6.1)
Fahrleitung	Leitersystem zur Versorgung von Fahrzeugen mit elektrischer Energie über Stromabnahmeeinrichtungen
Fahrzeugumlauf	Fahrt eines Fahrzeugs vom Start-Betriebspunkt bis zum End-Betriebspunkt einer Linie und wieder zurück.
Fz	Fahrzeug
Hbf	Hauptbahnhof
HBU	Hilfsbetriebe-Umrichter
HOAI	Honorarordnung für Architekten und Ingenieure
HLK	Heizungs-, Lüftungs- und Klimageräte
HVZ	Hauptverkehrszeit
LS	Ladestation
NT	Neigetechnik
NV	Nichtverfügbarkeit
NVZ	Nebenverkehrszeit
OBL	Oberleitung
SGV	Schienengüterverkehr
SOC	„State of Charge“ (Füllstand der Batterie)
SPFV	Schienenpersonenfernverkehr
SPNV	Schienenpersonennahverkehr
SU	Streckenunterführung
RVOF	Regionalverkehr Oberfranken
Technische Fahrzeit	Zuschlagsfreie notwendige minimale reine Fahrzeit, während welcher der Zug in Bewegung ist (Geschwindigkeit grösser 0 km/h)
$U_{\text{mean useful}}$	Mittlere nutzbare Spannung am Stromabnehmer (Definition nach EN 50388-1 [31])
Urw	Umrichterwerk
Uw	Unterwerk
Viriato	Simulationssoftware der SMA und Partner AG (siehe auch Kapitel 3.6.2)
XEMU	Elektrisch angetriebene Hybridtriebzüge mit Pantographen für fahrleitungsgebundenen Betrieb sowie mit Wasserstoff betriebenen Brennstoffzellen und Traktions- wie auch Zwischenspeicherbatterien für fahrleitungsungebundenen Betrieb.

Tabelle 3-2: Übersicht der Abkürzungen und Begriffe

3.5 Referenzen

3.5.1 Grundlegendokumente

- [1] Leistungsbeschreibung Machbarkeitsstudie Oberfranken aus den Ausschreibungsunterlagen, Landkreis Kulmbach mit Stand 24.04.2023
- [2] Infrastrukturdaten zu allen DB-Strecken im Untersuchungsraum, erworben bei der DB Netz AG und erhalten am 21.09.2023
- [3] VzG für die Strecke Bayreuth – Weidenberg, erhalten von der Bayerischen Regionaleisenbahn GmbH am 4.12.2023
- [4] Infrastrukturdaten zu den Strecken im tschechischen Teil des Untersuchungsraums, C10300(C)_U_85200_A211061001_1.pdf, C10400(K)_U_85200_A204021001_1.pdf und R10200(R)_U_85200_A221021001_1.pdf, erhalten am 27.11.2023 und am 08.12.2023 von Správa železnic
- [5] Streckenspeiseplan 15-kV Zes Süd (München) Bereich Nord, „Speisung der OL Süd-2023_Juli Bestand_A.dwg“, DB Netz, EknY 10000-Süd, erhalten am 13.11.2023 von DB Energie
- [6] Streckenspeiseplan Auszug aus «Speisung der OL-Süd - 2023» (aktueller Arbeitsstand am 09.02.2023), erhalten am 29.09.2023 von DB Energie
- [7] Speisebezirksliste Nürnberg 2023, erhalten am 13.11.2023 von DB Energie
- [8] Datenblatt zu Leiterseil BayEnergy® Al-Seil für Freileitungen Typ AL1, Bayka
- [9] Daten zum Mittelspannungskabel N2XS2Y, DB Energie
- [10] Zulässige Strombelastung für Regelfahrleitung nach Bauart Re 100 und Re 200, Dokument: Re100-Re200mod,100K,1Gleismit Grafik.xls, DB Energie
- [11] Angaben zu den geplanten Ausbauprojekten der DB Netz AG, «Diagramme 2023_10-12.pptx» erhalten von DB Netz AG am 30.10.2023
- [12] Unterlagen zum Unterwerk Jindřichov, «TT Jindřichov - transformers.xls» und «Map of TS.pdf» erhalten am 08.12.2023 von Správa železnic
- [13] Uw-Belastung 2022 im Untersuchungsgebiet Nordfranken, vom 15.11.2023 von DB Energie
- [14] Anschluss Ladestation beim Bahnhof Münchberg, E-Mail von Stadtwerke Münchberg, vom 06.05.2024
- [15] Anschluss Ladestation beim Bahnhof Bad Steben, E-Mail von Bayernwerk Netz GmbH, vom 24.05.2024
- [16] Anschluss Ladestation beim Bahnhof in Weiden, E-Mail von Bayernwerk Netz GmbH, vom 06.06.2024
- [17] Anfrage zu Ladestationen in den Bahnhöfen Weiden und Neustadt, E-Mail von Bayernwerk Netz GmbH, vom 12.06.2024

3.5.2 Dokumente Enotrac / SMA / hynes

- [18] ECH-541.01-103 Anhang A1 – Analyse der Teilstrecken, Enotrac AG
- [19] ECH-541.01-104 Anhang A2 – Ergebnisse zu den Netzsimulationen, Enotrac AG
- [20] ECH-541.01-105 Anhang A3 – Bildfahrpläne und Netzgrafik, SMA und Partner AG
- [21] ECH-541.01-106 Anhang A4 – Grafiken Wasserstoffinfrastruktur, hynes GmbH
- [22] ECH-541.01-202 Festlegung Fahrzeugeinsatz basierend auf Kapazitätsanforderungen; gemeinsam mit dem Auftraggeberkreis und der BEG festgelegt am 10.10.2023; Enotrac AG
- [23] ECH-541.01-100 Grundlegendenbericht zur vorliegenden Studie; Enotrac AG

3.5.3 Weitere Dokumente / Unterlagen

- [24] „Akkuhybridfahrzeuge Bayerwald“: Untersuchung zu den technischen Voraussetzungen eines Einsatzes von Akkuhybridfahrzeugen im Netz „Bayerwald“, 2022-618350-659.0, 19.12.2022, TU Dresden; c/o IFB Institut für Bahntechnik GmbH
- [25] 2021-EB-003_Elektrifizierungsstudie-Nordostbayern; Bahnstrom Gutachten für Nordostbayern vom 15.06.2021, TU Dresden
- [26] Machbarkeitsstudie zum Einsatz von H2- und Akkuhybridzügen im Allgäu und dem westlichen Oberbayern von Enotrac AG, SMA und Partner AG und hynes GmbH

3.5.4 Normen / Richtlinien

- [27] EN 50119:2020 – Bahnanwendungen – Ortsfeste Anlagen – Oberleitungen für die elektrische Zugförderung
- [28] EN 50163:2004 – Bahnanwendungen – Speisespannungen von Bahnnetzen
- [29] EN 50328:2003 – Bahnanwendungen – Ortsfeste Anlagen – Leistungselektronische Stromrichter für Unterwerke
- [30] EN 50329 2003 – Bahnanwendungen – Ortsfeste Anlagen – Bahn-Transformatoren
- [31] EN 50388:2012 – Bahnanwendungen – Bahnenergieversorgung und Fahrzeuge – Technische Kriterien für die Koordination zwischen Anlagen der Bahnenergieversorgung und Fahrzeugen zum Erreichen der Interoperabilität
- [32] EN 50367:2020 – Bahnanwendungen – Ortsfeste Anlagen und Fahrzeuge – Kriterien zur Erreichung der technischen Kompatibilität zwischen Dachstromabnehmern und Oberleitung

3.6 Beschreibung eingesetzte Simulations-Tools

3.6.1 Fabel



Fabel ist ein von Enotrac AG entwickeltes Softwarepaket, das der Betriebssimulation fahrleitungsgebundener Verkehrssysteme (Bahnen, Tram, Trolleybusse) dient. Dabei wird ein fahrplanmäßiger Betrieb in Wechselwirkung mit dem überlagerten Wechsel- oder Gleichstromnetz während einem gewünschten Zeitraum simuliert. Das Netz kann stark vermascht sein und von einer praktisch beliebigen Anzahl Züge gleichzeitig befahren werden.

Die Hauptanwendungen von Fabel sind die Auslegung von neuen Stromversorgungen und Fahrleitungsanlagen, die Optimierung bestehender Anlagen, Planung von Umbauten, Dimensionierung von Fahrzeugen, Evaluation von Energiesparmaßnahmen sowie die Auslegung von Schutzeinstellungen. Das elektrische Netz in Fabel erlaubt zudem das Ermitteln von Kurzschlussströmen an beliebigen Kurzschlussorten.

Für die Fahrsimulation werden im Modell Parameter zur Strecke (Steigungen, Gefälle, Kurven, Tunnel, Stationen, Signalisierung), zum elektrischen Netz, zu den Fahrzeugen (Zug-/Bremskraftcharakteristiken, Massenverteilung über die Zuglänge, Fahrwiderstände, Eigenbedarf usw.) und zum Betrieb (Fahrplan, Passagierzuladung) im Detail berücksichtigt. Mit einer überlagerten Begrenzung der maximalen Beschleunigung, Verzögerung und des Rucks sowie einer Kollisionsschutzfunktion wird eine wirklichkeitsnahe Fahrweise erreicht. All dies gestattet ein realistisches Abbild des zu untersuchenden Systems.

Fabel ermittelt aufgrund der Modelldaten die Stromflüsse und die effektiven Spannungen im Netz (Fahrleitungsabschnitte, Verbindungsleitungen, Lastschalter, Unterwerke, Energiespeicher) als Funktion der Zeit. Der momentane Ort und der Leistungsbedarf der fahrenden Züge werden zu jedem Zeitpunkt berücksichtigt. Nebst normalen Spannungs- oder Stromquellen können ebenfalls Energiespeicher oder steuerbare Quellen (Umrichter) eingesetzt werden. Da sich Strom und Spannung gegenseitig beeinflussen, arbeitet der Algorithmus mit einem komplexen Iterationsprozess. Fabel ist für die Simulation von Wechselstromsystemen ebenso geeignet wie für Gleichstromsysteme. Bei Letzteren kann entweder nur das Gleichstromnetz oder zusätzlich auch das speisende Wechselstromnetz modelliert werden. Bei Wechselstromnetzen kann Fabel sowohl für die Simulation von 1-Phasen- als auch 3-Phasen-Systemen oder auch für Fahrstromversorgungen mit Autotransformatoren eingesetzt werden.

Fabel bietet zudem die Möglichkeit, in der Fahrsimulation die Streckensignalisierung respektive das Zugsicherungssystem abzubilden. Dabei können konventionelle, streckenseitige Lichtsignale als auch dynamische Blockabschnitte (Fahren im relativen Bewegungsabstand, ETCS Level 3) modelliert werden. Dies ermöglicht in den Simulationen die Berücksichtigung eines realistischen Betriebs, aber auch die Untersuchung und Optimierung bestehender oder neuer Signalisierungskonzepte.

Mit dem Modul OptiDrive von Fabel können für gegebene Fahrpläne energieoptimierte Fahrprofile ermittelt werden. Dabei werden aufgrund der vorhandenen Fahrzeitreserven in Abhängigkeit der Streckenbedingungen (wie Stationen, Streckengeschwindigkeit, Steigungen/Gefälle) und der Zugsgattung die optimale Reisegeschwindigkeit ermittelt sowie Abschnitte definiert, bei welchen die Züge ohne Zugkraft fahren sollen (Ausrollen / Coasting).

Im simulierten Netz lassen sich an beliebigen Orten Strom und Spannung zeitabhängig auswerten und grafisch darstellen. Bei den Fahrzeugen können nebst Spannung und Strom weitere Angaben zum Fahrverhalten zeit- und ortsabhängig ausgewertet werden. Unter Berücksichtigung der gegebenen

Leitergeometrie, Materialdaten und Umweltparameter (Umgebungstemperatur, Windgeschwindigkeit, Sonneneinstrahlung) können direkt aus Fabel auch die für Fahrdrähte und Leiterseile resultierenden Temperaturverläufe berechnet werden. Fabel löst die nichtlinearen Gleichungen des Wärmeübergangs numerisch. Dabei wird die Wärmeabhängigkeit des elektrischen Widerstandes des Leiters ebenso berücksichtigt wie die vom momentanen Arbeitspunkt abhängige Zeitkonstante der Erwärmung und Abkühlung.

Alle Modelldaten und Resultate sind in einer relationalen Datenbank vorhanden. Damit ist einerseits die lückenlose Rückverfolgung der Simulationen gewährleistet. Andererseits sind die Resultate schnell und in beliebigen Kombinationen für die Auswertungen abrufbar. Eine auf die jeweilige Aufgabenstellung angepasste Auswertung ist daher einfach realisierbar.

Fabel ist durch mehrere Vergleichsmessungen mit realen Stromversorgungsanlagen und Zugfahrten validiert worden und wird von Enotrac seit über 30 Jahren in Projekten weltweit eingesetzt. Fabel wurde und wird weiterhin durch ein Team von Enotrac -Spezialisten ständig den neuen Bedürfnissen und dem Stand der Technik angepasst. Weiter wurde Fabel von der benannten Stelle SCORAIL zertifiziert, was die gute Übereinstimmung zwischen Simulationsergebnissen und Messungen in DC-, AC- und 2x25 kV-Netzen bescheinigt. Fabel war außerdem eines der Referenz-Tools bei der Erarbeitung der neuen Norm EN 50641:2020 (Anforderungen für die Validierung von Simulationsprogrammen für die Auslegung von Bahnenergieversorgungssystemen).

3.6.2 Viriato

Die von SMA entwickelte Software-Lösung Viriato ist ein Planungssystem, das von den ersten strategischen Überlegungen bis hin zum täglichen Betrieb sämtliche Stufen der Fahrplanplanung abdeckt. Dank seiner funktionalen Breite und Vielseitigkeit hat sich Viriato als fester Bestandteil der Fahrplanplanung bei über 100 Unternehmungen in 17 Ländern etabliert.

Die angebotsorientierte Methodik erlaubt eine Planung vom Groben ins Detail: Planungstiefe und Detailgrad entsprechen stets der aktuellen Aufgabenstellung. So kann der Anwender Ideen und Angebotskonzepte entwickeln, ohne von vornherein die unzähligen Rahmenbedingungen des vorhandenen Netzes berücksichtigen zu müssen.

- **Strategische Planung:** Bereits anhand von groben Basisdaten lassen sich mit Viriato Fahrzeiten abschätzen, Fahrplanentwürfe erstellen und das notwendige Rollmaterial ermitteln. Verschiedene Konzeptvarianten können bequem miteinander verglichen werden, um den bestmöglichen Fahrplan zu erarbeiten.
- **Kapazitätsplanung:** Mit dem Fortschreiten des Planungsprozesses werden die Modelle in Viriato laufend präzisiert und die Daten zwischen den Projektbeteiligten ausgetauscht.
- **Betriebsplanung:** Viriato wird auch eingesetzt, um Tagesfahrpläne für Verkehrsunternehmen und Infrastrukturbetreiber zu erstellen.

Viriato eignet sich insbesondere für die Entwicklung integraler Taktfahrpläne, denn zu diesem Zweck wurde die Software ursprünglich entwickelt. Eine ihrer größten Stärken ist, dass sie große Datenmengen von ganzen Eisenbahnnetzen beherrscht. Damit lassen sich die Kapazitäten der Schieneninfrastruktur netzweit optimieren und kosteneffiziente Strategien zur Beseitigung von Engpässen ermitteln.

4 ÜBERSICHT ZU DEN REFERENZFAHRZEUGEN

Für vorliegendes Gutachten wurden in Abstimmung mit dem projektbegleitenden Arbeitskreis zwei Referenzfahrzeuge definiert. Ein Fahrzeugtyp für den Regionalverkehr Oberfranken und ein Fahrzeugtyp für den Expressverkehr Nordostbayern mit Neigetechik. Die Daten für das Fahrzeug für das RVOF-Netz basieren auf Angaben von vier verschiedenen Herstellern von Akkuhybridzügen. Das verwendete Fahrzeugmodell ist somit fiktiv, jedoch angelehnt an realen Fahrzeugen, dabei aber möglichst herstellernerutral. Für das Neigetechik-Fahrzeug wurde basierend auf Aussagen nur eines Herstellers von Neigetechikfahrzeugen ein fiktives Modell erstellt, da ein solches trimodales Fahrzeug heute noch gar nicht existiert und auch nur ein Hersteller bekannt ist, der ein solches Fahrzeug plant. In nachfolgender Tabelle sind die Kenngrößen zusammengefasst dargestellt. Mehr Informationen sind im Grundlegendatenbericht [23] zu finden.

Kenngrößen	BEMU 45	NT-XEMU-70	Einheit
Verkehr	RVOF	EVNO	
Länge über Puffer	45	70	m
Zugelassene Höchstgeschwindigkeit	160	160	km/h
Neigetechik	nein	ja	
Max. Beschleunigung	1	1	m/s ²
Max. Ruck	0.8	0.8	m/s ³
Leermasse	91	157	t
Simulationsmasse	100	170	t
Anzahl der Sitzplätze	120	180	
Zuschlag rotierende Masse	5	8.5	t
Systemspannung	15 / 25	15	kV
Frequenz	16.7 / 50	16.7	Hz
Wirkungsgrad des Traktionsstrangs ab OBL	86	86	%
Wirkungsgrad des Traktionsstrangs ab Batterie	88	88	%
Leistung Hilfsbetriebe Zugförderung	20	20	kW
Leistung Hilfsbetriebe Komfort	90	140	kW
Batteriekapazität nutzbar EOL	350	300	kWh
Max. Lade- / Entladeleistung	1300	2000	kW
Max. Antriebsleistung	1000	1500	kW
Max. Zugkraft Traktion	100	180	kN
Bremsleistung	1300	2000	kW
Max. Bremskraft	100	150	kN
Statische Oberstrombegrenzung (im Stillstand, Annahme 1 Stromabnehmer)	80	80	A

Kenngrößen	BEMU 45	NT-XEMU-70	Einheit
Anzahl Brennstoffzellen	-	2	
Betriebsdruck	-	350	bar
Max. Betankungsgeschwindigkeit	-	15	kg/min
Max. Leistung Brennstoffzelle	-	800	kW
Mittlerer Wirkungsgrad Brennstoffzelle	-	55	%
Anzahl H ₂ -Tanks	-	1	
Tank-Typ	-	IV	
H ₂ -Menge	-	300	kg

Tabelle 4-1: Übersicht zu den Kenndaten der zwei berücksichtigten Referenzfahrzeugen.

Anmerkungen zu Tabelle: Basierend auf Aussagen eines Fahrzeugherstellers von Wasserstoffzügen darf der mittlere Wirkungsgrad der Brennstoffzelle im Bereich von 50 – 60 % angenommen werden. Vereinfacht wurde von 55 % ausgegangen.

5 BESCHREIBUNG DER LINIEN UND STRECKEN

5.1 Übersicht

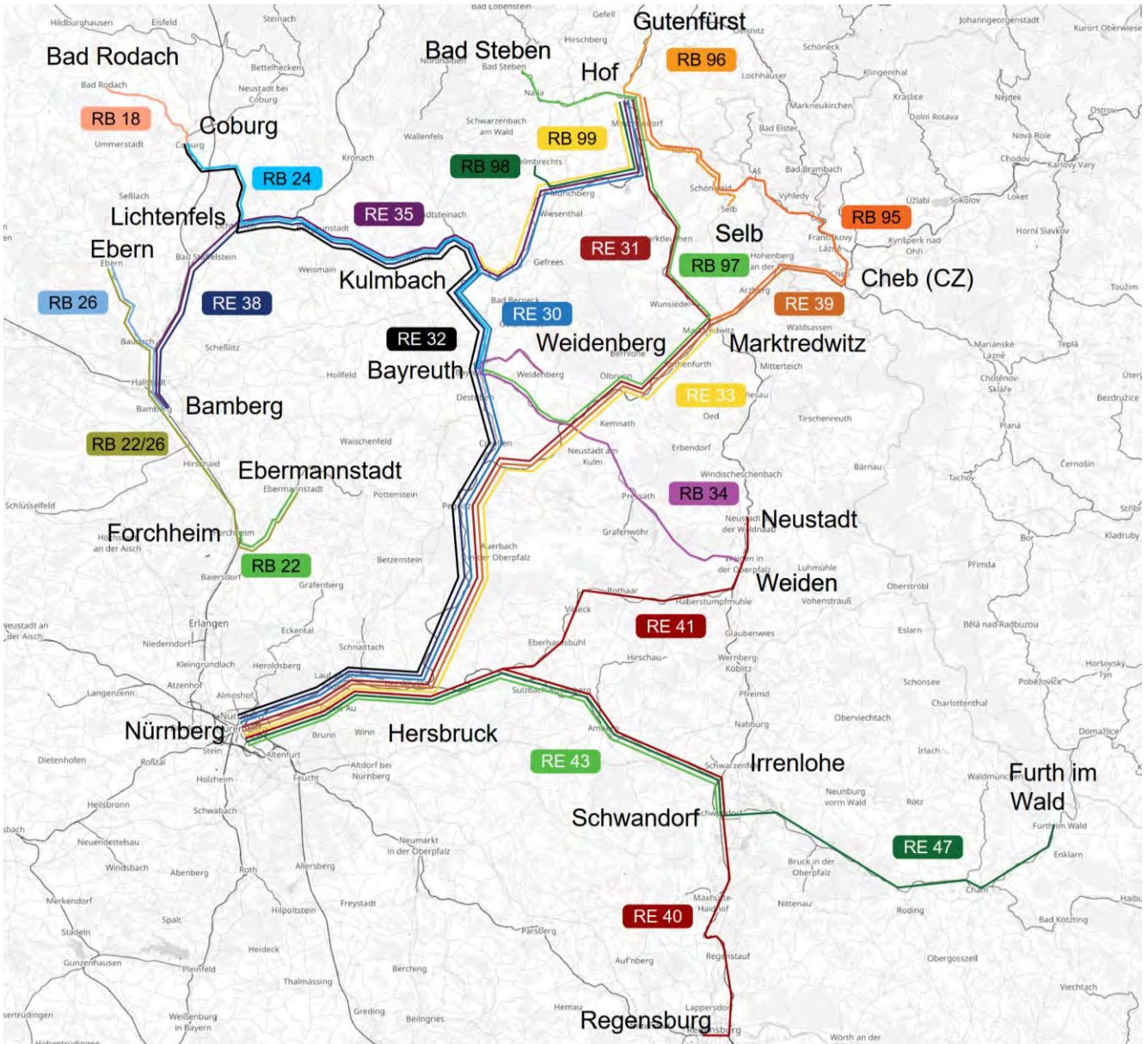


Abbildung 5-1: Übersicht zu den betrachteten Linien im Expressverkehr Nordostbayern (EVNO) und im Regionalverkehr Oberfranken (RVOF). Die Linien im EVNO sind als Regionalexpress (RE) gekennzeichnet. Die Linien im RVOF als Regionalbahn (RB).

Gemeinsam mit dem projektbegleitenden Arbeitskreis wurde unter Berücksichtigung der Kapazitätsanforderungen für die einzelnen Linien der nachfolgende Fahrzeugeinsatz für den Expressverkehr Nordostbayern Tabelle 5-1 (alle Züge mit NT-XEMU) und für den Regionalverkehr Oberfranken in Tabelle 5-2 (alle Züge mit BEMU 45) festgelegt. Das Angebotskonzept entspricht dabei grundsätzlich den beiden Ausschreibungsnetzen EVNO und RVOF.

5.2 Expressverkehr Nordostbayern (EVNO)

Linie	Abschnitt	Anzahl Fz pro Zug	Resultierende Kapazität	Bemerkungen	
RE 30 Nürnberg – Bayreuth – Hof	Nürnberg - Pegnitz	3	540	Flügelung mit RE 31 in Pegnitz	
	Pegnitz - Bayreuth - Hof	2	360		
RE 31 Nürnberg – Marktredwitz – Hof	Nürnberg - Pegnitz	3	540	Flügelung mit RE 30 in Pegnitz	
	Pegnitz - Marktredwitz	2	360		
	Marktredwitz - Hof	1	180		Flügelung mit RE 39 in Cheb
RE 32 Nürnberg – Bayreuth – Coburg	Nürnberg - Hersbruck	3	540	Flügelung mit RE 43 in Hersbruck (nur in Richtung Bayreuth – Coburg)	
	Hersbruck - Bayreuth	2	360		
	Bayreuth - Neuenmarkt-Wirsberg	1	180		
	Neuenmarkt-Wirsberg - Lichtenfels	2	360		Vereinigen mit RE 35 in Neuenmarkt
	Lichtenfels - Coburg	1	180		Flügelung mit RE 35 in Lichtenfels
RE 33 Nürnberg – Marktredwitz	Nürnberg - Pegnitz	3	540	Flügelung mit RE 30 in Pegnitz	
	Pegnitz - Marktredwitz	1	180		
RE 35 Bamberg – Hof	Bamberg - Lichtenfels	1	180	Vereinigen mit RE 32 in Lichtenfels	
	Lichtenfels - Neuenmarkt-Wirsberg	2	360		Flügelung mit RE 35 in Neuenmarkt
	Neuenmarkt-Wirsberg - Hof	1	180		
RE 38 Nürnberg – Bayreuth – Bamberg	Nürnberg - Hersbruck	3	540	Flügelung mit RE 43 in Hersbruck (nur in Richtung Bayreuth – Bamberg)	
	Hersbruck - Bayreuth	2	360		
	Bayreuth - Bamberg	1	180		
RE 39 Nürnberg – Marktredwitz – Cheb (CZ)	Nürnberg - Pegnitz	3	540	Flügelung mit RE30 in Pegnitz	

Linie	Abschnitt	Anzahl Fz pro Zug	Resultierende Kapazität	Bemerkungen
	Pegnitz - Marktredwitz	2	360	Flügelung mit RE31 in Marktredwitz
	Marktredwitz - Cheb	1	180	
RE 40 Nürnberg – Regensburg	Nürnberg - Neukirchen	3	540	Flügelung mit RE41 in Neukirchen
	Neukirchen - Schwandorf	2	360	
RE 41 Nürnberg – Neustadt (Waldnaab)	Schwandorf - Regensburg	3	540	
	Nürnberg - Neukirchen	3	540	Flügelung mit RE40 in Neukirchen
RE 43/47 Nürnberg – Schwandorf (– Furth im Wald)	Neukirchen - Neustadt (Waldnaab)	1	180	
	Nürnberg - Hersbruck	3	540	In Fahrtrichtung Schwandorf Flügelung in Hersbruck mit RE32 und RE38
RE 47 Nürnberg – Schwandorf (– Furth im Wald)	Hersbruck - Schwandorf	1	180	In Gegenrichtung eigenständige Führung via links Pegnitz
	Schwandorf – Furth im Wald	1	180	Nur Einzellagen

Tabelle 5-1: Einsatzplan für den Expressverkehr Nordostbayern mit dem Referenzfahrzeug NT-XEMU-70 (Details zum Fahrzeugmodell in Kapitel 3.6)

5.3 Regionalverkehr Oberfranken (RVOF)

Linie	Abschnitt	Anzahl Fz pro Zug	Resultierende Kapazität	Bemerkungen
RB 18 Coburg – Bad Rodach		2	260	
RB 22 Forchheim – Ebermannstadt		2	260	
RB 24 Coburg – Bayreuth		2	260	
RB 26 Bamberg – Ebern		2	260	
RB 34 Weidenberg – Weiden		2	260	
RB 95 Hof – Cheb (CZ) – Marktredwitz	Hof - Selb-Plößberg	2	260	Flügelung mit RB96 in Selb-Plößberg
	Selb-Plößberg - Marktredwitz	1	130	
RB 96 Hof-Neuhof – Selb Stadt	Hof – Selb-Plößberg	2	260	Flügelung mit RB 95 in Selb-Plößberg
RB 96 Hof-Neuhof – Selb Stadt	Selb-Plößberg – Selb Stadt	1	130	
RB 96 Gutenfürst – Rehau (HVZ)		1	130	
RB 97 Bayreuth – Marktredwitz – Bad Steben		2	260	
RB 98 Helmbrechts – Hof		1	130	
RB 99 Hof-Neuhof – Neuenmarkt-Wirsberg		1	130	RB 99 wird auf RB 96 in Hof-Neuhof durchgebunden

Tabelle 5-2: Einsatzplan für den Regionalverkehr Oberfranken mit dem Referenzfahrzeug BEMU 45 (Details zum Fahrzeugmodell in Kapitel 3.6)

5.4 Beschreibung der definierten Teilstrecken

Zur Erarbeitung der Speisekonzepte wurde das heutige noch nicht elektrifizierte Streckennetz im Untersuchungsraum der vorliegenden Studie in einzelne Teilstrecken unterteilt, wobei sich die Unterteilung nach potenziell möglichen Elektrifizierungsmaßnahmen richtet. Dabei wurden Teilstrecken, welche zu den zu untersuchenden Zeiträumen 2035 und 2040 sowieso elektrifiziert werden sollen, explizit ausgeklammert. Im Anhang 1 [18] wird zu den Teilstrecken, für welche die Maßnahme Errichtung der Oberleitung konkret untersucht wurde, näher auf die für eine Ausrüstung mit Oberleitung hinsichtlich Kosten maßgebenden Gegebenheiten der Teilstrecke eingegangen (z.B. lange Brücken, Tunnel, Straßenüberführungen etc.). Diese erfassten Daten bilden unter anderem die Basis für das Mengengerüst, welches der Kostenkalkulation der Bahnstromanlagen zu Grunde gelegt wurde.

Die Teilstrecken wurden nach den folgenden Kriterien analysiert:

- Situation bei den Bahnhöfen entlang der Teilstrecken: Es sind Gleise zu elektrifizieren und damit verbunden, Anpassungen an den Sicherungsanlagen und dem Erdungs- und Rückleitungssystem der Bahn notwendig.
- Anzahl Bahnübergänge (BÜ): eine Elektrifizierung bedingt bei Bahnübergängen eine Anpassung der Sicherungsanlagen sowie eine Anbindung an die Erdung und Rückleitungssystem der Bahn.
- Kreuzungsstellen / Doppelspurabschnitt (bei Einspurstrecken): zusätzliches Gleis ist zu elektrifizieren. Es sind zudem Anpassungen der Sicherungsanlagen sowie eine Anbindung an die Erdungs- und Rückleitungssystem der Eisenbahn (oder eine Anpassung des bestehenden Erdungs- und Rückleitungssystems) notwendig.
- Längere Brücken oder Straßenunterführungen (SU): bei Bauwerkslängen grösser einer Abspannlänge (~50 m) sind Masten auf den Bauwerken selbst notwendig, was aufwändiger zu errichten ist als auf der normalen Strecke.
- Überführungen (über die Eisenbahnstrecke, wie für Straßenverkehr oder Personen): unter Umständen ist hier die Höhe zwischen Gleis und Bauwerk begrenzt, was eine teurere Sonderkonstruktion beim Bau der Oberleitung bedingt.
- Tunnel: bei Tunneln sind die Baukosten für die Oberleitung höher als auf freier Strecke.

ID	Strecke (DB-Nummer)	von km	bis km	Streckenlänge [km]	Anzahl Gleise
1	Hochstadt-Marktzeuln - Mainleus (5100)	40.164	56.620	16.5	2
2	Mainleus - Kulmbach (5100)	56.620	61.977	5.4	2
3	Kulmbach - Untersteinach (5100)	61.977	68.307	6.3	2
4	Untersteinach - Neuenmarkt-Wirsberg (5100)	68.307	74.362	6.1	2
5a	Neuenmarkt-Wirsberg - Marktschorgast (5100)	74.362	81.823	7.5	2
5b	Trebgast - Neuenmarkt-Wirsberg (5051)	73.729	78.485	4.8	1
5c	Neuenmarkt-Wirsberg Süd - Neuenmarkt-Wirsberg Ost (5007)	0.000	0.732	0.7	1
6	Bayreuth - Trebgast (5051)	58.054	73.729	15.7	1
7	Kirchenlaibach - Bayreuth (5051)	39.284	58.054	18.8	1
8	Marktschorgast - Stammbach (5100)	81.823	93.050	11.2	1

ID	Strecke (DB-Nummer)	von km	bis km	Streckenlänge [km]	Anzahl Gleise
9	Stammbach - Münchberg (5100)	93.050	102.971	9.9	2
10	Münchberg - Seulbitz (5100)	102.971	109.559	6.6	2
11	Seulbitz - Oberkotzau (5100)	109.559	121.615	12.1	2
12	Rehau - Oberkotzau (5027)	46.259	54.504	8.2	1
13	Hof - Rothenbürg (5021)	1.038	13.076	12.0	1
14	Neukirchen - Freihung (5060)	0.000	29.450	29.5	1
15	Freihung - Weiden (5060)	29.450	51.514	22.1	1
16	Altenstadt - Neustadt a.d. Waldnaab	0.000	1.02	1.02	1
17	Weiden - Pressath (5051)	0.000	20.819	20.8	1
18	Pressath - Kirchenlaibach (5051)	20.819	39.284	18.5	1
19	Bayreuth - Weidenberg	0.000	14.296	14.3	1
20	Frantiskovy-Lazne - Selb-Plößberg	0.000	30.323	30.3	1
21	Selb-Plößberg – Selb-Stadt (5033)	0.000	3.561	3.6	1
22	Selb-Plößberg - Rehau (5027)	34.823	46.259	11.4	1
23	Rothenbürg - Bad Steben (5021)	13.076	26.993	13.9	1
24	Münchberg - Helmbrechts (5025)	0.000	9.314	9.3	1
25	Coburg - Bad Rodach (5122)	0.000	17.650	17.7	1
26	Breitengüßbach - Ebern (5104)	0.000	17.678	17.7	1
27	Forchheim - Ebermannstadt (5113)	0.000	14.765	14.8	1

Tabelle 5-3: Übersicht der Unterteilung in Teilstrecken (siehe auch Karte in nachfolgender Abbildung)

Anmerkungen zur Tabelle:

- Die Kilometerangaben „von“ und „bis“ beziehen sich auf die Modellierung
- Der Begriff Streckenlänge orientiert sich an der Kilometrierungsachse einer Strecke.
- Die Distanz ist in obiger Tabelle unter Vernachlässigung allfälliger Kilometersprünge ausgewiesen. Im Simulationsmodell wurden Kilometersprünge jedoch berücksichtigt (dokumentiert in [23]).
- Die Nummerierung der ID's ist grundsätzlich zufällig. Die Teilstrecke mit der ID 5 wurde im Verlauf der Untersuchungen detaillierter aufgeteilt, weshalb die kurzen Streckenabschnitte dort nun mit 5a, 5b und 5c bezeichnet werden. In der Grafik unten ist das Gleis-Dreieck bei Neuenmarkt-Wirsberg zudem etwas vereinfacht dargestellt.

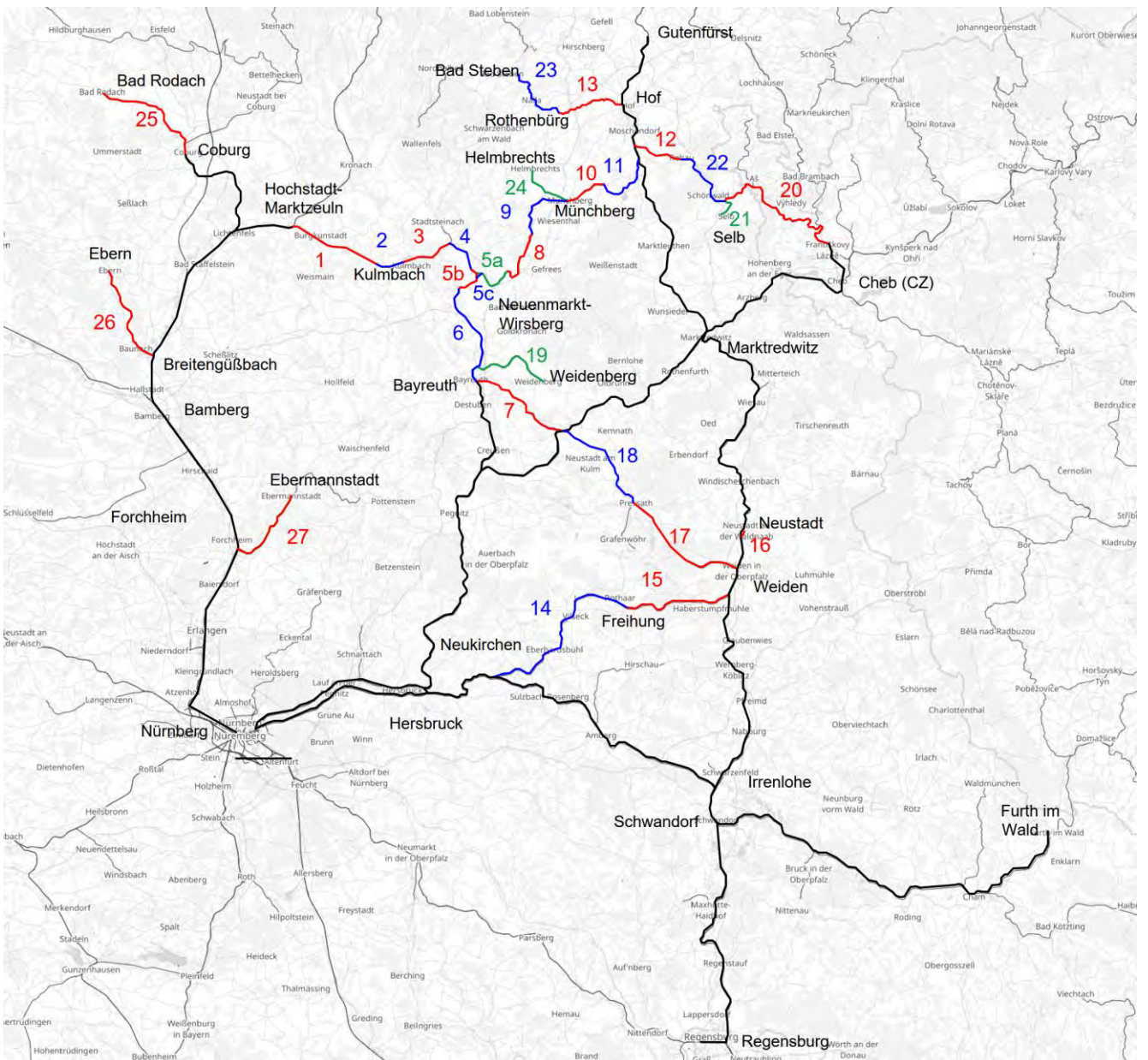


Abbildung 5-2: Übersicht der definierten Teilstrecken, farbig hervorgehoben, mit Bezug auf die Teilstrecken-ID gemäß vorangehender Tabelle; Schwarz dargestellt sind die heute bereits elektrifizierten oder die in den Zeithorizonten 2035 und 2040 als elektrifiziert zu unterstellenden Strecken im Betrachtungsperimeter. (Die hinterlegte Karte stammt von OpenRailwayMap <https://www.openrailwaymap.org/>).

5.5 Zuordnung der einzelnen Linien zu den Teilstrecken

Nachfolgende Tabelle zeigt eine Zuordnung der untersuchten Teilstrecken zu den betrachteten betrieblichen Linien. Wichtig zum Verständnis: Es sind nur Teilstrecken aufgeführt, welche in den Zeithorizonten 2035 und 2040 als potenzielle Elektrifizierungsmaßnahme in Frage kommen. So hat zum Beispiel die RE31 keine zugehörige Teilstrecke (kein Kreuzchen), weil sie im Zeithorizont 2040 ausschließlich unter bereits vollständig elektrifizierter Infrastruktur verkehrt.

ID	Teilstrecke / Maßnahme	Anzahl Linien pro Teilabschnitt	RE30 Nürnberg – Bayreuth – Hof	RE31 Nürnberg – Marktredwitz – Hof	RE32 Nürnberg – Bayreuth – Coburg	RE33 Nürnberg – Marktredwitz	RE35 Bamberg – Hof	RE38 Nürnberg – Bayreuth – Bamberg	RE39 Nürnberg – Cheb (CZ)	RE40 Nürnberg – Regensburg	RE41 Nürnberg – Neustadt (Waldnaab)	RE43 Nürnberg – Schwandorf	RE47 Nürnberg – Furth im Wald	RB 18 Coburg – Bad Rodach	RB 22 Forchheim – Ebermannstadt	RB 24 Coburg – Bayreuth	RB 26 Bamberg – Ebern	RB 34 Weidenberg – Weiden	RB 95 Hof – Marktredwitz	RB 96 Hof-Neuhof – Selb Stadt	RB 97 Bayreuth – Bad Steben	RB 98 Helmbrechts – Hof	RB 99 Hof-Neuhof – Neuenmarkt-Wirsberg	
1	Hochstadt-Marktzeuln - Mainleus	4			X		X	X								X								
2	Mainleus - Kulmbach	4			X		X	X								X								
3	Kulmbach - Untersteinach	4			X		X	X								X								
4	Untersteinach - Neuenmarkt-Wirsberg	4			X		X	X								X								
5a	Neuenmarkt-Wirsberg - Marktschorgast	3	X				X																X	
5b	Trebgast - Neuenmarkt-Wirsberg	4	X		X			X								X								
5c	Neuenmarkt-Wirsberg Süd - Neuenmarkt-Wirsberg Ost	1	X																					

ID	Teilstrecke / Maßnahme	Anzahl Linien pro Teilabschnitt	RE30 Nürnberg – Bayreuth – Hof	RE31 Nürnberg – Marktredwitz – Hof	RE32 Nürnberg – Bayreuth – Coburg	RE33 Nürnberg – Marktredwitz	RE35 Bamberg – Hof	RE38 Nürnberg – Bayreuth – Bamberg	RE39 Nürnberg – Cheb (CZ)	RE40 Nürnberg – Regensburg	RE41 Nürnberg – Neustadt (Waldnaab)	RE43 Nürnberg – Schwandorf	RE47 Nürnberg – Furth im Wald	RB 18 Coburg – Bad Rodach	RB 22 Forchheim – Ebermannstadt	RB 24 Coburg – Bayreuth	RB 26 Bamberg – Ebern	RB 34 Weidenberg – Weiden	RB 95 Hof – Marktredwitz	RB 96 Hof-Neuhof – Selb Stadt	RB 97 Bayreuth – Bad Steben	RB 98 Helmbrechts – Hof	RB 99 Hof-Neuhof – Neuenmarkt-Wirsberg	
6	Bayreuth - Trebgast	4	x		x			x								x								
7	Kirchenlaibach - Bayreuth	2																x			x			
8	Marktschorgast - Stambach	3	x				x																	x
9	Stambach - Münchberg	3	x				x																	x
10	Münchberg - Seulbitz	4	x				x															x		x
11	Seulbitz - Oberkotzau	4	x				x															x		x
12	Rehau - Oberkotzau	3																	x	x				
13	Hof - Rothenbürg	1																			x			
14	Neukirchen - Freihung	1									x													
15	Freihung - Weiden	1									x													
16	Altenstadt - Neustadt	1									x													
17	Weiden - Pressath	1																x						
18	Pressath - Kirchenlaibach	1																x						
19	Bayreuth - Weidenberg	1																x						

ID	Teilstrecke / Maßnahme	Anzahl Linien pro Teilabschnitt	RE30 Nürnberg – Bayreuth – Hof	RE31 Nürnberg – Marktredwitz – Hof	RE32 Nürnberg – Bayreuth – Coburg	RE33 Nürnberg – Marktredwitz	RE35 Bamberg – Hof	RE38 Nürnberg – Bayreuth – Bamberg	RE39 Nürnberg – Cheb (CZ)	RE40 Nürnberg – Regensburg	RE41 Nürnberg – Neustadt (Waldnaab)	RE43 Nürnberg – Schwandorf	RE47 Nürnberg – Furth im Wald	RB 18 Coburg – Bad Rodach	RB 22 Forchheim – Ebermannstadt	RB 24 Coburg – Bayreuth	RB 26 Bamberg – Ebern	RB 34 Weidenberg – Weiden	RB 95 Hof – Marktredwitz	RB 96 Hof-Neuhof – Selb Stadt	RB 97 Bayreuth – Bad Steben	RB 98 Helmbrechts – Hof	RB 99 Hof-Neuhof – Neuenmarkt-Wirsberg	
20	Frantiskovy-Lazne – Selb-Plößberg	1																	X					
21	Selb-Plößberg - Selb Stadt	2																			X			
22	Selb-Plößberg - Rehau	3																	X	X				
23	Rothenbürg - Bad Steben	1																				X		
24	Münchberg - Helmbrechts	1																					X	
25	Coburg - Bad Rodach	1												X										
26	Breitengüßbach - Ebern	1															X							
27	Forchheim - Ebermannstad	1													X									

Tabelle 5-4: Zuordnung der einzelnen Linien zu den nicht elektrifizierten Teilstrecken

5.6 Umlaufplanung

Als Grundlage für die Umlaufplanung wurden bei den Neigetechnik-Linien folgenden Wendezeiten unterstellt:

- RE 30 Nürnberg – Bayreuth – Hof
 - Nürnberg: 42 Minuten (Wende aus RE 32)
 - Bayreuth: 18 Minuten (Wende auf RE 32)
 - Hof: 72 Minuten
- RE 31 Nürnberg – Marktredwitz – Hof
 - Nürnberg: 42 Minuten (Wende aus RE 38)
 - Hof: 83 Minuten
- RE 32 Nürnberg – Bayreuth – Coburg
 - Nürnberg: 43 Minuten (Wende aus RE 30)
 - Coburg: 84 Minuten
- RE 35 Bamberg – Hof
 - Bamberg: 32 Minuten (Wende aus RE 38)
 - Hof: 74 Minuten
- RE 38 Nürnberg – Bayreuth – Bamberg
 - Nürnberg: 84 Minuten (Wende aus RE 30)
 - Bamberg: 32 Minuten (Wende auf RE 35)
- RE 32 Nürnberg – Bayreuth – Coburg
 - Nürnberg: 43 Minuten (Wende aus RE 30)
 - Coburg: 84 Minuten
- RE 39 Nürnberg – Marktredwitz – Cheb
 - Nürnberg: 42 Minuten (Wende aus RE 32)
 - Cheb: 70 Minuten
- RE 40 Nürnberg – Regensburg
 - Nürnberg: 28 Minuten bzw. 88 Minuten
 - Regensburg: 69 Minuten
- RE 41 Nürnberg – Weiden – Neustadt (Waldnaab)
 - Nürnberg: 28 Minuten bzw. 88 Minuten
 - Neustadt (Waldnaab): 54 Minuten
- RE 43/47 Nürnberg – Schwandorf (– Furth im Wald)
 - Nürnberg: 42 Minuten (Wende aus RE 39)
 - Schwandorf: 68 Minuten

- RE 38 Nürnberg – Bayreuth – Bamberg
 - Nürnberg: 84 Minuten (Wende aus RE 30)
 - Bamberg: 32 Minuten (Wende auf RE 35)

Bei der Erstellung des Umlaufes wurden die HVZ-Fahrten nach Schwandorf ganztägig berücksichtigt. Zudem wurden die Kapazitätsvorgaben der BEG ebenfalls ganztägig bei allen Fahrten unterstellt.

Mit dem vorliegenden Betriebskonzept und den abgestimmten Randbedingungen werden insgesamt 47 Fahrzeuge ohne Reserve benötigt. Im Rahmen der Energieberechnungen von Enotrac hat sich jedoch gezeigt, dass für die Linien RE 40 und RE 41 eine Betankung pro Tag nicht ausreicht. Bei diesen beiden Linien wurde daher in Nürnberg eine überschlagene Wende mit einer Wendezeit von neu 88 statt 28 Minuten unterstellt. Damit erhöht sich der Umlaufbedarf auf 51 Fahrzeuge (ohne Reserve).

Aus dem Umlaufplan ergeben sich folgende Nachtabstellungen:

- Nürnberg: 16 Fahrzeuge
- Bayreuth: 4 Fahrzeuge
- Bamberg: 2 Fahrzeuge
- Lichtenfels: 2 Fahrzeuge
- Hof: 6 Fahrzeuge
- Marktredwitz: 3 Fahrzeuge
- Schwandorf: 13 Fahrzeuge
- Cheb: 1 Fahrzeug
- Weiden: 3 Fahrzeuge
- Regensburg: 1 Fahrzeug

Aus wirtschaftlichen Gründen erscheint es nicht sinnvoll, an jedem Ort wo Züge über Nacht abgestellt werden, eine Wasserstofftankstelle zu bauen. Daher wurde seitens der Gutachter vorgeschlagen, nur in Nürnberg, Bayreuth, Hof und Schwandorf eine Wasserstofftankstelle zu bauen. Diejenigen Fahrzeuge, die über Nacht in Bamberg, Lichtenfels, Marktredwitz, Cheb, Weiden und Regensburg abgestellt werden, können tagsüber an einer der vier Standorte betankt werden. Dies wurde vom projektbegleitenden Arbeitskreis unterstützt, weshalb bei der Erarbeitung eines Wasserstoffkonzepts von diesen vier Standorten ausgegangen wurde.

6 BETRACHTETE PRINZIPIEN ZUR ELEKTRIFIZIERUNG

6.1 Generell

Vorliegendes Kapitel beschreibt mögliche Maßnahmen, welche je Teilstrecke im Untersuchungsraum umgesetzt werden können, damit ein BEMU-Verkehr möglich ist. Vorab zum Verständnis aber einige Grundsätze zur Elektrifizierung von Eisenbahnen in Deutschland:

<p>Speisung ab Bahnstromnetz 110 kV (16.7 Hz):</p>	<p>Bei Speisung ab Bahnstromnetz 110 kV (16.7 Hz) wird die Spannung des 2-phasigen 110-kV-Übertragungsnetzes der DB Energie in einem Unterwerk (Uw) über Transformatoren auf die notwendige Spannung von 15 kV umgewandelt.</p> <p>Für die vorliegenden Betrachtungen im Gebiet Oberfranken bedingt der Bau von neuen Unterwerken den gleichzeitigen Ausbau des 110-kV-Bahnstromnetzes, da ein solches im betrachteten Untersuchungsraum nur teilweise existiert. Ein mögliches Ausbauszenario wurde von der TU Dresden im Rahmen eines Bahnstrom-Gutachtens untersucht [25]. Diese Erkenntnisse wurden im vorliegenden Gutachten mitberücksichtigt.</p>
<p>Speisung ab Landesnetz (50 Hz):</p>	<p>In einem Umrichterwerk (Urw) oder auch dezentralen Unterwerk (dUw) wird die Spannung des 3-phasigen Landesnetzes (Drehstrom, z.B. 110 kV oder 380 kV) der öffentlichen Netzbetreiber, welches mit der Frequenz von 50 Hz betrieben wird, auf die notwendige Frequenz 16.7 Hz und 1-phasige Spannung von 15 kV umgewandelt.</p> <p>Im klassischen Bahnnetz erfolgt diese Umformung in Deutschland über rotierende oder statische (elektronische) Frequenzumrichter.</p> <p>Diese Maßnahme ist für die vorliegende Betrachtung dahingehend relevant, da aktuell im betrachteten Streckennetz (insbesondere entlang der Oberfranken-Achse) ein 110-kV-Bahnstromnetz nur teilweise vorhanden ist und somit eine Anbindung an das im Betrachtungsraum vorhandene Landesnetz durchaus eine sinnvolle Lösung darstellt.</p>
<p>Oberleitung:</p>	<p>Die Oberleitung, bestehend aus einem Fahrdrat und einem Trageil, dient der Übertragung der elektrischen Energie vom Einspeisepunkt zum Fahrzeug (Standardoberleitung der DB, wie Regelbauart Re 100 oder Re 200⁵).</p> <p>Für das Laden von Akkuhybridfahrzeugen im Stillstand ist zu beachten, dass aufgrund des relativ hohen Übergangswiderstands zwischen Fahrdrat und Kohle eines klassischen Stromabnehmers die Stromabnahme begrenzt ist. Grund der Begrenzung ist die Gefahr von thermischer Überlastung (im Extremfall ausglühen des Fahrdrattes).</p>

⁵ Bei der DB Netz AG werden die Oberleitungssysteme nach der zugelassenen Höchstgeschwindigkeit eingeteilt. Die Abkürzung Re steht für Regeloberleitung. So wird bspw. die Re 100 für Oberleitungssysteme mit einer zugelassenen Höchstgeschwindigkeit bis 100 km/h und die Re 200 für Oberleitungssysteme mit zugelassenen Geschwindigkeiten bis 200 km/h eingesetzt.

	<p>Der zulässige Dauerstrom liegt bei 80 A pro gehobenem Stromabnehmer (EN 50367 [32]). Dies ergibt somit bei einer Spannung von 15 kV eine mögliche Ladeleistung im Stillstand von 1.2 MW pro gehobenen Stromabnehmer. Für vorliegende Studie wird von einem gehobenen Stromabnehmer ausgegangen und damit einem Ladestrom von 80 A und einer Ladeleistung von 1.2 MW im Stillstand. (Der gleiche Wert wurde auch für das Laden bei Ladestationen angenommen; d.h. allenfalls mögliche höheren Ströme mit Stromschienen bei Ladestationen wurden nicht betrachtet.)</p> <p>Anmerkung: während des Fahrens dürfen wesentlich höhere Ströme bezogen werden. Der maximale Strom wird durch das Fahrzeug limitiert.</p>
--	--

6.2 Ausrüstung mit Oberleitung und Anschluss an das Bestandsnetz

Eine Möglichkeit, um einen BEMU-Verkehr zu realisieren, ist ein Ausbau der Oberleitungsanlage. Während der Fahrt beziehen Akkuhybridzüge die Traktionsenergie sowie die erforderliche Ladeenergie für die Traktionsbatterien über den Stromabnehmer, um anschließend auch auf nicht elektrifizierten Streckenabschnitten fahren zu können.

Dabei kann das bestehende Oberleitungsnetz erweitert und die Leistung ab bestehendem 15-kV-Bahnnetz zur Verfügung gestellt werden. Gegebenenfalls sind zur Versorgung zusätzliche Unterwerke oder Umrichterwerke erforderlich.

Ein Vorteil dieser Lösung gegenüber dem Einsatz von Ladestationen ist, dass für das Laden keine lange Haltezeit notwendig ist. Es bietet sich an, vor allem Strecken mit Oberleitung zu elektrifizieren, auf welchen möglichst viele Akkuhybridzüge verkehren und dementsprechend vom Laden profitieren können (Synergieeffekt).

6.3 Oberleitungsinselanlagen (OLIA)

Auch bei dieser Maßnahme werden Teile der Strecke mit Oberleitung ausgerüstet. Jedoch besteht hier kein Anknüpfungspunkt an das bestehende 15-kV-Bahnnetz der DB. Das heißt, es entsteht eine Oberleitungsinsel. Diese Insel kann bspw. über ein Umrichterwerk ab dem 3-phasigen 50-Hz-Netz gespeist werden. Da dabei im Vergleich zu klassischen Unterwerken oder Umrichterwerken im Hauptnetz der DB deutlich einfachere Ausführungen mit kleinerer Leistung nötig sind⁶, sind diese auch entsprechend kostengünstiger, was die Attraktivität dieser Variante auszeichnet.

Theoretisch ist auch ein Betrieb der OLIA mit 50 Hz möglich, da moderne Fahrzeuge durchaus in der Lage sind, mit 50 Hz zu verkehren. Als aktuelles Beispiel kann hier die im letzten Jahr neu errichtete Ladestation im Bahnhof Annaberg-Buchholz Süd im sächsischen Erzgebirge genannt werden. Sie versorgt die Akku-Triebzüge vom Typ Coradia Continental mit 15 kV, 50 Hz anstelle mit 16,7 Hz.

⁶ Eine OLIA ist per Definition kurz und zum Laden von Akkutriebfahrzeugen ausgelegt, so dass diese Aussage gilt.

Somit könnten, nebst der „teuren“ Vollumrichterlösung, auch andere Ansätze zur Versorgung ab dem Landesnetz weiterverfolgt werden, wie der Anschluss über Scott-Transformatoren oder V-Transformatoren⁷. Eine solche Lösung ist zwar deutlich billiger, kann jedoch bei der späteren Vollelektrifizierung auf 15 kV/16.7 Hz nicht mehr weiterverwendet werden, weshalb die Wirtschaftlichkeit im konkreten Fall betrachtet werden muss.

Die OLIA kann auch als Ladestation, wie nachfolgend beschrieben, mit zusätzlicher Oberleitung angesehen werden. Dies ist allenfalls sinnvoll, wenn die verfügbare betriebliche Haltezeit bei der Ladestation nicht ausreicht. Somit wäre ein Laden über Ladestation auch bei Fahrt auf freier Strecke möglich.

6.4 Ladestationen, Laden über Stromabnehmer

Bei dieser Maßnahme wird die Batterie des Akkuhybridzuges an Haltestellen im Stillstand geladen. Dabei wird der Strom über ein Oberleitungssystem zum Zug geführt, wobei die Stromabnahme über den „normalen“ Stromabnehmer des Fahrzeuges erfolgt. Da im Vergleich zu Bahnunterwerken die Leistung wesentlich geringer ausfällt, wird die Ladestation selbst aus dem örtlichen Mittelspannungsnetz gespeist, z.B. mit einer Nennspannung von 10 kV oder 20 kV.

Wie eingangs in Kapitel 6.1 bereits erläutert, ist der Ladestrom im Stillstand begrenzt. Daher benötigt ein Laden der Batterie eine gewisse Zeit, welche betrieblich gesehen nicht unerheblich ist. Als Beispiel: für eine Ladung von 210 kWh, was 60 % der in der Studie unterstellten Batteriekapazität des BEMU 45 entspricht, resultiert bei einer Ladeleistung von 1.2 MW eine Ladezeit von 10.5 Minuten.

Solch lange Haltezeiten sind betrieblich in der Regel nur an den Endhaltestellen einer Linie sinnvoll möglich, weshalb sich der Einsatz von Ladestationen auch vor allem an Endhaltestellen (Wendebahnhöfen) anbietet. An diesen ergeben sich betrieblich für die Fahrplanstabilität oder der angestrebten Fahrplansymmetrie oft bereits längere Wendezeiten.

Je nach Begebenheit werden dabei mehrere Gleise über eine oder mehrere Ladestationen gespeist, damit das Laden mehrerer Züge möglich ist.

Erste derartige Ladestationen sind in Deutschland bereits in Betrieb oder in Realisierung, wie beispielsweise die Zugladestation VOLTAP von Furrer+Frey⁸, welche erstmals in Tübingen gebaut wurde, oder die Lösung mit Ladeunterwerken, welche von DB in Schleswig-Holstein und in Nordostbrandenburg aktuell geplant und gebaut wird. Ein weiteres Beispiel, welches bereits im obigen Kapitel 6.3 erwähnt wurde, befindet sich im sächsischen Erzgebirge.

⁷ Zur gleichmäßigeren Belastung des speisenden 3-Phasennetzes sind spezielle Transformator-Lösungen notwendig

⁸ <https://www.furrerfrey.ch/de/e-mobility/voltap.html>

6.5 Ladestationen, Laden über Ladekabel

Ähnlich wie bei der Ladestation wird hierbei der Zug im Stillstand geladen, jedoch über ein Kabel.

Das Kabel muss durch den Triebfahrzeugführer an den entsprechenden Orten eigens eingesteckt werden. Dies benötigt Aufwand und zusätzliche Zeit, was die verfügbare Ladezeit an der Haltestelle verkürzt. Solche Ladesysteme sind von der Leistung her zudem aktuell in der Regel etwas schwächer ausgelegt als eine Ladestation über Stromabnehmern (kleiner 1 MW), was vergleichsweise eine längere Ladezeit bedingt.

Dafür fällt die Realisierung über Ladekabel kostengünstiger aus als bei einer Ladestation über Stromabnehmer.

Die Analyse im Rahmen der Konzeptbildung für den Betrachtungsperimeter der Studie hat aber gezeigt, dass eine Anwendung von Ladekabeln für die benötigten Ladekapazitäten aufgrund der betrieblich verfügbaren Ladezeiten nicht sinnvoll erscheint: die benötigten Ladezeiten wären zu lang, was im schlimmsten Fall zur Folge hätte, dass mehr Fahrzeuge beschafft werden müssten, um den geplanten Betrieb fahren zu können. Hinzu kommt, dass eine „überschlagene Wende“ mit zusätzlichem Fahrzeug an vielen Endstationen im untersuchten Netz nicht möglich ist, weil nur ein Gleis vorhanden ist. Bei Abstellanlagen (für Tag- oder Nachtabstellung) ist jedoch genügend Ladezeit vorhanden. Daher kann dieses System bei noch nicht elektrifizierten Abstellanlagen mit mehreren Gleisen durchaus eine kostengünstigere Alternative zur kompletten Ausrüstung der Abstellgleise mit Oberleitung darstellen. Abstellkonzepte waren im Rahmen dieses Gutachtens jedoch nicht zu erarbeiten.

7 ERARBEITUNG VON OBERLEITUNGSKONZEPTEN

7.1 Vorgehen generell

Für die Erarbeitung geeigneter Oberleitungs- und Speisekonzepte für die Zeithorizonte 2035 und 2040 sowie für die Ermittlung der Bestvariante wurde folgendes Vorgehen gewählt:

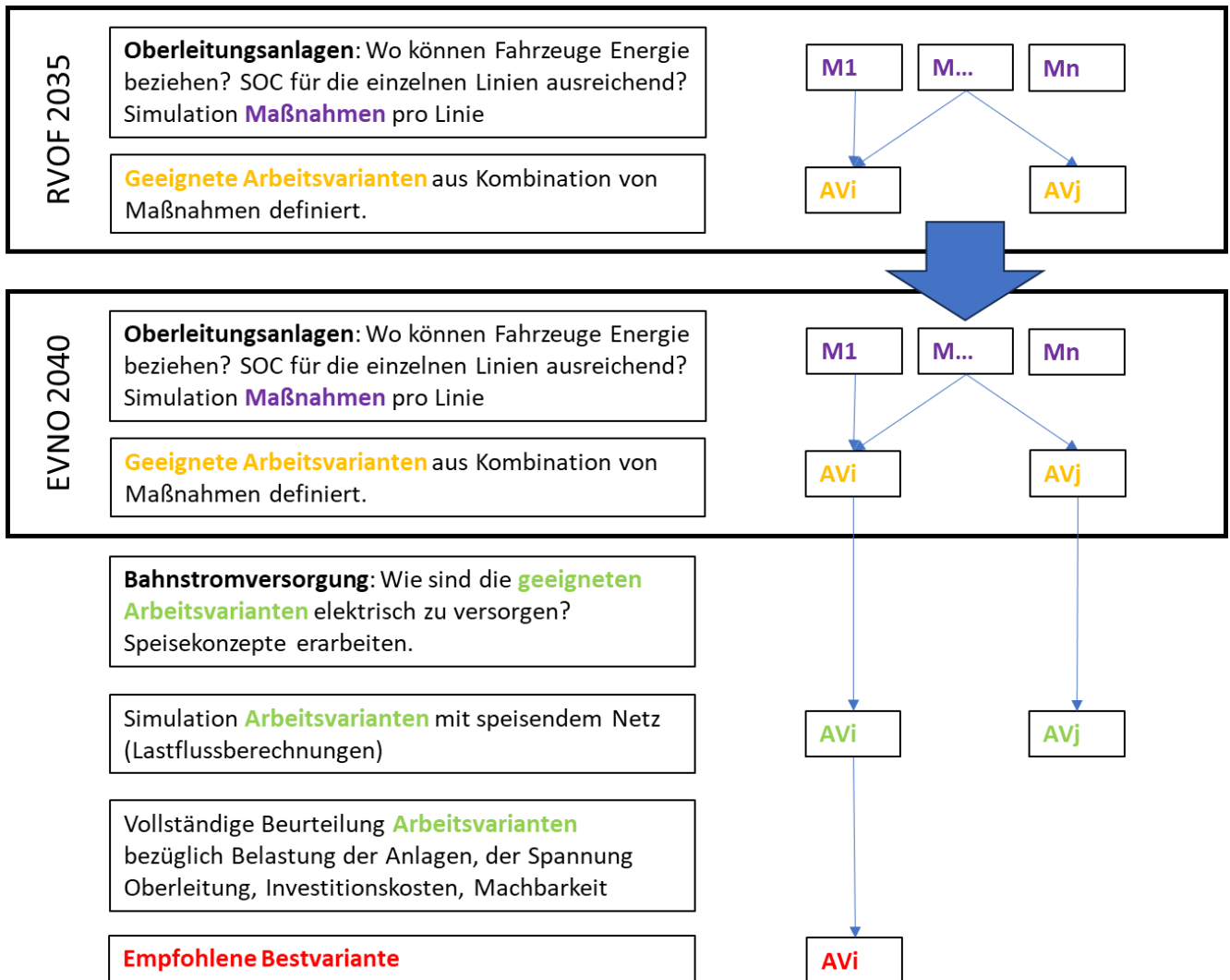


Abbildung 7-1: Übersicht zum Vorgehen für die Erarbeitung einer Bestvariante

- Maßnahmen (M) **violett**: In einem ersten Schritt wird basierend auf den Fahrzeugdaten und den daraus abgeleiteten typischen Reichweiten (siehe Kapitel 7.3.4) überprüft, wo und wie die Akkuhybridfahrzeuge optimalerweise mit Energie versorgt werden (bspw. durch neue Oberleitungsabschnitte oder Ladestationen). Anschließend werden die minimal notwendigen Infrastrukturmaßnahmen anhand von Simulationen ermittelt, damit der der Akkumulator stets über einen genügenden Energieinhalt (auch SOC – „state of charge“) verfügt.
- Arbeitsvarianten (AV) **gelb**: Aus den identifizierten Maßnahmen werden Speisekonzept-Variante(n) mit den zur Versorgung der Akkuhybridfahrzeuge geeigneten Erweiterungen der Oberleitung oder

Ladestationen zusammengestellt. Geeignet bedeutet, dass der Betrieb entsprechend dem vorgegebenen Betriebskonzept zuverlässig möglich ist.

- Arbeitsvarianten **grün**: Unterschiedliche Varianten der übergeordneten Bahnstromversorgung für die verschiedenen gelben Arbeitsvarianten.
- Bestvariante **rot**: Die unter Beachtung aller Kriterien (Ladezustand der Akkuhybridfahrzeuge, Spannungshaltung, Belastung der Anlagen, Kosten der Maßnahmen, Umsetzbarkeit, Weiterentwicklung zur vollständigen Elektrifizierung, ...) beste Variante aller vorherigen Arbeitsvarianten.

7.2 Basis für die Simulationen mit Fabel

7.2.1 Modelldaten Infrastruktur

Die Infrastrukturdaten für das Simulationsmodell sind im Grundlagendatenbericht [23] detailliert beschrieben, weshalb hier nicht weiter darauf eingegangen und ausschließlich auf diesen verwiesen wird.

7.2.2 Simulationsparameter

Simulationszeitschritt	Als Simulationszeitschritt (Auflösung) wird 1 s (Simulationen bei Nennspannung) resp. 2 s (Simulationen inklusive Bahnstromversorgung) verwendet.
Simulationsdauer	Für die Simulationen wird ein 6-stündiges Hauptverkehrsfenster berücksichtigt.

7.2.3 Übersicht Simulationsvarianten

Nachfolgende Tabelle gibt eine Übersicht zu den untersuchten Szenarien und Varianten.

Bezeichnung	Speisevariante	Verkehre	Netzzustand	Resultatdatenbank-ID
EVNO_2032_H2	-	EVNO (H2)	Nennspannung	r_p541p01m001v04_6_240515_143732
RVOF_2035_AV01	AV 1	RVOF	Nennspannung	r_p541p01m011v01_7_240320_201957
RVOF_2035_AV02	AV 2	RVOF	Nennspannung	r_p541p01m012v01_7_240312_133509
RVOF_2035_AV03	AV 3	RVOF	Nennspannung	r_p541p01m013v01_7_240322_105146
EVNO_2040_AV01	AV 1	EVNO	Nennspannung	r_p541p01m020v01_7_240405_113226
EVNO_2040_AV02	AV 2	EVNO	Nennspannung	r_p541p01m021v01_7_240405_114340
EVNO_2040_AV03	AV 3	EVNO	Nennspannung	r_p541p01m022v01_7_240405_115447
2040_v01	AV 1	alle	Normal	r_p541p01m100v05_11_240806_165403
2040_v01	AV 1	nur BEMU	Normal	r_p541p01m100v05_5_240806_165426
2040_v02	AV 2	alle	Normal	r_p541p01m101v01_11_240806_165445

Bezeichnung	Speisevariante	Verkehre	Netzzustand	Resultatdatenbank-ID
2040_v02	AV 2	nur BEMU	Normal	r_p541p01m101v01_5_240806_165501
2040_v03	AV 3	alle	Normal	r_p541p01m102v01_11_240806_165513
2040_v03	AV 3	nur BEMU	Normal	r_p541p01m102v01_5_240806_165532
2040_v04 *	AV 4	alle	Normal	r_p541p01m103v02_11_240807_091213
2040_v04 *	AV 4	nur BEMU	Normal	r_p541p01m103v02_5_240807_091955

Tabelle 7-1: Übersicht der durchgeführten Simulationen mit Fabel

Erläuterung zur Tabelle:

Bezeichnung	<p>Bezeichnung zur Identifikation der Simulation (Enotrac-intern);</p> <p>* Für den Zeithorizont 2040 wurde in Absprache mit dem projektbegleitenden Arbeitskreis in der vorletzten Projektphase eine alternative Variante (AV04) geprüft, welche keine Oberleitung entlang der schiefen Ebene vorsieht. Auf die Ergebnisse wird in vorliegender Studie nur zusammenfassend eingegangen, siehe Kapitel 11.1.2.</p>
Speisevariante:	<p>Unterschiedliche Oberleitungs- respektive Speisevariante gemäß Kapitel 8.4 und 9.4 (Arbeitsvarianten 1 - 3) und gemäß Kapitel 10 (Verifikation mittels Lastflussberechnungen).</p>
Verkehre:	<p>EVNO und RVOF gemäß Kapitel 5</p> <p>Alle: Jegliche Verkehre im Untersuchungsgebiet (SPNV, SPFV und SGV)</p> <p>Nur BEMU: Nur die Netze EVNO und RVOF mit den NT-XEMU-70 im reinen Akkuhybridbetrieb (ab 2040 kein Einsatz mehr von Wasserstoff)</p> <p>Die Simulationen mit «nur BEMU» dienen zur Ermittlung des Leistungsanteils der an das Studiengebiet angrenzenden Bahnstromanlagen.</p>
Netzzustand:	<p>Normal: normaler Netzzustand, d.h. alle Energieversorgungsanlagen in Betrieb</p> <p>Alle Bestandsanlagen sowie alle neu geplanten Bahnstromanlagen sind / werden gemäß DB Energie redundant aufgebaut, weshalb keine Nichtverfügbarkeits-Varianten zu untersuchen waren.</p>
Resultatdatenbank-ID:	<p>Die Ergebnisse einer Simulation aus Fabel werden in einer Datenbank gespeichert. Jede Resultatdatenbank weist eine eindeutige Identifikationsnummer auf, was u.a. eine Rückverfolgbarkeit erlaubt.</p>

7.3 Anforderungen und Annahmen

7.3.1 Abgrenzung zum übrigen Netz

Der Untersuchungsraum ist in Abbildung 3-1 dargestellt. Die umgebenden Netzbereiche wurden im Simulationsmodell zwar mitabgebildet, im Rahmen des Gutachtens aber nicht bewertet. Details zu den Abgrenzungen sind im Grundlagendatenbericht [23] detaillierter beschrieben.

Für die Bahnstromanlagen, welche sich direkt an der Untersuchungsgrenze befinden (Uw Burgweinting, Uw Nürnberg Stein, Uw Nürnberg Ost sowie das Uw Jindrichov in Tschechien) wurde folgendes Prinzip gewählt: Wie im obigen Kapitel 7.2.3 angegeben, wurden für den Zeithorizont 2040 zusätzlich Simulationen durchgeführt, welche nur die Akkuhybrid-Verkehre (EVNO und RVOF im Zeithorizont 2040) berücksichtigen. Aus diesen konnte die zu erwartende Mehrbelastung durch die BEMU-Fahrzeuge bei den genannten drei Anlagen ermittelt werden. Unter Kapitel 10.3.3.3 sind die entsprechenden Belastungsgrade in Bezug auf die Nennleistung der Anlage ausgewiesen.

7.3.2 Anforderungen an Redundanzen

Bei Energieversorgungsanlagen für 15-kV-Bahnstrom gelten die Grundsätze der DB Energie. Diese schreiben vor, dass der Ausfall einer Komponente einer Energieversorgungsanlage, wie Unterwerk, Umrichterwerk und Ladestation, nicht zu einer Beeinträchtigung des Betriebs (Fahrplan) führen darf. Für die Anlagen, wie sie im Studiengebiet vorkommen und wie sie in Absprache mit dem Auftraggeber auch für die zusätzlichen Anlagen der vorliegenden Studie geplant werden sollen, bedeutet dies:

- Sämtliche Komponenten bis zum Anschluss an die darüberliegende Spannungsebene sind in Redundanz auszuführen.
- Die darüberliegende Spannungsebene, Mittel- Hoch- oder Höchstspannung, gilt als redundant und muss nicht weiter betrachtet werden.
- Ein Totalausfall einer Energieversorgungsanlage muss nicht betrachtet werden.

7.3.3 Beurteilungskriterium Energiebilanz Fahrzeuge

Als Beurteilungskriterium für einen ausreichenden Anteil an Elektrifizierung dient die Energiebilanz über einen gesamten Umlauf (Station A → Station Z → Station A) sowie der minimale Energieinhalt (auch Min. SoC – „State of Charge“).

Als Planungsgrundlage wird davon ausgegangen, dass die simulatorisch ermittelte Energiebilanz in allen untersuchten Fällen positiv sein soll. Das heißt, dass der Füllstand der Batterie zu Beginn des zweiten Umlaufs mindestens gleich hoch wie beim Beginn des ersten Umlaufs sein soll. Bei einer allfälligen negativen Energiebilanz würde sich die Batterie über den Tagesbetrieb sukzessive entladen.

Desweiteren wird für die Bewertung der Energiebilanz angenommen (siehe auch nachfolgende Abbildung):

- als nutzbare Kapazität ist von der Batteriekapazität „End of Life“ (EoL) auszugehen. In den Betrachtungen wird daher EOL als 100 % angesetzt.

- beim Laden der Batterien ist jeweils ein Puffer von 10 % für Bremsenergie zu berücksichtigen. Das heißt, ab Oberleitung wird die Batterie nie mehr als 90 % EoL geladen. Die Idee dabei ist, dass einerseits die Batterie geschont wird und zum anderen immer genügend Kapazität zur Verfügung steht, um die Energie einer Bremsung aufzunehmen.
- Als Reserve für betrieblich Unvorhergesehenes (z.B. massive Verspätungen), wird ein Puffer von 30 % angesetzt.

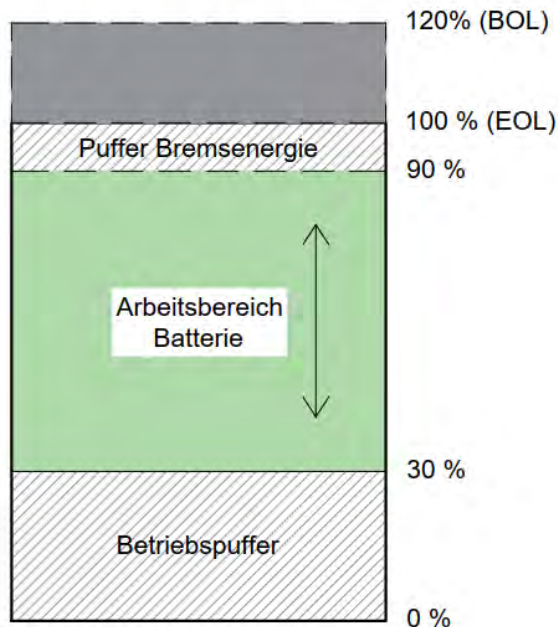


Abbildung 7-2: Für die Studie verwendeter Ansatz zur Definition des nutzbaren Arbeitsbereichs der Batterien

7.3.4 Annahmen zu Reichweiten und Ladezeiten

Als erste Arbeitshypothesen zum Definieren möglicher Maßnahmenpakete wurden nachfolgende Größenordnungen (basierend auf Herstellerangaben) verwendet. Diese wurden anschließend mittels Simulationsrechnungen verifiziert.

	BEMU 45	NT-XEMU 70
Typische Reichweite im Batteriemodus	80 km	40 km
Effektiv nutzbare Reichweite im Batteriemodus *	48 km	24 km
Ladedauer an Ladestation im Stillstand für Aufladen der Batterie **	10.5 Minuten	9 Minuten

* Basierend auf 60 % der installierten nutzbaren Batteriekapazität (zwischen 30 % und 90 %, siehe Kapitel 7.3.3), d.h. 350 kWh für BEMU 45 und 300 kWh für NT-XEMU-70 (siehe auch Kapitel 3.6).

** Basierend auf einer Ladung von 60 % der installierten nutzbaren Batteriekapazität (zwischen 30 % und 90 %, siehe Kapitel 7.3.3), d.h. 350 kWh für BEMU 45 und 300 kWh für NT-XEMU-70 (siehe auch Kapitel 3.6), und der Strombegrenzung im Stillstand von 80 A, was einer Ladeleistung von 1.2 MW entspricht.

7.3.5 Annahme zum Traktionsartwechsel

Der Wechsel der Traktionsart zwischen Strecken mit Oberleitung und oberleitungsfreien Strecken soll gemäß Aussagen von DB InfraGO in Zukunft auch während der Fahrt erfolgen können. Voraussetzung ist jedoch, dass an gewünschter Stelle eine Betriebsstelle⁹ eingerichtet ist. Somit wurde in vorliegender Studie das Heben / Senken des Stromabnehmers auf freier Strecke und unter Fahrt nach Errichten einer Betriebsstelle als grundsätzlich möglich betrachtet. Nach Möglichkeit soll ein Traktionsartwechsel aber stets bei einer bereits vorhandenen Betriebsstelle erfolgen, wodurch keine zusätzlichen Maßnahmen zur Errichtung einer neuen Betriebsstelle erforderlich sind.

⁹ Betriebsstellen sind Bahnanlagen gemäß Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO). Nach Ril 408.0101A01 dienen sie der Regelung und Sicherung der Zug- und Rangierfahrten. Es gibt Betriebsstellen auf freien Strecken und Betriebsstellen, die zu Bahnhöfen gehören. Werden Betriebsstellen für Traktionsartwechsel eingerichtet, sind bauliche Maßnahmen zur Verhinderung eines Oberleitungsschadens bei versehentlich gehobenem Bügel am Oberleitungsende notwendig.

8 OBERLEITUNGSVARIANTEN FÜR DEN ZEITHORIZONT 2035

8.1 Ausgangslage und Vorgehensweise

Ab 2035 sollen die Dieselfahrzeuge im Regionalverkehr Oberfranken auf Akkuhybrid umgestellt werden. Damit die Batteriefahrzeuge genügend Lademöglichkeiten haben, um die entsprechende Verkehrsleistung zu erbringen, müssen zusätzliche Elektrifizierungsmaßnahmen umgesetzt werden. In vorliegendem Arbeitsschritt wurde deshalb basierend auf Simulationen für jede Linie mehrere Maßnahmen untersucht und hinsichtlich den beiden Kriterien Energiebilanz und minimaler Energiefüllstand bewertet. Anhand dieser Ergebnisse wurden anschließend die geeigneten Maßnahmen überlagert und daraus drei verschiedene Oberleitungsvarianten erarbeitet.

Als Grundlage für die Erarbeitung der drei Oberleitungsvarianten gilt nachfolgender Elektrifizierungsstand im Untersuchungsgebiet. Gegenüber dem heutigen Elektrifizierungsstand ist für den Zeithorizont 2035 gemäß Studienvorgabe zusätzlich die Elektrifizierung der Strecke Hof – Marktredwitz unterstellt.

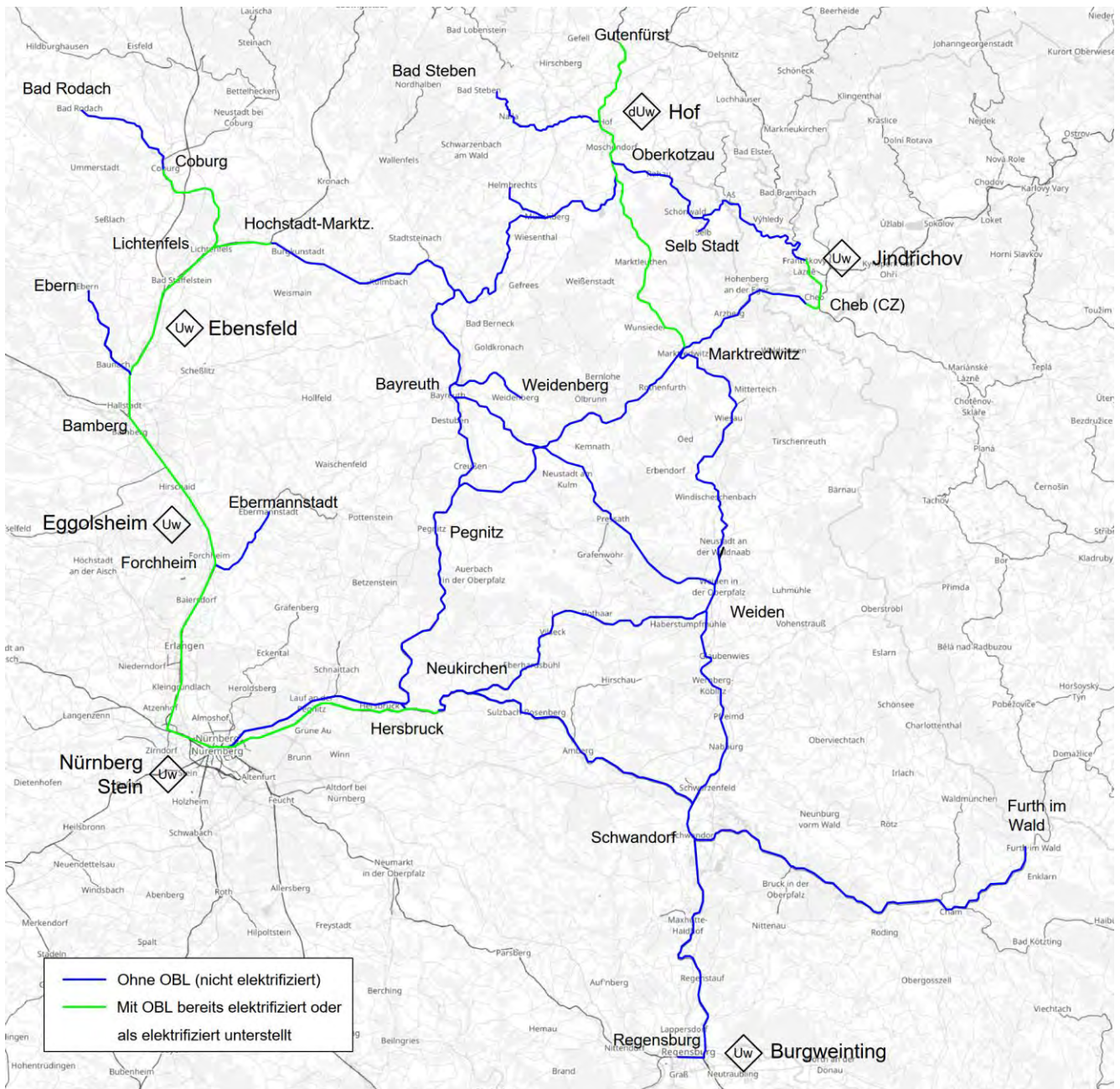


Abbildung 8-1: Zu unterstellender Elektrifizierungsstand für den Zeithorizont 2035.

Auf folgenden Streckenabschnitten können in diesem Arbeitsschritt keine Elektrifizierungsmaßnahmen definiert werden, da die Elektrifizierung dieser Relationen gemäß Bundesverkehrswegeplan von 2018 geplant, aber erst für den Zeithorizont 2040 unterstellt wird:

- Franken-Sachsen-Magistrale: Nürnberg – Marktredwitz – Cheb (CZ), mitsamt dem Zubringer Bayreuth – Pegnitz
- Ostkorridor Süd: Regensburg – Marktredwitz
- Metropolenbahn: Hartmannshof – Schwandorf – Furth im Wald (für den RVOF nicht relevant)

8.2 Mögliche Maßnahmepakete pro Linie

Basierend auf den Annahmen zu Reichweiten und Ladezeiten gemäß Kapitel 7.3.4 wurden in einem ersten Schritt pro Linie¹⁰ mehrere mögliche alternative Maßnahmepakete definiert. Diese sind in untenstehender Tabelle beschrieben. Wie die Tabelle zeigt, benötigen einzelne Linien keine Maßnahmen, bei anderen liegt die sinnvollste Maßnahme bereits auf der Hand (bspw. bei der RB 22 - > Überspannung von Gleis 8 in Forchheim). Dementsprechend wurde dort auf die Simulation von weiteren möglichen Maßnahmen verzichtet. Entsprechende Einträge sind mit „-“ gekennzeichnet.

In einem zweiten Schritt wurde die Wirksamkeit der Maßnahmepakete mittels Simulationen überprüft, wobei für jede Linie der Batteriefüllstandverlauf ausgewertet wurde. Nachfolgende Tabelle beinhaltet nun die während einem Umlauf resultierenden minimalen Energiefüllstände (als Min. SoC bezeichnet). Wie in Kapitel 7.3.3 beschrieben, darf grundsätzlich eine Reserve von SoC 30 % nicht unterschritten werden. Auch gilt das Kriterium, dass die Energiebilanz nach einem Umlauf nicht negativ sein darf. Dieses wird vorliegend jedoch nicht explizit ausgewiesen, da bei allen Umläufen mit SoC > 30 % auch eine positive Bilanz resultierte. Von den Maßnahmen, welche als ausreichenden bewertet wurden, sind zudem die Verläufe der Energieinhalte über einen Umlauf im Anhang 2 [19] aufgeführt.

¹⁰ Teilweise sind Fahrzeugumläufe über mehrere Linien hinsichtlich der Bewertung der Energiebilanz relevant. So beispielsweise die RB 96, bei welcher das Fahrzeug nach der Rückkehr nach Hof-Neuhof die Linie RB 99 bedient.

Linie / Umlauf	Maßnahmepaket 1	Min. SoC	Maßnahmepaket 2	Min. SoC	Maßnahmepaket 3	Min. SoC
RB 18 Coburg – Bad Rodach	Keine Maßnahme	46%	-	-	-	-
RB 22 Forchheim – Ebermannstadt	Gleis 8 Forchheim	54%	-	-	-	-
RB 22 / RB 26 HVZ Ebermannstadt – Bamberg – Ebern	Keine Maßnahme	54%	-	-	-	-
RB 24 Coburg – Bayreuth	Bhf Bayreuth	2%	Hochstadt-Marktzeuln – Ludwigschorgast	0%	Untersteinach – Neuenmarkt-Wirsberg + Bhf Bayreuth	45%
RB 26 Bamberg – Ebern	Keine Maßnahme	48%	-	-	-	-
RB 34 Weidenberg – Weiden	Bayreuth – Trabit	26%	Bayreuth – Kirchenlaibach + Bhf Weiden	39%	Bhf Bayreuth + Bhf Kirchenlaibach + Bhf Weiden	4%
RB 95 Hof – Cheb (CZ) – Marktredwitz	Gleis Oberkotzau	31%	-	-	Keine Maßnahme	0%
RB 96 HVZ Gutenfürst – Hof Hbf – Rehau	Gleis Oberkotzau	75%	-	-	Keine Maßnahme	45%
RB 96 / RB 99 Hof-Neuhof – Selb Stadt – Hof-Neuhof – Neuenmarkt-Wirsberg – Hof-Neuhof	Bhf Neuenmarkt-Wirsberg + Bhf Oberkotzau	18%	Oberkotzau – Münchberg	18%	Bhf Münchberg + Neuenmarkt-Wirsberg – Marktschorgast + Oberkotzau – Rehau	46%
RB 97 Bayreuth – Marktredwitz – Bad Steben	Bhf Bayreuth	8%	Bayreuth – Kirchenlaibach	4%	Bayreuth – Kirchenlaibach + Hof – Selbitz oder Bhf Bad Steben ¹¹	43%
RB 98 Helmbrechts – Hof	Bhf Münchberg	36%	Münchberg – Seulbitz	61%	-	-

Tabelle 8-1: Übersicht der simulierten Maßnahmen zur Erarbeitung einer minimalen Oberleitungsvariante für den Zeithorizont 2035. Schwarz gekennzeichnet sind Varianten welche im Bezug auf den Energiebedarf der Fahrzeuge alle Kriterien einhalten. Rot sind die Massnahmen, welche nicht ausreichend sind.

¹¹ Die Massnahmen einer Elektrifizierung von Hof bis Selbitz oder einer Ladestation in Bad Steben wurden beide geprüft und sind betreffend minimalem SoC gleichwertig.

8.3 Erkenntnisse und Ableiten von Arbeitsvarianten

Folgende Erkenntnisse konnten aus diesen ersten Simulationen gewonnen werden:

- /1/ Die Linien RB 18 Coburg – Bad Rodach, RB 26 Bamberg – Ebern sowie der HVZ-Umlauf der RB 22 und RB 26 von Ebermannstadt über Bamberg nach Ebern benötigen keine Elektrifizierungsmaßnahmen. Alle drei Linien können mit dem heutigen Elektrifizierungsstand zuverlässig mit dem unterstellten Akkuhybridfahrzeug betrieben werden.
- /2/ Die RB 22 Forchheim – Ebermannstadt, welche zum Zeitpunkt 2035 durchgehend ohne Oberleitung verkehrt, kann mit Elektrifizierung des Gleis 8 in Forchheim betrieben werden. Da diese Maßnahme mit verhältnismäßig geringem Aufwand umgesetzt werden kann, wurde keine weitere Maßnahme geprüft. Die Oberleitung kann aus dem Bestandsnetz gespeist werden. Nebst dem Gleis 8 sind auch zwei Abstellgleise in Forchheim zu elektrifizieren.
- /3/ Der Umlauf des Fahrzeugs auf den Linien RB 96 / RB 99 zeigt, dass mit dem hohen Energiebedarf für die RB 99 aufgrund der anspruchsvollen topographischen Gegebenheiten (schiefe Ebene) mindestens eine Elektrifizierung des Bahnhofs Neuenmarkt-Wirsberg erforderlich ist. Ohne eine Lademöglichkeit in Neuenmarkt-Wirsberg wäre mindestens die Elektrifizierung von Oberkotzau bis Stammbach oder gar bis Marktschorgast notwendig. Die Errichtung einer Ladeinfrastruktur im Bahnhof Neuenmarkt-Wirsberg allein ist jedoch noch nicht ausreichend und muss mit weiteren Maßnahmen kombiniert werden. Mögliche Varianten sind:
- Elektrifizierung (OBL) der Strecke Neuenmarkt-Wirsberg – Marktschorgast in Kombination mit einer Ladestation in Münchberg,
 - die Errichtung einer Oberleitungsanlage entlang der gesamten Strecke von Neuenmarkt-Wirsberg bis Münchberg oder
 - die Elektrifizierung (OBL) der Strecke Oberkotzau – Münchberg.
- /4/ Die Strecke der RB 34 (Weidenberg – Weiden) ist zum Zeitpunkt 2035 durchgehend nicht elektrifiziert. Auch sind zu diesem Zeitpunkt noch keine anliegenden Strecken als elektrifiziert zu betrachten (die Elektrifizierung der Franken-Sachsen-Magistrale ist erst für 2040 vorgesehen). Entsprechend ist die Verlängerung bestehender Oberleitungsanlagen keine Option und mögliche Maßnahmen umfassen entweder den Bau von mehreren Ladestationen entlang der Linie, die Errichtung von Oberleitungsinseln oder eine Kombination aus beidem. Eine reine Lösung mit Ladestationen in den Bahnhöfen ist nur dann sinnvoll, wenn die Fahrzeuge betrieblich auch genügend Zeit zum Laden haben. Dies ist mit dem vorgegebenen Betriebskonzept jedoch nicht der Fall. Als einzige Ausnahme wurde eine Variante mit drei Ladestationen an den Bahnhöfen Bayreuth, Kirchenlaibach und Weiden untersucht. Die Ergebnisse haben aber gezeigt, dass diese Lösung nicht ausreichend ist (siehe Maßnahmenpaket 3 in Tabelle 8-1). Da 2040 die Franken-Sachsen-Magistrale inkl. Schnabelwaid – Bayreuth elektrifiziert werden soll, bietet sich eine Elektrifizierung der Strecke Kirchenlaibach – Bayreuth an. Die Simulationen zum Maßnahmenpaket 2 bestätigen, dass diese Variante in Kombination mit einer Ladestation im Bahnhof Weiden ausreichend ist.
- /5/ Unter Berücksichtigung der Elektrifizierung in Neuenmarkt-Wirsberg gemäß /3/, sowie des Bahnhofs Bayreuth (dank der Streckenelektrifizierung Bayreuth – Kirchenlaibach aus /4/) resultiert die Errichtung einer Oberleitungsanlage von Neuenmarkt-Wirsberg bis nach Untersteinach als sinnvolle und minimale Ausbaumaßnahme für einen störungsfreien Betrieb der RB 24.

- /6/ Für die RB 95 von Hof nach Marktredwitz über Cheb ist die Elektrifizierung des Gleis 2 in Oberkotzau ausreichend. Da diese Maßnahme mit verhältnismäßig geringem Aufwand umgesetzt werden kann, wurde hierzu keine weitere Maßnahme geprüft.
- /7/ Für die RB 96 von Hof-Neuhof nach Selb Stadt (Umlauf mit RB 99) ist die vorhin genannte Maßnahme für die RB 95 nicht ausreichend. Es bietet sich an, die Strecke von Oberkotzau bis Rehau zu elektrifizieren, da diese Maßnahme zusätzliche Stabilität für die RB 95 bietet. Weiter könnte rein theoretisch der HVZ-Verstärker RB 96 von Gutenfürst nach Rehau gar mit reinen EMU betrieben werden.
- /8/ Die Verbindung RB 97 Bad Steben – Marktredwitz – Bayreuth ist auf der Strecke Hof – Marktredwitz bereits ab 2035 mit OBL ausgerüstet. Aufgrund der in /4/ hergeleiteten notwendigen Elektrifizierung des Abschnitts Kirchenlaibach – Bayreuth ist das südliche Ende dieser Verbindung bereits ausreichend elektrifiziert. Auf dem nördlichen Abschnitt Hof – Bad Steben sind die Maßnahmen Ladestation in Bad Steben, sowie Verlängerung der Oberleitung von Hof bis Hof-Neuhof, respektive bis nach Selbitz geprüft worden. Die Verlängerung der Oberleitung von Hof bis Hof-Neuhof ist nicht ausreichend. Im projektbegleitenden Arbeitskreis wurde die Ladestation in Bad Steben gegenüber der Elektrifizierung von Hof – Selbitz deutlich bevorzugt, weshalb diese in die drei Arbeitsvarianten 2035 einfließt.
- /9/ Die RB 98 verkehrt im Umlauf von Hof nach Münchberg, anschließend zweimal von Münchberg nach Helmbrechts und zurück und dann wieder nach Hof. Die Simulationsergebnisse haben gezeigt, dass eine Elektrifizierung der Bahnhofgleise in Münchberg unabdingbar ist.

8.4 Arbeitsvarianten 1 – 3 für den RVOF 2035

Aus obigen Erkenntnissen lässt sich zusammenfassend für den RVOF zum Zeithorizont 2035 folgende als minimal umzusetzende Maßnahmen ableiten:

- Oberleitung Untersteinach – Neuenmarkt-Wirsberg
- Oberleitung Bayreuth – Kirchenlaibach (inkl. Elektrifizierung von mindestens je zwei Bahnhofs- und Abstellgleisen in Bayreuth)
- Oberleitung Oberkotzau – Rehau
- Stationäre Lademöglichkeit in Weiden
- Stationäre Lademöglichkeit in Bad Steben
- Elektrifizierung Gleis 8 Forchheim (+ 2 Abstellgleise)

Zusätzlich sind Maßnahmen auf dem östlichen Abschnitt der Oberfranken-Achse zwischen Neuenmarkt-Wirsberg und Oberkotzau notwendig. Da hier mehrere Möglichkeiten mit nahezu gleichwertigen technischen Ergebnissen resultieren, wurden drei verschiedene Arbeitsvarianten zur weiteren Prüfung definiert.

Aus oben aufgeführten Erkenntnissen wurden nun die drei nachfolgend dargestellten Arbeitsvarianten für den Zeithorizont 2035 erarbeitet. Bei der Zusammenstellung wurden zudem bereits erste Überlegungen zum Speisekonzept (Art und Weise der Energieversorgung) angestellt.

8.4.1 Arbeitsvariante 1 (2035)

- Streckenlänge: 41 km (3 % bezogen auf die gesamte Streckenlänge im Untersuchungsgebiet)
 Länge OBL: 54 km (3 % bezogen auf die gesamte OBL-Länge im Untersuchungsgebiet)
 Uw / Urw: Neues Standard-dUw mit 2x15 MVA im Knoten Neuenmarkt-Wirsberg
 Verschiebung des geplanten Uw Schnabelwaid nach Kirchenlaibach 2x15 MVA (wird im Rahmen der Elektrifizierung der Franken-Sachsen-Magistrale umgesetzt)
 Ladestationen: LS Bad Steben 2.4 MW
 LS Weiden 2.4 MW
 LS Münchberg 1.2 MW
 Sonstige Maßnahmen: Elektrifizierung Gleis 8 sowie zwei Abstellgleise in Forchheim
 Elektrifizierung zwei Bahnhofs- und zwei Abstellgleise in Bayreuth

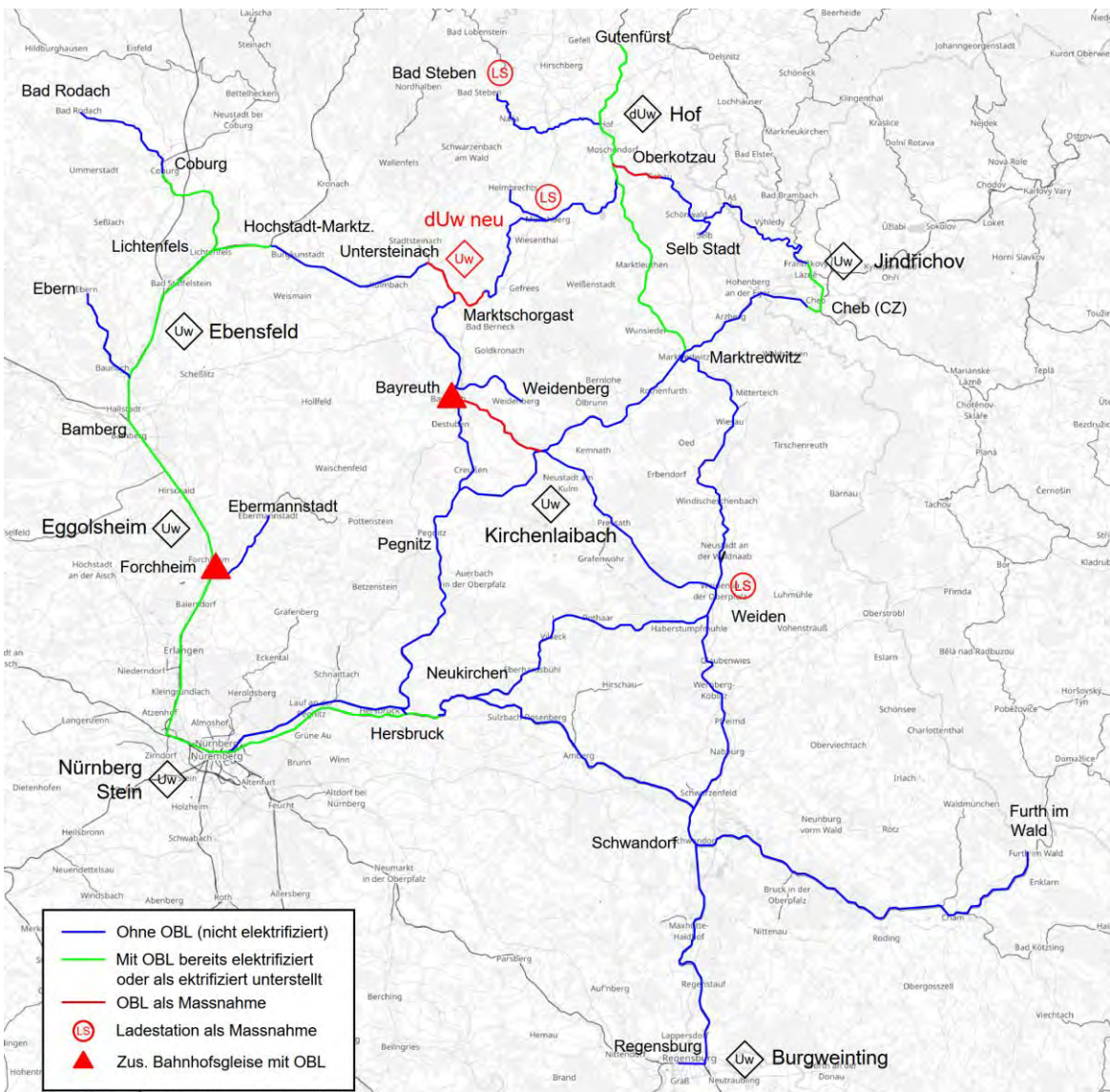


Abbildung 8-2: Übersicht Arbeitsvariante 1 zum Zeithorizont 2035 (hinterlegte Karte stammt von <https://www.openrailwaymap.org/>)

8.4.2 Arbeitsvariante 2 (2035)

- Streckenlänge: 62 km (5 % bezogen auf die gesamte Streckenlänge im Untersuchungsgebiet)
 Länge OBL: 85 km (5 % bezogen auf die gesamte OBL-Länge im Untersuchungsgebiet)
 Uw / Urw: Neues Standard-dUw mit 2x15 MVA im Knoten Neuenmarkt-Wirsberg
 Verschiebung geplantes Uw Schnabelwaid nach Kirchenlaibach 2x15 MVA (wird im Rahmen der Elektrifizierung der Franken-Sachsen-Magistrale umgesetzt)
 Ladestationen: LS Bad Steben 2.4 MW
 LS Weiden 2.4 MW
 Sonstige Maßnahmen: Elektrifizierung Gleis 8 sowie zwei Abstellgleise in Forchheim
 Elektrifizierung zwei Bahnhofs- und zwei Abstellgleise in Bayreuth

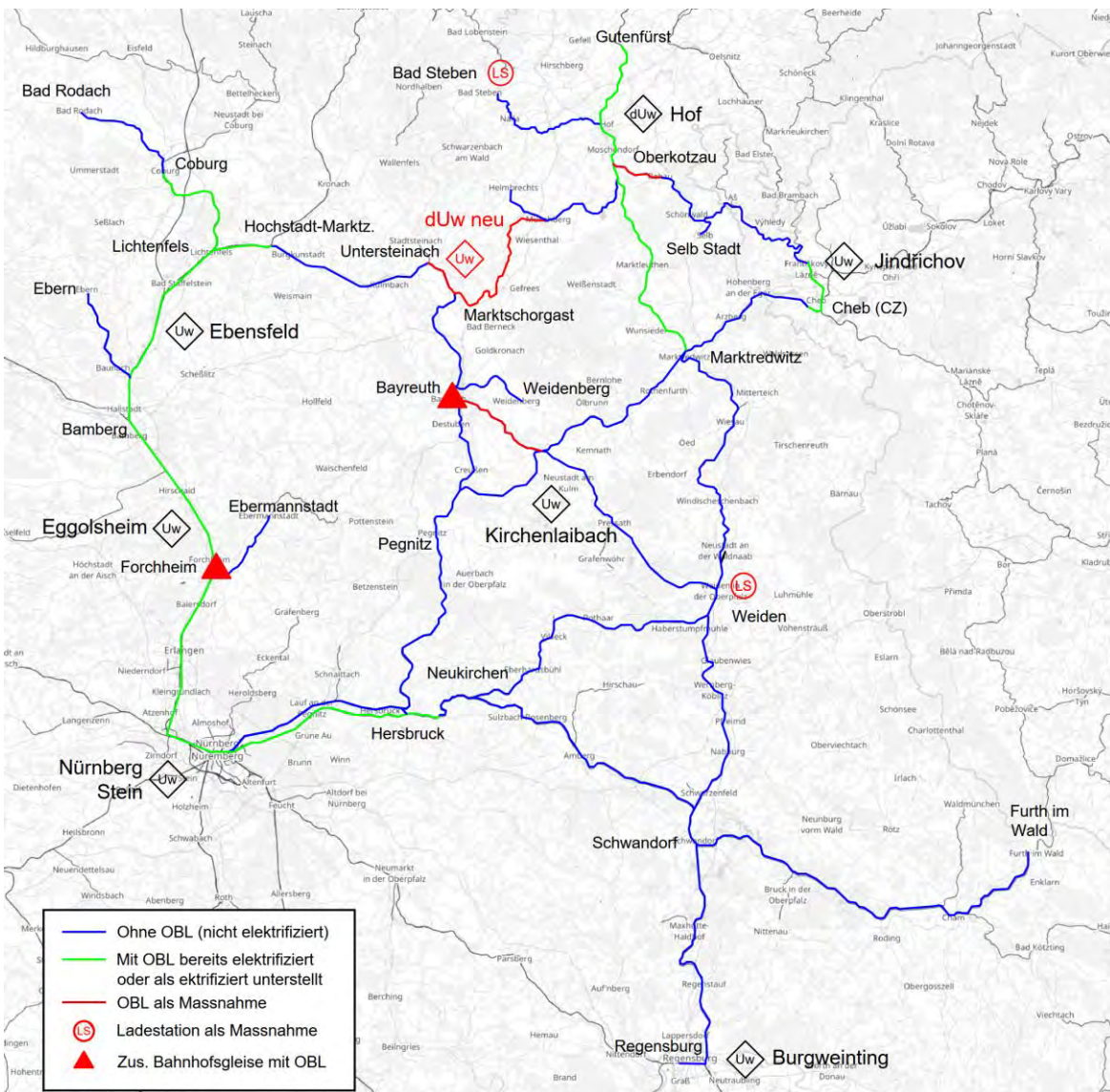


Abbildung 8-3: Übersicht Arbeitsvariante 2 zum Zeithorizont 2035 (hinterlegte Karte stammt von <https://www.openrailwaymap.org/>)

8.4.3 Arbeitsvariante 3 (2035)

- Streckenlänge: 62 km (5 % bezogen auf die gesamte Streckenlänge im Untersuchungsgebiet)
 Länge OBL: 75 km (4 % bezogen auf die gesamte OBL-Länge im Untersuchungsgebiet)
 Uw / Urw: Verschiebung geplantes Uw Schnabelwaid nach Kirchenlaibach 2x15 MVA (wird im Rahmen der Elektrifizierung der Franken-Sachsen-Magistrale umgesetzt)
 Ladestationen: LS Bad Steben 2.4 MW
 LS Weiden 2.4 MW
 LS Münchberg 1.2 MW
 Sonstige Maßnahmen: Elektrifizierung Gleis 8 sowie zwei Abstellgleise in Forchheim
 Maßnahmen: Elektrifizierung gesamter Bahnhof Bayreuth (inkl. Abstellgleise)

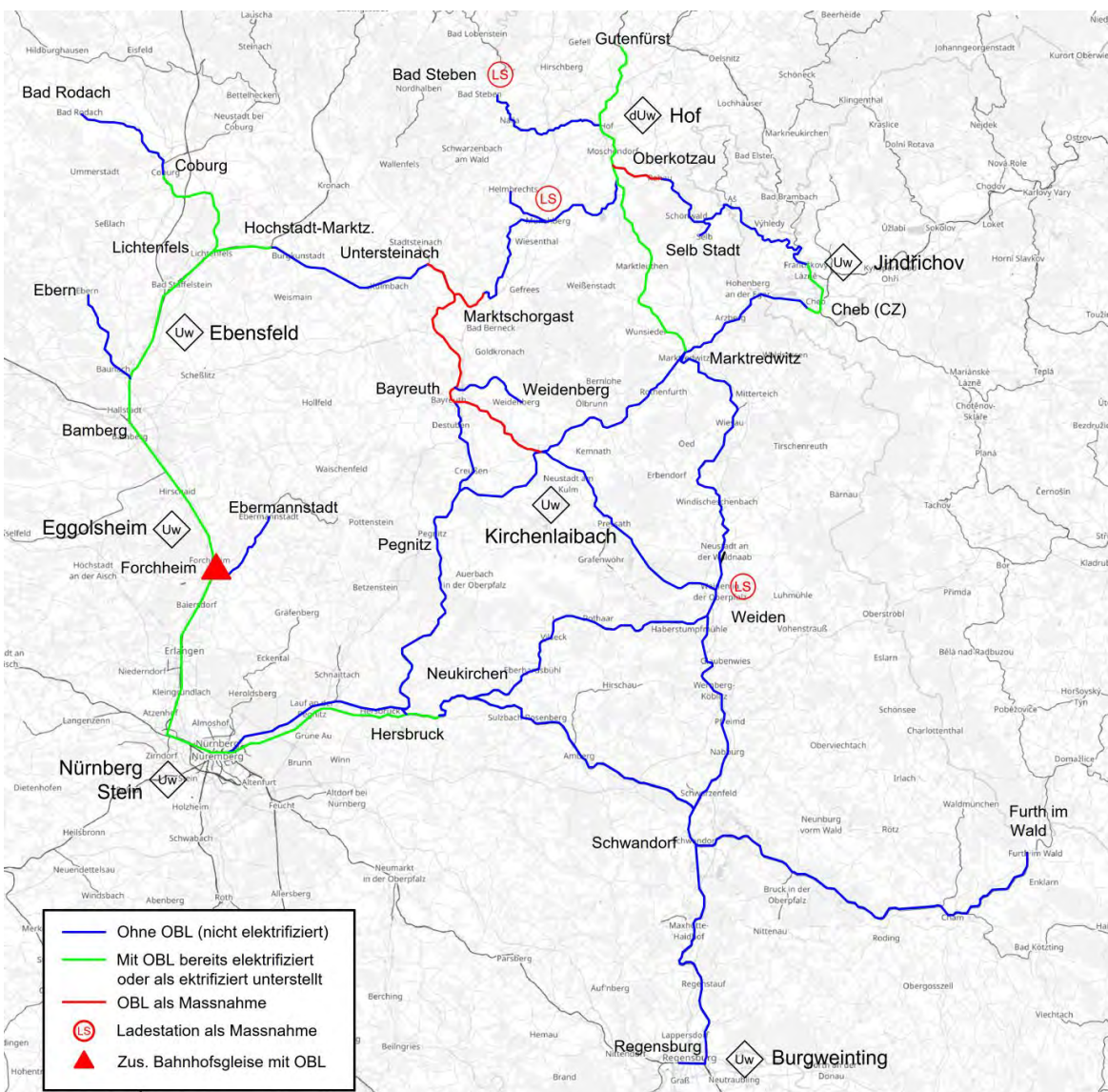


Abbildung 8-4: Übersicht Arbeitsvariante 3 im Zeithorizont 2035 (hinterlegte Karte stammt von <https://www.openrailwaymap.org/>)

9 OBERLEITUNGSVARIANTEN FÜR DEN ZEITHORIZONT 2040

9.1 Ausgangslage und Vorgehensweise

Die drei großen Elektrifizierungsprojekte Franken-Sachsen-Magistrale, Ostkorridor Süd und Metropolenbahn sowie die bereits durch den Freistaat zur Planung beauftragte Elektrifizierung der Strecke Schnabelwaid – Bayreuth bilden eine Grundvoraussetzung der Umstellung der EVNO-Linien auf einen reinen batterie-elektrischen Betrieb. Diese Projekte sollen bis 2040 umgesetzt sein und waren gemäß Leistungsvereinbarung in vorliegendem Gutachten vorzusetzen. Entsprechend sieht das für den Zeitraum 2040 zu unterstellende Streckennetz wie folgt aus. Darin nicht dargestellt, sind die Maßnahmen, welche für den Regionalverkehr und dem Zeithorizont 2035 erforderlich sind (da hier noch mehrere Möglichkeiten im Raum stehen)

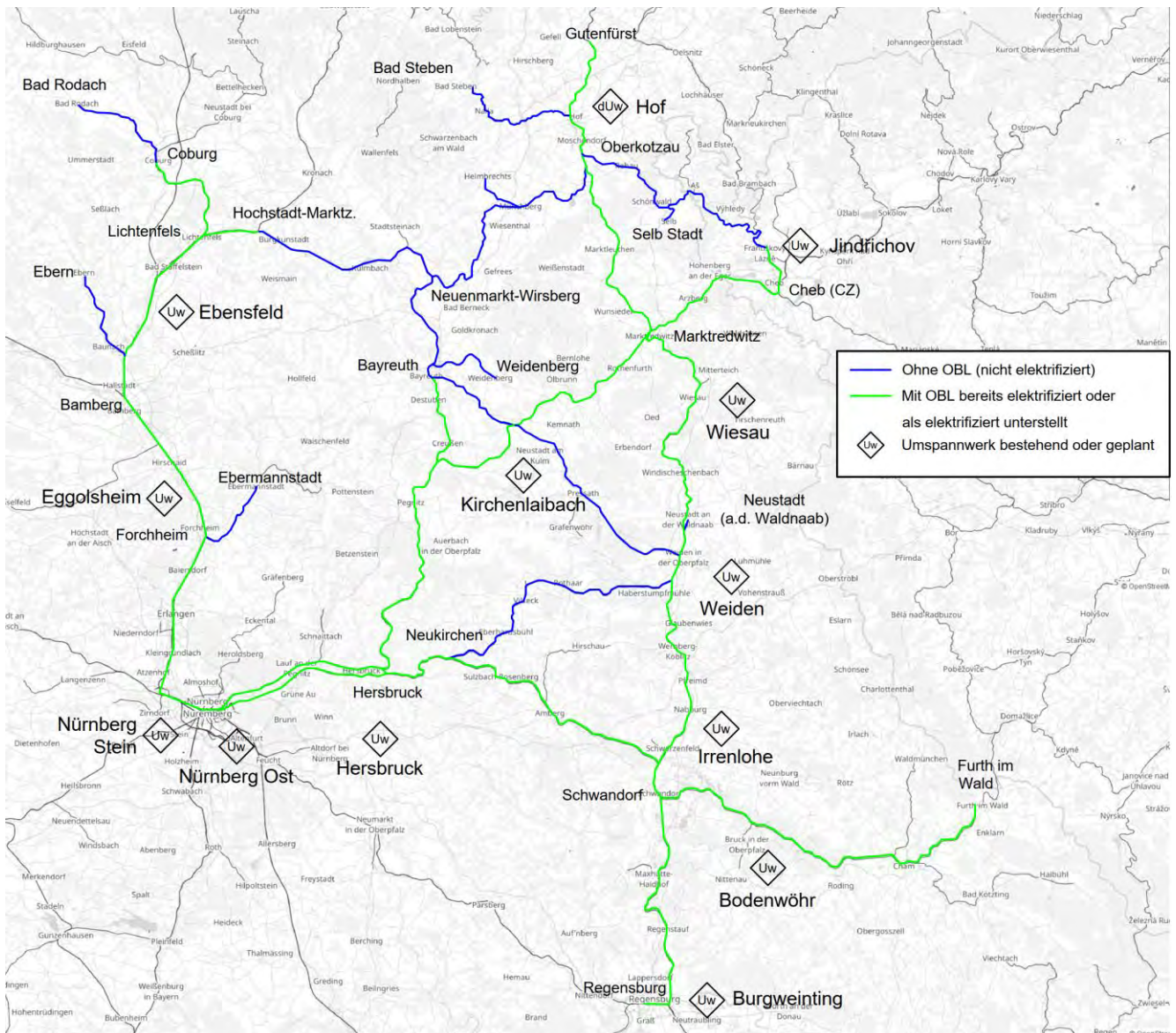


Abbildung 9-1: Zu unterstellender Elektrifizierungsstand für die Betrachtungen im Zeithorizont 2040 (hinterlegte Karte stammt von <https://www.openrailwaymap.org/>)

9.2 Mögliche Maßnahmenpakete pro Linien

Die im vorhergehenden Kapitel 8.4 erarbeiteten Arbeitsvarianten aus dem Zeithorizont 2035 wurden für die Weiterentwicklung im Zeithorizont 2040 als Grundlage verwendet. Zusätzlich zu den möglichen Maßnahmen für den Regionalverkehr Oberfranken sind nun auch für den Akkuhybridbetrieb der Neigetechnikfahrzeuge im Expressverkehr Nordostbayern zusätzliche Streckenelektrifizierungen erforderlich. So wurden gleichermaßen für die EVNO-Linien mehrere Maßnahmenpakete erarbeitet, anhand welcher anschließend die drei Speisekonzepte aus dem RVOF 2035 weiterentwickelt werden konnten.

In der nachfolgenden Tabelle sind die für den EVNO untersuchten Maßnahmenpakete pro Linie zusammengefasst. Da mit den zusätzlichen Elektrifizierungen bis 2040 gemäß Abbildung 9-1 die meisten Linien bereits vollständig elektrisch betrieben werden können, sind nur die übrigbleibenden 5 Linien zu untersuchen.

Wie bereits beim Zeithorizont 2035 (Kapitel 8.2) sind nachfolgend zusätzlich die während dem Umlauf resultierenden tiefsten Energiefüllstände (Min. SOC) dargestellt. Als Bewertungskriterium gilt wie in Kapitel 7.3.3 beschrieben, dass eine Reserve von 30 % nicht unterschritten werden darf. Auch gilt das Kriterium, dass die Energiebilanz nach einem Umlauf nicht negativ sein darf. Von den Maßnahmen, welche als ausreichenden bewertet wurden, sind zudem die Verläufe der Energieinhalte über einen Umlauf im Anhang 2 [19] aufgeführt.

Linie / Umlauf	Maßnahmepaket 1 (OBL & LS)	Min. SOC	Maßnahmepaket 2 (OBL & LS)	Min. SOC	Maßnahmepaket 3 (OBL & LS)	Min. SOC
RE30 Nürnberg Hbf – Bayreuth – Hof	Trebgast – Marktschorgast + LS Münchberg	32%	Neuenmarkt- Wirsberg (Ost) – Münchberg	50%	Neuenmarkt- Wirsberg (Ost) – Stammbach	27%
RE32 Nürnberg – Bayreuth – Coburg	Untersteinach – Neuenmarkt- Wirsberg	0%	Kulmbach – Neuenmarkt- Wirsberg	27%	Kulmbach – Trebgast	32%
RE35 Bamberg – Hof	Untersteinach – Marktschorgast + LS Münchberg	8%	Kulmbach – Stammbach + LS Münchberg	33%	Kulmbach – Münchberg	33%
RE38 Nürnberg – Bayreuth – Bamberg	Untersteinach – Neuenmarkt- Wirsberg	0%	Kulmbach – Neuenmarkt- Wirsberg	16%	Kulmbach – Trebgast	30%
RE41 Nürnberg – Neustadt (Waldnaab)	Freihung – Weiden	0%	Freihung – Weiden + LS Neustadt	16%	Neukirchen – Freihung + LS Neustadt	31%

Tabelle 9-1: Übersicht der simulierten Maßnahmen zur Erarbeitung einer minimalen Oberleitungsvariante für den Zeithorizont 2035. Schwarz gekennzeichnet sind Varianten welche im Bezug auf den Energiebedarf der Fahrzeuge alle Kriterien einhalten. Rot sind die Massnahmen, welche nicht ausreichend sind.

9.3 Erkenntnisse und Weiterentwicklung der Arbeitsvarianten 1-3

Aus den Simulationen zu den fünf zu untersuchenden Linien des Expressverkehrsnetzes konnten folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- /1/ Auf Basis der im vorherigen Kapitel 8.3 (Ergebnisse RVOF) erarbeiteten Maßnahmen zwischen Neuenmarkt-Wirsberg und Untersteinach ist eine OBL-Verlängerung entlang dieser Strecke bis nach Kulmbach sowohl für die RE 32 als auch die RE 35 und RE 38 angezeigt. Des Weiteren ist für die RE 32 und RE 38 auch eine Verlängerung der Strecke in Richtung Süden bis nach Trebgast notwendig, sofern dies in der entsprechenden Arbeitsvariante für den Zeithorizont 2035 nicht schon berücksichtigt wurde (Arbeitsvariante 3).
- /2/ Für die RE 41 im Süden des Studiengebiets ist eine Elektrifizierung des Bahnhofs Neustadt an der Waldnaab aufgrund der Aufenthaltsdauer unumgänglich. Des Weiteren ist im Minimum eine Elektrifizierung der Strecke Neukirchen – Freihung notwendig, alternativ könnte auch die etwas längere Strecke Vilseck – Weiden elektrifiziert werden.

9.4 Arbeitsvarianten 1 – 3 für den EVNO 2040

Die Erkenntnisse aus dem vorhergehenden Abschnitt wurden nun in die Weiterentwicklung der drei bestehenden Arbeitsvarianten aus dem Zeithorizont 2035 mitaufgenommen. Nachfolgende Unterkapitel zeigen die drei weiterentwickelten Arbeitsvarianten für den Zeithorizont 2040. Die ausgewiesenen Maßnahmen beinhalten auch diejenigen aus dem RVOF 2035.

Die weiterführende Analyse der Arbeitsvarianten zum Zeitpunkt 2040, mitsamt der quantitativen Bewertung der Stromversorgung erfolgt dann im Kapitel 10.

9.4.1 Arbeitsvariante 1 (2040)

- Streckenlänge: 41 km bis 2035 (3 % bezogen auf gesamte Streckenlänge im Untersuchungsgebiet)
93 km bis 2040 (7 % bezogen auf gesamte Streckenlänge im Untersuchungsgebiet)
- Länge OBL: 54 km bis 2035 (3 % bezogen auf gesamte OBL-Länge im Untersuchungsgebiet)
113 km bis 2040 (7 % bezogen auf gesamte OBL-Länge im Untersuchungsgebiet)
- Uw / Urw: Neues Standard-dUw 2x15 MVA im Knoten Neuenmarkt-Wirsberg (2035)
Verschiebung geplantes Uw Schnabelwaid nach Kirchenlaibach 2x15 MVA (2035)
- Ladestationen: LS Bad Steben 2.4 MW (2035)
LS Weiden 2.4 MW (2035)
LS Münchberg 2.4 MW (2035)
LS Neustadt a.d. Waldnaab 2.4 MW; verschoben vom Standort Weiden (2040)
- Sonstige Maßnahmen: Elektrifizierung Gleis 8 sowie zwei Abstellgleise in Forchheim (2035)
Elektrifizierung zwei Bahnhofs- und zwei Abstellgleise in Bayreuth (2035)

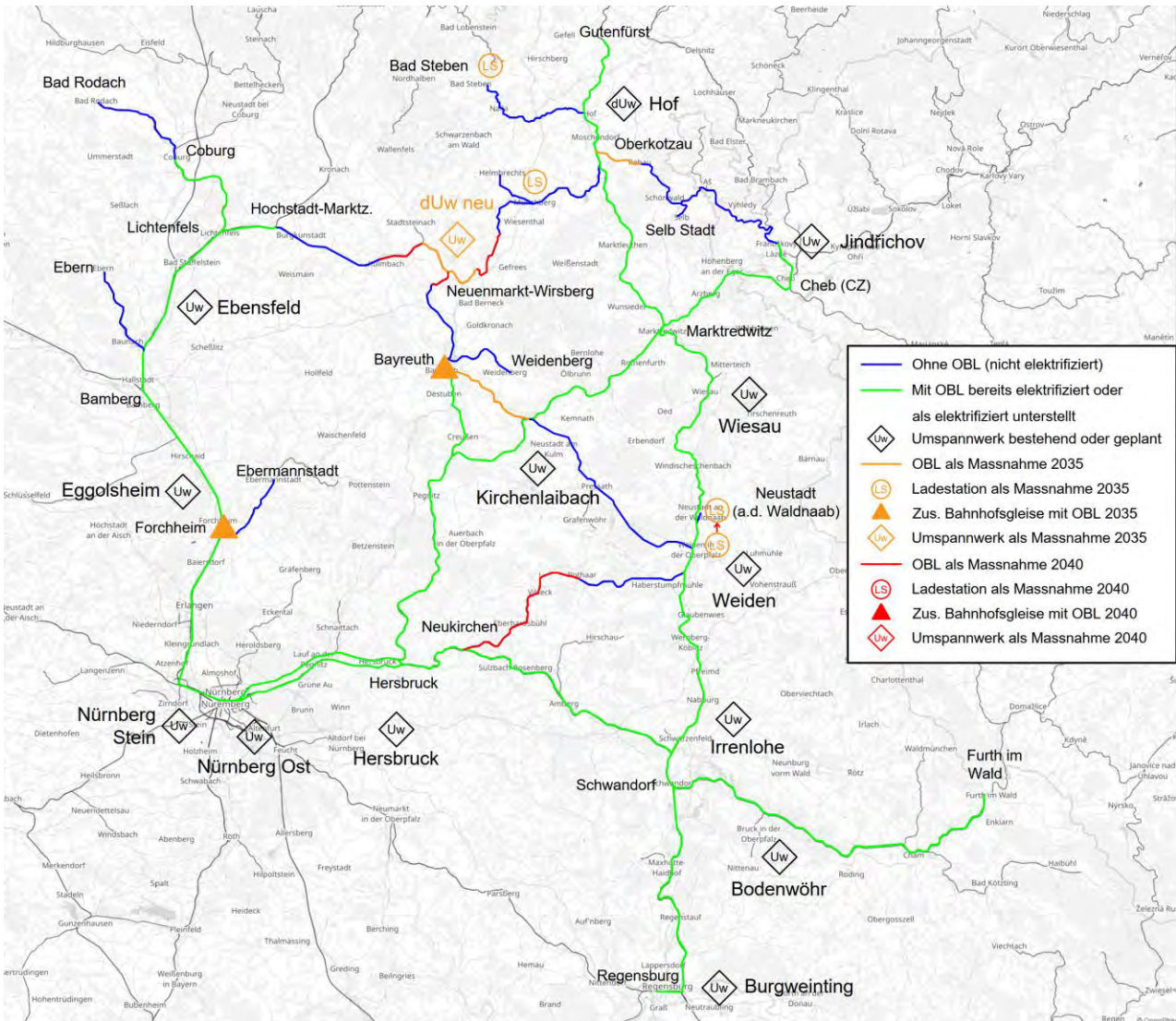


Abbildung 9-2: Arbeitsvariante 2040-1 (hinterlegte Karte stammt von <https://www.openrailwaymap.org/>)

9.4.2 Arbeitsvariante 2 (2040)

Streckenlänge:	62 km bis 2035 (5 % bezogen auf gesamte Streckenlänge im Untersuchungsgebiet) 103 km bis 2040 (8 % bezogen auf gesamte Streckenlänge im Untersuchungsgebiet)
Länge OBL:	85 km bis 2035 (5 % bezogen auf gesamte OBL-Länge im Untersuchungsgebiet) 133 km bis 2040 (8 % bezogen auf gesamte OBL-Länge im Untersuchungsgebiet)
Uw / Urw:	Neues Standard-dUw 2x15 MVA im Knoten Neuenmarkt-Wirsberg (2035) Verschiebung geplantes Uw Schnabelwaid nach Kirchenlaibach 2x15 MVA (2035)
Ladestationen:	LS Bad Steben 2.4 MW (2035) LS Weiden 2.4 MW (2035) LS Neustadt a.d. Waldnaab 2.4 MW; verschoben vom Standort Weiden (2040)
Sonstige Maßnahmen:	Elektrifizierung Gleis 8 sowie zwei Abstellgleise in Forchheim (2035) Elektrifizierung zwei Bahnhofs- und zwei Abstellgleise in Bayreuth (2035)

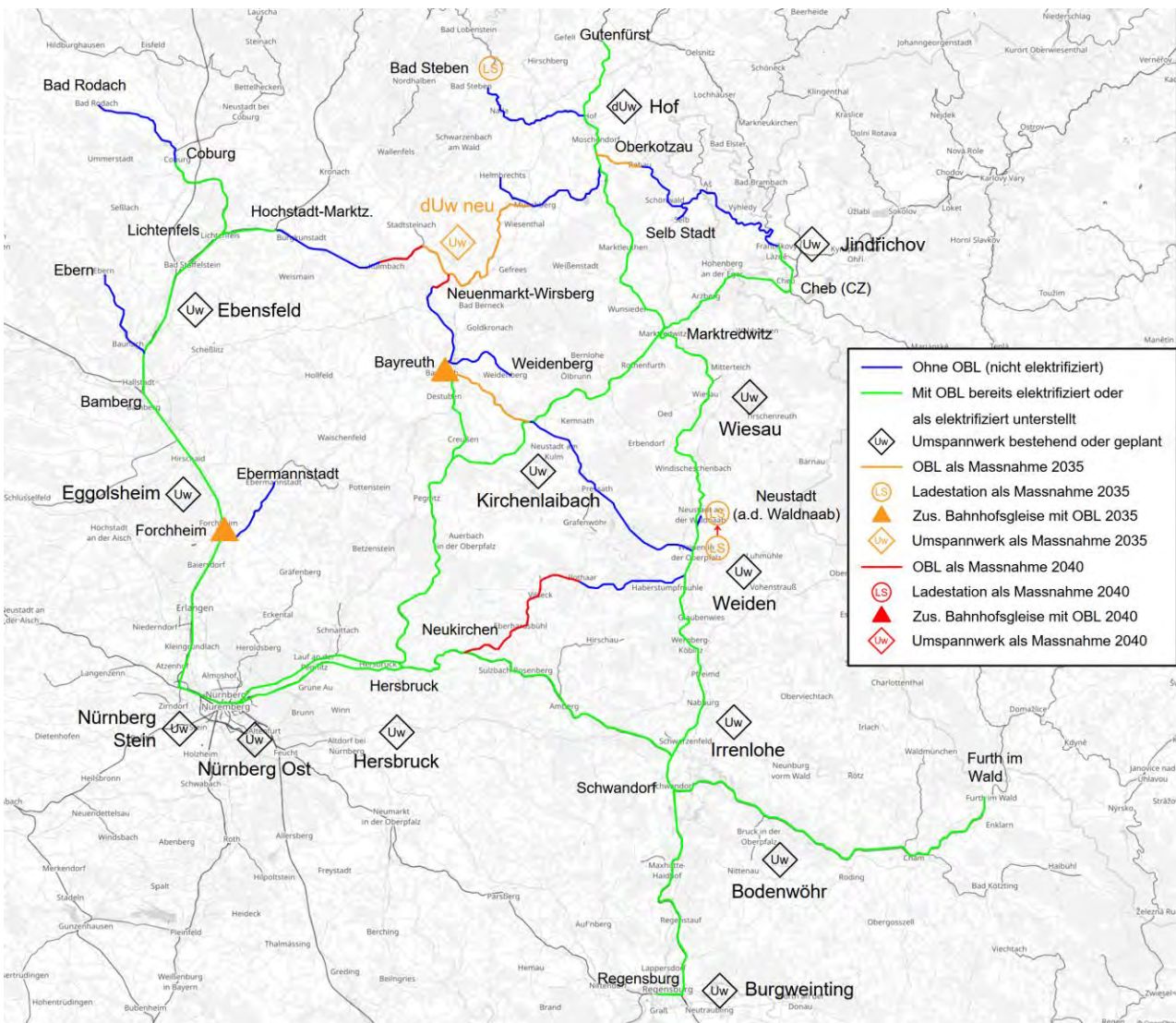


Abbildung 9-3: Arbeitsvariante 2040-2 (hinterlegte Karte stammt von <https://www.openrailwaymap.org/>)

9.4.3 Arbeitsvariante 3 (2040)

- Streckenlänge: 62 km bis 2035 (5 % bezogen auf gesamte Streckenlänge im Untersuchungsgebiet)
109 km bis 2040 (9 % bezogen auf gesamte Streckenlänge im Untersuchungsgebiet)
- Länge OBL: 75 km bis 2035 (4 % bezogen auf gesamte OBL-Länge im Untersuchungsgebiet)
129 km bis 2040 (8 % bezogen auf gesamte OBL-Länge im Untersuchungsgebiet)
- Uw / Urw: Verschiebung geplantes Uw Schnabelwaid nach Kirchenlaibach 2x15 MVA (2035)
- Ladestationen: LS Bad Steben 2.4 MW (2035)
LS Weiden 2.4 MW (2035)
LS Münchberg 2.4 MW (2035)
LS Neustadt a.d. Waldnaab 2.4 MW; verschoben vom Standort Weiden (2040)
- Sonstige Maßnahmen: Elektrifizierung Gleis 8 sowie zwei Abstellgleise in Forchheim (2035)
- Maßnahmen: Elektrifizierung gesamter Bahnhof Bayreuth (inkl. Abstellgleise) (2035)

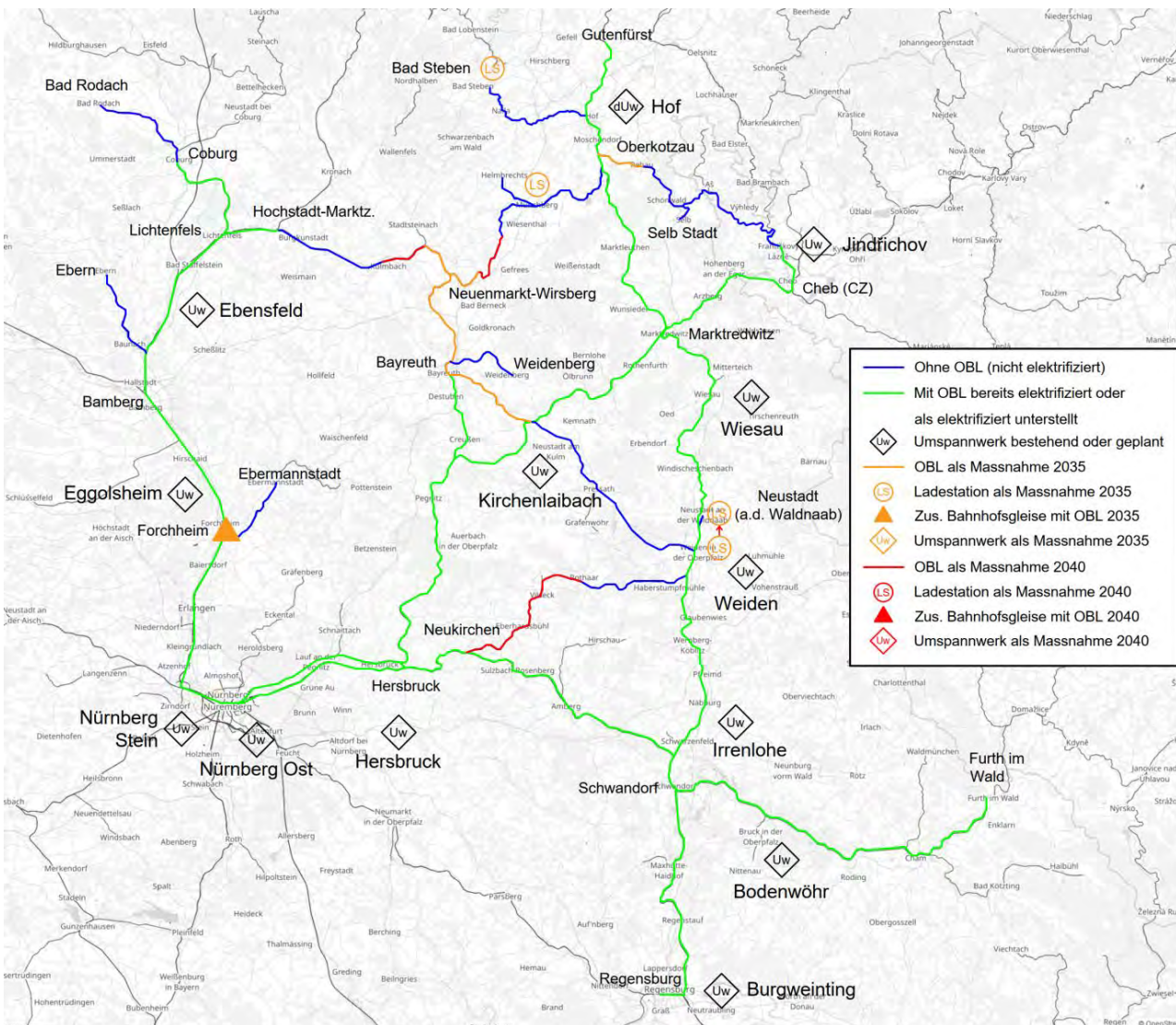


Abbildung 9-4: Arbeitsvariante 2040-3 (hinterlegte Karte stammt von <https://www.openrailwaymap.org/>)

10 VERIFIKATION DER ARBEITSVARIANTEN

10.1 Ziel und Zweck der Simulationen

Die erarbeiteten Speisekonzepte sollen hinsichtlich ihrer Machbarkeit mittels dynamischer Netzsimulationen geprüft werden (Phase 4 gemäß Kapitel 3.3.4). Diese Verifikation ist jedoch ausschließlich für den Zeithorizont 2040 erforderlich, da dieser gegenüber 2035 deutlich mehr elektrische Verkehre beinhaltet und somit den für die Bahnstromanlagen schlimmeren Zustand darstellt.

In der vorliegenden Studie liegt der Fokus bei der Auswertung der Lastflusssimulationen mit Fabel auf den folgenden drei Themen:

1. Energiebilanz der Akkuhybridzüge
2. Qualität und Belastung der Bahnstromversorgung
3. Fahr- und Haltezeiten

Mit Viriato wurde schlussendlich für die Bestvariante das mögliche Betriebskonzept verifiziert. Eine Beschreibung zu den verwendeten Tools Fabel und Viriato ist unter Kapitel 3.6.2 zu finden.

10.2 Ergebnisse Energiebilanz der Züge

10.2.1 Minimaler SoC Arbeitsvarianten 1-3 für den Zeithorizont 2040

Die Ergebnisse der minimalen Energiebilanz je Umlauf für den Zeithorizont 2040 sind nachfolgend aufgelistet. Da auf den Linien RE40, RE43 und RE47 100 % der Strecke als elektrifiziert unterstellt wurde, sind diese nachfolgend nicht aufgeführt. Aufgrund der zusätzlichen Elektrifizierungen bis 2040 sind die resultierenden minimalen Batteriefüllstände (SoC) für die Umläufe im RVOF teilweise höher als zum Zeithorizont 2035. Dies betrifft jedoch nur die RB 24 und die RB 99. Der Unterschied ist zudem mit maximal 10 % SoC sehr gering.

Linie / Umlauf	Minimaler Batteriestand SoC [%]		
	Arbeitsvariante 1	Arbeitsvariante 2	Arbeitsvariante 3
RB 18 Coburg – Bad Rodach	46	46	46
RB 22 / RB 26 Ebermannstadt – Bamberg – Ebern	48	48	48
RB 24 Coburg – Bayreuth	55	55	55
RB 34 Weidenberg – Weiden	39	39	39
RB 95 Hof – Cheb (CZ) – Marktredwitz	41	41	41

Linie / Umlauf	Minimaler Batteriestand SoC [%]		
	Arbeitsvariante 1	Arbeitsvariante 2	Arbeitsvariante 3
RB 95 HVZ Gutenfürst – Hof Hbf – Rehau	87	87	87
RB 97 Bayreuth – Marktredwitz – Bad Steben	49	49	49
RB 98 Helmbrechts – Hof	38	38	38
RB 96 / RB 99 Hof-Neuhof – Selb-Stadt – Hof-Neuhof – Neuenmarkt-Wirsberg – Hof-Neuhof	46	46	46
RE30 Nürnberg Hbf – Bayreuth – Hof	56	56	56
RE32 Nürnberg – Bayreuth – Coburg	32	32	32
RE35 Bamberg – Hof	32	32	32
RE38 Nürnberg – Bayreuth – Bamberg	30	30	30
RE41 Nürnberg – Neustadt a.d. Waldnaab	31	31	31

Tabelle 10-1: Minimaler Batteriestand SOC [%] pro Linie und Variante für den Zeithorizont 2040. Anmerkung: 100 % SoC entspricht dem Energieinhalt am Ende der Batterielebensdauer.

10.2.2 Bewertung / Interpretation

Wie Anhand der Tabelle 10-1 ersichtlich ist, erreichen sämtliche Umläufe eine minimale Batteriekapazität von 30% oder höher und liegen somit im zulässigen Bereich. Gleichzeitig ist ersichtlich, dass die drei Arbeitsvarianten in Bezug auf den minimalen SoC gleichwertig sind. Dies ist dadurch zu begründen, dass die Minima nicht auf den Streckenabschnitten entstehen, wo sich die drei Arbeitsvarianten unterscheiden, sondern eben entlang von Strecke, welche eine identische Elektrifizierung aufweisen. Grundsätzlich am kritischsten zeigen sich die Linien des EVNO, welche mit den Neigetechnik-XEMU-Fahrzeugen betrieben werden. Dies ist unter anderem nicht überraschend, da die XEMU-Fahrzeuge im Akkuhybridmodus über eine geringere Reichweite verfügen als die BEMU-Fahrzeuge, welche im RVOF-Netz eingesetzt werden.

Die Verläufe des Energieinhalts über einen Umlauf sind im Anhang 2 [19] aufgeführt. Sie zeigen, dass die Minima auf den Linien RE 32, RE 35 und RE 38 auf dem Streckenabschnitt Hochstadt-Marktzeuln – Kulmbach auftreten¹². Für die RE 41 geschieht dies auf dem nicht-elektrifizierten Teilstück Freihung – Weiden.

¹² Die RE32 und RE35 verkehren auf diesem Abschnitt gekoppelt.

10.3 Ergebnisse Bahnstromversorgung

10.3.1 Allgemeine Beurteilungskriterien

Mit den Netzsimulationen in Fabel werden die folgenden drei Fragestellungen / Ziele beantwortet:

1. Überprüfung/Nachweis einer guten Energieversorgung: Die Spannungshaltung am Stromabnehmer des Zuges ist ein bewährtes Kriterium zur Beurteilung der Qualität einer Bahnstromenergieversorgung. In vorliegendem Gutachten wurde sowohl die über die gesamte Simulationsdauer minimale aufgetretene Spannung am Stromabnehmer U_{\min} pro Strecke als auch die mittlere nutzbare Spannung $U_{\text{mean_useful}}$ ¹³ pro Speiseabschnitt ausgewertet.
2. Überprüfung der ausreichenden Dimensionierung der bestehenden Bahnstrominfrastruktur: Durch den Einsatz von Akkuhybridzügen wird die Strombelastung auf der bestehenden Bahnstrominfrastruktur zunehmen. Es ist daher zu überprüfen, dass die betroffenen Anlagen nicht thermisch überlastet werden. Bei Überlastungen sind entsprechende Maßnahmen zur Verbesserung der Situation zu formulieren. Diese Maßnahmen bilden wiederum die Basis für die Abschätzung allfälliger Kosten zur Umsetzung eines geeigneten Speisekonzeptes.
3. Ableiten Dimensionierungsgrundlagen neuer Bahnstromanlagen: Für die Speisung von neu elektrifizierten Sektoren oder zur Verstärkung der bestehenden Infrastruktur (z.B. bei Schwachstellen) werden neue Bahnstromanlagen benötigt, wie erweiterte Fahrleitungssektoren, leistungsfähigere Transformatoren, zusätzliche Unterwerke, zusätzliche Umformerwerke, neue Ladeinfrastruktur usw. Aus den Simulationen sollen hierfür die notwendigen Leistungsdaten abgeleitet werden. Diese bilden wiederum die Basis für die Ableitung möglicher Kostenfolgen.

10.3.2 Spannungshaltung

10.3.2.1 Beurteilungskriterien

Nach EN 50163 [28] und EN 50388-1 [31] gilt für ein 15-kV-System:

- Niedrigste Dauerspannung $U_{\min 1}$: 12 kV
- Niedrigste nichtpermanente Spannung $U_{\min 2}$: 11 kV (während 2 Minuten)
- Mittlere nutzbare Spannung $U_{\text{mean_useful}}$: 13.5 kV

10.3.2.2 Ergebnisse U_{\min} für Arbeitsvarianten 1 – 3

Nachfolgende Tabelle zeigt die kleinste während den Simulationen an einem Stromabnehmer aufgetretene Spannung pro Strecke im Betrachtungsperimeter.

¹³ Die mittlere nutzbare Spannung $U_{\text{mean_useful}}$ ist ein Qualitätsmaß der Spannungshaltung nach EN 50388-1 [31].

Strecken-Nr.	Strecke	Minimale Spannung am Stromabnehmer U_{\min} [V]		
		Arbeitsvariante 1	Arbeitsvariante 2	Arbeitsvariante 3
5001	Creußen – Bayreuth Hbf	15'000	15'000	14'216
5021	Hof Hbf – Bad Steben	16'016	16'016	16'019
5025	Münchberg – Helmbrechts	15'000	15'000	15'000
5027	As – Oberkotzau	15'434	15'434	15'435
5050	Weiden – Oberkotzau	13'953	13'954	13'936
5051	Weiden – Neuenmarkt-Wirsberg Süd	15'000	15'000	13'359
5054	Altenstadt – Neustadt a.d.W.	16'161	16'162	16'164
5060	Großalbershof – Weiden	15'749	15'749	15'746
5100	Bamberg – Hof Hbf	12'793	12'793	12'794
5113	Forchheim – Ebermannstadt	15'838	15'838	15'839
5122	Coburg – Bad Rodach	15'689	15'689	15'689
5800	Schwandorf – Furth im Wald	12'828	12'828	12'829
5860	Regensburg Hbf – Weiden	14'628	14'628	14'629
5900	Nürnberg Hbf – Bamberg	14'143	14'143	14'143
5903	Nürnberg Hbf – Cheb	14'461	14'466	14'457
5904	Nürnberg Hbf – Irrenlohe	15'000	15'000	15'000
5919	Breitengüßbach Süd – Theuern	15'517	15'517	15'517
5926	Verbindungsstrecke Pegnitz bei Hersbruck	15'690	15'690	15'689
6311	Coburg – Lichtenfels	15'000	15'000	15'000
6362	Werdau – Hof Hbf	13'782	13'782	13'784
9900	Bayreuth Hbf – Weidenberg	15'000	15'000	14'284
XT0148	Cheb (Eger) – As (Asch)	16'164	16'164	16'164

Tabelle 10-2: Zusammenfassung der kleinsten am Stromabnehmer aufgetretenen Spannung in [V] pro Strecke.

10.3.2.3 Ergebnisse $U_{\text{mean_useful}}$ für Arbeitsvarianten 1 – 3

Nachfolgende Tabelle zeigt die während den Simulationen mittlere nutzbare aufgetretene Spannung pro Speiseabschnitt im Betrachtungsperimeter.

Speisebereich	Mittlere nutzbare Spannung $U_{\text{mean_useful}}$ [V]		
	Arbeitsvariante 1	Arbeitsvariante 2	Arbeitsvariante 3
01 Fürth - Eggolsheim	16'145	16'145	16'146
02 Eggolsheim	16'355	16'355	16'356
03 Eggolsheim - Ebensfeld	15'826	15'826	15'826
04 Ebensfeld	16'297	16'297	16'297
05 Ebensfeld - Hochstadt-Marktzeuln	16'181	16'181	16'181
06 Kulmbach - Neuenmarkt-Wirsberg - Trebgast - Stammbach	16'435	16'391	15'357
07 Gutenfürst - Hof	15'768	15'769	15'770

Speisebereich	Mittlere nutzbare Spannung $U_{\text{mean_useful}}$ [V]		
	Arbeitsvariante 1	Arbeitsvariante 2	Arbeitsvariante 3
08 Hof	16'333	16'333	16'336
09 Hof - Kirchenlaibach - Wiesau	16'053	16'054	16'050
10 Wiesau	16'384	16'384	16'389
11 Wiesau - Weiden	16'299	16'299	16'302
12 Weiden	16'428	16'428	16'431
13 Weiden - Irrenlohe - Hersbruck	16'196	16'196	16'195
14 Nürnberg - Hersbruck rechts der Pegnitz	16'123	16'123	16'120
15 Nürnberg - Hersbruck links der Pegnitz	16'241	16'241	16'239
16 Nürnberg	16'349	16'349	16'350
17 Kirchenlaibach - Hersbruck	16'104	16'103	15'953
18 Kirchenlaibach - Bayreuth	16'208	16'207	15'357
19 Irrenlohe	16'345	16'345	16'346
20 Irrenlohe - Bodenwöhr - Burgweinting	16'231	16'231	16'231
21 Bodenwöhr	16'231	16'231	16'231
22 Bodenwöhr - Furth im Wald	16'231	16'231	16'231

Tabelle 10-3: Resultate zur mittleren nutzbaren Spannung in [V] pro Speisebereich

10.3.2.4 Bewertung / Interpretation

Die Resultate der dynamischen Simulationen zu den Arbeitsvarianten 1 – 3 zeigen, dass sämtliche Spannungsgrenzwerte eingehalten werden. Die minimale an einem Stromabnehmer aufgetretene Spannung U_{min} in Tabelle 10-2 sinkt auf den Strecken 5100 Bamberg – Hof und 5800 Schwandorf – Furth im Wald teilweise leicht unter 13kV, ist jedoch jederzeit über dem zulässigen Grenzwert von 12kV.

Die Strecke Schwandorf – Furth im Wald wird durch den untersuchten Verkehr des EVNO und RVOF nur spärlich befahren (vier Verbindungen der RE47 täglich). Auch ist die zusätzliche Belastung durch Maßnahmen in diesem Netzgebiet nicht Inhalt vorliegender Studie, da bei sämtlichen Arbeitsvarianten lediglich die ca. 40km von Schwandorf entfernt liegende Strecke Neukirchen – Freihung als zusätzlich elektrifiziert betrachtet wurde. Ein Blick auf die mittlere nutzbare Spannung $U_{\text{mean_useful}}$ zeigt, dass die Spannungsqualität in diesem Bereich gut ist und die tiefe Minimalspannung hauptsächlich auf den langen Streckenabschnitt zwischen dem UW Bodenwöhr und der Grenze zurückzuführen ist.

Die andere Strecke mit tiefer minimal aufgetretener Spannung, Bamberg – Hof, wiederum liegt mitten im Untersuchungsgebiet. Eine detailliertere Analyse zeigt, dass die niedrige Spannung für alle Arbeitsvarianten insbesondere im Abschnitt vor dem UW Ebsfeld (von Bamberg aus gesehen) auftritt. Das Verkehrsaufkommen ist in diesem heute schon elektrifizierten Bereich mitsamt Güter- und Fernverkehr hoch. Die Linien RB 22 und RB 26 des RVOF, sowie die Linien RE35 und RE 38 des EVNO verstärken den Energiebedarf weiter. Ein Blick auf die Spannungsplots in Anhang 2 [19] zeigt aber, dass die oben ausgewiesenen minimalen Spannungen bei den Fahrzeugen des EVNO und RVOF nicht auftreten und somit primär durch die anderen Verkehre (Güter- und Fernverkehre) verursacht werden.

Ein Blick auf die mittlere nutzbare Spannung $U_{\text{mean_useful}}$ in Tabelle 10-3 zeigt, dass alle Speisebereiche deutlich über dem zulässigen Grenzwert von 13.5kV liegen.

10.3.3 Unterwerk / Umrichter

10.3.3.1 Beurteilungskriterien

Die Anlagen im Betrachtungsgebiet werden anhand der über die Nennleistung normierten Belastungsdauerkurven in Funktion der Mittelungsdauer beurteilt. Für die Grenzwertkurve wird von den für Vollbahnen typischen Belastungsklassen nach EN 50328 [29] (Stromrichter, Klasse I), respektive EN 50329 [30] (Bahntransformatoren, Klasse IV) ausgegangen.

Für die Anlagen angrenzend ans Studiengebiet ist die Mehrbelastung durch die BEMU-Fahrzeuge anhand des 4-h-RMS-Werts der Scheinleistung tabellarisch ausgewiesen.

10.3.3.2 Anlagen im Studiengebiet

10.3.3.2.1 Arbeitsvariante 1



Abbildung 10-1: Belastungsdauerkurve für das bestehende Umrichterwerk in Hof sowie das neu zu errichtende dUW im Knoten Neuenmarkt-Wirsberg in der Arbeitsvariante 1

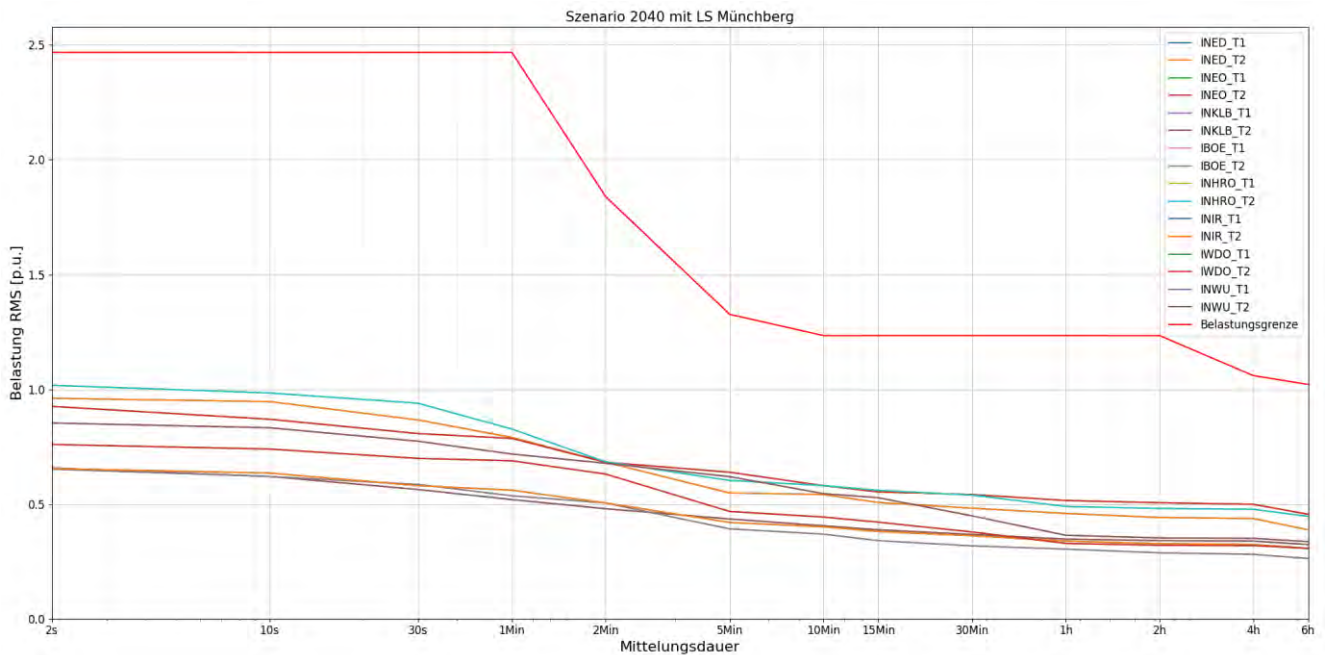


Abbildung 10-2: Belastungsdauerkurve für die bestehenden und die neu zu errichtenden Unterwerke im Studiengebiet in der Arbeitsvariante 1

10.3.3.2 Arbeitsvariante 2

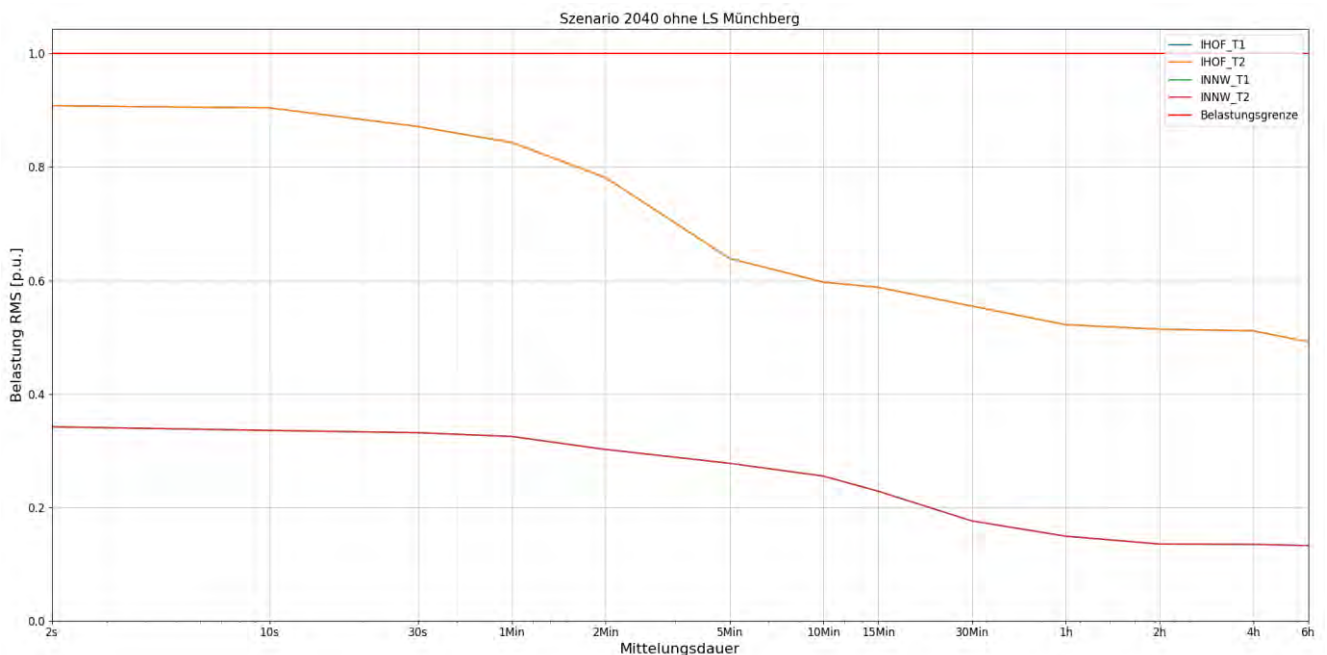


Abbildung 10-3: Belastungsdauerkurve für das bestehende Umrichterwerk in Hof sowie das neu zu errichtende dUW im Knoten Neuenmarkt-Wirsberg in der Arbeitsvariante 2

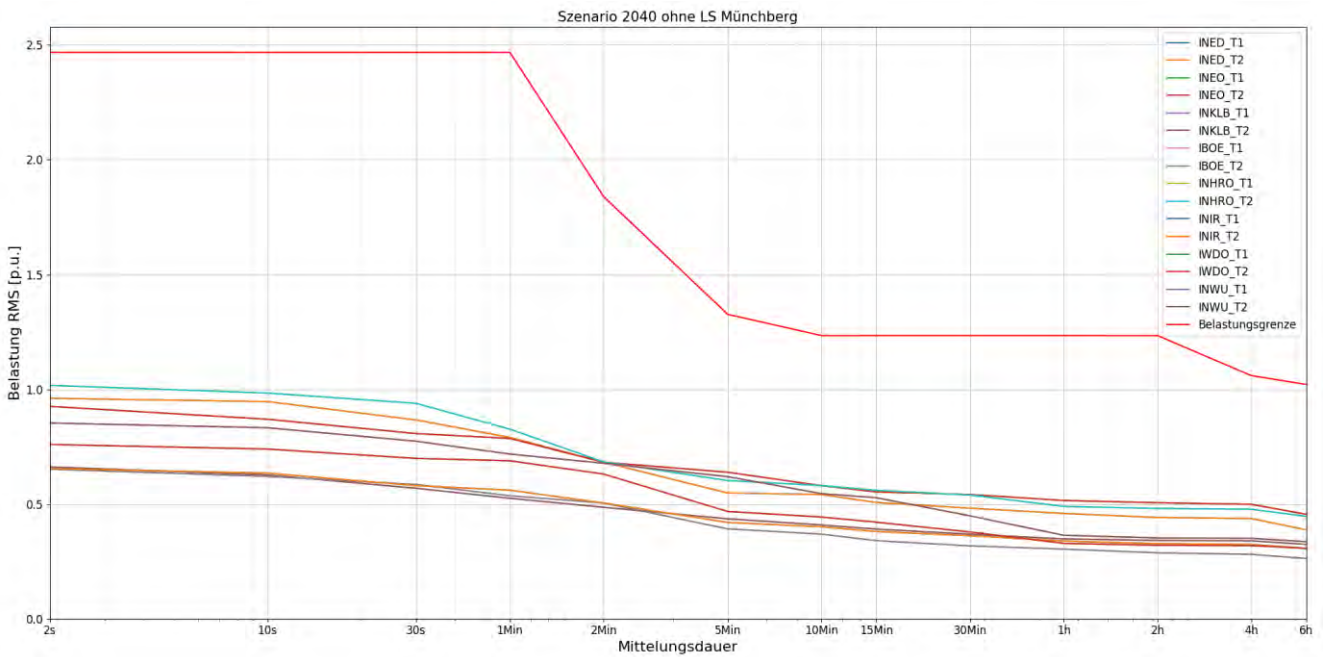


Abbildung 10-4: Belastungsdauerkurve für die bestehenden und die neu zu errichtenden Unterwerke im Studiengebiet in der Arbeitsvariante 2

10.3.3.2.3 Arbeitsvariante 3

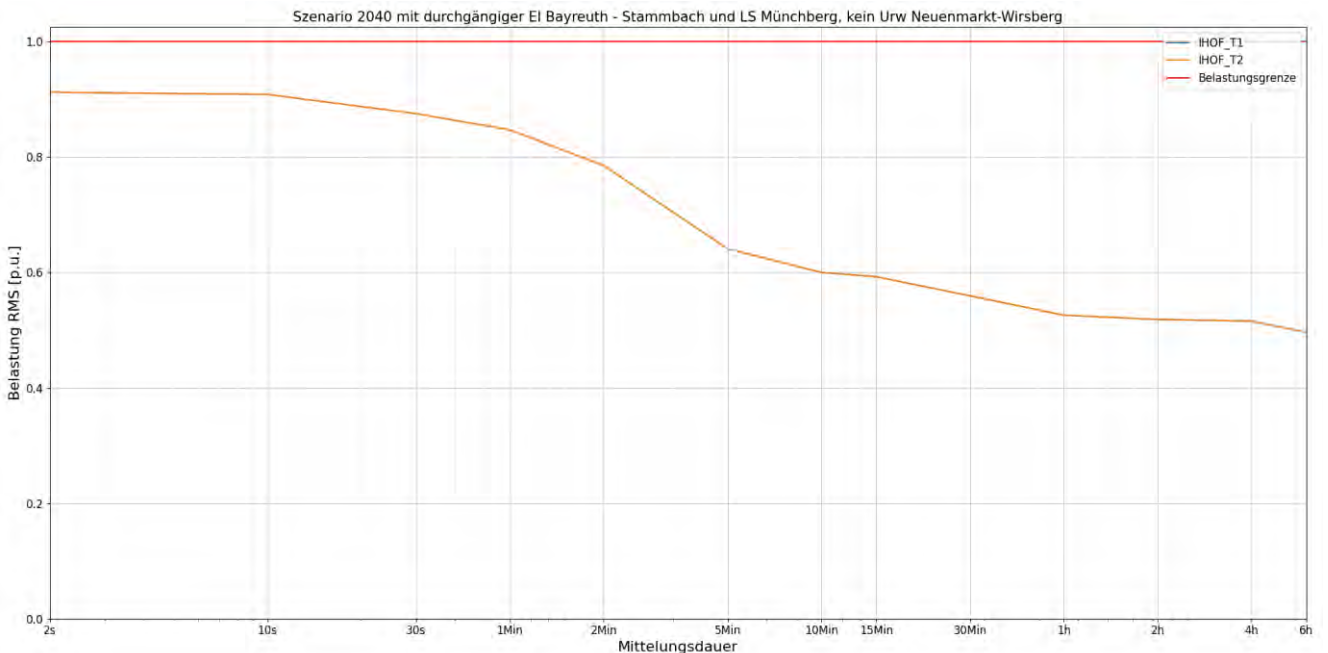


Abbildung 10-5: Belastungsdauerkurve für das bestehende Umrichterwerk in Hof sowie das neu zu errichtende dUW im Knoten Neuenmarkt-Wirsberg in der Arbeitsvariante 3

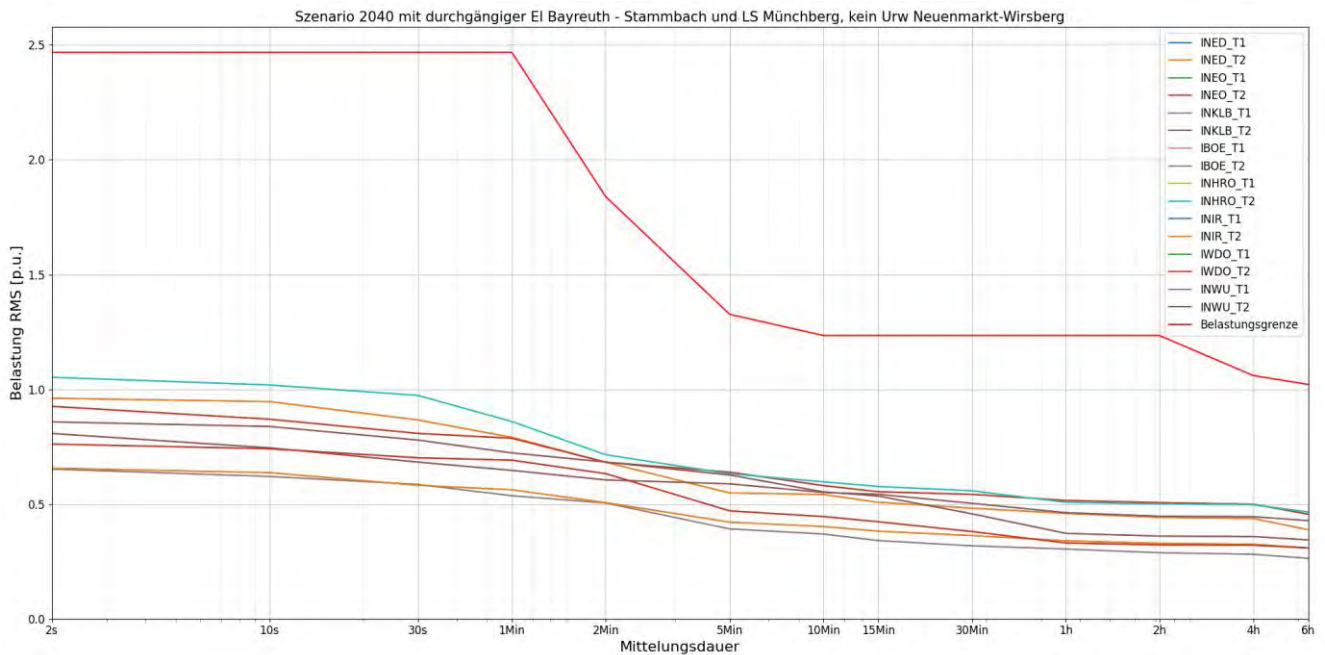


Abbildung 10-6: Belastungsdauerkurve für die bestehenden und die neu zu errichtenden Unterwerke im Studiengebiet in der Arbeitsvariante 3

10.3.3.3 Anlagen angrenzend an das Studiengebiet

Bahnstromanlage	Nennleistung in MVA	Zus. Belastung durch 4h-RMS-Leistung in %		
		Arbeitsvariante 1	Arbeitsvariante 2	Arbeitsvariante 3
UW Burgweinting	15.0	5%	5%	5%
UW Burgweinting	15.0	5%	5%	5%
UW Nürnberg Stein	15.0	3%	3%	3%
UW Nürnberg Stein	15.0	3%	3%	3%
UW Nürnberg Stein	15.0	3%	3%	3%
UW Jindrichov (CZ)	12.5	2%	2%	2%
UW Jindrichov (CZ)	12.5	2%	2%	2%
UW Nürnberg Ost	15.0	5%	5%	5%
UW Nürnberg Ost	15.0	5%	5%	5%

Tabelle 10-4: Mehrbelastung durch die BEMU-Verkehre in den Anlagen angrenzend an das Studiengebiet

10.3.3.4 Bewertung / Interpretation

Die Belastungsdauerkurven zeigen grundsätzlich, dass in allen drei Varianten keine Überlastungen aufgetreten sind und die Anlagen dementsprechend auch für den unterstellten Akkuhybridverkehr ausreichend dimensioniert sind.

Das dezentrale Unterwerk in Hof befindet sich jedoch insbesondere in der kurzzeitigen Betrachtung nahe an der Belastungsgrenze, weshalb da generell fast keine Reserven mehr vorhanden sind.

Für die Bestandsanlagen Ebenfeld und Eggolsheim wurde seitens DB Energie zusätzlich das höchste gemessene Stundenmittel (Wirkleistung) aus dem Jahr 2022 zur Verfügung gestellt [13]. Anhand dieser Angaben konnten die Ergebnisse auf Plausibilität geprüft werden.

Unterwerk	Max. Stundenwert DB	Max. Stundenwert Simulation	Mehrbelastung
Ebenfeld 2x15 MVA	8.94 MW	13.8 MW	54 %
Eggolsheim 2x15 MVA	11.72 MW	15.4 MW	31 %

Der Vergleich zeigt, dass die beiden Anlagen mit dem unterlegten Betriebskonzept, welches sowohl die BEMU-Fahrzeuge als auch prognostizierte Güter- und Fernverkehre berücksichtigt, um 54 % respektive 31 % stärker belastet werden. Aus Sicht Gutachter ist diese Mehrbelastung zwar hoch aber durchaus plausibel, da in vorliegender Betrachtung im Sinne einer Dimensionierungsaufgabe Reserven im Modell berücksichtigt wurden.

10.3.4 Speisepunkt (Speiseleitung)

10.3.4.1 Beurteilungskriterien

Es wurden keine thermischen Berechnungen zur Ermittlung der Leitertemperaturen (Kabel oder Freileitungen) durchgeführt. Die Beurteilung der Leiterbelastung der Speiseleiter vom Unterwerk zur Fahrleitung erfolgt anhand des maximalen 15-Minuten-RMS-Stromes aus den Simulationen.

Nach Angaben von DB Energie werden für die 15-kV-Speisekabel im Betrachtungsraum meist Kabel vom Typ 2xN2XS2Y 240 eingesetzt. Für die Bewertung der Bestandsanlagen im Studiengebiet wird als Grenzwert für die Belastung eines Kabels, für Verlegung in einem Oberflächenkanal aus Beton, nach [9] von 520 A ausgegangen. Die effektive Kabelkonfiguration wurde aus der Speisebezirksliste [7] ausgelesen.

Nach Angaben von DB Energie werden für als Freileiter ausgeführte Speiseleitungen typischerweise Aluminium-Seile, wie das 243-AL1, verwendet. Gemäß [8] beträgt die zulässige Belastung für dieses Seil 625 A.

Nachfolgend sind sowohl für die im Untersuchungsgebiet vorhandenen Speisekabel als auch Freileiter die in den Simulationen aufgetretenen maximalen 15-Minuten-RMS-Strombelastungen und die in Bezug zum Grenzwert resultierende Belastungsgrade angegeben.

Für die gemäß [5] vorgesehenen Neu-Anlagen sind die resultierenden Strombelastungen in Tabelle 10-7 ausgewiesen.

10.3.4.2 Kabelbelastung für Bestandsanlagen

Bahnstromanlage	Abgang Richtung	Grenzwert [A]	Arbeitsvariante 1		Arbeitsvariante 2		Arbeitsvariante 3	
			Max 15min-Strom [A]	Belastung [%]	Max 15min-Strom [A]	Belastung [%]	Max 15min-Strom [A]	Belastung [%]
dUW Hof	Bf Hof	1040	439	42%	439	42%	442	42%
dUW Hof	dUw Hof	1040	58	6%	58	6%	58	6%
dUW Hof	Plauen	1040	916	88%	916	88%	915	88%
Sp Bamberg	Ebensfeld	1040	470	45%	470	45%	469	45%
Sp Bamberg	Eggolsheim	520	385	74%	385	74%	385	74%
Sp Bamberg	Höflein	1040	140	13%	140	13%	140	13%
Sp Dörfles-Esbach	Niederfüllbach	520	159	31%	159	31%	159	31%
Sp Eltersdorf	Eggolsheim	1040	430	41%	430	41%	429	41%
Sp Eltersdorf	Eltersdorf	1040	272	26%	272	26%	272	26%
Sp Eltersdorf	Fürth	1040	432	42%	432	42%	432	42%
Uw Ebensfeld	Abzw Bamberg NBS	1040	716	69%	716	69%	717	69%
Uw Ebensfeld	Bamberg ABS	520	0	0%	0	0%	0	0%
Uw Ebensfeld	Lichtenfels	1040	444	43%	444	43%	444	43%
Uw Ebensfeld	Niederfüllbach	2080	176	8%	176	8%	176	8%
Uw Ebensfeld	Unterleiterbach	2080	353	17%	353	17%	353	17%
Uw Eggolsheim	Bamberg F-Bahn	1040	598	57%	598	57%	598	57%
Uw Eggolsheim	Eggolsheim	1040	70	7%	70	7%	70	7%
Uw Eggolsheim	Eltersdorf F-Bahn	1040	606	58%	606	58%	607	58%
Sp Fürth	Eltersdorf	1040	599	58%	599	58%	598	58%
Sp Lichtenfels	Bf Lichtenfels	1040	296	28%	296	28%	296	29%
Sp Lichtenfels	Ebensfeld	1040	337	32%	337	32%	338	32%
Sp Lichtenfels	Küps	1040	400	38%	400	38%	400	38%
Sp Lichtenfels	Niederfüllbach	520	130	25%	130	25%	131	25%
Sp Niederfüllbach	Ebensfeld	2080	179	9%	179	9%	179	9%
Sp Niederfüllbach	Lichtenfels	520	150	29%	150	29%	151	29%

Tabelle 10-5: Kabelbelastung pro Speisepunkt für Bestandsanlagen

10.3.4.3 Belastung Freileiter pro Speisepunkt für Bestandsanlagen

Bahnstromanlage	Abgang Richtung	Grenzwert [A]	Arbeitsvariante 1		Arbeitsvariante 2		Arbeitsvariante 3	
			Max 15min-Strom [A]	Belastung [%]	Max 15min-Strom [A]	Bahnstromanlage	Abgang Richtung	Grenzwert [A]
Sp Bamberg	Ebensfeld	1250	470	38%	470	38%	469	38%
Sp Dörfles-Esbach	Niederfüllbach	625	159	25%	159	25%	159	25%
Sp Eltersdorf	Eggolsheim	1250	430	34%	430	34%	429	34%
Sp Eltersdorf	Eltersdorf	1250	272	22%	272	22%	272	22%
Sp Eltersdorf	Fürth	1250	432	35%	432	35%	432	35%
Uw Ebensfeld	Abzw Bamberg NBS	1250	716	57%	716	57%	717	57%
Uw Ebensfeld	Lichtenfels	1250	444	36%	444	36%	444	36%
Uw Ebensfeld	Niederfüllbach	2500	176	7%	176	7%	176	7%
Uw Ebensfeld	Unterleiterbach	2500	353	14%	353	14%	353	14%
Uw Eggolsheim	Bamberg F-Bahn	1250	598	48%	598	48%	598	48%
Uw Eggolsheim	Eltersdorf F-Bahn	1250	606	49%	606	49%	607	49%
Sp Fürth	Eltersdorf	1250	599	48%	599	48%	598	48%
Sp Lichtenfels	Ebensfeld	1250	337	27%	337	27%	338	27%
Sp Lichtenfels	Küps	1250	400	32%	400	32%	400	32%
Sp Lichtenfels	Niederfüllbach	625	130	21%	130	21%	131	21%
Sp Niederfüllbach	Ebensfeld	2500	179	7%	179	7%	179	7%
Sp Niederfüllbach	Lichtenfels	625	150	24%	150	24%	151	24%

Tabelle 10-6: Freileiterbelastung pro Speisepunkt für Bestandsanlagen

10.3.4.4 Speisepunktbelastung für Neu-Anlagen

Bahnstromanlage	Abgang Richtung	Zeithorizont	Variante 1 Max 15min- Strom [A]	Variante 2 Max 15min- Strom [A]	Variante 3 Max 15min- Strom [A]
Uw Bodenwöhr	Bodenwöhr	2040	85	85	85
Uw Bodenwöhr	Fürth iW	2040	320	320	320
Uw Bodenwöhr	Fürth iW Ug	2040	291	291	291
Uw Bodenwöhr	Schwandorf	2040	158	158	159
Uw Bodenwöhr	Schwandorf Ug	2040	288	288	289
dUW Hof	Vg	2040	604	604	610
Sp Amberg	Amberg	2040	61	61	61
Sp Amberg	Hersbruck Ost	2040	117	117	119
Sp Amberg	Irrenlohe	2040	124	124	126
Sp Bayreuth	Bayreuth	2035	192	192	156
Sp Bayreuth	Kirchenlaibach	2035	139	140	347
Sp Bayreuth	Neuenmarkt-Wirsberg	2035	178	177	307
Sp Bayreuth	Schnabelwaid	2040	204	205	151
Uw Hersbruck Ost	5926	2040	143	143	143
Uw Hersbruck Ost	Amberg	2040	258	258	255
Uw Hersbruck Ost	Hohenstadt	2040	97	97	97
Uw Hersbruck Ost	Neunkirchen	2040	513	512	508
Uw Hersbruck Ost	Nürnberg	2040	279	279	275
Uw Hersbruck Ost	Schnabelwaid	2040	477	477	524
Uw Irrenlohe	Amberg	2040	201	201	204
Uw Irrenlohe	Irrenlohe	2040	157	157	157
Uw Irrenlohe	Schwandorf	2040	229	229	228
Uw Irrenlohe	Vg	2040	283	283	283
Uw Irrenlohe	Weiden	2040	516	516	515
Uw Kirchenlaibach	Bayreuth	2035	149	150	364
Uw Kirchenlaibach	Kirchenlaibach	2035	67	67	67
Uw Kirchenlaibach	Marktredwitz	2040	382	382	357
Uw Kirchenlaibach	Schnabelwaid	2040	394	393	472
Sp Marktredwitz	Marktredwitz	2040	122	122	122
Sp Marktredwitz	Oberkotzau	2040	455	455	447
Sp Marktredwitz	Schirnding	2040	119	119	119
Sp Marktredwitz	Schnabelwaid	2040	274	274	279
Sp Marktredwitz	Wiesau	2040	380	381	404
Sp Neunkirchen	Hersbruck Ost	2040	274	274	270
Sp Neunkirchen	Neunkirchen	2040	130	130	130
Sp Neunkirchen	Nürnberg Ost	2040	242	242	241
Sp Neunkirchen	Simmelsdorf	2040	128	128	128
Uw Nürnberg Ost	Hersbruck links	2040	373	373	377

Bahnstromanlage	Abgang Richtung	Zeithorizont	Variante 1 Max 15min- Strom [A]	Variante 2 Max 15min- Strom [A]	Variante 3 Max 15min- Strom [A]
Uw Nürnberg Ost	Hersbruck rechts	2040	613	613	617
Uw Untersteinach	Bayreuth	2035	217	213	240
Uw Untersteinach	Hochstadt-Marktzeuln	2035	184	184	184
Uw Untersteinach	Oberkotzau	2035	142	240	145
Uw Burgweinting	Schwandorf	2040	690	690	690
Sp Schwandorf	Bodenwöhr	2040	342	342	343
Sp Schwandorf	Burgweinting	2040	564	564	564
Sp Schwandorf	Irrenlohe	2040	193	193	193
Sp Schwandorf	Irrenlohe Vg	2040	283	283	283
Sp Schwandorf	Schwandorf	2040	134	134	134
Uw Wiesau	Marktrechwitz	2040	712	712	729
Uw Wiesau	Weiden	2040	346	346	344
Uw Wiesau	Wiesau	2040	187	187	187
Sp Oberkotzau	Hof	2040	260	260	262
Sp Oberkotzau	Marktrechwitz	2040	651	651	657
Sp Oberkotzau	Neuenmarkt-Wirsberg	2040	66	65	66
Sp Oberkotzau	Oberkotzau	2040	95	95	95
Sp Oberkotzau	Selb-Plößberg	2040	101	101	101
Sp Oberkotzau	VG Hof	2040	604	604	610
Uw Weiden	Irrenlohe	2040	623	623	623
Uw Weiden	Neukirchen	2040	86	86	87
Uw Weiden	Weiden	2040	223	223	223
Uw Weiden	Wiesau	2040	345	345	346

Tabelle 10-7: Speisepunktbelastung für Neu-Anlagen

10.3.4.5 Bewertung / Interpretation

Die Ergebnisse zu den Bestandsanlagen zeigen, dass in den Simulationen zum Zeithorizont 2040 keine Überlastungen aufgetreten sind und demnach auch mit Akkuhybridzügen die Bestandsanlagen genügend dimensioniert sind. Dies gilt sowohl für die Speisekabel als auch -Freileiter.

Für die Neu-Anlagen wurde ausschließlich die zu erwartende Belastung dargestellt und explizit kein Vergleich zu einer beliebigen Leiterkonfiguration gemacht. Dies ist in den weiteren Planungsschritten vorzunehmen.

10.3.5 Oberleitung

10.3.5.1 Beurteilungskriterien

Es werden keine thermischen Berechnungen zur Ermittlung der Fahrdrattemperatur durchgeführt. Die Beurteilung der Belastung erfolgt anhand des Stromes.

Die Leiter einer Fahrleitungsanlage weisen einen thermischen Grenzstrom für die Dauerbelastung auf (unter vorgegebenen Umweltbedingungen). Gemäß Angaben der DB Energie in [10] ist für Beurteilung der Fahrleitungsbelastung die zeitgewichtete Strombelastungsgrenzkurve, wie in nachfolgender Abbildung dargestellt, anzuwenden. Diese gilt für die typischerweise bei DB eingesetzten Regelfahrleitungen Re 100, Re 160, Re 200 und Re 330.

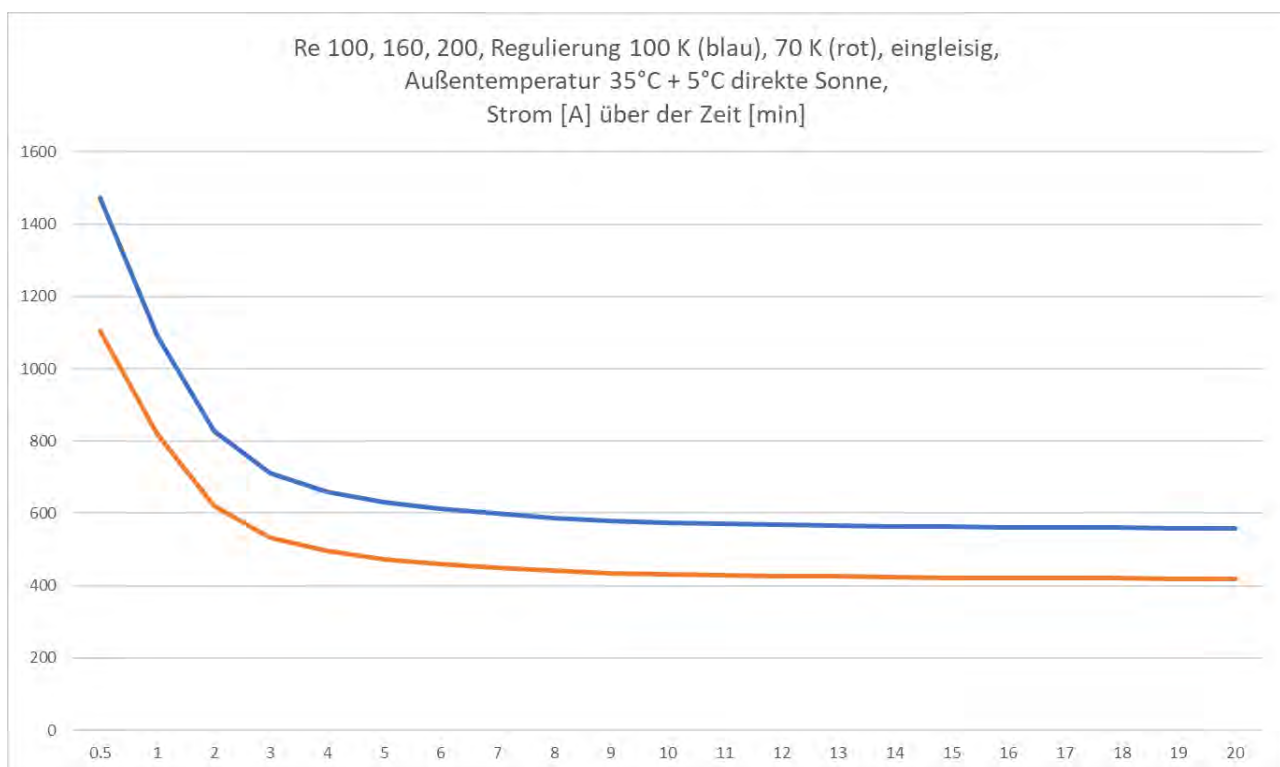


Abbildung 10-7: Zulässig Strombelastung der Regelfahrleitungssysteme Re 100, Re 160 und Re 200 gemäß DB Energie (Quelle [10])

10.3.5.2 Ergebnis und Bewertung

Zugunsten der Übersichtlichkeit vom vorliegenden Bericht sind die Grafiken nachfolgend nicht aufgeführt, sondern sind im Anhang 2 [19] zu finden. Die Ergebnisse zeigen aber, dass in allen drei untersuchten Varianten für den Zeithorizont 2040 keine Überlastungen aufgetreten sind und demnach keine zusätzlichen Massnahmen in den Oberleitungsanlagen notwendig ist.

10.4 Ergebnisse Betriebskonzept / Fahrzeiten

10.4.1 Beurteilungskriterien Fahr- und Haltezeiten

Grundsätzlich liegt für die vorliegende Untersuchung bereits ein Betriebskonzept für den Betrieb im SPNV vor. Dieses soll basierend auf definierten Referenzfahrzeugen und den gewählten Ladekonzepten für den Betrieb mit Akkuhybridzügen mithilfe der Software Viriato überprüft werden.

Durch die Zuglaufrechnungen in Fabel (ohne elektrisches Netz) wird in einem ersten Schritt die technische Fahrzeit ermittelt. Die technische Fahrzeit ist diejenige Zeit, während welcher der Zug in Bewegung ist (Geschwindigkeit grösser 0 km/h) – also ohne Haltezeiten oder Zuschläge zur Fahrplanstabilität. Die Fahrzeit kann auch signifikant durch die Wahl des Referenzfahrzeuges beeinflusst werden, je nach Leistung und Beschleunigungsvermögen des Zuges. Die resultierende technische Fahrzeit wird von Betriebspunkt (Haltepunkt) zu Betriebspunkt in tabellarischer Form ausgegeben und dargestellt.

10.4.2 Ergebnisse

Auf Basis der Fahrzeiten aus Fabel erfolgte die Prüfung, ob das geplante Fahrplankonzept gemäß Kapitel 5 und weiterhin umsetzbar bzw. mit den neuen Fahrzeugen möglich ist. Dazu wurde bei den technischen Fahrzeiten einerseits ein für Triebzüge im SPNV zu unterstellender Regelzuschlag von 3% berücksichtigt und andererseits noch den streckenspezifischen Bauzuschlag.

Die Analyse hat gezeigt, dass mit den neuen Fahrzeugen das Fahrplankonzept bzw. die bisherigen Fahrzeiten haltbar sind. Die entsprechende Prüfung soll in der nachfolgenden Tabelle anhand eines Beispiels dargestellt werden. Aufgrund von Rundungseffekten sind in den Tabellen jeweils leichte Abweichungen im Zehntels-Minuten-Bereich möglich.

RE 30 Nürnberg – Bayreuth – Hof									
Station	technische Fahrzeit ohne Regelzuschlag [min]	technische Fahrzeit inkl. Regelzuschlag [min]	Bauzuschlag [min]	Fahrzeitüberschuss [min]	Summe Fahrzeit inkl. Zuschläge [min]	Haltezeit [min]	Reisezeit [min]	Ankunftszeit Mustertakt [hh:mm]	Abfahrtszeit Mustertakt [hh:mm]
Nürnberg Hbf									05:37.3
Neuhaus (Pegnitz)	23.0	23.7	2.9	1.6	28.2	0.7	28.9	06:05.5	06:06.2
Pegnitz	7.9	8.2	0.3	0.0	8.5	2.0	10.5	06:14.7	06:16.7
Bayreuth Hbf	13.4	13.8	0.6	0.2	14.6	1.5	16.1	06:31.3	06:32.8
Treggast	7.6	7.8	1.0	0.2	9.0	0.7	9.7	06:41.8	06:42.5
Münchberg	21.9	22.6	1.0	0.4	24.0	0.7	24.7	07:06.5	07:07.2
Hof Hbf	14.0	14.4	0.7	1.9	17.0		17.0	07:24.2	

RE 30 Nürnberg – Bayreuth – Hof									
Station	technische Fahrzeit ohne Regelzuschlag [min]	technische Fahrzeit inkl. Regelzuschlag [min]	Bauzuschlag [min]	Fahrzeitüberschuss [min]	Summe Fahrzeit inkl. Zuschläge [min]	Haltezeit [min]	Reisezeit [min]	Ankunftszeit Mustertakt [hh:mm]	Abfahrtszeit Mustertakt [hh:mm]
Summe	87.8	90.5	6.5	4.3	101.3	5.6	106.9		

Tabelle 10-8: Fahrzeiten RE 30 Nürnberg - Hof

Der RE 30 verkehrt von Nürnberg nach Hof. Die reine technische Fahrzeit beträgt in Fahrtrichtung Hof inklusive dem Regelzuschlag von 3% insgesamt 90.5 Minuten. Berücksichtigt man den entsprechenden Bauzuschlag von in Summe 5.6 Minuten sowie die minimalen Haltezeiten verbleibt ein Fahrzeitüberschuss von 4.3 Minuten. Mit dem neuen Fahrzeug kann also die Fahrzeit, welche für das Gesamtkonzept erforderlich ist, gehalten werden. Die übrigen Linien wurden ebenfalls bezüglich der Fahrzeit und Knoteneinbindung geprüft. Die Bildfahrpläne aller Linien sowie die Netzgrafik sind im Anhang ersichtlich.

11 PRÜFUNG DER STANDORTE DER BAHNSTROMANLAGEN

11.1 Ausbau Oberleitungsanlage

11.1.1 Allgemeines Fazit

Die unter Kapitel 9.4 dargestellten Speisevarianten sehen für einen robusten Akkuhybridverkehr in den Ausschreibungsnetzen Regionalverkehr Oberfranken und Expressverkehr Nordostbayern neue Oberleitungsanlagen auf einer gesamten Streckenlänge von 113 km bis 133 km vor. Im Rahmen einer ersten Machbarkeitsabschätzung sowie unter Einbezug von Vertretern der DB InfraGO sowie DB Energie im projektbegleitenden Arbeitskreis scheinen die vorgeschlagenen Elektrifizierungsmassnahmen aus technischer Sicht grundsätzlich umsetzbar zu sein. Auf zwei konkrete Herausforderungen wird vorliegend etwas detaillierter eingegangen:

- Schiefe Ebene zwischen Neuenmarkt-Wirsberg und Marktschorgast
- Straßenbrücke in Untersteinach

11.1.2 Schiefe Ebene

Zwischen den Bahnhöfen Neuenmarkt-Wirsberg und Marktschorgast befindet sich die sogenannte Schiefe Ebene. Dieser Streckenabschnitt zeichnet sich als eine Steilstrecke mit maximaler Neigung von 25 ‰ aus und gilt aufgrund der zahlreichen vorhandenen Stützmauern und Steindämme als technische Meisterleistung aus dem 19. Jahrhundert. Die Strecke ist als Kulturdenkmal im Bayerischen Denkmalschutzgesetz erfasst.

Vorliegende Studie hat gezeigt, dass die Elektrifizierung der Schiefen Ebene ein wichtiger Ausbauschritt für die Elektrifizierung der Oberfranken-Achse darstellt. Dank der großen Neigung wären in Richtung Neuenmarkt-Wirsberg herunterfahrende elektrische Züge in der Lage relativ viel Energie zu regenerieren und diese bspw. hochfahrenden Zügen über die Oberleitungsanlage zur Verfügung zu stellen. Der Energiebedarf ist auf der steilen Strecke bei Bergfahrt relativ hoch, so dass eine relativ kurze Elektrifizierung den Energiebedarf ab Batterie stark reduziert.

Die Errichtung einer Oberleitungsanlage wird auf diesem Abschnitt technisch als machbar, aber herausfordernd eingestuft. Sicherlich sind Anforderungen zu erfüllen, die bei „normalen“ Elektrifizierungen nicht anfallen. Der Bau einer Oberleitungsanlage entlang der Schiefen Ebene stellt deshalb ein Projektrisiko bezüglich der zeitlichen Umsetzung dar. Die Elektrifizierung der Schiefen Ebene ist aber auch Teil des übergeordneten Ziels, die Oberfranken-Achse durchgängig zu elektrifizieren und ist deshalb ohnehin früher oder später anzugehen.

Da dieser Ausbau also ein Projektrisiko darstellt, wurde zusätzlich untersucht, welche Maßnahmen erforderlich sind, falls die Schiefe Ebene nicht elektrifiziert werden kann. Basierend auf einer zusätzlichen Simulation, konnte festgestellt werden, dass deutlich mehr Oberleitung zwischen Marktschorgast und Münchberg respektive Oberkotzau erforderlich wäre, damit der BEMU-Betrieb garantiert werden kann. Falls zudem nicht an eine Bestandsanlage angeschlossen werden kann (Elektrifizierung nicht bis Oberkotzau), wäre zudem eine weitere Bahnstromanlage erforderlich, was wirtschaftlich und auch mit Blick auf eine Vollelektrifizierung als das Fernziel nicht vorteilhaft wäre.

Für die Elektrifizierung der Schiefen Ebene sollten die weiteren und konkreteren Planungsschritte rasch angegangen werden.

11.1.3 Straßenbrücke in Untersteinach

In Untersteinach wurde 2018 eine Straßenbrücke erbaut, welche für eine künftige Elektrifizierung der Oberfranken-Achse eine zu geringe Höhe aufweist. Gemäß Aussagen aus dem projektbeteiligten Arbeitskreis beträgt die lichte Höhe bei der Gleichachse 4.90 m. Dies ist zu niedrig, als dass unter der Brücke eine Oberleitung mit 15 kV, 16.7 Hz gebaut werden könnte.

Als mögliche bahnseitige Lösungen bestehen zwei Varianten: Eine Absenkung der Gleise oder ein spannungsloser und geerdeter Abschnitt in der Fahrleitung. Die Absenkung der Gleise ist jedoch sehr teuer und die tiefer gelegte Strecke wäre dem bestehenden Hochwasserrisiko in diesem Gebiet verstärkt ausgesetzt. Ein spannungsloser und geerdeter Abschnitt in der Fahrleitung ist für BEMU kein Problem – im entsprechenden Abschnitt fährt der Zug einfach im Akkumodus. Für andere Verkehre ohne Akku ergibt sich jedoch eine Reduktion der Zuverlässigkeit und eine Reduktion der Verfügbarkeit der Strecke. Diese Züge müssen den Abschnitt mit Schwung passieren. Kommt es zu einem Stillstand im spannungslosen Bereich, so kann der Zug diesen nicht mehr aus eigener Kraft verlassen und muss abgeschleppt werden – ein temporäres Einschalten des spannungslosen Abschnitts, wie z.B. bei Schutzstrecken, ist aufgrund der geringen Distanz zwischen Fahrdrabt und Wagendächern nicht möglich. Da die Brücke die Bahn unter einem geringen Winkel quert und die Absenkung des Fahrdrabts über mehrere Felder erfolgen muss, ergibt sich ein relativ langer Abschnitt, der spannungslos sein muss. Für Akkuhybridzüge ist diese Lösung deshalb technisch machbar, für einen späteren durchgängigen Verkehr mit elektrischen Zügen ist aber die genaue Lösung noch zu evaluieren.

11.2 Unterwerke / Umrichterwerke

11.2.1 Unterwerk Kirchenlaibach

Die TU Dresden hat 2021 ein Bahnstrom-Gutachten [25] vorgestellt, in welchem verschiedene Varianten zur Elektrifizierung im Raum Nordostbayern untersucht und bewertet wurden. Zusammengefasst resultierten aus dem Gutachten zwei Empfehlungen:

- **Empfehlung 1:** Zentrale Bahnstromversorgung mit Unterwerken an den Standorten Bodenwöhr, Hohenstadt, Irrenlohe, Schnabelwaid, Wiesau sowie der Ausbau des Bahnstromnetzes entlang dem Ostkorridor (Burgweinting bis Wiesau), zwischen Bodenwöhr und Irrenlohe sowie der Anschluss an das Bestandsnetz über ein Schaltwerk in Ottensoos und einer Bahnstromleitung von Ottensoos bis nach Hohenstadt. Weiter könnte entweder der sogenannte südliche Ringschluss mit einer Bahnstromleitung von Hohenstadt nach Schnabelwaid sowie von Hohenstadt nach Irrenlohe oder der nördliche Ringschluss mit einer Bahnstromleitung von Hohenstadt über Schnabelwaid bis nach Wiesau umgesetzt werden.
- **Empfehlung 2:** Prüfung weiterer Möglichkeiten wie:
 - Verlängerung der Bahnstromleitung von Wiesau über Hof bis nach Werdau.
 - Alternative Uw-Standorte in Weiden und Marktredwitz anstelle Wiesau und dem SP Marktredwitz.

In vorliegender Studie wurde grundsätzlich die Empfehlung 1 mit dem südlichen Ringschluss unterstellt. Die Ergebnisse haben aber gezeigt (siehe Kapitel 8.3), dass der Unterwerksstandort Schnabelwaid aufgrund der notwendigen Streckenelektrifizierung des Streckenabschnitts Bayreuth – Kirchenlaibach suboptimal ist und stattdessen in Kirchenlaibach eine Bahnstromanlage erforderlich ist. Das Gutachten zum Bahnstromausbau von 2021 zeigt aber auch, dass die Errichtung eines Uw in Kirchenlaibach und die dadurch notwendige verlängerte Bahnstromleitung aus Hohenstadt grundsätzlich unproblematisch ist. Aus diesem Grund wurde, und dies auch in Absprache mit DB Energie, die Standortverschiebung von Schnabelwaid nach Kirchenlaibach als akzeptabel bewertet.

11.2.2 Umrichterwerk im Knoten Neuenmarkt-Wirsberg

Die Studienergebnisse haben gezeigt, dass im Raum Neuenmarkt-Wirsberg eine neue Bahnstromanlage mit 15 kV /16.7 Hz erforderlich ist. Nachfolgende Grafik zeigt einen Ausschnitt aus der Stromnetzkarte (www.flosm.de). Daraus ist ersichtlich, dass in diesem Gebiet keine 110-kV-Bahnstromversorgung (16.7 Hz) vorhanden – auch nicht in unmittelbarer Nähe. Jedoch ist in Untersteinach eine 110-kV-Leitungen des öffentlichen Netzes (50 Hz) vorhanden.



Abbildung 11-1: 50-Hz-Hochspannungsleitungen im Betrachtungsraum (Quelle: <https://www.flosm.de/>); Ergänzt mit den relevanten Bahngleisen zwischen Kulmbach via Neuenmarkt-Wirsberg in Richtung Oberkotzau sowie in Richtung Bayreuth (gelb).

Es bietet sich eine Fläche östlich von Untersteinach an. Der Standort zeichnet sich durch die kurze Distanz zur Bahn als auch zur Hochspannungsleitung und einem Unterwerk aus sowie durch einen ausreichenden Abstand zu bewohntem Gebiet. Die Situation ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

In vorliegender Studie wurde die Machbarkeit nicht vertiefter geklärt. Dies würde den Umfang der Studie übersteigen und erfolgt daher in den weiteren Planungsschritten. Die durchgeführte Analyse erlaubt

aber die Schlussfolgerung, dass ein Standort für ein Umrichterwerk in Untersteinach höchstwahrscheinlich zu finden ist.

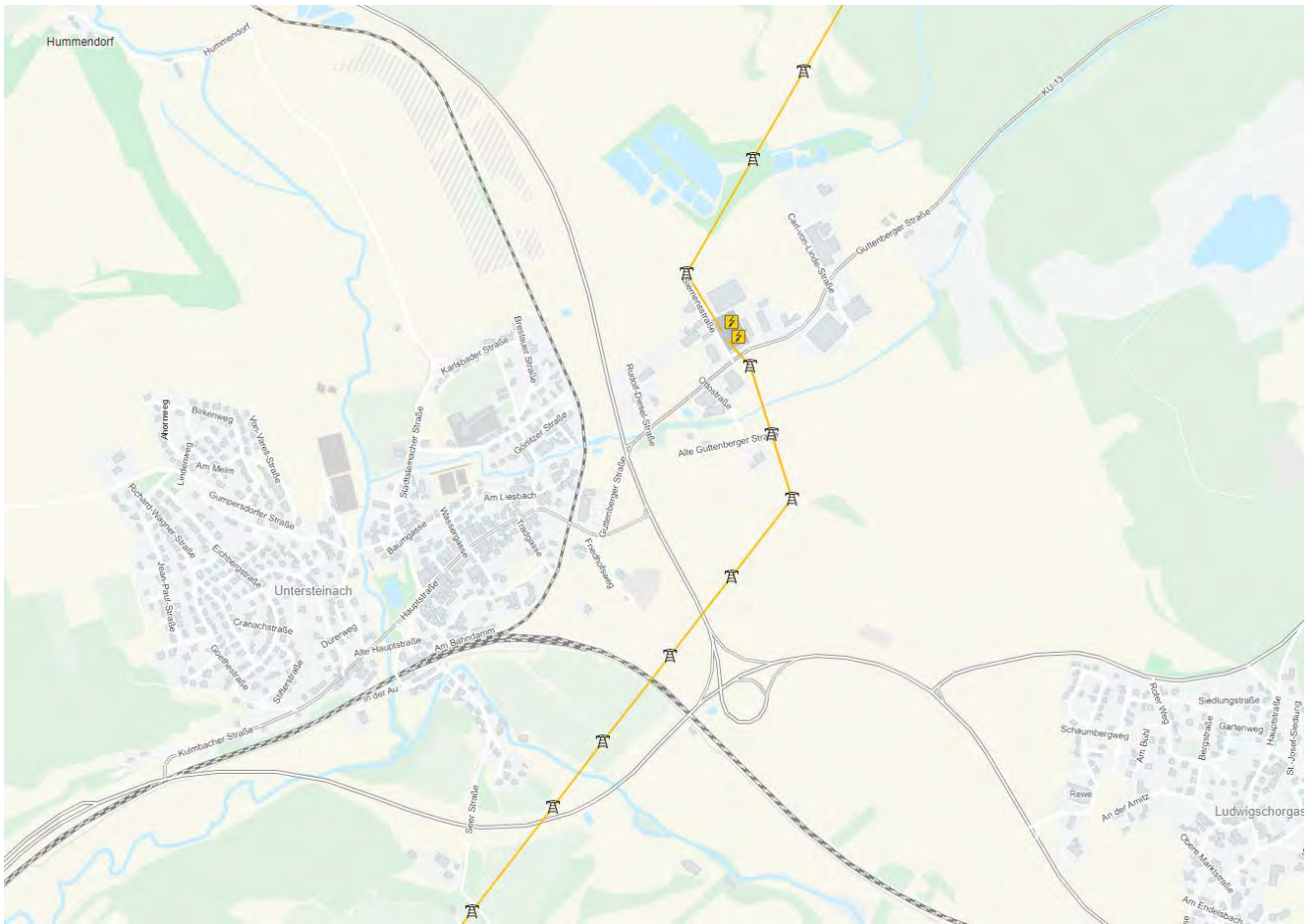


Abbildung 11-2: Situation in Untersteinach (Quelle: <https://www.flosm.de/>)

11.3 Ladestation / Ladeunterwerke

11.3.1 Standort Münchberg

Wie unter Kapitel 8.3 beschrieben, ist für die RB98 eine Lademöglichkeit in Münchberg zwingend erforderlich. In zwei der drei untersuchten Arbeitsvarianten nach Kapitel 9.4 wurde in Münchberg deshalb eine Ladestation berücksichtigt. Auch die RB99, welche zwischen Hof und Neuenmarkt-Wirsberg verkehrt, profitiert von einer Lademöglichkeit in Münchberg und muss bei der Dimensionierung mitberücksichtigt werden.

Nach Betriebskonzept (siehe Kapitel 5) verkehren beide Linien in Einfachtraktion. Die Ladeleistung pro Fahrzeug ist auf 1.2 MW begrenzt. Da es möglich ist, dass von beiden Linien ein Fahrzeug gleichzeitig in Münchberg ist, resultiert somit ein Bedarf von 2.4 MW-Ladeleistung.

Abklärungen bei den Stadtwerken Münchberg [14] haben ergeben, dass beim Bahnhof Münchberg vom Energienetz her die Installation einer Ladestation mit bis zu 2.4 MVA grundsätzlich möglich ist, jedoch zusätzliche Tiefbaumaßnahmen erforderlich sind.

Nachfolgende Abbildung zeigt die Situation in Münchberg. Nach dieser scheint es möglich, auf noch freien Flächen in Bahnhofsnähe (insbesondere auf südlicher Seite) eine Ladestation zu errichten.



Abbildung 11-3: Situation in Münchberg im Satellitenbild; (Quelle: Google Maps)

11.3.2 Standort Bad Steben

In Bad Steben wird für die RB97 eine Ladestation benötigt, siehe Kapitel 8.3. Nach Betriebskonzept gemäß Kapitel 5 soll diese Linie in Doppeltraktion verkehren. Mit der pro Fahrzeug begrenzten Ladeleistung von 1.2 MW resultiert in Bad Steben ein Bedarf von 2.4 MW.

Abklärungen bei der Bayernwerk Netz GmbH [15] haben ergeben, dass beim Bahnhof Bad Steben vom Energienetz her die Installation einer Ladestation mit bis zu 2.4 MVA grundsätzlich möglich ist.

Nachfolgende Abbildung zeigt die Situation in Bad Steben. Nach dieser scheint es möglich, auf noch freien Flächen in Bahnhofsnähe (insbesondere auf der süd-östlichen Seite) eine Ladestation zu errichten.



Abbildung 11-4: Situation in Bad Steben im Satellitenbild; (Quelle: Google Maps)

11.3.3 Standort Weiden

In Weiden wird für die RB34 eine Ladestation benötigt, siehe Kapitel 8.3. Nach Betriebskonzept gemäß Kapitel 5 soll diese Linie in Doppeltraktion verkehren. Mit der pro Fahrzeug begrenzten Ladeleistung von 1.2 MW resultiert in im Bahnhof Weiden ein Bedarf von 2.4 MW.

Abklärungen bei der Bayernwerk Netz GmbH [16] haben ergeben, dass beim Bahnhof in Weiden vom Energienetz her die Installation einer Ladestation mit bis zu 2.4 MVA grundsätzlich möglich ist.

Nachfolgende Abbildung zeigt die Situation beim Bahnhof Weiden. Sie zeigt, dass insbesondere im südwestlichen Bereich es möglich sein sollte, auf noch freien Flächen in Bahnhofsnähe eine Ladestation zu errichten. Da die Bahnhofsgleise jedoch auf der östlichen Seite liegen, sollte bei den weiteren konkreteren Planungsschritten geprüft werden, ob die Ladestation allenfalls auch in ein Bahnhofgebäude untergebracht werden kann.



Abbildung 11-5: Situation in Weiden im Satellitenbild; (Quelle: Google Maps)

11.3.4 Standort Neustadt an der Waldnaab

In Neustadt an der Waldnaab wird für die RE41 eine Ladestation benötigt, siehe Kapitel 8.3. Nach Betriebskonzept gemäß Kapitel 5 soll diese Linie ab Neukirchen in Einfachtraktion verkehren. Da die Ladeleistung pro Fahrzeug auf 1.2 MW begrenzt ist, resultiert in im Bahnhof Neustadt a.d. Waldnaab ein Bedarf von 1.2 MW.

Abklärungen bei der Bayernwerk Netz GmbH [17] haben ergeben, dass beim Bahnhof Neustadt a.d. Waldnaab vom Energienetz her die Installation einer Ladestation mit bis zu 1.2 MVA grundsätzlich möglich ist.

Nachfolgende Abbildung zeigt die örtliche Situation. Nach dieser scheint es möglich, auf noch freien Flächen in Bahnhofsnahe (insbesondere auf der süd-östlichen Seite) eine Ladestation zu errichten.

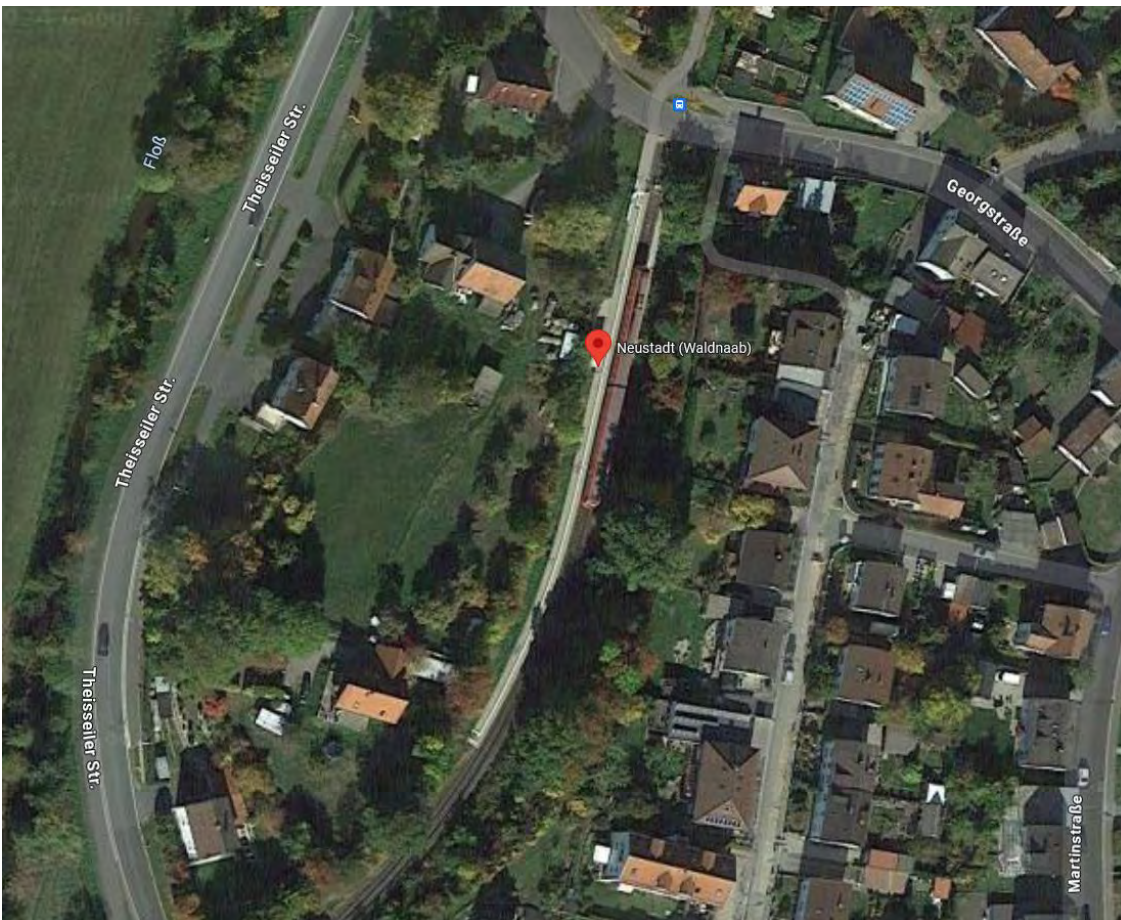


Abbildung 11-6: Situation in Neustadt an der Waldnaab im Satellitenbild; (Quelle: Google Maps)

12 KOSTENSCHÄTZUNG BAHNSTROMANLAGEN

12.1 Generelle Bemerkung

Die Betrachtung der Kosten bezieht sich ausschließlich auf die für die Umsetzung der formulierten Maßnahmen anfallenden (Investitions-)Kosten. Die Fahrzeugkosten zur Umsetzung eines BEMU-Betriebs sind bei den vorliegenden Betrachtungen und Fragestellungen somit nicht relevant. Respektive sind sie nur zu betrachten, falls aufgrund der gewählten infrastrukturseitigen Lösung zusätzliche Fahrzeuge notwendig wären, was aber bei den betrachteten Szenarien nicht der Fall ist.

Vorliegende Kostenschätzungen basieren grundsätzlich auf einer Kostenbasis für das Jahr 2022. Die aufgeführten Kosten enthalten weiter nur den Anteil an den Baukosten, also exklusive Planung. Die Planung wird schlussendlich mit 20 % des Bauvolumens mitberücksichtigt.

12.2 Kostenbasis

12.2.1 Übersicht

Nachfolgende Tabelle fasst die angesetzten Basiskosten als Übersicht zusammen. Die Herleitung, Quellen und Annahmen dazu sind in den nachfolgenden Kapiteln näher erläutert.

ID	Position	Kosten [€]
1	Unterwerk 110/15 kV: 2x15 MVA	8'900'000
2	Umrichterwerk 30 MVA: 2x15 MVA	25'000'000
4	Anbindung an bestehende 110 kV / 16.7 Hz (Schaltwerk)	2'000'000
5	110-kV-Leitung 16.7 Hz (pro km)	800'000
6	Ladestation 1.2 MW (redundant)	4'000'000
7	Ladestation 2.4 MW (redundant)	7'875'000
10	Nachrüsten bestehendes Unterwerk/Umrichterwerk mit zusätzlichem Abgang	150'000
11	Errichten neuer Schaltposten für einen Abzweig ab bestehender 15-kV-Fahrleitung	1'000'000
12	Signalisation Traktionsartwechsel	30'000
13	Fahrleitung Einspurstrecke (pro km) *	470'000
14	Fahrleitung Doppelspurstrecke (pro km) *	450'000
15	Zuschlag Elektrifizieren eines Gleises im Bahnhof	350'000

Tabelle 12-1: Übersicht der angesetzten Basiskosten

* Diese Kosten decken nur die Kosten der Fahrleitung selbst ab. Hinzu kommen aber noch Folgekosten, wie für Erdung und Rückleitung oder Anpassung an Bahnübergängen. Siehe hierzu auch Kapitel 12.2.6.

12.2.2 Unterwerk

Standard-Nennleistungen für Bahnstromtransformatoren für Unterwerke 110 kV / 15 kV (16.7 Hz) bei DB Energie sind 10 MVA und 15 MVA. Unterwerke werden dabei in der Regel redundant aufgebaut, das heißt mit mindestens 2 Transformatoren. Für die vorliegende Studie wurde daher für ein Unterwerk von einer Nennleistung von 2x15 MVA ausgegangen.

Nach Angaben von DB Energie sind für ein Unterwerk mit einer Nennleistung von 2x15 MVA (30 MVA) basierend auf Erfahrungswerten kürzlich realisierter Projekte von 8'500'000 € auszugehen. In diesen Kosten ist der Bau des Unterwerks bis und mit Anbindung an die Oberleitung enthalten, inklusive Anbindung ans 110-kV-Bahnstromnetz (nicht aber eine allfällige Leitung). Nicht eingerechnet ist dabei der notwendige Grunderwerb. Für diesen werden somit, eher konservativ, noch zusätzliche 400'000 € pauschal hinzugerechnet, ohne detaillierte Prüfung der lokalen Grundstückspreise. Somit belaufen sich die in der Studie für ein Umrichterwerk angesetzten Kosten total auf 8'900'000 €.

12.2.3 Nachrüsten bestehendes Uw / Urw mit zusätzlichem 15-kV-Abgang

Je nach gewählten Teilstrecken zur Elektrifizierung ist für die Speisung ein zusätzliches 15-kV-Abgangsfeld bei einem bestehenden Unterwerk oder Umrichterwerk notwendig. Nach DB Energie ist hierfür mit Kosten von 150'000 € zu rechnen.

12.2.4 Umrichterwerk

Gemäß DB Energie beschaffen werden nach aktueller Philosophie in der Regel Umrichter in 15-MVA-Blöcken beschafft. Zudem werden die Umrichterwerke in der Regel redundant, also in 2 Gruppen, ausgeführt. Für die vorliegend betrachteten Anlagen wird daher eine Nennleistung von 2x15 MVA angesetzt.

Nach Angaben von DB Energie sind für ein Umrichterwerk 110 kV / 15 kV (statischer Frequenzumformer) mit einer Nennleistung von 2x15 MVA (30 MVA) basierend auf Erfahrungswerten kürzlich realisierter Projekte von rund 20'000'000 € - 25'000'000 € auszugehen. In diesen Kosten ist der Bau des Unterwerks bis und mit Anbindung an die Oberleitung enthalten, inklusive Anbindung ans öffentliche 110-kV-Netz.

Als konservative Annahme werden in vorliegender Studie Kosten für 2x15 MVA von 25'000'000 € verwendet, wobei dann mit diesen die Kosten für Grunderwerb auch abgedeckt sind.

12.2.5 110-kV-Bahnstromleitung

Wie in Kapitel bereits erläutert, kommen zur Anbindung an eine bestehende 110-kV-Bahnstromleitung nur die Erweiterung einer bestehenden 50 Hz-Leitung des Landesnetzes (110 kV oder 380 kV) mit der Bahnstromleitung oder einer neuen Leitung entlang der Bahnstrecke in Frage.

Die Kosten für den Bau einer 110-kV-Bahnstromleitung sind stark projektabhängig. DB Energie verwendet bei Studien mit ähnlichem Detaillierungsgrad als Richtwert 800'000 €/km.

Für die An- resp. Einbindung der neuen Leitung an eine bestehende 110-kV-Bahnstromleitung muss für das hierfür erforderliche Schaltwerk zusätzlich noch rund 2'000'000 € eingerechnet werden (Schätzwert DB Energie).

12.2.6 Oberleitung

DB InfraGO hat aus den jüngsten Erfahrungen der ABS 48 (München – Lindau) die Baukosten für die einzelnen Fahrleitungsbaulose zur Verfügung gestellt. Daraus abgeleitet konnten die folgenden mittleren Kosten pro Kilometer Oberleitung abgeleitet werden:

Einspurstrecke: 470'000 €/km (pro Gleis)

Doppelspurstrecken: 450'000 €/km (pro Gleis)

Es ist berücksichtigt, dass bei der ABS 48 ein 2x15-kV-System verbaut wurde (mit Negativfeeder und Autotransformatoren). In den vorliegenden Betrachtungen wird jedoch für die neu zu elektrifizierenden Teilstrecken von einem klassischen 1x15-kV-System ausgegangen. Demzufolge sind die Baukosten für die Fahrleitung bei der ABS 48 aufgrund des zusätzlichen Negativfeeders etwas höher. Ein entsprechender Abschlag wurde in den obengenannten Preisen eingerechnet.

Zusätzlich wurden von DB InfraGO kurz vor Abschluss der vorliegenden Machbarkeitsstudie Vergleichswerte aus dem aktuellen Planungsprojekt Marktredwitz – Hof zur Verfügung gestellt. Diese bestätigen, dass obige Kosten nach wie vor plausibel sind.

Zudem als Vergleich: Die SBB (Schweiz) rechnet für ähnliche Verhältnisse als Richtwert mit 600'000 CHF/km. Unter Berücksichtigung des Wechselkurses und der höheren Lohnkosten in der Schweiz sind die angesetzten Kosten in ähnlicher Grössenordnung.

Die Installation der Oberleitung führt jedoch auch zu Folgekosten, die in den genannten Preisen nicht abgedeckt sind und wie folgt beziffert wurden:

Anpassung / Errichtung Erdungs- und Rückleitungssystem:	25'000 €/km (angelehnt an [24])
Zuschlag für die Anpassung an Bahnübergängen:	200'000 € pro Bahnübergang (Schätzwert DB)
Zuschlag für Überführungen (Mehraufwand aufgrund reduzierter Fahrdrachhöhe)	100'000 € pro Überführung (über der Bahn), Annahme Enotrac
Zuschlag für Tunnelstrecken (Mehraufwand aufgrund reduzierter Fahrdrachhöhe und Stromschienensystem) ¹⁴	1'000'000 €/km pro Gleis, Annahme Enotrac
Zuschlag für lange Eisenbahnbrücken (ca. >50 m resp. > eine Nachspannlänge) aufgrund erhöhter Komplexität	500'000 €/km pro Gleis, Annahme Enotrac

¹⁴ In vorliegender Untersuchung sind in keiner Arbeitsvariante Tunnelstrecken zu elektrifizieren.

12.2.7 Zuschlag Elektrifizieren eines Gleises im Bahnhof

Die Elektrifizierung der Bahnhöfe ist aufwändiger als auf offener Strecke, zum Beispiel aufgrund der Erdungs- und Rückleitung (zum Personenschutz aber unter Umständen auch aufgrund älterer Sicherungsanlagen). Hierzu wird pro Gleis ein Zuschlag von 350'000 € eingerechnet.

12.2.8 Neuer Schaltposten

Die elektrische Anbindung einer neu zu elektrifizierenden Strecke an eine bereits elektrifizierte Strecke erfolgt in der Regel über einen Schaltposten. Die Kosten für einen Standard-Schaltposten betragen gemäß DB Energie mindestens 1'000'000 €.

12.2.9 Traktionsartwechsel

Wie in Kapitel 7.3.57.3.5 bereits erwähnt, wurde im Rahmen einer ähnlichen Studie für die Region Allgäu und westliches Oberbayern [26] bei DB InfraGO angefragt, unter welchen Voraussetzungen ein Traktionsartwechsel für die Akkuhybridfahrzeuge erfolgen kann.

Basierend auf Aussagen der DB InfraGO darf ein Traktionsartwechsel sowohl im Stillstand als auch während der Fahrt als möglich betrachtet werden. Voraussetzung ist jedoch, dass an diesen Orten der Transition folgende Maßnahmen umgesetzt sind:

- Eine Betriebsstelle gemäß Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO).
- Neue oder mindestens ergänzte Signalisation
- Baulichen Maßnahmen an der Oberleitungsanlage zur Verhinderung eines Oberleitungsschadens bei versehentlich gehobenem Bügel am Oberleitungsende

Da aber zu den anfallenden Kosten und Aufwendungen aktuell seitens DB InfraGO keine Angaben gemacht werden können, wurden die Kosten für die notwendigen Maßnahmen in nachfolgender Abschätzung nicht berücksichtigt.

12.3 Fahrleitungskosten der einzelnen betrachteten Teilstrecken

ID	Strecke	Streckenlänge [km]	Fahrleitung		Erdung und Rückleitung		Bahnübergänge		Überführungen	
			Länge FL [km]	Kosten FL [€]	Länge FL [km]	Kosten FL [€]	Anzahl	Kosten [€]	Anzahl	Kosten [€]
1	Hochstadt-Marktzeuln – Mainleus	16.5	32.9	14'810'400	32.9	822'800	12	3'000'000	3	300'000
2	Mainleus – Kulmbach	5.4	10.7	4'821'300	10.7	267'850	2	500'000	2	200'000
3	Kulmbach – Untersteinach	6.3	12.7	5'697'000	12.7	316'500	4	1'000'000	1	100'000
4	Untersteinach - Neuenmarkt-Wirsberg	6.1	12.1	5'449'500	12.1	302'750	2	500'000	1	100'000
5a	Neuenmarkt-Wirsb. – Marktschorgast	7.5	14.9	6'714'900	14.9	373'050	0	0	4	400'000
5b	Treggast - Neuenmarkt-Wirsberg	4.8	4.8	2'235'320	4.8	118'900	2	500'000	1	100'000
5c	Neuenmarkt-Wirsberg Süd – Ost	0.7	0.7	344'040	0.7	18'300	0	0	1	100'000
6	Bayreuth – Treggast	15.7	15.7	7'367'250	15.7	391'875	9	2'250'000	5	500'000
7	Kirchenlaibach – Bayreuth	18.8	18.8	8'821'900	18.8	469'250	8	2'000'000	9	900'000
8	Marktschorgast – Stambach	11.2	11.2	5'276'690	11.2	280'675	5	1'250'000	2	200'000
9	Stambach – Münchberg	9.9	19.8	8'928'900	19.8	496'050	1	250'000	2	200'000
10	Münchberg – Seulbitz	6.6	13.2	5'929'200	13.2	329'400	2	500'000	1	100'000
11	Seulbitz – Oberkotzau	12.1	24.1	10'850'400	24.1	602'800	4	1'000'000	3	300'000
12	Rehau – Oberkotzau	8.2	8.2	3'875'150	8.2	206'125	3	750'000	4	400'000
13	Hof – Rothenbürg	12.0	12.0	5'657'860	12.0	300'950	7	1'750'000	5	500'000
14	Neukirchen – Freihung	29.5	29.5	13'841'500	29.5	736'250	9	2'250'000	6	600'000
15	Freihung – Weiden	22.1	22.1	10'370'080	22.1	551'600	9	2'250'000	7	700'000
16	Altstadt - Neustadt	1.0	1.0	479'400	1.0	25'500	0	0	0	0

Tabelle 12-2: Fahrleitungskosten der Teilstrecken – Teil 1, Fortsetzung in nachfolgender Tabelle

ID	Strecke	Streckenlänge [km]	Lange Brücken (> 50 m)		Bahnhöfe		Kreuzungsstellen		Total	
			Länge [km]	Kosten [€]	Anzahl Gleise	Kosten [€]	Länge [km]	Kosten [€]	Total Kosten [€]	Total Kosten [€/km]
1	Hochstadt-Marktzeuln – Mainleus	16.5	0.2	190'000	4	1'400'000	0.0	0	20'523'200	623'578
2	Mainleus – Kulmbach	5.4	0.1	130'000	2	700'000	0.2	94'000	6'713'150	626'577
3	Kulmbach – Untersteinach	6.3	0.1	117'000	4	1'400'000	0.0	0	8'630'500	681'714
4	Untersteinach - Neuenmarkt-Wirsberg	6.1	0.0	0	5	1'750'000	0.0	0	8'102'250	669'055
5a	Neuenmarkt-Wirsb. – Marktschorgast	7.5	0.5	531'000	13	4'550'000	0.0	0	12'568'950	842'310
5b	Trebgast - Neuenmarkt-Wirsberg	4.8	0.1	35'500	2	700'000	0.0	0	3'689'720	775'803
5c	Neuenmarkt-Wirsberg Süd – Ost	0.7	0.0	0	0	0	0.0	0	462'340	631'612
6	Bayreuth – Trebgast	15.7	0.1	28'000	5	1'750'000	0.0	0	12'287'125	783'868
7	Kirchenlaibach – Bayreuth	18.8	0.3	139'000	19	6'650'000	0.1	32'900	19'013'050	1'012'949
8	Marktschorgast – Stambach	11.2	0.0	0	2	700'000	0.0	0	7'707'365	686'503
9	Stambach – Münchberg	9.9	0.0	0	4	1'400'000	0.0	0	11'274'950	568'237
10	Münchberg – Seulbitz	6.6	0.0	0	2	700'000	0.1	28'200	7'586'800	575'804
11	Seulbitz – Oberkotzau	12.1	0.0	0	4	1'400'000	0.1	23'500	14'176'700	587'952
12	Rehau – Oberkotzau	8.2	0.0	0	4	1'400'000	0.0	0	6'631'275	804'278
13	Hof – Rothenbürg	12.0	0.1	25'000	5	1'750'000	0.0	0	9'983'810	829'358
14	Neukirchen – Freihung	29.5	0.0	0	5	1'750'000	1.3	587'500	19'765'250	671'146
15	Freihung – Weiden	22.1	0.2	97'500	5	1'750'000	0.4	188'000	15'907'180	720'956
16	Altstadt - Neustadt	1.0	0.2	75'000	1	350'000	0.0	0	929'900	911'667

Tabelle 12-3: Fahrleitungskosten der Teilstrecken – Teil 2, grau markiert diejenigen Teilstrecken, welche in den Arbeitsvarianten 1-3 nicht elektrifiziert werden

12.4 Investitionskosten bis 2035

ID	Position	Basis- kosten [€]	Arbeitsvariante 1			Arbeitsvariante 2			Arbeitsvariante 3		
			Bemerkung	Menge	Kosten [M€]	Bemerkung	Menge	Kosten [M€]	Bemerkung	Menge	Kosten [M€]
1	Kosten Oberleitung	Sep. Sheet		54.0	46.3		85.1	65.3		75.2	62.8
2	Zusätzlich Elektrifizieren eines Gleises in einem Bahnhof (wenn zugehörige Strecke nicht el. wird)	350'000	Gleise in Forchheim und Bayreuth	7	2.5	Gleise in Forchheim und Bayreuth	7	2.5	Gleise in Forchheim	3	1.1
3	Unterwerk 110/15 kV: 2x15 MVA	8'900'000									
4	Umrichterwerk 30 MVA: 2x15 MVA	25'000'000	Neuenmarkt-Wirsb.	1	25.0	Neuenmarkt-Wirsb.	1	25.0			
6	Anbindung an bestehende 110 kV / 16.7 Hz	2'000'000									
7	110-kV-Leitung 16.7 Hz (pro km)	800'000									
8	Ladestation 1.2 MW	4'000'000									
9	Ladestation 2.4 MW *	8'250'000	Münchberg, Bad Steben, Weiden	3	24.8	Bad Steben, Weiden	2	16.5	Münchberg, Bad Steben, Weiden	3	24.8
10	Nachrüsten bestehendes Unterwerk/Umrichterwerk mit zusätzlichem Abgang	150'000									
11	Errichten eines neuen Schaltpostens für einen Abzweig ab bestehender 15-kV-Fahrleitung	1'000'000									
12	Signalisation Traktionsartwechsel	30'000		18	0.5		18	0.5		17	0.5
	Zwischentotal Investitionskosten [Mio. €]				99			110			89
	Planungskosten	20%			20			22			18
	Total [Mio. €]				119			132			107
	<i>Total [Mio. € pro km Fahrleitung]</i>				<i>2.20</i>			<i>1.55</i>			<i>1.42</i>

Tabelle 12-4: Zusammenfassung Kosten für die Arbeitsvarianten 1-3 im **Zeithorizont 2035**

12.5 Investitionskosten 2035 – 2040

ID	Position	Basis- kosten [€]	Arbeitsvariante 1			Arbeitsvariante 2			Arbeitsvariante 3		
			Bemerkung	Menge	Kosten [M€]	Bemerkung	Menge	Kosten [M€]	Bemerkung	Menge	Kosten [M€]
1	Kosten Oberleitung	Sep. Sheet		58.8	40.3		47.6	32.5		53.3	36.1
2	Zusätzlich Elektrifizieren eines Gleises in einem Bahnhof (wenn zugehörige Strecke nicht el. wird)	350'000									
3	Unterwerk 110/15 kV: 2x15 MVA	8'900'000									
4	Umrichterwerk 30 MVA: 2x15 MVA	25'000'000									
6	Anbindung an bestehende 110 kV / 16.7 Hz (Schaltwerk)	2'000'000									
7	110-kV-Leitung 16.7 Hz (pro km)	800'000									
8	Ladestation 1.2 MW	4'000'000									
9	Ladestation 2.4 MW *	8'250'000									
10	Nachrüsten bestehendes Unterwerk/Umrichterwerk mit zusätzlichem Abgang	150'000	Neustadt a.d W. (Anteil Verschieben)		0.5	Neustadt a.d W. (Anteil Verschieben)		0.5	Neustadt a.d W. (Anteil Verschieben)		0.5
11	Errichten eines neuen Schaltpostens für einen Abzweig ab bestehender 15-kV-Fahrleitung	1'000'000									
12	Signalisation Traktionsartwechsel	30'000	SP Neukirchen	1	1.0	SP Neukirchen	1	1.0	SP Neukirchen	1	1.0
	Zwischentotal Investitionskosten [Mio. €]		sep. Sheet	5	0.2	sep. Sheet	4	0.1	sep. Sheet	5	0.2
	Planungskosten	20%			42			34			38
	Total [Mio. €]				8			7			8
	Total [Mio. € pro km Fahrleitung]				50			41			45

Tabelle 12-5: Zusammenfassung Kosten für die Arbeitsvarianten 1-3 im **Zeithorizont 2040** (ohne die Kosten für die Massnahmen 2035 gemäß obiger Tabelle)

12.6 Gesamt-Investitionskosten bis 2040

Position	Basis- kosten [€]	Arbeitsvariante 1			Arbeitsvariante 2			Arbeitsvariante 3		
		Bemerkung	Menge	Kosten [M€]	Bemerkung	Menge	Kosten [M€]	Bemerkung	Menge	Kosten [M€]
Kosten Oberleitung	Sep. Sheet		113	86.6		133	97.8		129	98.9
Zusätzlich Elektrifizieren eines Gleises in einem Bahnhof (wenn zugehörige Strecke nicht el. wird)	350'000	Gleise in Forchheim und Bayreuth	7	2.5	Gleise in Forchheim und Bayreuth	7	2.5	Gleise in Forchheim und Bayreuth	3	1.1
Umrichterwerk 30 MVA: 2x15 MVA	25'000'000	Neuenmarkt-Wirsberg	1	25.0	Neuenmarkt-Wirsberg	1	25.0		0	0.0
Ladestation 2.4 MW *	8'250'000	Münchberg, Bad Steben, Weiden, Neustadt a.d.W. (Anteil Verschieben)	3	25.3	Münchberg, Bad Steben, Neustadt a.d.W. (Anteil Verschieben)	2	17.0	Münchberg, Bad Steben, Weiden, Neustadt a.d.W. (Anteil Verschieben)	3	25.3
Signalisation Traktionsartwechsel	30'000	SP Neukirchen	1	1.0	SP Neukirchen	1	1.0	SP Neukirchen	1	1.0
Zwischentotal Investitionskosten [Mio. €]			23	0.7		22	0.7		22	0.7
Planungskosten	20%			141			144			127
Total [Mio. €]				28			29			25
<i>Total [Mio. € pro km Fahrleitung]</i>				169			173			152

Tabelle 12-6: Zusammenstellung Gesamt-Kosten bis 2040

* Anmerkung: Die Kosten für den erforderlichen Netzausbau liegen zum aktuellen Stand noch nicht vor und sind somit in der Kostenzusammenstellung nicht berücksichtigt. Gleiches gilt, wie in Kapitel 12.2.9 erwähnt, für die Maßnahmen bezüglich des Traktionsartwechsels.

13 UMSETZUNGSPLAN

Der nachfolgend erarbeitete Umsetzungsplan zeigt die benötigte Zeitdauer zur Umsetzung der geplanten Infrastrukturmaßnahmen der Arbeitsvariante 3 (Kapitel 8.4.3 und Kapitel 9.4.3). Zum aktuellen Zeitpunkt kann diese Abschätzung der Gesamtprojektzeit nur grob erfolgen, da die Realisierungszeit solcher Projekte von diversen Umständen abhängt, wie Landerwerb, Bewilligungsverfahren, Einsprachen, verfügbaren Ressourcen usw., welche im Rahmen der vorliegenden Studie zu den individuellen Bauprojekten noch nicht bekannt sind, respektive deren Klärung weit über das Ziel der Studie hinausgehen würde. Aus diesem Grund wird hier pro Bauprojekt respektive Baulos die Durchlaufzeit pauschal angesetzt. Eine weitere Detaillierung des Umsetzungsplans, z.B. Aufteilung auf die einzelnen Leistungsphasen pro Bauprojekt nach HOAI, macht auf dieser Stufe der Studie nur wenig Sinn und würde nur eine falsche Genauigkeit vortäuschen.

Die Erarbeitung eines detaillierten Terminplans wird in einer nachfolgenden Projektphase erfolgen, bei welcher das Projekt weiter konkretisiert wird. Für diese Konkretisierungs-Phase zum Aufgleisen des gesamten Großprojekts wurden im Umsetzungsplan 1 Jahr eingerechnet.

Für die angesetzten Projektdurchlaufzeiten pro Bauprojekt wird auf der Bayerwaldstudie [24] sowie auf Erfahrungswerte von DB Energie, DB InfraGO als auch vom Gutachter selbst basiert.

Die Umsetzung einiger der für die Arbeitsvariante 3 erforderlichen infrastrukturseitigen Maßnahmen kann parallel und weitgehend entkoppelt voneinander realisiert werden. Es ist davon auszugehen, dass das ganze Vorhaben zwar zentral koordiniert, aber dazu schlussendlich in unterschiedliche Baulose unterteilt wird.

Für die umzusetzenden Energieversorgungsanlagen werden für deren Projektdurchlaufzeit (Leistungsphasen 1-9 gemäß HOAI) folgende Werte angesetzt:

Ladestation:	6 Jahre
Umrichterwerk:	7 Jahre
Unterwerk:	7 Jahre

Der Bau der Oberleitungsanlage wird vermutlich ähnlich wie bei ABS 48 München – Lindau, in mehrere Baulose aufgeteilt. Beim Bau der Fahrleitung auf den Streckenabschnitten Kulmbach – Neuenmarkt-Wirsberg – Bayreuth – Kirchenlaibach für den Zeithorizont 3 wird auch ein sequenzielles Vorgehen nötig sein, da vom Betrieb her nicht an der ganzen Strecke gleichzeitig gebaut werden kann. Für die entsprechende Staffelung wurde im Rahmen der vorliegenden Studie eine erste Annahme getroffen. Die einzelnen Fahrleitungsprojekte wurden dazu in ca. 20 km lange Bauabschnitte unterteilt. Für diese wird eine Durchlaufzeit von jeweils 5-7 Jahren angesetzt, abhängig der jeweiligen Komplexität (Länge, Einspur- / Doppelspur, größere Bahnhöfe usw.).

Es muss davon ausgegangen werden, da in den nächsten Jahren durch die angestrebte Dekarbonisierung der Bahn in Deutschland etliche Bahnstromanlagen- und Fahrleitungsprojekte ausgeführt werden sollen, die verfügbaren Ressourcen für Planung und Bau von solchen Vorhaben demzufolge begrenzt sein werden. Wie sich dies auf die Bauzeit und Realisierbarkeit auswirkt, ist aber zum aktuellen Zeitpunkt und im Rahmen der vorliegenden Studie nicht abzuschätzen. Für den nachfolgend dargestellten Umsetzungsplan für die Arbeitsvariante 3 wurde von der Vorgabe der Umsetzung auf Akkuhybrid-Betrieb per 2035 im RVOF und 2040 im EVNO ausgegangen. Unter dieser Vorgabe wurde die Umsetzung der einzelnen Maßnahmen möglichst gestaffelt angenommen.

Wie nachfolgender Umsetzungsplan zeigt, ist für die Umsetzung aller Maßnahmen theoretisch von einer totalen Durchlaufzeit von mindestens 10 Jahren auszugehen, wobei die Elektrifizierungen für den Regionalverkehr Oberfranken priorisiert und bereits innerhalb von rund 7 Jahren realisiert werden können (blau eingefärbt). Die zusätzlichen, für das Expressverkehrsnetz erforderlichen Elektrifizierungen sind als Oberleitungserweiterungen einzelner Maßnahmen für das RVOF 2035 zu verstehen und wurden deshalb nachfolgend jeweils in einem zweiten Los definiert. Die effektive Umsetzung dieser Anlagen darf auch zu einem späteren Zeitpunkt erfolgen, da diese Oberleitungen technisch gesehen, erst mit der Umstellung auf Akkuhybridbetrieb im EVNO-Netz, das heißt auf 2040, notwendig ist. Etwas speziell sind die Maßnahmen mit den ID 12 – 14. Diese orientieren sich am Umstellungsjahr 2040, da sie zeitlich mit den Elektrifizierungen der Metropolenbahn (ID 12 und 13) und des Ostkorridors (ID 14) zu synchronisieren sind.

Wie bereits erwähnt, ist nachfolgender Umsetzungsplan eher ein theoretisches Konstrukt, welches darstellen soll, dass die Realisierung bis zu den beiden Umstellungszeitpunkten 2035 und 2040 grundsätzlich möglich ist.

Anmerkung: Im nachfolgenden Umsetzungsplan wurde der zeitliche Einfluss der folgenden Schnittstellen nicht im Detail berücksichtigt, da sie nicht Inhalt des vorliegenden Gutachtens sind. Sie können jedoch einen maßgebenden Einfluss auf die Reihenfolge der umzusetzenden Maßnahmen sowie die gesamte Umsetzungsdauer haben. Diesen Punkten ist somit in einem weiteren Schritt Rechnung zu tragen:

- **Stellwerkersatz:** Bei einer Elektrifizierung einer Strecke muss die Kompatibilität mit den Sicherungsanlagen geprüft werden (Beeinflussung durch induzierte Spannungen oder Rückströme im Gleis). Im Untersuchungsraum existieren möglicherweise noch diverse Stellwerksanlagen, die unabhängig von einer Elektrifizierung für den Akkuhybrid-Einsatz ohnehin ersetzt oder erneuert werden müssen. Weiter ist zu beachten, dass auch streckenseitig die Kommunikationsleitungen zwischen diesen alten Stellwerken nicht genügend geschützt sind, wenn die Strecken elektrifiziert werden (induzierte Spannungen durch die Fahrstromversorgung).
- **Streckenklassen:** Aufgrund der Akkuhybridtechnik haben die Fahrzeuge eine Tendenz zu höheren Achslasten und Metergewichten.

Pos.	Baulos / Bauprojekt	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040
0	Konkretisierung und Aufgleisen Gesamtprojekt	■	■														
1	Ladestation Münchberg (2x1.2 MW)		■	■	■	■	■	■	■								
2	Ladestation Bad Steben (2x1.2 MW)		■	■	■	■	■	■	■								
3	Ladestation Weiden (2x1.2 MW)		■	■	■	■	■	■									
4	Fahrleitung 3 Bahnhof- und Abstellgleise in Forchheim		■	■	■	■	■										
5	Fahrleitung Neuenmarkt-Wirsberg - Kulmbach, Los 1 bis Untersteinach (6.1 km, 2 Gleise)		■	■	■	■	■	■	■								
6	Fahrleitung Neuenmarkt-Wirsberg - Kulmbach, Los 2 ab Untersteinach (6.3 km, 2 Gleise)						■	■	■	■	■	■	■				
7	Fahrleitung Neuenmarkt-Wirsberg - Stammbach, Los 1 bis Marktschorgast (7.5 km, 2 Gleise),		■	■	■	■	■	■	■								
8	Fahrleitung Neuenmarkt-Wirsberg - Stammbach, Los 2 ab Marktschorgast (11 km, 1 Gleis)						■	■	■	■	■	■					
9	Fahrleitung Neuenmarkt-Wirsberg Kirchenlaibach Los 1 bis Bayreuth (21.2 km, 1 Gleis)		■	■	■	■	■	■	■	■							
10	Fahrleitung Neuenmarkt-Wirsberg Kirchenlaibach Los 2 ab Bayreuth (18.8 km, 1 Gleis)						■	■	■	■	■	■	■				
11	Fahrleitung Oberkotzau - Rehau (8.2 km, 1 Gleis)		■	■	■	■	■	■									
12	Fahrleitung Neukirchen - Freihung (29 km, 1 Gleis)											■	■	■	■	■	■
13	Schaltposten Neukirchen													■	■	■	■
14	Ladestation von Weiden nach Neustadt a.d. Waldnaab verschieben *																■

Tabelle 13-1: Umsetzungsplan der Elektrifizierungsmaßnahmen für die Arbeitsvariante 3, Maßnahmen blau für den RVOF 2035 und orange für den EVNO 2040. Grau stellt den Bezug zum jeweiligen Zielhorizont dar. Bis dahin sind auch jegliche Projekte anderer Gewerke abzuschließen (bspw. Stellwerkersatz, Streckenklassen).
* Die Ladestation für den Standort Neustadt a.d. Waldnaab kann erst verschoben werden, wenn in Weiden das Unterwerk aus der Elektrifizierung des Ostkorridors gebaut wurde.

14 GRUNDLAGENERMITTLUNG WASSERSTOFFINFRASTRUKTUR

14.1 Aufbereitung Basisdatenset (Linienpläne, Fahrzeugdaten, Einsatzpläne, sonst. Kartenmaterial)

Zunächst werden im Rahmen einer Grundlagenrecherche Daten aus dem Projekt, von den Projektpartnern sowie frei zugängliche Quellen gesichtet, bewertet und verarbeitet. Eine Übersicht mit den genutzten Datensätzen, deren Herkunft und Quellenqualität sowie der Bearbeitungsmodus der Daten befindet sich im Anhang 4 [21].

14.1.1 Aufbereitung Fahrzeugdaten

Als Referenzfahrzeug für die Berechnungen wird sich an den Angaben aus Tabelle 14-1 orientiert. Die für die Auslegung der H₂-Infrastruktur relevanten Parameter sind in der untenstehenden Tabelle zusammengefasst:

BZ-Fahrzeug	Einheit	Wert
Betriebsdruck	bar	350
Betankungsgeschwindigkeit	kg/min	15
Brennstoffzelle¹⁵	Systeme	2
Leistung	kW	160-320 (max. 800)
Verbrauch	kg/km	0,42
Wirkungsgrad	%	35 - 60
Akku		
Nennleistung	kWh	2000
EOL bei Kapazität	bei %	80
Tanks		
Typ	#	IV
Anzahl	#	k. A.
H ₂ -Kapazität (Nutzbar)	kg	300
Betankungsprotokoll (APRR, Vorkühlung, Kommunikation)		
Vorkühlung	ja/ nein	ja
Kommunikation	ja/ nein	ja
Reichweite		
Gesamt	km	k.A.
Rein Batteriebetrieben (z.B. nach Tankentleerung, Wartung und Instandhaltung)	km	k.A.
Rekuperationsleistung (max.)	kW	2000

¹⁵ Angaben zu Leistung, Verbrauch und Wirkungsgrad gelten je BZ-System

BZ-Fahrzeug	Einheit	Wert
spez. Verbrauch	kWh/km	7
Länge	m	70

Tabelle 14-1: Kenndaten zum Referenzfahrzeug NT-XEMU

14.2 Erstellen der Basiskarten

Im Folgenden wird der Aufbau des Geoinformationssystems, welches in Qgis 3.30.0 erstellt wurde, beschrieben. Hierbei wird von der untersten Kartenebene bis zur obersten vorgegangen.

1.1.1 Hintergrundkarten

Die unterste Layerreihenfolge bilden Hintergrundkarten aus Google-Satellite und dem OSM-Standard. Zudem wurde die Karte «Positron» von DBCARTO ohne Beschriftungen geladen. Je nach Darstellungsziel, wird eine dieser Karten im Hintergrund angezeigt.

Die Layergruppe Allgemeines setzt sich zusammen aus den administrativen Grenzen, die für die Untersuchung und für die Übersicht in der Darstellung relevant sind, sowie ein WMS-Layer der Höhenlinien in Bayern, um eine bessere Vorstellung der Topografie an den potenziellen Tankstellenorten zu bekommen. Alle Layer stammen von den zuständigen Landesbehörden¹⁶.

Für die raumplanerische Einordnung der Potenzialflächen für den Bau der HRS wurden zudem die Flächennutzungspläne der wichtigsten Nachtstellorte geladen und georeferenziert.

14.2.1 Schutzgebiete

Darüber wurden die für die Planung relevanten Schutzgebiete, welche als restriktives Kriterium für die Standortsuche dienen, herangezogen. Da der Bau einer Wasserstofftankstelle in diesen Gebieten nicht gestattet ist, handelt es sich um Ausschlussflächen. Auch diese Layer wurden von den zuständigen Landesbehörden bezogen¹⁷. Welche Flächen in welchem Ausmaß genehmigungsrechtlich relevant sind, wird in Kapitel 17.3.1 erläutert.

14.2.2 Transport und Verkehr

In der Layergruppe Transport und Verkehr sind Straßen und Gleise dargestellt sowie die von der DB Energie GmbH betriebenen Schientankstellen mit Diesel und der European Hydrogen Backbone (EHB) respektive das Wasserstoffkernnetz. Zudem wurden Häfen mit Güterumschlag im Projektgebiet recherchiert und digitalisiert, um die Möglichkeit des Wasserstofftransports per Schiff einordnen zu können. Die Verkehrswege wurden mittels einer OSM API geladen und bereinigt. Der Verlauf des

¹⁶ <https://geoportal.bayern.de/geoportalbayern/>

¹⁷ ebenda

Wasserstoffkernnetzes wurde aus dem Kernnetzantrag der FNB bezogen¹⁸. Die Schienentankstellen wurden auf Basis des Dokuments Standort und Leistungsübersicht der Schienentankstellen der DB Energie GmbH¹⁹ digitalisiert.

Zunächst wurde der Gleislayer anhand der von Enotrac erstellten Elektrifizierungsszenarien klassifiziert in elektrifizierte Gleise, nicht elektrifizierte Gleise, Gleise deren Elektrifizierung vorgesehen ist und Gleise im Umfeld die nicht von den untersuchten Linien genutzt werden. Die daraus folgenden Implikationen, sind in Form des Umlaufplans (SMA) und – daraus folgend - der H2-Betankungsmenge der einzelnen Standorte in die Analyse mit eingeflossen. Grundsätzlich kann auch die Versorgung über die Gleise erfolgen.

Die Straßen sind differenziert in Autobahnen und Bundesstraßen, da diese für eine straßengebundene Versorgung relevant sind. Gefahrgutrelevante Durchfahrtsbeschränkungen konnten aus den zur Verfügung stehenden Daten nicht herausgelesen werden und müssen im Einzelfall geprüft werden.

Weiterhin wurde der EHB respektive das Wasserstoffkernnetz in die Betrachtung mit aufgenommen und mit seinen geplanten Ausbaustufen für 2030 und 2040 dargestellt. Über die Pipelines, die auf nationaler Ebene als «Wasserstoffkernnetz» umgesetzt werden, sollen zukünftig große Mengen Wasserstoff auf europäischer Ebene transportiert werden. Der EHB wird daher eine relevante Infrastrukturkomponente für wasserstoffnutzende Unternehmen in Zukunft darstellen.

14.2.3 Wasserstoffinfrastruktur

In dieser Layergruppe wurden die wasserstoffrelevanten Daten verarbeitet, aus denen Synergieeffekte für gemeinsame Infrastrukturen oder Versorgungskonzepte abgeleitet werden können. So wurden die Hyland Regionen, die sich im Untersuchungsgebiet befinden, bestehende Wasserstofftankstellen für PKW und Nutzfahrzeuge sowie Unternehmen aus dem industriellen Sektor lokalisiert, die zukünftig einen Wasserstoffbedarf aufweisen könnten. Auch wurden Elektrolyseure dargestellt. Unmittelbar im Untersuchungsgebiet nahe Marktredwitz befindet sich der Elektrolyseur in Wunsiedel. Außerdem befindet sich rund 30 km nordwestlich von Bamberg eine H2-Erzeugungsanlage in Haßfurt.

14.2.4 Tankstellen Analyse

In dieser Layergruppe befinden sich die zentralen Analyselayer der Machbarkeitsstudie. Die Isochronen visualisieren den Abstand im Gleisnetzwerk von den Nachtstellorten des Untersuchungsgebiets. Das dient dazu, die für die Betankungsvorgänge benötigten Leerfahrten vom Haltepunkt zur Tankstelle so gering wie möglich zu halten. Die Abstände sind bei der Standortsuche im Rahmen des Kriteriums „Betriebsintegration Leerkilometer“ in die Analysematrix eingeflossen.

Weiterhin sind hier die Orte mit Nachtabstellungen einschließlich abzustellender Fahrzeugmenge dargestellt.

Darauf folgen die Potenzial- und Ausschlussflächen. Zunächst wurden die vom Auftraggeber initial genannten Potenzialflächen dargestellt. Die sich aus den restriktiven Kriterien ergeben

¹⁸ <https://fnb-gas.de/wasserstoffnetz-wasserstoff-kernnetz/>

¹⁹ <https://www.dbenergie.de/resource/blob/9191222/7873807c2d5e796e1bc91683b8c1fce3/Tankdienste-Standort-und-leistungsebersicht-2023-data.pdf> (Stand 1.1.2023)

Ausschlussflächen, welche anhand der Flächennutzungspläne (FNP) und Bebauungspläne²⁰ digitalisiert wurden, werden als Ausschluss-Polygone (rot) dargestellt. Dabei handelt es sich um Wohngebiete (WR, WA, WB) und Dorfgebiete (MD), Innerstädtische Gebiete (MI, MK), da eine Wasserstofftankstelle (HRS – Hydrogen refueling Station) in diesen nicht errichtet werden darf. Da die Auf land- und forstwirtschaftliche Flächen, ist der Bau erstmal auch verboten, eine FNP-Änderung jedoch aussichtsreicher²¹.

Aus den verbleibenden Flächen wurden darauffolgend, Potenzialflächen über eine Luftbildanalyse identifiziert, welche mit dem Auftraggeber als Standorte diskutiert und in der Analysematrix individuell bewertet wurden. Auf diesen Flächen wurden Polygone platziert, welche die verschiedenen Komponenten der HRS – ausgelegt auf die jeweilige Lagermenge – repräsentieren. Die Positionierung der Komponenten ist nicht als konkreter Planungsvorschlag zu verstehen, sondern soll die Dimensionierung der HRS auf der Fläche veranschaulichen. Da die raumplanerischen Prämissen in Nürnberg am komplexesten sind, wurden hier die meisten Potenzialflächen vorgeschlagen, damit bei genehmigungsrechtlichen Hürden oder Ausschlussbedingungen im Planungsprozess, ausreichend Alternativoptionen vorhanden sind.

14.2.5 Elektrolyseoptionen

In der letzten Layergruppe wurden die potenziellen Elektrolysestandorte nach einem ähnlichen Vorgehen wie bei den HRS dargestellt. Die Blaupausen für die Elektrolysebestandteile, wurden von den Elektrolyseuren des Energiepark Mainz und des Elektrolyseurs in Wunsiedel abgeleitet und dimensioniert. Diese wurde dann als Konstellationsvorschläge auf die ermittelten Potenzialflächen gelegt, um die Dimensionierung zu veranschaulichen. Das Ermitteln der Potenzialflächen wird in Kapitel 19.1 genauer erläutert, die restriktiven Kriterien sind denen bei der HRS-Suche ähnlich.

14.2.6 Aufbereitung der H₂-Aktivitäten im Untersuchungsraum

Die Initiative „HyLand – Wasserstoffregionen in Deutschland“ ist ein vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) im Jahr 2019 initiiertes Wettbewerb. Ziel des Wettbewerbs ist es, Akteure in allen Regionen Deutschlands zu motivieren, Konzepte zur Nutzung von Wasserstoff zu initiieren, zu planen und umzusetzen. Unterstützt wird dabei die Entwicklung einer integrierten Wasserstoffwirtschaft in den Regionen durch gezielte Fördermaßnahmen, die den Voraussetzungen vor Ort Rechnung tragen. In der ersten Wettbewerbsrunde (HyLand I) wurden aus über 200 eingereichten Bewerbungen Konzepte in den drei Kategorien HyStarter (9 Regionen), HyExperts (13) und HyPerformer (3) ausgewählt, um die Regionen je nach Wissensstand und Projektfortschritt individuell zu fördern. In der zweiten Runde (HyLand II) wurden weitere 33 Regionen in diese Kategorien aufgenommen, um durch die Erstellung und Umsetzung regionaler Konzepte die Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie im Verkehrssektor voranzutreiben.

Mit den Hyland-Projekten HyExperts Wunsiedel, Landkreis NEW und HyStarter Kulmbach, gibt es 3 Akteursnetzwerke in der Region, auf deren Expertise, Projekte, Ansätze und Vernetzung mit weiteren Wasserstoffprojekten aufgebaut werden können. Daher wurden die Ergebnisse der Projekte gesichtet und relevante Erkenntnisse für dieses Projekt abgeleitet.

²⁰ Ebenfalls in der Layergruppe

²¹ Die Tankstelle in Bremervörde wurde auf einer vormals landwirtschaftlichen Fläche erbaut.

Die in den HyLand Regionen erarbeiteten Konzepte und Aktivitäten fließen aufgrund des Synergiepotenzials mit dem vorliegenden Projekt mit ein und werden nachfolgend kurz vorgestellt. Ziel ist es, an bereits bestehende Aktivitäten anknüpfen zu können.

14.2.6.1 HyExperts I: Wasserstoff-Modellregion Fichtelgebirge

Die Zielsetzung ist die Dekarbonisierung des Mobilitätssektors durch die Einführung grüner Technologien, insbesondere im Bereich des öffentlichen Nahverkehrs (ÖPNV). Im Rahmen des Projekts hat sich die Interessensgemeinschaft H2.Fichtelgebirge als Netzwerk gebildet. An das Fachwissen der Netzwerkteilnehmer im Bereich (grüner) ÖPNV und gegebenenfalls an die H2-Versorgung im Mobilitätssektor für den Zugverkehr kann angeknüpft werden. Hierbei können als potenzielle Akteure Logistikunternehmen, kommerzielle Betreiber und das Landratsamt involviert werden.

14.2.6.2 HyExperts I: Wasserstoff-Modellregion Fichtelgebirge

Die Zielsetzung ist die Dekarbonisierung des Mobilitätssektors durch die Einführung grüner Technologien, insbesondere im Bereich des öffentlichen Nahverkehrs (ÖPNV). Im Rahmen des Projekts hat sich die Interessensgemeinschaft H2.Fichtelgebirge als Netzwerk gebildet. An das Fachwissen der Netzwerkteilnehmer im Bereich (grüner) ÖPNV und gegebenenfalls an die H2-Versorgung im Mobilitätssektor für den Zugverkehr kann angeknüpft werden. Hierbei können als potenzielle Akteure Logistikunternehmen, kommerzielle Betreiber und das Landratsamt involviert werden.


Ein zentraler Bestandteil des Projekts ist der Aufbau eines 8,5-MW-PEM-Elektrolyseurs, der schrittweise auf 17,5 MW ausgebaut werden soll. Dieser Elektrolyseur wird hauptsächlich mit PV-Strom betrieben. Hierbei resultieren aus 5.000 Vollbetriebsstunden die Produktion von 850 t Wasserstoff. Der Preis für Wasserstoff bei 500 bar wird mit 4,56 Euro pro Kilogramm angegeben, wobei der größte Preistreiber der Strom mit 2,50 Euro pro Kilogramm ist.

Bisher wurde der Einsatz von Wasserstoff in Zügen nicht in Betracht gezogen, da die Region über nur eine Regionalbahnstrecke (RB96) verfügt.

Ein weiteres Ziel ist die Erzeugung von Grünstromüberschüssen für die Elektrolyse zur Wasserstoffproduktion. Neben der Elektrolyse ist auch die Dampfreformierung aus Biogas eine Option für die Wasserstofferzeugung in ländlichen Gebieten.

Speziell für Wasserstofftankstellen führt der Bericht nachfolgendes aus: „Bei Wasserstoffanwendungen [...], hat sich die Speicherung des dreifachen Tagesbedarfes etabliert. Bei Speichermengen < 10 t wird dies in der Regel durch Druckwasserstoff und dessen Anlieferung realisiert. Bei größeren Mengen kann ein Flüssigwasserstoffspeicher und dessen Anlieferung sinnvoll sein“. Als mögliche Redundanz für kleine Standorte (Kapazität bis zu 8-10 Busse) wird die Einführung einer mobilen Tankstelle in Erwägung gezogen.

Zu den Herstellern von Wasserstofftankstellen werden die Unternehmen Wystrach GmbH, Linde AG, Air Liquide Deutschland, Maximator Hydrogen, Ataway, Resato, Everfuel AS und Framatome angeführt. Darüber hinaus existiert ein bayerisches Förderprogramm für Wasserstofftankstellen, welches es auf seine Anwendbarkeit im konkreten Fall zu überprüfen gilt.



Wasserstoff-Modellregion Fichtelgebirge

 <p style="margin: 0;">Landkreis Wunsiedel im Fichtelgebirge als Wasserstoffregion</p>	 <p style="margin: 0;">Landkreis Wunsiedel im Fichtelgebirge</p>	<p style="margin: 0;">Projektvolumen 300.000 Euro</p>	<p style="margin: 0;">Laufzeit 2020–2021</p>
---	---	--	---



Unabhängig von der HyExpert-Förderung wurde im Juli 2021 mit dem **Bau eines 8,5 MW Elektrolyseurs** begonnen, der in den nächsten Jahren stufenweise auf bis zu 17,5 MW erweitert werden soll.

[Direkt zum Projekt](#)

14.2.6.3 HyExperts II: Landkreis NEW & HyStarter I: Wasserstoffregion Landkreis Neustadt an der Waldnaab

Die "Bavarian-Czech Hydrogen Networking-Veranstaltung" sowie die Initiative "Regionale Mobilität, Elektromobilität und Wasserstoffnutzung im Grenzgebiet Niederbayern-Tschechien" können als Anknüpfungspunkte für eine Zusammenarbeit mit Tschechien dienen. Insbesondere wird auf die Möglichkeit einer Förderung durch das INTERREG-Programm Bayern-Böhmen für den Zeitraum 2021-2027 hingewiesen.

Die Kosten für die Herstellung von Wasserstoff werden mit 14,70 Euro pro Kilogramm (netto) im Fall 1 angegeben, der den Mobilitätsbedarf von 2030 abdeckt, und 13,50 Euro pro Kilogramm (netto) im Fall 3, der den Sauerstoffbedarf der Dauerlast deckt. Transportkosten fallen 2,70 Euro pro Kilogramm oder 3,20 Euro pro Kilogramm an. Die Tankstellenpreise für Wasserstoff liegen zwischen 18,70 Euro pro Kilogramm und 15,80 Euro pro Kilogramm.

Zudem wurde die Bildungsinfrastruktur ausgebaut. Ermöglicht wurde das, durch Aufbau von Partnerschaften mit regionalen Dienstleistern und Handwerkern, um das Fachwissen und die Qualifikationen im Bereich Wasserstofftechnologie zu stärken.

Vor dem HyExperts Programm war die Region bereits HyStarter Region. Von den zuvor gesammelten Erfahrungen und Netzwerken konnte, während der HyExperts Phase dann profitiert werden.



Landkreis Neustadt an der Waldnaab

 <p style="margin: 0;">Status einer nachhaltigen, klimafreundlichen und CO₂-neutral handelnden Region</p>	 <p style="margin: 0;">Landkreis Neustadt an der Waldnaab</p>	<p style="margin: 0;">Projektvolumen 400.000 Euro</p>	<p style="margin: 0;">Laufzeit 2022–2023</p>
---	--	--	---

Die vorangegangenen **HyStarter Ergebnisse** sollen **vertieft** und **neue Möglichkeiten** aufgetan werden, die Wirtschaft und die Bevölkerung für das Thema **Wasserstoff** zu sensibilisieren.

[Direkt zum Projekt](#)

		<h2>Wasserstoffregion Landkreis Neustadt an der Waldnaab</h2>	
 <p>Entwicklung eines Wasserstoffkonzepts und Herausbildung eines Akteursnetzwerks</p>	 <p>Landkreis Neustadt an der Waldnaab</p>	<p>Laufzeit</p> <p>12/2019–05/2021</p>	
 <p>Für die NEW-HyStarter Region ist es wichtig zu erfahren: Welche Rolle kann Wasserstoff bei den Unternehmen im Landkreis einnehmen? Wie kann durch Sektorenkopplung der erzeugte grüne Wasserstoff in den ÖPNV eingebunden werden?</p>			<p>Direkt zum Projekt</p>

14.2.6.4 HyStarter Kulmbach

Die HyStarter-Region Kulmbach fokussiert sich auf grünen Wasserstoff aus erneuerbaren Energien wie PV- und Windkraftanlagen. Ein digitaler Energienutzungsplan soll mögliche Elektrolyse-Standorte festlegen. Der Bau einer Wasserstofftankstelle im Stadtgebiet ist vorgesehen, um den Schwerlastverkehr zu bedienen und Unternehmen den Umstieg auf Brennstoffzellenantriebe zu ermöglichen. Es werden auch alternative Erzeugungspfade für Wasserstoff wie Pyrolyse und Biogasdampfreformierung betrachtet. Der Schwerpunkt des Programms liegt auf der Wahl geeigneter Standorte mit kurzen Anfahrtswegen.

		<h2>Landkreis Kulmbach</h2>	
 <p>Aufbau und Entwicklung einer Wasserstoffwirtschaft weiter fördern</p>	 <p>Landkreis Kulmbach, Stadt Kulmbach</p>	<p>Laufzeit</p> <p>2021–2023</p>	
 <p>Über 65% des Gesamtstromverbrauchs in der Region wird bereits mit regenerativen Energien erzeugt. Der weitere Ausbau soll die Wasserstoffherzeugung erhöhen.</p>			<p>Direkt zum Projekt</p>

14.2.7 Metropolregion Nürnberg

Zudem wurde von der Stadt Nürnberg eine Studie in Auftrag gegeben, welche die Kompetenzen, Chancen und Herausforderungen der Metropolregion analysiert. Diese wurde Ende 2022 veröffentlicht und wird in 3 Kernaussagen zusammengefasst²².

Zunächst wurde festgestellt, dass die Metropolregion das Potenzial besitzt zu einem Innovationszentrum für die Entwicklung, Herstellung, Vertrieb und den Export von Wasserstofftechnologien zu werden, was mit der hohen Kompetenz in komplementären Wirtschaftszweigen wie Maschinenbau, sowie den diversen Akteuren im Bereich Forschung und Entwicklung begründet wird²³.

Hinsichtlich der Erzeugung und Verwendung von Wasserstoff wird der Region ein geringes Potenzial vorausgesagt, da ein geringes Stromerzeugungsniveau für eine potenzielle Elektrolyse besteht und es zudem auf der Nachfragerseite an industriellen Großverbrauchern (z.B. Chemieindustrie) mangelt. Die erneuerbaren Energien müssten stark ausgebaut werden, um Überschussstrom zu generieren und selbst dann, wären die Erzeugungskosten in der Region höher als in anderen Regionen. Nachfrageseitig werden Anwendungsszenarien für die energieintensive Industrie von bis zu 2,6 TWh/a und im Schwerlastverkehr gesehen. Auch Elektrolyse zur Netzstabilisierung wird als Möglichkeit genannt. Festgehalten werden kann, dass das Elektrolysepotenzial in der Region entstehen könnte, sich jedoch keine Export- oder Großverbraucherregion entwickeln wird.

Dennoch wird perspektivisch ein Bedarf an Wasserstoff bestehen, weswegen zuletzt, noch aufgezeigt wird, dass trotz geringen Erzeugungs- und Anwendungspotenzial, eine entsprechende Versorgungsstruktur für Wasserstoff in der Region notwendig sein wird. Hier werden vor allem Tankstellen für den benötigten Schwerlastverkehr genannt.

Daher wird empfohlen, um die Wissenschaftsakteure der Region ein Wissenszentrum zu etablieren und bei einer metropolitanen Koordinationsstelle das Zusammenbringen von potenziellen Anbietern und Anwendern anzustreben und den Fokus auf Vernetzung sowie Wissens- und Technologietransfer zu setzen. Weiterhin wird empfohlen den Ausbau der erneuerbaren Energien generell in der Region zu beschleunigen.

²² Dazu: https://www.nuernberg.de/internet/wirtschaft/wasserstoff.html#_0_4

²³ Eine Liste mit allen von der Studie ermittelten Unternehmen mit Wasserstoffaktivität, befindet sich auf S. 165 ff. unter:
https://www.nuernberg.de/imperia/md/wirtschaft/dokumente/2023/wasserstoff_h2_emn_nuernberg_studie.pdf

15 BERECHNUNG DES WASSERSTOFFBEDARFS

15.1 Allgemein

Basierend auf den festgelegten Fahrzeugparametern (Kapitel 4), dem Fahrzeugeinsatz (Kapitel 5) sowie den Umlaufplänen (im Anhang 3 [20]) wurden für die Berechnung des Wasserstoffbedarfs der Neigetechnikzüge die Fabel-Simulationen von Enotrac verwendet. Aus diesen wurde der Energiebedarf pro Fahrzeug über einen gesamten Betriebstag berechnet. Dabei sind jegliche streckentopologischen Eigenschaften (wie Höhenprofil oder die Kurvenradien, etc.) als auch die Kompositionswechsel beim Flügeln (Vereinigen oder Trennen) detailliert mitberücksichtigt. Bei der Modellierung des Fahrzeugverhaltens wurde zudem davon ausgegangen, dass die Neigetechnikfahrzeuge ihre benötigte Energie grundsätzlich über die Brennstoffzelle aus dem Wasserstoff beziehen, ausser wenn sich das Fahrzeug unter Oberleitung befindet. In diesem Fall wird die erforderliche Energie komplett aus der Oberleitung bezogen. Für die Batterie wurde ausschliesslich ein einfaches²⁴ Batteriemanagement unterstellt, mit welchem sichergestellt wird, dass die Brennstoffzelle stets bei optimalem Wirkungsgrad (Bei einer Brennstoffzelle sind das gemäß Angaben eines Fahrzeugherstellers rund 55 %) betrieben werden kann.

So wurde für den Zeithorizont 2032 der Gesamtbedarf an H₂ im Neigetechniknetz bestimmt. Dabei wurde unterstellt, dass gegenüber heute keine weiteren Elektrifizierungen im Betrachtungsraum umgesetzt sind, d.h. der heutige Ausbauzustand des Oberleitungsnetzes (Status Quo) zu berücksichtigen ist. Abbildung 15-1 zeigt den dazu berücksichtigten Elektrifizierungsstand.

Zusätzlich wurde untersucht, wie stark sich der Wasserstoffbedarf reduzieren lassen würde, wenn die für den Regionalverkehr Oberfranken ermittelten Elektrifizierungsmassnahmen (Akkuhybridfahrzeuge ab 2035) bereits früher umgesetzt würden respektive mit der Umstellung der Fahrzeuge im Neigetechniknetz zeitlich synchronisiert werden können. In dieser Betrachtungsvariante profitieren die Neigetechnikfahrzeuge wie oben beschrieben, vom zusätzlichen Oberleitungsausbau, welcher für das konventionelle Netz erforderlich ist. Als Grundlage für die Berechnungen wurde hierzu der Elektrifizierungsstand gemäß Kapitel 8.4.3 – Arbeitsvariante 3 unterstellt.

Zugunsten eines besseren Verständnisses wird nachfolgend von den Zeithorizonten 2032 und 2035 gesprochen.

²⁴ Mit einem intelligenten Batteriemanagement wäre es möglich, die Batterie je nach bevorstehender Fahrleistung (Strecke mit oder ohne OBL) ortsabhängig unterschiedlich stark zu belasten, so dass der Wasserstoffbedarf reduziert werden kann. Dies hätte jedoch auch zur Folge, dass die Batterie aufgrund der insgesamt wohl etwas stärkeren Belastung schneller das Ende der Lebensdauer erreichen würde.

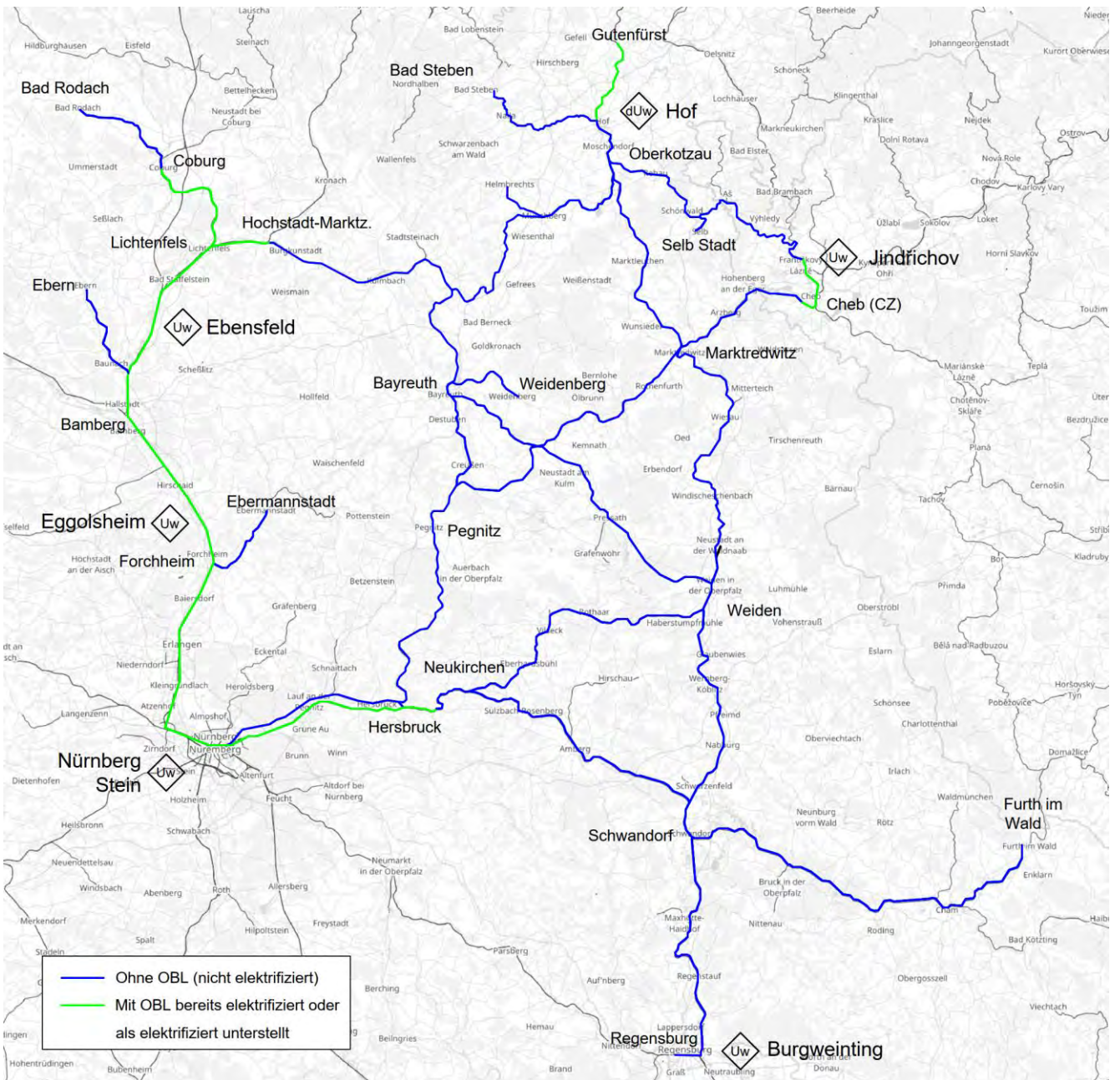


Abbildung 15-1: Unterstellter Elektrifizierungsstand für Szenario Zeithorizont 2032 (hinterlegte Karte stammt von OpenStreetMap <https://www.openstreetmap.org>)

15.2 Ergebnis Wasserstoffbedarf

Nachfolgendes Balkendiagramm zeigt für jedes Fahrzeug gemäß Umlaufplan (Anhang 3 [20]) den resultierenden Wasserstoff-Energiebedarf, welcher über einen gesamten Betriebstag anfällt. Dabei gilt:

- Auf der X-Achse sind 51 Fahrzeugen aus dem Umlaufplan referenziert. (Die Fahrzeuge sind über die entsprechenden Nummern identifizierbar).
- Auf der Y-Achse ist der Tages-Energiebedarf für Wasserstoff in kWh dargestellt.
- Die **blauen** Balken zeigen den Bedarf im Zeithorizont 2032 und die **orangenen** Balken den Bedarf im Zeithorizont 2035 (Berücksichtigung der Elektrifizierungsmaßnahmen gemäß Kapitel 8.4.3 – Arbeitsvariante 3).
- Die rote durchgezogene Linie zeigt die basierend auf Herstellerangaben abgeleitete mitgeführte Wasserstoffenergie eines NT-XEMU-Fahrzeugs und die gepunktete Linie die verfügbare Wasserstoffenergie abzüglich einer Reserve von 100 km Fahrleistung (mit einem durchschnittlichen spezifischen Energiebedarf gerechnet).
- In Prozentangaben ist zudem der Anteil an elektrifizierter Strecke (Elektrifizierungsgrad) für jedes Fahrzeug angegeben.

Zum besseren Verständnis dient folgendes Lesebeispiel: Das Fahrzeug mit der Nr. 1 fährt im Zeithorizont 2032 (blau) auf 11 % der gesamten zurückgelegten Strecke unter Oberleitung und weist einen Energiebedarf Wasserstoff von rund 4591 kWh auf. Im Zeithorizont 2 (orange) sind zusätzliche Streckenabschnitte elektrifiziert, so dass der Anteil an elektrifizierter Strecke auf 16 % ansteigt und das Fahrzeug einen gegenüber dem Zeithorizont 2032 etwas tieferen Energiebedarf an Wasserstoff von 4142 kWh aufweist. In beiden Zeithorizonten sind gegenüber der verfügbaren mitgeführten Wasserstoffenergie nur wenig Reserven vorhanden.

Energiebedarf H2 (Balken) und Anteil elektrifizierte Strecke (in %) pro Betriebstag und Fahrzeug

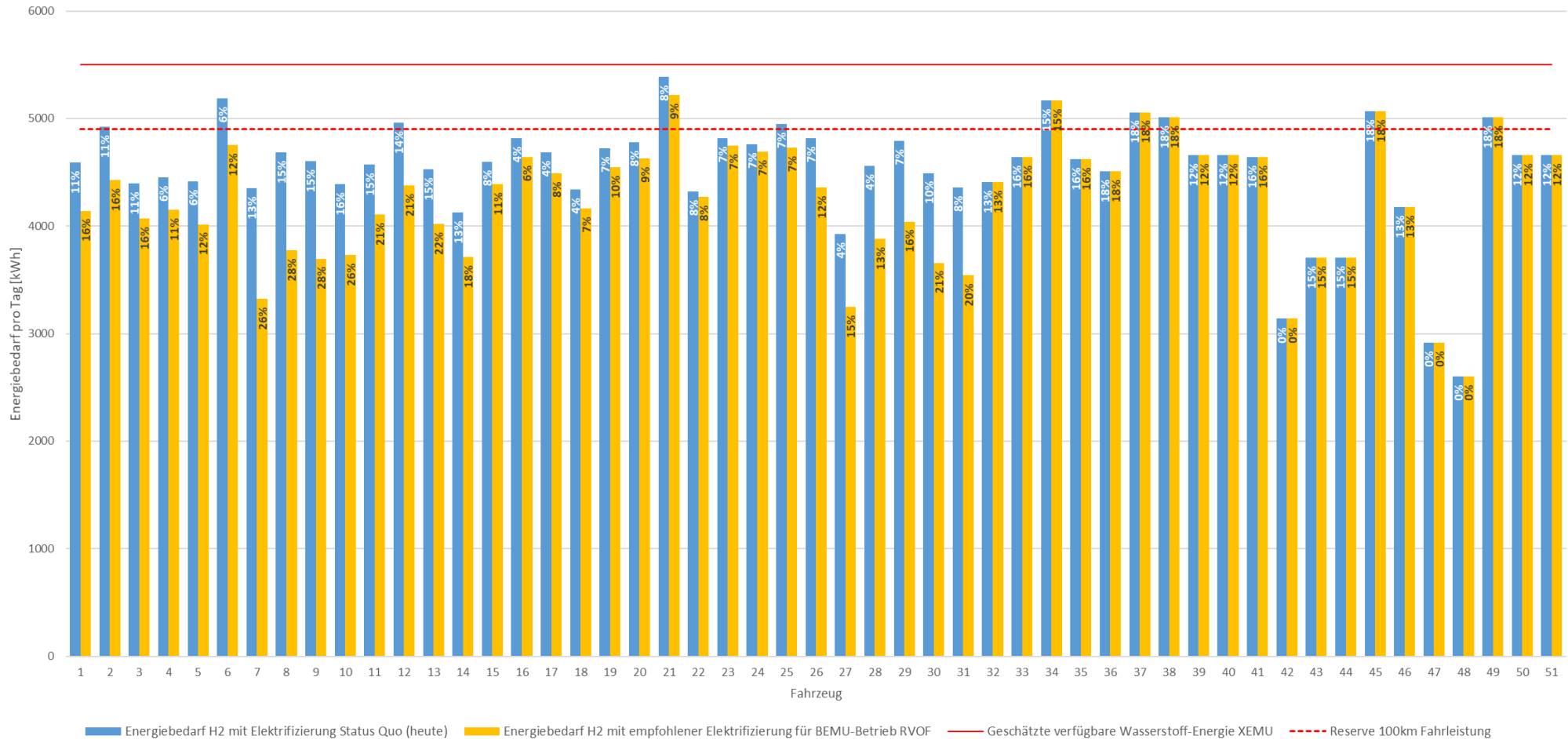


Abbildung 15-2: Wasserstoffbedarf in den Zeithorizonten 2032 (blau) und 2035 (orange), dargestellt in einem Balkendiagramm

Für die Umrechnung des Wasserstoffbedarfs in Energie kWh zu Wasserstoff in kg muss die Energiedichte von Wasserstoff von 33.3 kWh/kg und der durchschnittliche Wirkungsgrad der Brennstoffzelle von 55 % mitberücksichtigt werden. Zur genaueren Analyse sind die oben dargestellten Ergebnisse nachfolgend zusätzlich in tabellarischer Form aufgeführt.

Fahrzeug Nr.	Tagesleistung in km	Tagesleistung in hh:mm:ss	H2-Bedarf im Zeithorizont 2032			H2-Bedarf im Zeithorizont 2035		
			Bedarf in kWh	Bedarf in kg	El.- Grad in %	Bedarf in kWh	Bedarf in kg	El.- Grad in %
1	1047	17:19:00	4591	250	11%	4142	226	16%
2	1112	19:20:06	4922	269	11%	4429	242	16%
3	1047	17:25:18	4398	240	11%	4069	222	16%
4	1036	16:44:18	4452	243	6%	4149	226	11%
5	1015	16:44:42	4414	241	6%	4017	219	12%
6	1171	19:16:42	5188	283	6%	4756	259	12%
7	960	17:09:48	4350	237	13%	3324	181	26%
8	1055	16:57:18	4684	256	15%	3776	206	28%
9	1055	17:03:24	4604	251	15%	3696	202	28%
10	982	15:12:36	4392	240	16%	3731	204	26%
11	1074	17:04:24	4572	249	15%	4107	224	21%
12	1146	18:18:30	4960	271	14%	4379	239	21%
13	1052	17:39:18	4528	247	15%	4018	219	22%
14	925	14:49:18	4126	225	13%	3714	203	18%
15	1015	17:10:00	4596	251	8%	4391	240	11%
16	1044	17:25:12	4814	263	4%	4642	253	6%
17	1014	16:53:18	4688	256	4%	4490	245	8%
18	951	15:44:42	4341	237	4%	4165	227	7%
19	1045	17:48:30	4724	258	7%	4548	248	10%
20	972	17:19:06	4781	261	8%	4628	252	9%
21	1124	19:50:18	5386	294	8%	5216	285	9%
22	892	16:22:54	4324	236	8%	4271	233	8%
23	1017	17:24:42	4818	263	7%	4750	259	7%
24	1017	17:22:48	4762	260	7%	4693	256	7%
25	986	18:48:48	4947	270	7%	4728	258	7%
26	965	18:11:24	4820	263	7%	4357	238	12%
27	789	15:31:54	3927	214	4%	3248	177	15%
28	913	16:48:18	4561	249	4%	3879	212	13%
29	1008	17:34:06	4793	261	7%	4041	220	16%
30	984	16:48:30	4494	245	10%	3659	200	21%
31	957	16:15:30	4361	238	8%	3542	193	20%
32	854	18:31:00	4408	240	13%	4408	240	13%
33	904	19:20:06	4640	253	16%	4640	253	16%
34	942	21:04:48	5169	282	15%	5169	282	15%
35	904	19:06:54	4622	252	16%	4622	252	16%
36	780	17:29:36	4511	246	18%	4511	246	18%

Fahrzeug Nr.	Tagesleistung in km	Tagesleistung in hh:mm:ss	H2-Bedarf im Zeithorizont 2032			H2-Bedarf im Zeithorizont 2035		
			Bedarf in kWh	Bedarf in kg	El.- Grad in %	Bedarf in kWh	Bedarf in kg	El.- Grad in %
37	818	19:27:30	5058	276	18%	5058	276	18%
38	808	18:31:54	5013	273	18%	5013	273	18%
39	904	19:04:42	4661	254	12%	4661	254	12%
40	904	19:04:42	4661	254	12%	4661	254	12%
41	904	19:20:06	4640	253	16%	4640	253	16%
42	511	17:09:24	3138	171	0%	3138	171	0%
43	726	15:39:42	3705	202	15%	3705	202	15%
44	726	15:39:42	3705	202	15%	3705	202	15%
45	818	19:32:30	5065	276	18%	5065	276	18%
46	812	17:52:54	4174	228	13%	4174	228	13%
47	469	15:28:48	2914	159	0%	2914	159	0%
48	426	14:09:24	2603	142	0%	2603	142	0%
49	808	18:31:54	5013	273	18%	5013	273	18%
50	904	19:04:42	4661	254	12%	4661	254	12%
51	904	19:04:42	4661	254	12%	4661	254	12%

Tabelle 15-1: Ergebnis zum Wasserstoffbedarf in den Zeithorizonten 2032 (blau) und 2035 (orange) tabellarisch dargestellt.

15.3 Interpretation / Fazit

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass sowohl mit heutigem Elektrifizierungsstand (Zeithorizont 2032) wie auch nach Umsetzung der für den Regionalverkehr Oberfranken erforderlichen Elektrifizierungsmaßnahmen (Zeithorizont 2035) einzelne Fahrzeuge nicht ohne Zwischenbetankungen auskommen. Diese Fahrzeuge müssen tagsüber zwischenbetankt werden. Weiter ist ersichtlich, dass bei den meisten Fahrzeugen die zusätzlichen Elektrifizierungen den Bedarf nur marginal senken (im Mittel über alle Fahrzeuge betrachtet gerade mal 6 %). Desweiteren zeigt der Vergleich der beiden Varianten, dass folgende Linien von den Elektrifizierungen nicht profitieren und sich daher deren Bedarf nicht reduzieren lässt: RE40, RE41, RE43 und RE47.

Es lässt sich also festhalten, dass ein Vorziehen der Massnahmen, welche ab 2035 für den Regionalverkehr mit Akkuhybridfahrzeugen vorgesehenen sind, keinen signifikanten Nutzen bringt und zusätzliche Betankungsfenster tagsüber eingeplant werden müssen.

Aus den oben aufgeführten Ergebnissen resultieren zudem für die beiden Zeithorizonte folgende Wasserstoffmengen für das gesamte Neigtechniknetz und pro Tag:

- Zeithorizont 2032: 12'565 kg Wasserstoff
- Zeithorizont 2035: 11'815 kg Wasserstoff

Würden die Elektrifizierungsmaßnahmen, welche für die Akkuhybridfahrzeuge im Regionalverkehr Oberfranken erforderlich sind, mit der Umstellung der Fahrzeuge im Neigtechniknetz synchronisiert, so liesse sich Wasserstoffbedarf um rund 6 % reduzieren.

15.4 Modellierung der erforderlichen H2-Betankungsmenge an den HRS-Standorten

Die erforderlichen H2-Betankungsmengen wurden aus den von Enotrac durchgeführten Simulationen (siehe vorige Kapitel) errechnet. Die Anzahl der Nachtabstellungen und Betankungen wurde aus den Umlaufplänen (siehe Anhang 3 [20]) ermittelt.

Damit die betrieblichen Abläufe so einfach wie möglich gehalten werden können, wird mit einer vollen Tankfüllung pro Fahrzeug pro Tag gerechnet, was aus den Verbrauchswerten aus Tabelle 15-1 hervorgeht. Bei einer Tankkapazität eines Fahrzeugs von 300 kg, ergeben sich daraus bei 51 Fahrzeugen 15300 kg /t. Die Differenz zwischen beiden Gesamtmengen (12565 kg/t gemäß obigem Kapitel), wird als Reservekapazität im Gesamtsystem gehalten.

Aufgrund des sehr hohen Wasserstoffbedarfs wurde zusätzlich betrachtet, ob ein Vorziehen der Elektrifizierungsmaßnahmen, die eigentlich für 2035 vorgesehen sind, den Bedarf relevant reduzieren liesse. Der H2-Bedarf ist bei Umsetzung der zusätzlich geplanten Elektrifizierungsmaßnahmen jedoch unwesentlich geringer (~5%). Die erhöhte Differenz zwischen täglichem Verbrauch und Lagermenge im Vergleich zum Status-Quo der Elektrifizierung würde als zusätzliche Redundanz im Gesamtsystem gehalten werden, wodurch die Versorgungssicherheit erhöht wird. Der Nutzen, der durch das Vorziehen der Elektrifizierung entsteht, ist jedoch zu gering, als dass er die Maßnahmen rechtfertigen würde.

Die Betankungsmenge für die spezifischen Betankungsstandorte, kann in einem Umlaufsystem mit untertägigen Betankungen nur näherungsweise errechnet werden, da sich aus 51 Fahrzeugen im Gesamtsystem und 64 Betankungen am Tag mit unterschiedlichen Tankfüllständen zu viele Verteilungsvarianten ergäben und mit einer spezifischen Konstellation zu rechnen, dem Betriebsalltag später nicht gerecht würde. Daher wurden die Betankungen an jedem Standort prozentual an den Betankungsvorgängen pro Tag mit der Gesamt H2-Menge pro Tag im Gesamtsystem verrechnet. Um die Versorgungssicherheit zu gewährleisten, wurde eine 50% und 100% Reserve dieser H2-Mengen an jedem Standort inkludiert und dieser Wert dann auf die nächste volle Tausend gerundet.

Folgende Abbildung stellt die Rechnung in übersichtlicher Weise dar:

$H_2 \text{ Bedarf/t: } 51 [\text{Fzg}] * 300 [\text{kgH}_2] = 15300 [\text{kg H}_2] \rightarrow \text{Bsp. Nürnberg: } 15300 [\text{kg}] * 23 [\text{Betankung an HRS}] / 64 [\text{Betankungen insg.}] = 5498 [\text{kgH}_2]$					
Standort	Wasserstoff-Tankstelle?	Anzahl Fahrzeuge in der Nacht	H2-Bedarf [kg]	Anzahl Betankungen pro Tag	H2-Menge erforderlich [kg]
Nürnberg	Ja	16	4800	23	5498
Bayreuth	Ja	4	1200	8	1913
Bamberg	Nein	2	600	-	-
Lichtenfels	Nein	2	600	-	-
Hof	Ja	6	1800	14	3347
Marktredwitz	Nein	3	900	-	-
Schwandorf	Ja	13	3900	19	4542
Cheb	Nein	1	300	-	-
Weiden	Nein	3	900	-	-
Regensburg	Nein	1	300	-	-
Summe	-	51	15300	64	15300

Tabelle 15-2: Energiebedarfsrechnung XEMU ohne zusätzliche Elektrifizierungsmaßnahme (ergo: Stand heute), also Zeithorizont 1

Auslegungsgröße war eine möglichst nahe 100% vorliegende Reserve an Wasserstoff pro Standort, ohne in den Geltungsbereich der Störfallverordnung mit einer Lagerkapazität von über 5 t H₂ zu fallen.

Bsp. Nürnberg: 5498 [kgH₂] → *1,5 = 8248 [kgH₂ inkl. Reserve] → 8000 [kgH₂ gerundet]

Standort	Anzahl Fahrzeuge in der Nacht	Anzahl Betankungen pro Tag	H ₂ -Menge erforderlich [kg]	H ₂ -Menge inkl. 50% Reserve [kg]	benötigte Tankkapazität [kg]	Reservekapazität [%]	H ₂ -Menge inkl. 100% Reserve [kg]	benötigte Tankkapazität [kg]	Reservekapazität [%]
Nürnberg	16	23	5498	8248	8000	45%	10997	10000	91%
Bayreuth	4	8	1913	2869	3000	55%	3825	4000	105%
Hof	6	14	3347	5020	5000	49%	6694	7000	105%
Schwandorf	13	19	4542	6813	5000	10%	9084	10000	110%
Summe	51	64	15300	22950	21000	-	30600	31000	-

Tabelle 15-3: Energiebedarfsrechnung XEMU mit vorgehaltener Reserve von 50 % respektive 100 %

Bei der Tageskapazität +50% dieser als Reserve, werden für Nürnberg aus betrieblicher und genehmigungsrechtlicher Abwägung zwei Tankstellenstandorte vorgeschlagen. Mit 50% Reservekapazität, müsste in Schwandorf eigentlich mehr als 5t Wasserstoff vorgehalten werden, was jedoch die Anwendung der Störfallverordnung zur Folge hätte. Daher wurde die Reservekapazität gesenkt.

Würde man die doppelte Tagesmenge an Lagerkapazität vorhalten wollen, müssten neben den zwei Tankstellenstandorten in Nürnberg auch in Schwandorf und Hof zwei getrennte Tankstellenstandorte errichtet werden.

16 HRS-KONZEPTIONIERUNG

Ein Wasserstofftankstelle (HRS: Hydrogen Refueling Station) ist eine Tankstelle, die Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge (FCEVs) oder Fahrzeuge mit Wasserstoffverbrennungsmotor mit Wasserstoff (H₂) versorgt.

Für den Betrieb von Brennstoffzellenzügen muss eine bedarfsgerechte Wasserstoffinfrastruktur aufgebaut werden, die sich an das jeweilige Betankungskonzept richtet. Anlehnend an das Belieferungskonzept muss auch die Wasserstoffbetankungseinrichtung vor Ort entsprechend konzipiert werden. Wichtige Parameter in diesem Kontext sind:

- Täglicher Wasserstoffumsatz und Hochlaufszenario: bestimmt die Auslegung bzw. Leistung der Komponenten, wie Speichergröße und Kompressorleistung sowie die Erweiterungsplanung.
- Benötigtes Tankdruckniveau: bestimmt die gesamte Auslegung der Komponenten (in der Regel 350 bar bei Brennstoffzellenzügen).
- Anzahl / Uhrzeit der täglichen Betankungen: bestimmt die Auslegung und Anzahl der Komponenten (z.B. mehrere Gleise mit Dispensern).
- Standort und Flächenverfügbarkeit: neben den Modulen der Wasserstoffbetankungseinrichtung muss auch eine Fläche für den Stellplatz des Trailers und ggf. mehrere Stellplätze für die Fahrzeuge vorgehalten werden.
- Betriebsmodell: Betrieb durch das Verkehrsunternehmen oder durch ein auf die Technologie spezialisiertes Unternehmen.

Wasserstoffbetankungseinrichtungen können grundsätzlich in vier Funktionsbereiche unterteilt werden, die mit ihren Modulen verschiedenen Zwecken dienen. Technisch gesehen kommen je nach örtlichen Gegebenheiten und Vorstellungen der Betreiber einige Varianten der Tankstellenauslegung in Frage. Eine Beschreibung der einzelnen Bereiche einer Betankungseinrichtung ist in folgender Tabelle enthalten.

1	Wasserstoffproduktion / -bereitstellung	Option 1: On-Site Produktion von Wasserstoff durch z.B. einen Elektrolyseur Option 2: Off-Site Produktion mit Belieferung durch Wasserstofftrailer Option 3: Off-Site Produktion mit leitungsgebundener Belieferung
2	Wasserstoffkompression	Das Verdichtungssystem ist dazu ausgelegt den für die Betankung nötigen Druck aufzubauen. Hierbei kann sich verschiedener Kompressorarten bedient werden. Meist handelt es sich dabei um eine stufenweise Verdichtung. Dabei wird der Wasserstoff aus dem Niederdruckspeicher (evtl. auch Mitteldruckspeicher als Zwischenspeicher) auf 500 – 1.000 bar komprimiert, welcher dann im Hochdruckspeicher zur Verfügung gestellt wird.
3	Wasserstoffspeicherung	Speicher stellen den gasförmigen Wasserstoff durch Lagerung auf verschiedenen Druckebenen für die weiterführende Verdichtung bereit. Typische Speicherdruckebenen sind: <ul style="list-style-type: none"> • 30 bar (Niederdruckspeicher) • 200 – 300 bar (Mitteldruckspeicher)

		<ul style="list-style-type: none"> > 500 bar (Hochdruckspeicher) <p>Der Trailer wird mit der Tankstelle verbunden und lässt den Wasserstoff durch Überströmen in die Speicher fließen (Niederdruck- / Mitteldruckspeicher) oder es findet die direkte Verdichtung auf 500 bar in den Hochdruckspeicher statt. Alternativ kann auch ein 500 bar - Trailer als Hochdruckspeicher fungieren, der den Wasserstoff direkt für die Betankung bereitstellt. In diesem Fall muss dieser regelmäßig durch einen neuen Trailer bzw. deren Wasserstoffcontainer getauscht werden (Trailer-Swap).</p>
4	Betankung	<p>Die Betankungseinheit in Form einer Zapfsäule (Dispenser) stellt die Verbindung zwischen Tankstelle und Fahrzeug her. Beim Betankungsvorgang strömt der Wasserstoff aufgrund des Druckunterschiedes zwischen Speicher und Fahrzeugtank in den Tank über. Für eine schnelle Betankung ist eine Vorkühlung des Wasserstoffs auf bis zu -40°C notwendig, um einer Überhitzung des Fahrzeugtanks vorzubeugen.</p>

Tabelle 16-1: Technische Bereiche einer Wasserstoffbetankungseinrichtung

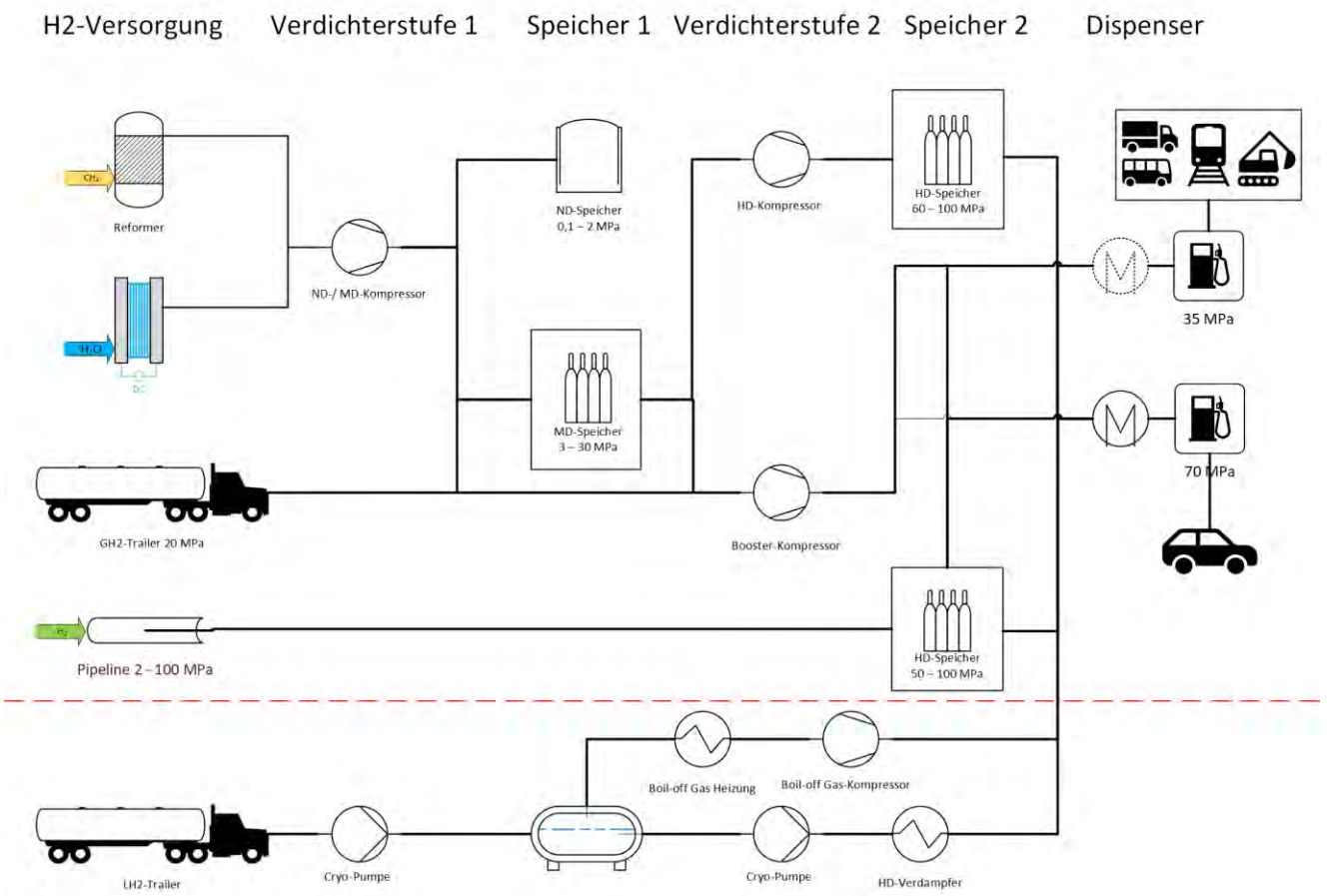


Abbildung 16-1: Übersicht Systemaufbau Wasserstoffbetankungseinrichtung

16.1 Wasserstoffbereitstellung

Wird der benötigte Wasserstoff nicht vor Ort der Betankung bzw. Nutzung produziert (zentrale Produktion; off-site-production)²⁵, muss dieser an die Verbrauchsstelle geliefert werden. Wasserstoff weist unter Normbedingungen eine geringe volumetrische Energiedichte auf, was eine der zentralen Herausforderung der Wasserstoffwirtschaft ist. Eine Komprimierung des Wasserstoffs und anschließende Speicherung bzw. Lagerung in Druckgasbehältern ermöglicht eine Erhöhung der volumetrischen Energiedichte, wobei der Energieverbrauch für die Komprimierung den systemischen Wirkungsgrad der Wasserstoff-Wertschöpfungskette mindert.

Die Entwicklung und Umsetzung von passenden Transportsystemen für Wasserstoff ist ein wichtiger Schritt zum Gelingen einer erfolgreichen Wasserstoffwirtschaft. Der Transport von Wasserstoff ist aufgrund der spezifischen chemisch-physikalischen Eigenschaften mit besonderen Anforderungen an das Handling verbunden. Es stehen heute schon eine Reihe geeigneter Transportoptionen zur Auswahl. Die Wahl, der am besten geeigneten Transportvariante hängt von einer Anzahl an Variablen ab, die sich aus den Vorgaben des jeweiligen Projekts ergeben.

Der Transport zur HRS kann je nach Menge oder Druck auf unterschiedliche Weise realisiert werden.

16.1.1 Gasförmiger Wasserstoff in MEGC-Trailern

Der Transport von gasförmigem Wasserstoff kann auf verschiedenen Druckniveaus durchgeführt werden. Üblicherweise arbeiten die eingesetzten Trailer mit Drücken von 200 bar bis 500 bar. Die verschiedenen Trailermodelle können dabei mehrere hundert Kilogramm bis zu 1000 kg Wasserstoff transportieren. Aktuell werden im wesentlichen zwei Arten von Trailern unterschieden. Differenziert werden sogenannte Tube Trailer und Multi-Element-Gas-Container (MEGC) Trailer. Bei der MEGC-Lösung werden gebündelte zylindrische Gasflaschen in einem separaten Container auf dem Fahrzeug transportiert. Da diese einen höheren Druck erlauben, kann mehr Wasserstoff transportiert werden.

16.1.2 Flüssiger Wasserstoff LH2

Wenn eine große Menge Wasserstoff benötigt wird, ist flüssiger Wasserstoff LH2 eine weitere geeignete Versorgungsart. Die Wasserstoffverflüssigung erfordert die Aufrechterhaltung der Bedingungen im Inneren des Anhängers (-253 °C bei Umgebungsdruck, ~0,2 MPa). LH2 wird in hochisolierten Anhängertanks geliefert, und obwohl sie isoliert sind, kann sich LH2 während der Lieferung erwärmen und verdampfen, wodurch der Druck in den Lagertanks erhöht wird. Aus Sicherheitsgründen muss der gasförmige Wasserstoff abgelassen werden, wenn der Druck den maximalen Druck des Tanks überschreitet. Dies wird als "Boil-off-Verlust" bezeichnet.

Eine Belieferung mit flüssigem Wasserstoff ist nicht Bestandteil des Versorgungskonzepts da es nur eine sehr eingeschränkte Versorgungsinfrastruktur ist flüssigem Wasserstoff gibt.

²⁵ Auf die Möglichkeiten der Wasserstoffversorgung upstream wird in Kapitel 19 detaillierter eingegangen.

16.1.3 Pipeline

Die mit Abstand größte Kapazität bietet eine leitungsgebundene Versorgung über Pipelines. Neben dem Bau eines dedizierten Wasserstoffnetzes bestehend aus Wasserstoffpipelines ist die Nutzung und Umnutzung des bestehenden Gasnetzes Gegenstand technischer und normativer Aktivitäten. Dabei geht es sowohl um die Eignung von Werkstoffen als auch um die Entwicklung geeigneter Normen und Sicherheitsvorschriften sowie nationaler und internationaler Vorschriften. Den hohen Transportkapazitäten stehen jedoch auch die höchsten Anfangsinvestitionen unter den Versorgungsoptionen gegenüber.

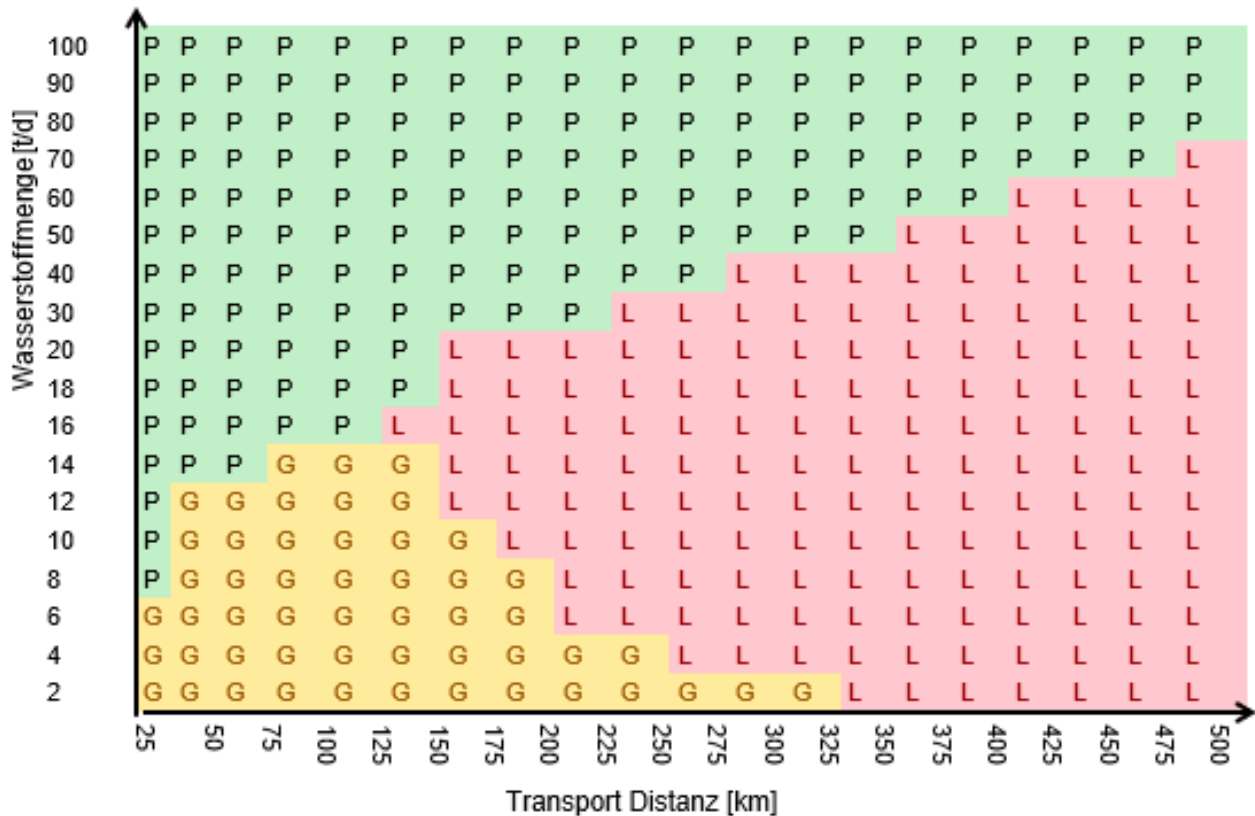


Abbildung 16-2: geringsten Kosten für den Wasserstofftransport in Abhängigkeit von Distanz und zu transportierender Menge. P = Pipeline, L = liquid, G = gasförmig nach Yang & Ogden 2008²⁶

Es kann zusammenfassend also festgehalten werden, dass die Lieferung von Wasserstoff als komprimiertes Gas mittels LKW ideal für kleine Standorte und geringe Nachfrage ist, die Lieferung von flüssigem Wasserstoff für den Transport über lange Distanzen und moderate Nachfrage geeignet ist, und die Versorgung über Pipelines sich besonders für Anwendungsfälle mit hoher Wasserstoffnachfrage anbietet.

Derzeit und voraussichtlich auch in näherer Zukunft ist der gasförmige Transport per LKW gängige Praxis und Stand der Technik. Eine Pipeline und der Transport in verflüssigter Form werden aufgrund der Dimensionen des Projektgebiets und den erforderlichen Mengen (dazu folgendes Kapitel) im heutigen infrastrukturellen Kontext als weniger geeignet eingeschätzt. Unabhängig davon, wie das

²⁶ Yang & Ogden 2008: Determining the Lowest-Cost Hydrogen Delivery Mode

Versorgungskonzept und der überregionale Transport des Wasserstoffs sich gestaltet, wird demnach die Infrastruktur für die Anlieferung per LKW in die Aufstellkonzepte der HRS integriert.

Ob der Wasserstofftransport von der Erzeugung bis zu den HRS *ausschließlich* mit LKW abgewickelt werden soll, wird im Kapitel 16.1 näher erläutert.

16.2 Wasserstoffaufbereitung

Verdichtung: Zur Kompression von Wasserstoff stehen grundsätzlich 3 Verdichtersysteme zur Verfügung. Kolbenkompressoren weisen eine hohe Druckerhöhung, jedoch eine eingeschränkte Dynamik auf. Eine ebenfalls hohe Druckerhöhung weisen Membrankompressoren auf. Ihr Nachteil liegt allerdings in einem geringen Wirkungsgrad und einer begrenzten Förderrate. Ionische Verdichter komprimieren Gase durch Auf- und Abbewegen einer ionischen Flüssigkeitssäule. Ionische Salze weisen keinen Dampfdruck auf, weshalb sie sich nicht mit Umgebungsmedien vermischen.

Speicherung: Derzeitige Druckwasserstoffspeicher bestehen aus Stahl und/ oder Kompositwerkstoffen und sind von zylindrischer Form. Das gilt für Nieder- wie auch Hochdruckspeicher. Aufsteigend von Typ 1 bis Typ 4 Tanks sinkt das Systemgewicht und der Betriebsdruck steigt, während sich die Komplexität der Fertigung und damit die spezifischen Kosten erhöhen. Bei Typ-I-Behältern handelt es sich um (Industrie-) Gasflaschen, die aus Stahl bestehen und somit ein sehr hohes Gewicht, aber gleichzeitig eine hohe Sicherheit und Festigkeit aufweisen. Die Drücke variieren zwischen 200 und 300 bar. Für Typ-II-Behälter wird der zylindrische Teil mittels gewickelten Kohlefasern verstärkt. Dadurch besitzen sie ein geringeres Systemgewicht. Typ-III- sowie Typ-IV-Behälter sind vollständig mit einem hochfesten Faserverbundwerkstoff umhüllt, unterscheiden sich aber in Bezug auf das verwendete Material. Typ-III-Behältern liegt ein metallischer Liner (Absperrschicht zur Permeationsvermeidung) zugrunde, während Typ IV Tanks einen Kunststoffliner verwenden. Gegenüber herkömmlichen Stahlbehältern wird durch Typ IV eine Gewichtsreduzierung von knapp 70 % ermöglicht.

16.3 Dimensionierung der Komponenten (Versorgung, Speicherung, Verdichtung, Peripherie, Dispenser)

Der Auftraggeber beabsichtigt auf eigenem Betriebsgelände mehrere Wasserstofftankstellen für die Betankung von Brennstoffzellen Zügen zu errichten. Je Standort sollen 10 respektive 11 Fahrzeuge betankt werden. Die Tankstelle wird über mindestens eine Zapfsäule für gasförmigen Wasserstoff bei 350 bar verfügen. Die Betankung erfolgt auf Betankungsgleisen. Die Versorgung der Tankstellen mit Wasserstoff erfolgt aus Druckgasspeicher Behältern für gasförmigen Wasserstoff. Die Druckgasbehälter besitzen einen Nenndruck zwischen 500 und 600 bar. Die Druckgasbehälter werden über eine Verdichteranlage mit Wasserstoff was aus einem Füllspeicher befüllt. Der Wasserstoff wird gasförmig in Trailer angeliefert.

Die Wasserstofftankstellen sind stets in einem eingezäunten Grundstück des Auftraggebers zu errichten die Anlagenteile der Wasserstoff Tankstelle werden für gewöhnlich in Fertigcontainern montiert und aufgestellt. Die Verbindungsrohrleitungen zwischen den einzelne Tankstellen Bestandteilen (Pufferspeicher, Verdichter, Füllspeicher) werden oberirdisch verlegt.

An der Tankstelle werden ausschließlich verkehrsrechtlich zugelassene Druckgasbehälter für Wasserstoff in Kraftfahrzeugen befüllt. Die Wasserstoffanlagen werden entsprechend geltender

Normen (Betriebssicherheitsverordnung) regelmäßig wiederkehrend durch zugelassene Überwachungsstellen geprüft.

16.3.1 Betankungsprozess

Im Tankstellenbereich befinden sich Dispenser für das Druckniveau 350 bar. Das angegebene Druckniveau von 350 bar bezieht sich auf den Wasserstoffdruck im Fahrzeugtank bei einer Außentemperatur von 15 °C. Der im Fahrzeugtank maximal zulässige Druck während des Betankungsvorgangs beträgt 438 bar, resultiert aus isochorer Druckerhöhung ausgehend vom Nenndruck 350 bar infolge eines Temperaturanstiegs von 15 °C auf die maximal zulässige Tankbehälterinnentemperatur von 85 °C.

Um die maximale Kraftstoffmenge bei einer vollständigen Befüllung zu erreichen, darf der Druck im Tank über dem normalen Arbeitsdruck liegen, muss aber den maximalen Fülldruck (1,25 x Betriebsdruck) der Zapfanlage unterschreiten. Der vollständige Füllstand des Fahrzeugspeichersystems entspricht daher dem Betriebsdruck bei einer Referenztemperatur von 15 °C. Für die sichere und schnelle Befüllung legt das Betankungsprotokoll die Betankungsrate in Form einer Druckrampe fest. Um die für jeden Betankungsprozess spezifische Rampenrate anzuwenden, benötigt die Zapfsäule die aktuelle Wasserstoff-Vorkühltemperatur (sofern vorhanden), das Volumen und den Druck im Fahrzeugtank sowie die Umgebungstemperatur.

Die Startphase beginnt mit dem sicheren Verbinden der Zapfpistole am Fahrzeugtankzapfen. Nach dem Verifizieren der Koppelverbindung initialisiert die Zapfsäule einen Connection Puls, der den Fahrzeugdruck erfasst. Dabei strömt Wasserstoff in einer geringen Menge unter hohem Druck in das System, wodurch die Rückschlagventile geöffnet werden. Folgend stellt sich ein einheitliches Druckniveau zwischen Tankstelle und Fahrzeugtank ein. Ein zweiter Druckimpuls dient der Aufnahme der Fahrzeugtankkapazität und dem Überprüfen von Leckagen. In dieser Phase der Betankung wird, die Umgebungs- und die Zapfsäulentemperatur erfasst und mit dem Fahrzeugtankdruck sowie dem Stationstyp kombiniert, um die geeignete Druckrampe in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur und des Fahrzeugtankdrucks zu berechnen. Die Startphase endet mit dem Strömungsbeginn des Wasserstoffs in den Fahrzeugtank.

Beim sogenannten Überströmen fließt der Wasserstoff aus dem Füllspeicher mit höherem Druck in den Fahrzeugtank mit einem niedrigeren Druck. Das Überströmen findet so lange statt bis und Gleichgewichtsdruck zwischen viel Speicher und Fahrzeugtank erreicht ist. Entspricht der Fahrzeugdruck noch nicht dem Enddruck von 350 bar wird auf die nächste Druckkaskade umgeschaltet. Während der Hauptbetankungsphase werden die Vorkühltemperatur sofern vorhanden und die Kommunikationssignale überwacht. Ist das Kommunikationssignal ungültig, wird der Tankvorgang abgebrochen. Der Betankungsvorgang endet bei Erreichen des Zieldrucks an der Zapfsäule oder durch Überschreiten der Grenzwerte. Ein Abbruch kann auch erfolgen, wenn die Tankstelle nicht den passenden Druck zur Verfügung stellt und die Druckrampe nicht eingehalten werden kann. Wird der gewünschte Enddruck nicht mehr durch das Überströmen aus den Speicherbehältern erreicht, wird für die Betankung der Fahrzeuge der Wasserstoffverdichter zugeschaltet. Nach Beendigung des Betankungsvorgangs wird das Zapfventil zu einer Ausblaseleitung sicher in die Atmosphäre entlüftet.

Der Betankungsprozess wird anhand einer deutlich sichtbaren Anleitung, die sich am Dispenser befindet, vom Fahrzeugführer selbständig durchgeführt. Der Auftraggeber hat sicherzustellen das ausschließlich eingewiesene Personal betanken durchführt.

Konkret in diesem Projekt, werden für den Betankungsprozess folgende Annahmen unterstellt:

- Betankung der Fahrzeuge in Doppeltraktion
- Dispenser je Betankungsgleis
- Maximale Dauer für Transfer zwischen Abstellung und Betankung von 20 min
- Rüstzeit von 5 min.
- Maximale Betankungszeit je Fahrzeug von 20 min

Grafisch ist der Betankungsprozess in nachfolgender Abbildung vereinfacht dargestellt.



Abbildung 16-3: Annahme zum Betankungsprozess

16.3.2 Versorgung

Zur Versorgung der Tankstellen mit Wasserstoff werden eine Trailer-Lieferstationen errichtet. Das mit gasförmigem Wasserstoff beladene Fahrzeug wird in der Trailerstation abgestellt. Der Auflieger mit einer H₂-Kapazität von bis zu 1.000 kg H₂ wird dort zur Entnahme bis auf einen Restdruck abgestellt. Danach wird der Auflieger gegen einen voll beladenen Wasserstoff-Auflieger getauscht. Das Zugfahrzeug wird außerhalb der Entladestation abgestellt. Der Auflieger wird gegen Wegrollen gesichert und geerdet. Der Trailer wird dauerhaft auf der Fläche aufgestellt und mit der Tankstelle über flexible Schlauchleitungen verbunden. Der Trailer wird sukzessive entleert. Nach Erreichen eines Mindestdrucks wird der leere Trailer bedarfsgerecht ausgetauscht.

Das Befüllen der Speicherbehälter erfolgt durch Verdichten des Wasserstoffs aus dem Trailer bzw. einem optionalen Niederdruckspeicher. Alle Leitungen, Armaturen und Anlagenteile werden so gewählt, dass sie für den Einsatz von Wasserstoff geeignet sind. Die Werkstoffe sind insbesondere gegen thermische und chemische Beanspruchungen beständig und halten den erforderlichen mechanischen Beanspruchungen stand.

Im nächsten Schritt wurden Wasserstofftankstellen spezifisch für Züge konzipiert, die die erforderliche Tagesmenge inklusive einer betrieblich-infrastrukturell angemessenen Redundanz vorhalten. Weiterhin wurde durch die Linienplanung insbesondere die Traktionsplanung festgelegt, dass die Standorte genug Flächenverfügbarkeit für das Betanken einer in zweifachtraktion fahrenden Konstellation haben müssen. An als für geeignet ausgemachte Standorte ohne entsprechende Gleise ist das in den Gesamtkosten zu beachten.

Für die Dimensionierung der Komponenten wurden zwei bestehende Schienentankstellen digitalisiert und für den spezifischen Anwendungsfall skaliert.

16.3.3 Best Practice: Höchst und Bremervörde

In Deutschland werden derzeit 3 Wasserstofftankstellen für Züge betrieben, die als Benchmark herangezogen wurden. Eine dieser Tankstellen steht in Frankfurt Höchst am Industriepark von Infraseriv und wurde errichtet, um die NT-XEMU-Flotte der Taunusbahn zu versorgen.

In Bremervörde wurde für 14 NT-XEMU der Elbe-Weser-Bahn eine Tankstelle im Außenbereich („auf der grünen Wiese“) errichtet. Da kein Bebauungsplan für das betroffene Gebiet existiert, fand auf einer landwirtschaftlichen Fläche eine Planung im Außenbereich statt. Im Unterschied zu Höchst, werden hier 500 bar Konstantdruckspeicher eingesetzt. Diese weisen aufgrund des Hydraulikteils einschließlich Peripherie einen größeren Flächenbedarf verglichen zu anderen Druckwasserstoff-Speicherkonzepten auf. In Bremervörde kann an zwei Dispensern gleichzeitig getankt werden, was jedoch vom konkreten Betriebsablauf abhängig zu machen ist, weswegen der Flächenverbrauch für die Betankungsgleise entsprechend variieren kann.

Eine Abschätzung der Größe der einzelnen Komponenten der beiden Systeme werden in der folgenden Tabelle gegenübergestellt.

Höchst		Bremervörde	
Komponente	Maße	Komponente	Maße
Betankungsgleis	70mx2m = 140m ²	Betankungsgleis	70mx2m = 140m ²
Dispenser	3,5mx2m = 7m ²	Dispenser	3,5mx2m = 7m ²
<i>Trailer-Box</i>	<i>5mx12m = 60m²</i>	Trailer-Box	5mx12m = 60m ²
<i>Niederdruckspeicher</i>	<i>4mx4m = 16m²</i>	Verdichter an LKW-Anschluss	2,5mx9,5m = ~24m ²
MEGC Container	2,5mx12m = 30m ²	Konstantdruckspeicher Einheit	16,5mx10m = 165m ²
Verdichterhalle	18mx25m = 450m ²	Hydrauliköltank	12mx3,5m = 42m ²
		Hydraulikpumpen-container	9,5mx4m = 38m ²

Tabelle 16-2: Komponenten bei den Systemen in Höchst und Brenevörde

In Höchst kommen derzeit 4 MEGC Container die jeweils 1000 kg H₂ bei 550 bar speichern zum Einsatz. Daneben befindet sich eine Verdichterhalle. Da der Wasserstoff in Höchst hauptsächlich als Nebenprodukt der Chlor-Alkali-Elektrolyse auf dem Industriegelände anfällt und via Pipeline verteilt wird, entfallen die Trailer-Boxen. Die Dispenser sind in Höchst über eine Pipeline mit den anderen Infrastrukturteilen verbunden. Die Pipeline wurde über den zwischenliegenden Gleisen errichtet. Die Gesamtkosten für die Errichtung der Tankstelle lagen etwa bei 4.2 Mio. €, wobei 2.5 Mio. € vom Land Hessen als Förderung bezuschusst wurden. Daneben kamen 0.8 Mio. € für vorbereitende Gutachten und eine mobile Zugbetankungseinrichtung²⁷.

²⁷ <https://www.chemietechnik.de/service-standorte/infraseriv-hoechst-errichtet-wasserstofftankstelle-fuer-zuege-im-industriepark-784.html>



Abbildung 16-4: Übersicht HRS in Höchst

In Bremervörde braucht jede der zwei Konstantdruckspeichereinheiten (32 Einzeltanks) mit Peripheriekomponenten 250m² bei einer Wasserstoffspeicherkapazität von 900 kg. Die Fläche für Dispenser und Betankungsgleis sind identisch mit der in Höchst. Die Fläche für die Trailer-Boxen betragen je Einheit 85m² (60m² + 24m²+ Puffer).

Gefördert wurde das Errichten der Tankstelle durch den Bund im Rahmen des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie mit rund 4.3 Mio. €²⁸

²⁸ <https://www.now-gmbh.de/aktuelles/pressemitteilungen/spatenstich-in-bremervoerde-weltweit-erste-wasserstofftankstelle-fuer-passagierzuege/>



Abbildung 16-5: Übersicht HRS in Bremervörde

Die Maße wurden normiert und für Anlagen mit entsprechender Lagerkapazität summiert. Das Ergebnis ist in Abbildung 16-6 dargestellt. Die Version mit den MEGC-Containern ist bei größeren Lagermengen platzsparender. Durch die Größe der Verdichterhalle bestehen jedoch Restriktionen hinsichtlich Mindestlänge und -breite der Fläche.

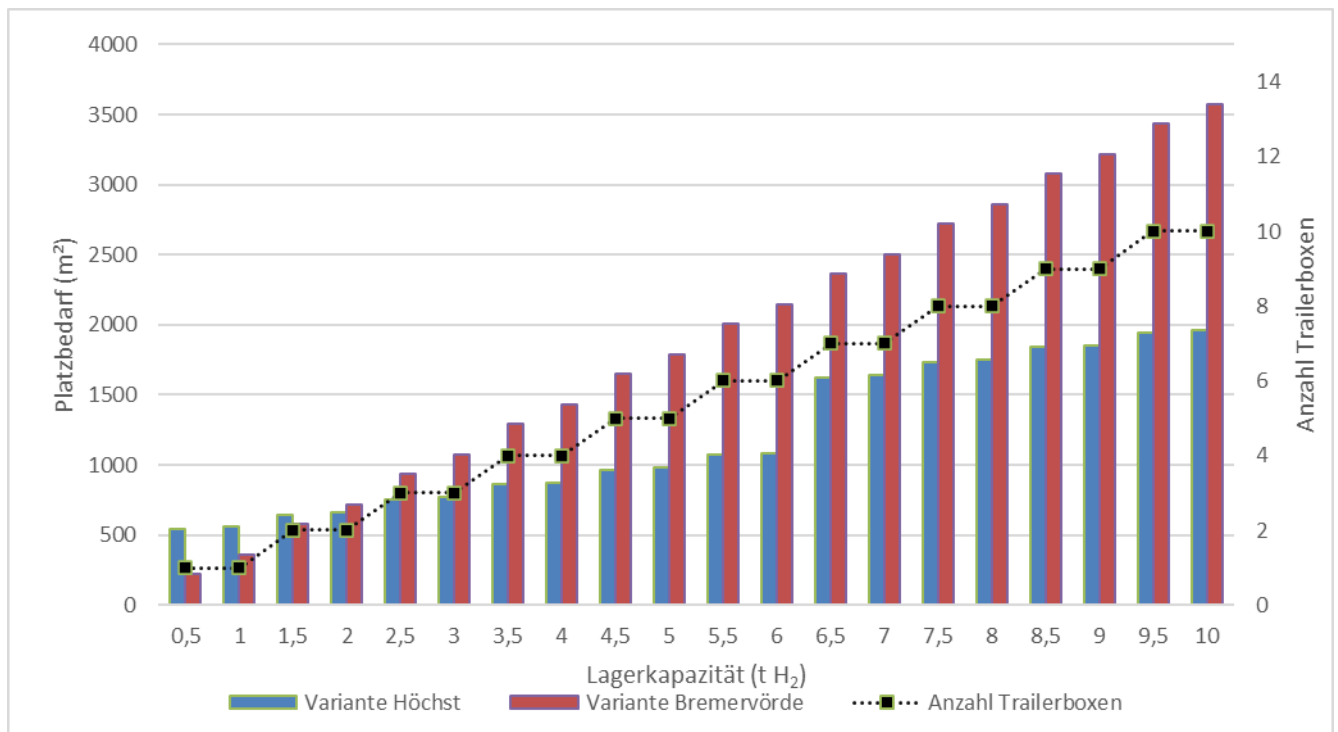


Abbildung 16-6: Größe der HRS-Aufstellung bei zunehmender Lagerkapazität (x-Achse: Wasserstofflagerkapazität in t, y-Achse: benötigte Fläche in m²)

Nachfolgend werden die wichtigsten Parameter der HRS in Höchst und Bremervörde sowie der mobilen HRS in Tübingen aufgezählt:

	Frankfurt Höchst	Bremervörde	Tübingen
Projektpartner	Alstom, RMV, Infraseriv Höchst	Alstom, Linde, LNVG, evb	DB Energie, DB Regio, Siemens Mobility
H2-Quelle	By-Product Chlor-Alkali+ 5 MW Wasserelektrolyse	By-Product	Wasserelektrolyse
H2-Versorgung	Pipeline	MEGC-Trailer; 200 - 300 bar	MEGC-Trailer 300 bar; On site Elektrolyse
H2-Verdichtung	Membrankompressoren; 500 bar	Kolbenkompressor; 500 bar	40 ft Verdichtercontainer; 500 bar
H2-Druckgasspeicherung	4 x 40 ft MEGC Container bei 50 MPa	64 Konstantdruckspeicher bei 50 MPa	45 ft MEGC Container 300 bar
H2-Gesamtspeicher-kapazität	4.400	2.030	900
Betankungen pro Tag	ca. 14	12 x 130 kg	
H2-Tagesbedarf	ca. 2000	ca. 1600	
Dispenser	2	2	2
Vorkühlung	nein	keine Information	ja
Betankungszeit	15 - 20 min	15 - 20 min	15 - 20 min

Tabelle 16-3: Kenndaten zu den HRS in Höchst, Bremervörde und Tübingen

17 STANDORTANALYSE LOGISTISCH GEEIGNETER HRS

Nachfolgend wird das Vorgehen der Standortsuche, -analyse und -bewertung erläutert sowie die potenziellen Standorte vorgestellt.

17.1 Präferenzstandorte

In einem ersten Schritt wurden Auftraggeberseitig Präferenzstandorte, vor allem aufgrund betrieblicher Faktoren abgefragt. Hier wurden keine Präferenzen genannt.

17.2 Dieselbestandstankstellen

Bislang werden die untersuchten Linien durch Dieselfahrzeuge bedient, weswegen sich im nächsten Schritt hieran orientiert wurde. Einerseits, weil an diesen Standorten eine Einbindung in den Betriebsablauf sichergestellt ist und andererseits, weil mit genehmigungsrechtlich einfacheren Prozessen für den Fall einer Erweiterung um H2 gerechnet wird.

Im Untersuchungsgebiet konnten 12 Tankstellen für Züge identifiziert werden, die gleichmäßig über das Untersuchungsgebiet verteilt sind, wobei sich zwei der Tankstellen in Nürnberg befinden.

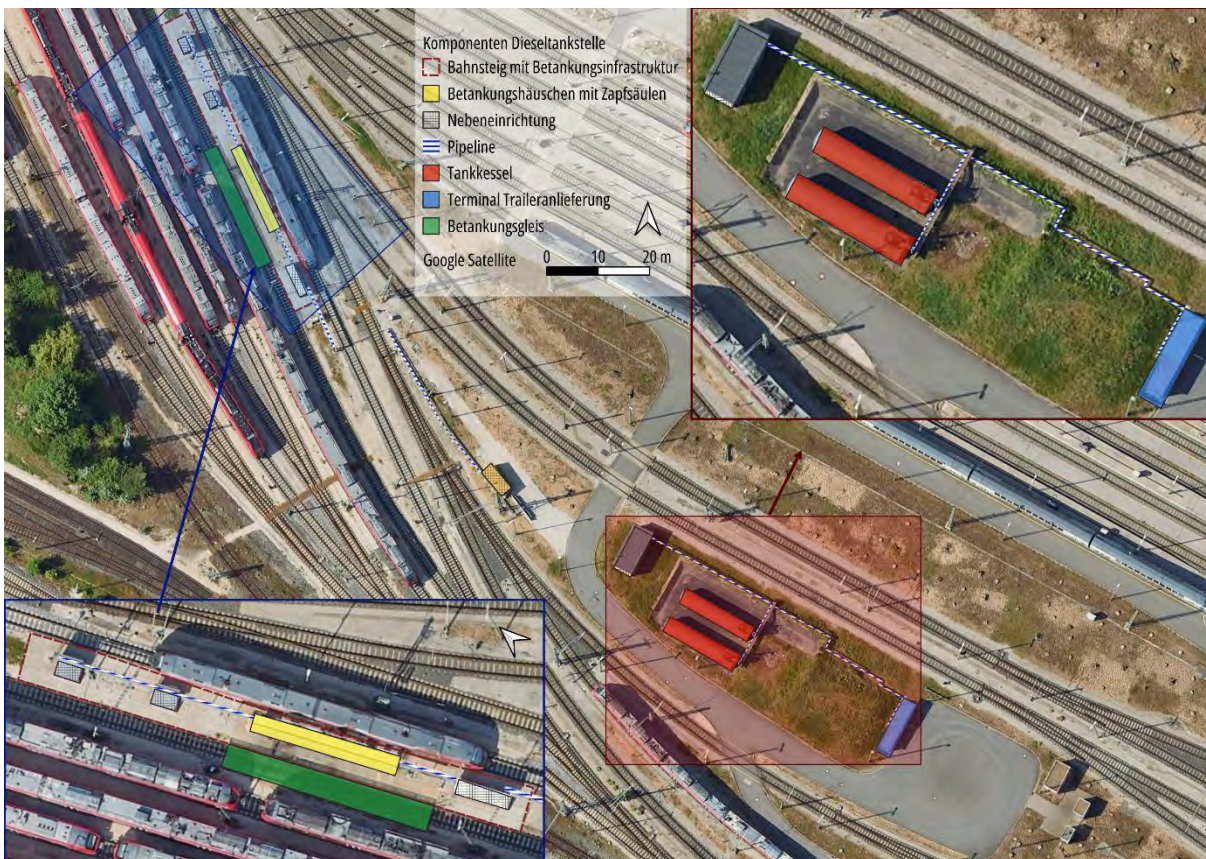


Abbildung 17-1: Aufbau einer Schienentankstelle mit Diesel

Die Dieseltankstellen im Untersuchungsraum befinden sich in unmittelbarer Nachbarschaft der dazugehörigen Haltepunkte oder eines Bahnbetriebsgeländes und haben für die Betankung ein separates Gleis zur Verfügung. Um Betriebs- und Leerfahrten so kurz wie möglich zu halten, wurde dieses Abstandskriterium für die Wasserstofftankstellen übernommen und als Isochronen entsprechend in den Karten dargestellt.

17.3 Neue Standorte

Aufgrund der Kosten für neue Tankinfrastruktur und der – auch in Zukunft – begrenzten Anzahl von Wasserstoffzügen gilt es, Standorte zu identifizieren, die eine hohe Anzahl an Fahrzeugen an Knotenpunkten bedienen können.

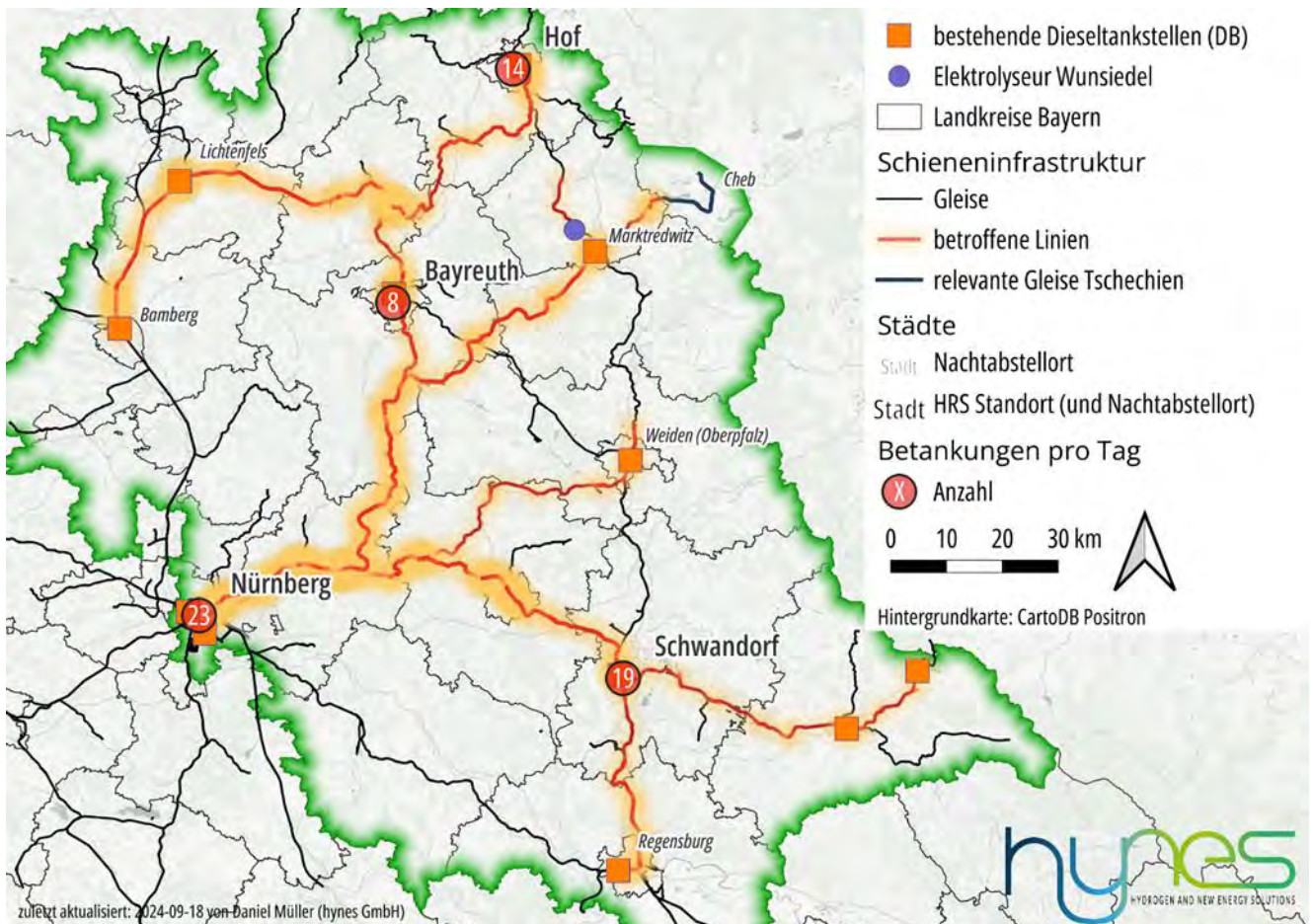


Abbildung 17-2: Überblick über den Untersuchungsraum, die betroffenen Linien sowie die Nachtstellorte und HRS-Standorte

Wie in Kapitel 15 beschrieben wird, wurde die Anzahl der Nachtabstellungen und Betankungen aus den Umlaufplänen (siehe Anhang 3 [20]) ermittelt. In Absprache mit dem Auftraggeber, wurden so als Tankstellenstandorte Bayreuth, Nürnberg, Hof und Schwandorf ausgewählt.

17.3.1 Genehmigungsrechtliche Parameter²⁹

Tankstellen gelten als Betriebsanlagen der Eisenbahn und dürfen nur gebaut oder geändert werden, wenn eine Planfeststellung oder Plangenehmigung erteilt wurde (§ 18 Abs. 1; 18b AEG). Es gelten die §§ 72 bis 78 VwVfG.

Generell muss für Tankstellen, die zur Versorgung und Betankung von Zügen in der Nähe der Bahnschienen betrieben werden, demnach ein Planfeststellungsverfahren nach §18 AEG durchlaufen werden. Das Planfeststellungsverfahren als höherrangiges Verfahren schließt die Prüfung aller

²⁹ Dieses Kapitel stellt keine rechtsverbindliche Beratung oder ein Rechtsgutachten dar. Es handelt sich hierbei um eine genehmigungsrechtliche Einschätzung, die auf der Grundlage des verfügbaren Wissens und der Erfahrung des Verfassers erstellt wurde. Der Verfasser ist kein Jurist, und die hier gegebenen Informationen sollten nicht als Ersatz für eine qualifizierte Rechtsberatung angesehen werden.

materiell-rechtlichen Rechtsvorschriften mit ein. Neben der Planfeststellung sind andere behördliche Entscheidungen nicht erforderlich (Konzentrationswirkung, § 75 Abs. 1 VwVfG).

Die im Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) umgesetzte Richtlinie 2010/75/EU hat gemäß § 1 Abs. 1 BImSchG den Zweck, Menschen, Tiere und Pflanzen, den Boden, das Wasser, die Atmosphäre sowie Kultur- und sonstige Sachgüter vor schädlichen Umwelteinwirkungen zu schützen und dem Entstehen schädlicher Umwelteinwirkungen vorzubeugen. Zum Einhalten dieser Ziele müssen Einrichtungen und deren Betreibung einen immissionstechnischen oder auch einen störfalltechnischen Genehmigungsvorbehalt erfüllen. Die immissionsschutzrechtlichen Genehmigungsverfahren wurden in § 10 BImSchG und in der Verordnung über das Genehmigungsverfahren (9. BImSchV) nach bundeseinheitlicher Regelung abschließend festgelegt. Nach § 73 BImSchG sind davon abweichende Verfahrensregelungen der Länder ausdrücklich ausgeschlossen.

Im Anhang I der 4. Bundes-Immissionsschutzverordnung (4. BImSchV) werden die genehmigungspflichtigen Anlagen samt den bestimmenden Mengen/-Leistungsschwellen aufgeführt, die schädliche Umwelteinwirkungen hervorrufen können. Bei Wasserstoffbetankungsanlagen ist dabei die Speicherkapazität entscheidend, die unter Nummer 9, Lagerung, Be- und Entladen von Stoffen und Gemischen, Anhang I der 4. BImSchV aufgeführt wird. Nach Nummer 9.3 und entsprechend nach Anhang II der 4. BImSchV muss für Wasserstofflagermengen von mehr als 3 Tonnen ein Vereinfachtes Verfahren gemäß § 19 BImSchG (ohne Öffentlichkeitsbeteiligung) und bei mehr als 30 Tonnen ein Genehmigungsverfahren gemäß § 10 BImSchG (mit Öffentlichkeitsbeteiligung) durchgeführt werden. Werden weniger als 3t insgesamt gelagert, muss nach der Betriebssicherheitsverordnung eine Erlaubnispflicht mit Baugenehmigung eingeholt werden, wie sie in Abschnitt 3 §18 aufgeführt wird³⁰.

Es ist darauf zu achten, dass das Vorhaben nicht unter § 50 BImSchG und damit die Störfallverordnung fällt.

Die 12. BImSchV, die sogenannte Störfallverordnung regelt den Schutz von Menschen und Umwelt vor den Folgen von plötzlich auftretenden Störfällen bei technischen Anlagen mit Austritt von gefährlichen Stoffen. Die gefährlichen Stoffe und die definierten Mengenschwelle die vorhanden sein dürfen sind in Anhang 1 12. BImSchV festgelegt. Die Nummer 2.44 führt die Mengenschwelle für Wasserstoff auf. Dort werden ein unterer und ein oberer Betriebsbereich beschrieben, die ab einer Menge >5 t bzw. >50 t nach § 1 der 12. BImSchV unterschiedliche Voraussetzungen erfüllen müssen. Wird die Mengenschwelle von 5t überschritten, muss der Betreiber folgende Pflichten nach §§ 3-8³¹ erfüllen:

- Präventive Maßnahmen zur Störfallverhinderung und Schadensbegrenzung
- Einhaltung der aktuellen Sicherheitsstandards und regelmäßige Überwachung der Anlagen
- Umfassende Information und Zusammenarbeit mit Behörden
- Schriftliche Anzeige von relevanten Änderungen an die zuständige Behörde
- Erstellung eines Sicherheitskonzepts und dessen regelmäßige Überprüfung
- Öffentlichkeitsarbeit zur Zugänglichkeit der relevanten Sicherheitsinformationen

Raumplanerisch relevant ist besonders §3 Absatz (5), wo um die „Wahrung angemessener Sicherheitsabstände zwischen Betriebsbereich und benachbarten Schutzobjekten“ geht. Was als angemessener Sicherheitsabstand und als Schutzobjekt gilt, wird in KAS 18 respektive KAS 63 definiert. Die Schutzobjekte werden in KAS 18 aufgeführt:

³⁰ In der LV 49 des Länderausschusses für Arbeitsschutz und Sicherheitstechnik (LASI) vom Oktober 2017 finden sich Erläuterung und Hinweise zur Durchführung.

³¹ Die erweiterten Pflichten für Lagermengen >50t sind in §§ 9-12 aufgeführt. Sind aber für das Projekt aufgrund der veranschlagten Mengen nicht weiter relevant.

- Wohngebieten,
- öffentlich genutzten Gebäuden und Gebieten,
- wichtigen Verkehrswegen (so weit wie möglich),
- Freizeitgebieten und unter dem Gesichtspunkt des Naturschutzes besonders wertvollen bzw. besonders empfindlichen Gebieten andererseits

Die angemessenen Sicherheitsabstände für Anlagen zur Verwendung von Wasserstoff sind in KAS 63 pauschal festgelegt und unterscheiden sich nach Leckagefläche³² und Betriebsüberdruck:

Betriebsüberdruck P	490 mm ² [m]
P < 100 bar	80
100 ≤ P < 200 bar	110
200 ≤ P < 400 bar	140
400 ≤ P < 600 bar	150
600 ≤ P < 800 bar	170
800 ≤ P ≤ 1.000 bar	180

Tabelle 17-1: Angemessene Sicherheitsabstände nach KAS 63

Hieraus wird geschlossen, dass eine Lagerung von mehr als 5t Wasserstoff Standorte im funktionalen Umfeld der Haltepunkte ausschließt, da die Bahnhöfe selbst Schutzobjekte sind.

Genehmigungsrelevante Parameter	Verfahren
H ₂ -Lagerung < 3 t Gesamtlagerung	Nach Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) Abschnitt 3 § 18 Erlaubnispflicht mit Baugenehmigung Erläuterung und Hinweise zur Durchführung finden sich in der LV 49 des Länderausschusses für Arbeitsschutz und Sicherheitstechnik (LASI) vom Oktober 2017
H ₂ -Lagerung ≥ 3 t und < 30 t Gesamtlagerung	Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) Vereinfachtes Verfahren
H ₂ -Lagerung ≥ 30 t Gesamtlagerung und/oder On-site-Elektrolyse im industriellen Maßstab	Nach Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) Förmliches Verfahren
Bei Lagerung von > 5 t unter Berücksichtigung weiterer Stoffe mit jeweiliger Gewichtung	Störfall-Verordnung (12. BImSchG)

Tabelle 17-2: Zusammenfassung der genehmigungsrelevanten Parameter und der folgenden Verfahren nach 4. BImSchV

³² Hierbei wird in zwei Anlagentypen unterschieden: 1. Anlagen mit Rohrleitungen mit Innendurchmessern vom maximal 15 mm und 2. Anlagen mit Rohrleitungen mit Innendurchmessern von über 15 mm. Daraus abgeleitet wird im Fall 1 eine Leckagefläche von 180 mm² (Äquivalenzdurchmesser 15 mm) und im Fall 2 eine Leckagefläche von 490 mm² (Äquivalenzdurchmesser 25 mm) unterstellt.

Bei gelagerten Wasserstoffmengen von 3 t und mehr ist zusätzlich eine allgemeine Vorprüfung nach dem UVPG durchzuführen (UVPG, Anlage 1, Nr. 9.3.3). Unterhalb dieser Menge fällt die Anlage nicht unter das UVPG. Die nächstgrößere Mengenschwelle liegt bei 30 t und mehr (UVPG, Anlage 1, Nr. 9.3.2) und ist daher für diese Untersuchung nicht weiter relevant. Beim Bau eines Elektrolyseurs, muss eine allgemeine Vorprüfung nach UVPG durchgeführt werden (UVPG, Anlage 1, Nr. 4.2).

17.3.1.1 Bundesnaturschutzgesetz

Einige im BNatSchG definierte Schutzgebiete schließen den Bau einer Wasserstofftankstelle praktisch aus und wurden folgend bei der Potenzialflächensuche als Ausschlussflächen behandelt:

§ 23 BNatSchG Naturschutzgebiete:

In Naturschutzgebieten sind bauliche Maßnahmen grundsätzlich verboten, es sei denn, sie dienen ausdrücklich dem Schutzzweck des Gebiets. Der Bau einer Wasserstofftankstelle wäre in der Regel mit den Schutzziele eines Naturschutzgebiets unvereinbar und daher ausgeschlossen.

§ 24 BNatSchG Nationalparks:

In Nationalparks ist jegliche Art von baulichen Eingriffen, die die natürliche Entwicklung der Landschaft stören könnten, grundsätzlich ausgeschlossen. Der Bau einer Wasserstofftankstelle ist daher praktisch unmöglich.

§ 25 BNatSchG (Kernzonen von) Biosphärenreservaten:

In der Kernzone eines Biosphärenreservats sind jegliche Bauvorhaben, die nicht dem Schutz oder der wissenschaftlichen Forschung dienen, grundsätzlich ausgeschlossen.

§ 28 BNatSchG Flächenhafte Naturdenkmale:

In flächenhaften Naturdenkmälern sind bauliche Maßnahmen grundsätzlich verboten, da sie den geschützten Charakter der Fläche beeinträchtigen würden.

§ 30 BNatSchG Gesetzlich geschützte Biotop:

Grundsätzlich ist ein Eingriff im größeren Maße auf einer Fläche mit einem geschützten Biotop nach § 30 BNatSchG verboten. Jede Maßnahme, die das Biotop in seiner ökologischen Funktion oder Ausdehnung wesentlich beeinträchtigt und zerstört fällt unter das Verbot.

In Landschaftsschutzgebieten, Naturparks und Entwicklungszonen von Biosphärenreservaten kann der Bau einer Wasserstofftankstelle unter bestimmten Bedingungen möglich sein, sofern die Planung den jeweiligen Schutzzwecken nicht widerspricht und alle erforderlichen Genehmigungen eingeholt werden.

§ 39 BNatSchG schützt allgemein wild lebende Tiere und Pflanzen sowie deren Lebensräume und verbietet die Zerstörung oder erhebliche Beeinträchtigung dieser Lebensstätten. Es gibt jedoch bestimmte Ausnahmeregelungen und Ermessensspielräume, insbesondere wenn das Biotop auf einer Fläche liegt, die einem bestimmten Zweck (z. B. Bahnbetriebsfläche) zugeordnet ist. Bahnbetriebsflächen fallen häufig unter spezielle Regelungen, da sie einem besonderen öffentlichen Interesse (Eisenbahnverkehr und Infrastruktur) dienen. Die Frage, ob der Bau einer Wasserstofftankstelle für Züge als privilegierte Nutzung auf einer Bahnbetriebsfläche anzusehen ist, hängt von der rechtlichen Einordnung des Projekts und der Fläche ab. Ebenfalls sei darauf hingewiesen, dass nach §67 BNatSchG von den Geboten und Verboten des Gesetzes Befreiung gewährt werden kann.

Es wird empfohlen, eine frühzeitige Abstimmung mit der zuständigen Behörde (i.d.R. untere Naturschutzbehörde) zu suchen. Ausschlussflächen sind es hingegen nicht, es wird bei der Vorstellung der Potenzialflächen auf die erschwerten genehmigungsrechtlichen Bedingungen hingewiesen.

Zusätzlich zu den bundesrechtlichen Vorgaben gelten auch die Bestimmungen des Bayerischen Naturschutzgesetzes. In Bayern sind beispielsweise bestimmte Verfahrensregelungen und Zuständigkeiten für den Umgang mit Eingriffen in Biotope und geschützte Arten strenger oder detaillierter als im Bundesrecht.

17.3.2 Potenzialflächen

An den in Kapitel 17.3 gezeigten und sich aus den Umlaufplänen ergebenden Standorten für HRS wurden Potenzialflächen für HRS konkretisiert und bewertet.

Zunächst wurde um die Gleise, die den jeweiligen Haltepunkt ans Schienennetzwerk anschließen ein 200m Puffer gelegt, der die Gesamtpotenzialfläche für die HRS darstellt. Anschließend wurden restriktive Kriterien für den Bau einer HRS definiert und als Ausschlussflächen festgesetzt. Das sind die im vorigen Kapitel aufgezeigten Schutzgebiete sowie planungsrechtlich ausgewiesene Flächen (Wohngebiete, Dorfgebiete, Innerstädtische Gebiete), die dem Bau einer HRS entgegenstehen. Land- und forstwirtschaftliche Flächen wurden berücksichtigt, obwohl ein Planänderungsverfahren eingeleitet werden müsste. Die HRS Bremervörde ist so vorgegangen und das hauptsächlich von einer HRS tangierte Schutzgut «Mensch» auf solchen Flächen zu vernachlässigen ist, was eine Genehmigung aussichtsreicher macht. Diese Standorte wurden unter dem Kriterium «Flächenkategorie» und «betriebliche Machbarkeit» entsprechend bewertet. Die übrigen Flächen wurden anschließend anhand des Kriterienkatalogs bewertet. Die Struktur dieses Kriterienkatalogs soll eine systematische und ganzheitliche Bewertung potenzieller Standorte ermöglichen, da sowohl infrastrukturelle, betriebliche, genehmigungsrechtliche als auch wirtschaftliche Aspekte berücksichtigt werden.

17.3.3 Bewertungsmatrix/Kriterienkatalog

Für die Haltepunkte, die eine HRS erhalten sollen (Bayreuth, Nürnberg, Hof & Schwandorf), wurden anhand eines iterativ erarbeiteten Kriterienkatalogs verschiedene spezifische Standorte herausgearbeitet und bewertet.

In der Kategorie der infrastrukturellen Kriterien werden Optionen für die Wasserstoffversorgung untersucht, einschließlich der Verfügbarkeit von Wasserstoff über Straße, Schiene oder Wasserweg sowie der Nähe zum Wasserstoffkernnetz. Des Weiteren werden Flächenaspekte betrachtet, darunter die Verfügbarkeit von Freiflächen für die Anlagentechnik sowie das Ausbaupotenzial der Standorte.

Die betrieblichen Kriterien fokussieren sich auf die Effizienz und Integration der Tankstellen in das bestehende System. Dies beinhaltet das Vorhandensein von Dieselbetankungsmöglichkeiten im funktionalen Umfeld sowie die Integration in den Betriebsablauf hinsichtlich zu fahrenden Leerkilometer.

Im genehmigungsrechtlichen Bereich werden die Standorte hinsichtlich ihrer Eignung für den Bau und Betrieb von Wasserstofftankstellen geprüft. Das umfasst die Lage in Industriegebieten, die Lagerkapazitäten, die Einhaltung von Immissionsrichtlinien (insbesondere Abstände zu Wohngebieten) und die Bodenkategorisierung.

Schließlich werden wirtschaftliche Kriterien berücksichtigt, die auf potenziellen Synergieeffekten und Wertschöpfungspotenzialen basieren. Dazu zählen die Verfügbarkeit von Wasserstoffquellen, die Nähe zum H₂-Kernnetz sowie die Lage in oder zu Hyland-Regionen, die besondere Fördermöglichkeiten bieten könnten.

Oberkategorie	Kategorie	
Infrastrukturell	H ₂ -Versorgungsoption	Diese Kategorie bewertet die Verfügbarkeit verschiedener Versorgungsoptionen für Wasserstoff, einschließlich des Transports über Straße, Schiene oder Wasserweg sowie der Nähe zum European Hydrogen Backbone (EHB). Die Wahl der Versorgungsoption kann erhebliche Auswirkungen auf die Effizienz und Zuverlässigkeit der Wasserstoffversorgung haben.
	Fläche	Die Verfügbarkeit von ausreichendem Raum für den Bau und Betrieb einer Wasserstofftankstelle ist von entscheidender Bedeutung. Ausreichend Freiflächen für die Anlagentechnik sowie das Potenzial für zukünftige Erweiterungen und Ausbauten sind hier wichtige Kriterien.
Betrieblich	Dieselbetankung im funktionalen Umfeld	Die Möglichkeit, Dieseldieselkraftstoff in der Nähe der Wasserstofftankstelle zu beziehen, kann zur sukzessiven Umstellung der Fahrzeugflotte genutzt werden und ermöglicht eine nahtlose Integration in den bestehenden Betriebsablauf.
	Betriebsintegration (Leerkilometer)	Dieses Kriterium bewertet das Verhältnis von Leer- zu Gesamtkilometern der bedienten Fahrzeuge. Eine geringe Distanz zwischen den Tankstellen und den von den Fahrzeugen frequentierten Strecken kann die Betriebskosten senken und steigert die Effizienz.
Genehmigungsrechtlich	Lagerkapazität	Die Einhaltung der gesetzlichen Anforderungen hinsichtlich Lagerung, Sicherheit und Umweltschutz (Betriebsstoffe) ist unerlässlich und wird von den Genehmigungsbehörden geprüft.
	Immissionsorte	Die Einhaltung von Immissionsrichtlinien und die Minimierung von Umweltauswirkungen, insbesondere in Bezug auf Wohngebiete und sensitive Umweltbereiche, sind wesentliche Aspekte bei der Standortwahl.
	Bodenkategorie	Standorte mit günstigen Bodenkategorien gemäß den Umweltschutzbestimmungen haben eine höhere Genehmigungswahrscheinlichkeit und sind weniger anfällig für Umweltauswirkungen im Zusammenhang mit dem Betrieb der Wasserstofftankstelle.
Wirtschaftlich	Synergiepotentiale	Die Identifizierung von Synergieeffekten mit anderen (potenziellen) Wasserstoffnutzern oder -infrastrukturen kann die Rentabilität und Nachhaltigkeit des Standorts verbessern und zusätzliche Einnahmequellen schaffen.

Tabelle 17-3: Kriterienkatalog Synergieeffekte

Eine tabellarische Darstellung der Bewertungsmatrix aller Potenzialstandorte befindet sich in Anhang 4 [21]. In den folgenden Kapiteln werden die an den Standorten Nürnberg, Bayreuth, Schwandorf und Hof identifizierten Potenzialflächen mit den jeweils höchsten Bewertungen kurz in Kartenform aufbereitet dargestellt und vorgestellt.

Für alle nachfolgend gezeigten Karten gilt folgende Legende:

Zeichenerklärung für Potenzialstandortkarten

Tankstellenanalyse

- ◆ HRS Potenzialstandorte

Tankstellenbestandteile

- Betankungsgleis
- Dispenser
- Traileranlieferung
- Niederdruckspeicher
- Verdichterhalle
- MEGC
- Straßenanbindung
- Eingezäunter Bereich

Isochoren [km]

- 0,5
- 1
- 1,5
- 2
- 3
- 4
- 5
- 10

Potenzielle Wasserstoffsinken

- ▲ Automobilhersteller
- ▲ Bauunternehmen
- ▲ Chemieindustrie
- ▲ Elektrotechnik
- ▲ Glasindustrie
- ▲ Holzverarbeitung & Möbelherstellung
- ▲ Klinikprodukte
- ▲ Lebensmittelindustrie
- ▲ Logistik
- ▲ Maschinenbau
- ▲ Metallverarbeitung
- ▲ Oberflächenverdeulung
- ▲ Papierindustrie
- ▲ Petrochemie
- ▲ Pflanzengroßhandel
- ▲ Verpackung
- ▲ Zement

Wasserstoffinfrastruktur

- ◆ Wasserstofftankstellen Kfz
- Elektrolyseur Wunsiedel
- Hyland Landkreise

Transport und Verkehr

- relevante Gleise
- Wasserstoffkernnetz geplant für...
 - 2028
 - 2030
 - 2040
- Straßen
 - Autobahn
 - Bundesstraße (außerorts)
- Flughäfen_Bayern
 - ✈ Internationaler Flughafen
 - ✈ Militärflughafen
 - ✈ Regionalflughafen
 - ✈ Trimodale Häfen

Allgemeines

- Höhenlinien
- Untersuchungsgebiet
- Landkreise
- Hintergrundkarte: Google Satellite



erstellt von: Daniel Müller (Hynes)
zuletzt aktualisiert von: Daniel Müller (Hynes) am 2024-09-20



Abbildung 17-3: Zeichenerklärung für Potenzialstandortkarten

17.3.4 Nürnberg

In Nürnberg wurden 9 Potenzialflächen, die für den Bau einer HRS und der zugehörigen Peripherie geeignet wären, ausgemacht. Da in Nürnberg aufgrund der benötigten Wasserstoffmenge respektive der Störfallverordnung, zwei Standorte benötigt werden und zudem die dichte Bebauung zu erheblichen Beeinträchtigungen bei der Planung und Genehmigung führen kann, wurde die Potenzialflächenfindung hier am intensivsten betrieben. Die Bepunktung reicht von 82 Punkten bei Standort 5 bis zu 132 Punkten an Standort 1. Im Mittel liegt die Bepunktung der Nürnberger Standorte bei 105 Punkten. Im Folgenden werden die Potenzialflächen vorgestellt, die über diesem Durchschnitt liegen, die Karten aller weiteren Standorte befinden sich in Anhang 4 [21]. Zunächst können einige Kriterien für alle Potenzialflächen in Nürnberg erläutert werden. Hierbei handelt es sich um Kriterien, die nicht die Potenzialflächen untereinander, sondern die HRS-Standorte unterscheidet. So befindet sich Nürnberg in keinem der HyLand Projekte, weswegen alle Potenzialflächen mit 0 Punkten bewertet werden. Auch ist in Nürnberg die Anzahl der bedienten Linien und Fahrzeuge im Vergleich zu den anderen Standorten sehr hoch und damit betrieblich als außerordentlich wichtig einzuordnen, weswegen 10 Punkte vergeben wurden. Die pipelinegebundene Versorgungsoption über das Wasserstoffkernnetz ist durch die Umwidmung der Erdgaspipeline Erlangen-Tennenlohe-Nürnberg, welche für 2028 vorgesehen ist (dazu Kapitel 19.2), sehr aussichtsreich. Die einzelnen Standorte werden nun nach ihrer Bewertung deszendend genauer betrachtet.

Nürnberg S1

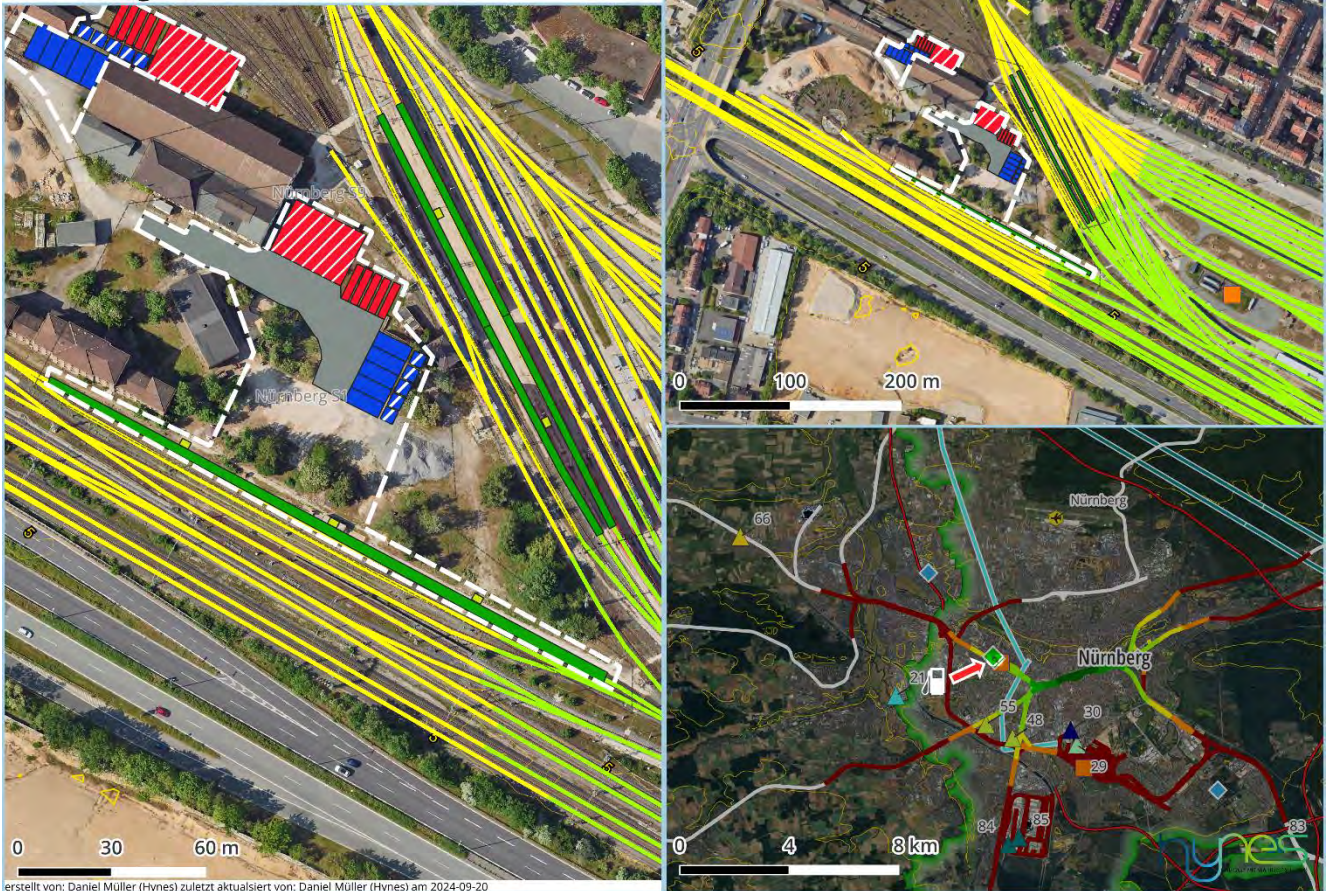


Abbildung 17-4: Potenzialstandortkarte Nürnberg Standort 1

Der Potenzialstandort Nürnberg 1 liegt auf dem Bahnbetriebswerk Nürnberg West im Südwesten der Fläche in der Nähe des ehemaligen Ringlokschuppens.

Eine Versorgungsoption über die Schiene hat aufgrund der hier verlegten Gleise des Bahnbetriebswerks sehr gute Voraussetzungen, und auch ein Betankungsgleis ist bereits vorhanden. Für eine Versorgung über die Straße sind die Voraussetzungen ebenfalls sehr gut, da sich unmittelbar südlich des Bahnbetriebswerks und damit auf der Potenzialfläche der Frankenschneidweg befindet, welcher in seiner Verlängerung zur A73 wird. Lediglich die Straße auf dem Betriebsgelände selbst müsste für die Traileranlieferung entsprechend ausgebaut werden. Die Versorgung per Schiff wäre über den Güterhafen bei Nürnberg Eibach zwar möglich, wird jedoch aufgrund der Kosten für die benötigte Infrastruktur sowie der technischen Reife des Schifftransports in Kombination mit den benötigten Mengen und den alternativen Versorgungsoptionen als nicht empfehlenswert eingestuft.

Hinsichtlich der Flächenverfügbarkeit ist der Freiheitsgrad für die Anlagentechnik sehr gut, auch wenn das Ausbaupotenzial aufgrund der weiteren Bebauung auf dem Gelände als herausfordernd eingestuft wird.

Aus betrieblicher Perspektive ist die Distanz zum Haltepunkt Nürnberg mit knapp über 3 km zwar nur als ausreichend zu bewerten, da das Betriebsgelände jedoch auch eine Dieseltankstelle in unmittelbarer Nähe des Potenzialstandorts 1 ausweist, wird die betriebliche Integration der Wasserstoffbetankungen als sehr gut bewertet.

Da das gesamte Betriebsgelände im FNP als Bahnanlage gekennzeichnet, sind die genehmigungsrechtlichen Voraussetzungen hinsichtlich der Flächenkategorie sehr gut. Südlich schließt an den Frankenschnellweg ein Gewerbegebiet an und nördlich, ein Wohngebiet. So wird das genehmigungsrechtliche Gutachten, aufgrund der bestehenden Emissionen zwar begünstigt, durch die Nähe zum immissionssensiblen Wohngebiet im Norden, muss jedoch auch mit Herausforderungen gerechnet werden. Die betriebliche Machbarkeit ist sichergestellt.

Synergiepotenziale ergeben sich durch das in der Nähe befindliche Klärwerk, Wasserstoffsensoren oder -quellen sind hingegen weiter entfernt, weswegen der Aufbau gemeinsamer Infrastruktur hier nur bedingt aussichtsreich scheint. Dennoch wird Nürnberg in Zukunft eine hohe Wasserstoffnachfrage aufweisen, weswegen gemeinsame Distributionsinfrastrukturen angestrebt werden sollten.

Insgesamt ist der Standort mit 132 der am höchsten bewerteten aller Standorte dieser Studie und wird daher im Falle einer Umsetzung als prioritärer Standort empfohlen.

Nürnberg S7

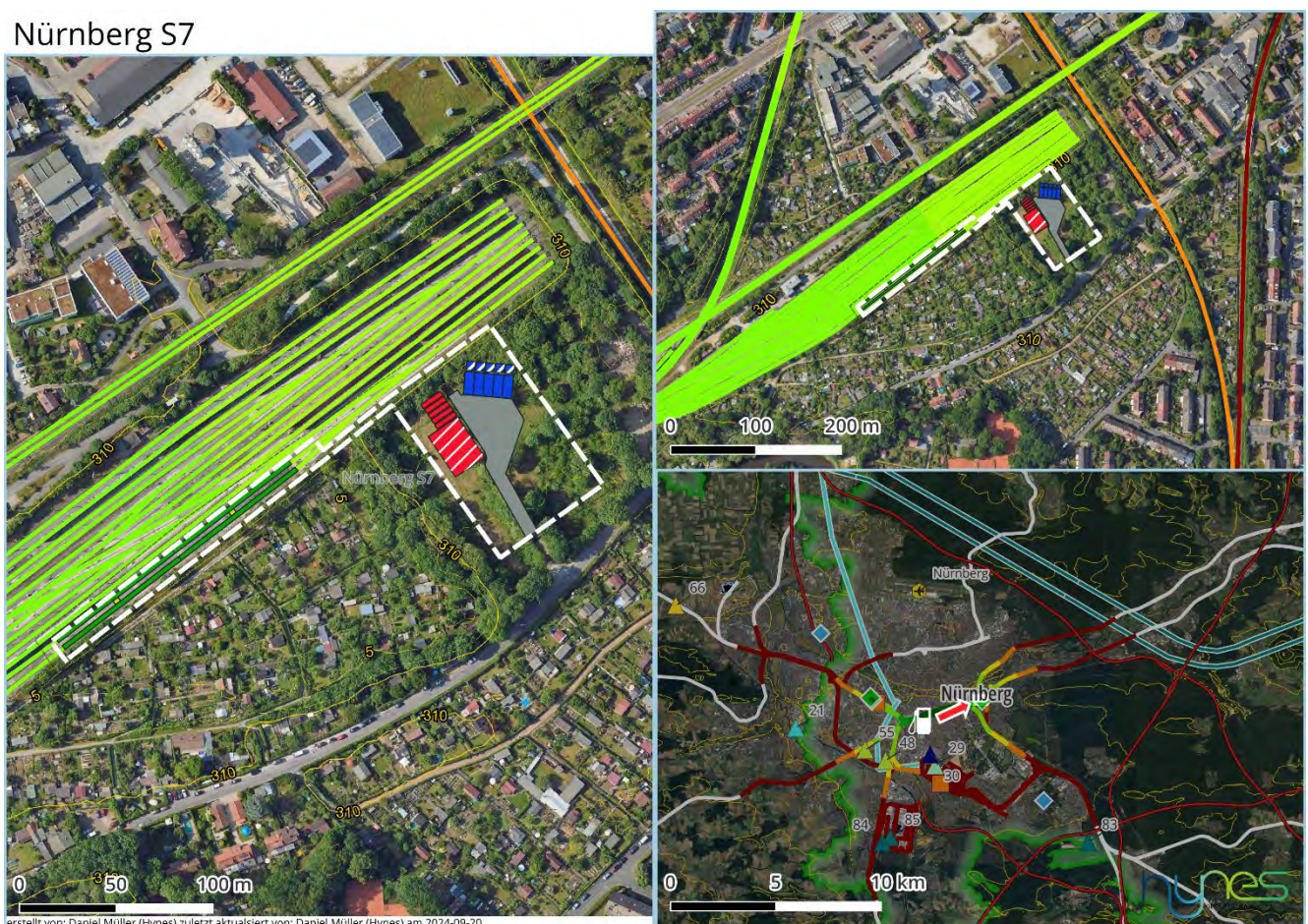


Abbildung 17-5: Potenzialstandortkarte Nürnberg Standort 7

Die Potenzialfläche Nürnberg 7 liegt im Gleisdreieck östlich des Hauptbahnhofes am Deutsche Bahn Depot Dagmarstraße. Hier befindet sich gemäß FNP zwischen Gleishammerstraße und den Schrebergärten südlich des Depots eine gewerbliche Fläche, die derzeit brachliegt.

Die Versorgungsoption über die Schiene ist durch die zahlreichen vorhandenen Gleise sehr aussichtsreich, auch wenn die betriebliche Integration mitunter herausfordernd ist. Die Straßenanbindung ist durch die Passauer Straße, welche an die A3 über Nürnberg Nord angeschlossen

ist, sehr gut. Für eine Transportoption per Schiff, gelten dieselben Einschränkungen wie beim vorigen Standort 1.

Die Fläche ist ausreichend dimensioniert, und das Platzieren der Anlagentechnik und ein potenzieller Ausbau daher sehr gut möglich.

Aus betrieblicher Perspektive ist die Distanz zum Haltepunkt mit knapp 3 km ausreichend kurz, die Entfernung zur nächsten Dieseltankstelle ist jedoch sehr weit, weswegen die betriebliche Integration hier herausfordernd wird.

Die Gleissituation am Depot führt überdies zu einer sehr guten Ausgangslage für das Schaffen eines Betankungsgleises. Der Abstand zu immissionssensibler Bebauung ist ähnlich wie am vorigen Standort ausreichend gegeben, wenn auch mit gewissen Einschränkungen im Planungsprozess gerechnet werden muss. Die Lage auf einer gewerblichen Fläche, die sonst nur vom Bahndepot und Kleingartenanlage umgeben ist, ist genehmigungsrechtlich – besonders bei vorwiegend Nachtbetankung – hingegen günstig. Die betriebliche Machbarkeit ist am Potenzialstandort 7 sichergestellt.

Die Synergiepotenziale für gemeinsame Infrastruktur mit anderen H2-Nutzern oder die Einbindung von H2-Quellen aus der Industrie sind hingegen durch die Lage im Gleisdreieck und der fehlenden produzierenden Gewerbe im Umfeld eher schlecht. Ebenso liegt kein kreislaufwirtschaftliches Unternehmen im funktionalen Umfeld der Fläche.

Mit einer Punktzahl von 113 Punkten ist der Standort dennoch als gut zu bewerten. Er weist darüber hinaus eine weite Entfernung zum Standort 1 auf, was hinsichtlich einer Klassifizierung als eigener Betriebsbereich gemäß Störfallverordnung als günstig angesehen werden kann. Dadurch können zwei funktional unabhängig voneinander betriebene Anlagen aufgebaut werden.

Nürnberg S9

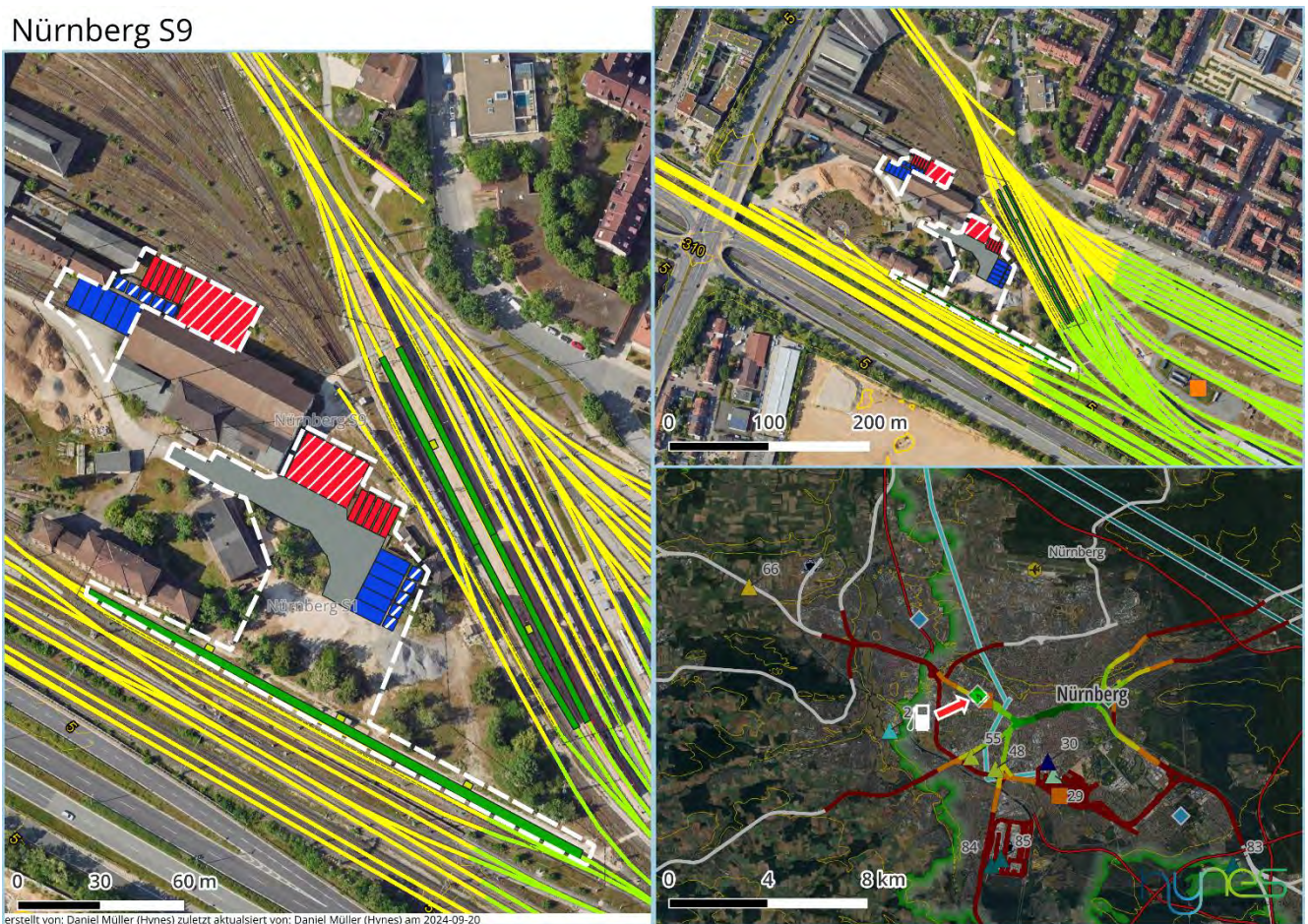


Abbildung 17-6: Potenzialstandortkarte Nürnberg Standort 9

Die Potenzialfläche 9 in Nürnberg ist in vielerlei Hinsicht mit der Potenzialfläche 1 vergleichbar, da sie auf demselben Bahnbetriebswerksgelände, nordwestlich auf einem nicht mehr genutzten Gleisfächer liegt. Durch die Lage des Gleisfächers hinter Gebäuden, ist die Freifläche jedoch nicht ideal gelegen, was das Platzieren der Anlagentechnik erschwert und das Ausbaupotenzial einschränkt, weswegen es schlechter im Vergleich zu Potenzialfläche 1 bewertet wird.

Daher kann sie zwar als Alternative für den Potenzialstandort 1 dienen, nicht jedoch für den Standort 7, da die Lage auf demselben Gelände in unmittelbarer Nähe zueinander voraussichtlich zu einem formalen Ausschluss nach Störfallverordnung führen würde.

Die betriebliche Machbarkeit ist somit, unter der Voraussetzung der Umsetzung auf Potenzialfläche 1, nicht gegeben.

Für den Fall, dass Fläche 1 nicht verfügbar wäre, kann also gut auf Fläche 9 ausgewichen werden.

17.3.5 Bayreuth

In Bayreuth wurden 3 Potenzialflächen identifiziert, welche von 103 Punkten bei Fläche 1 bis 85 Punkten bei Fläche 2 und 3 reichen. Der HRS-Standort Bayreuth hat mit 8 täglichen Betankungen die geringste Anzahl an bedienten Fahrzeugen unter den 4 HRS Standorten. Bayreuth liegt genau zwischen 3 Hyland-Landkreisen, weswegen für den Standort ein Synergiepotenzial mit den verschiedenen Hyland Netzwerken gegeben ist, wenn auch aufgrund der dennoch gegebenen Distanz ein eher geringes. Die Nähe zum Elektrolyseur in Wunsiedel ist mit 30 km als umsetzbare Versorgungsoption zu bewerten. Das zukünftige Wasserstoffkernnetz führt zwar lediglich ca. 2,5 km an Bayreuth vorbei, wird jedoch planmäßig frühestens in der Ausbaustufe 2040 umgesetzt, weswegen eine netzgebundene Versorgung im konkreten Projektzusammenhang als ungeeignet angesehen wird. Ebenso kann die Versorgung des Standorts per Schiff ausgeschlossen werden.

Bayreuth S1

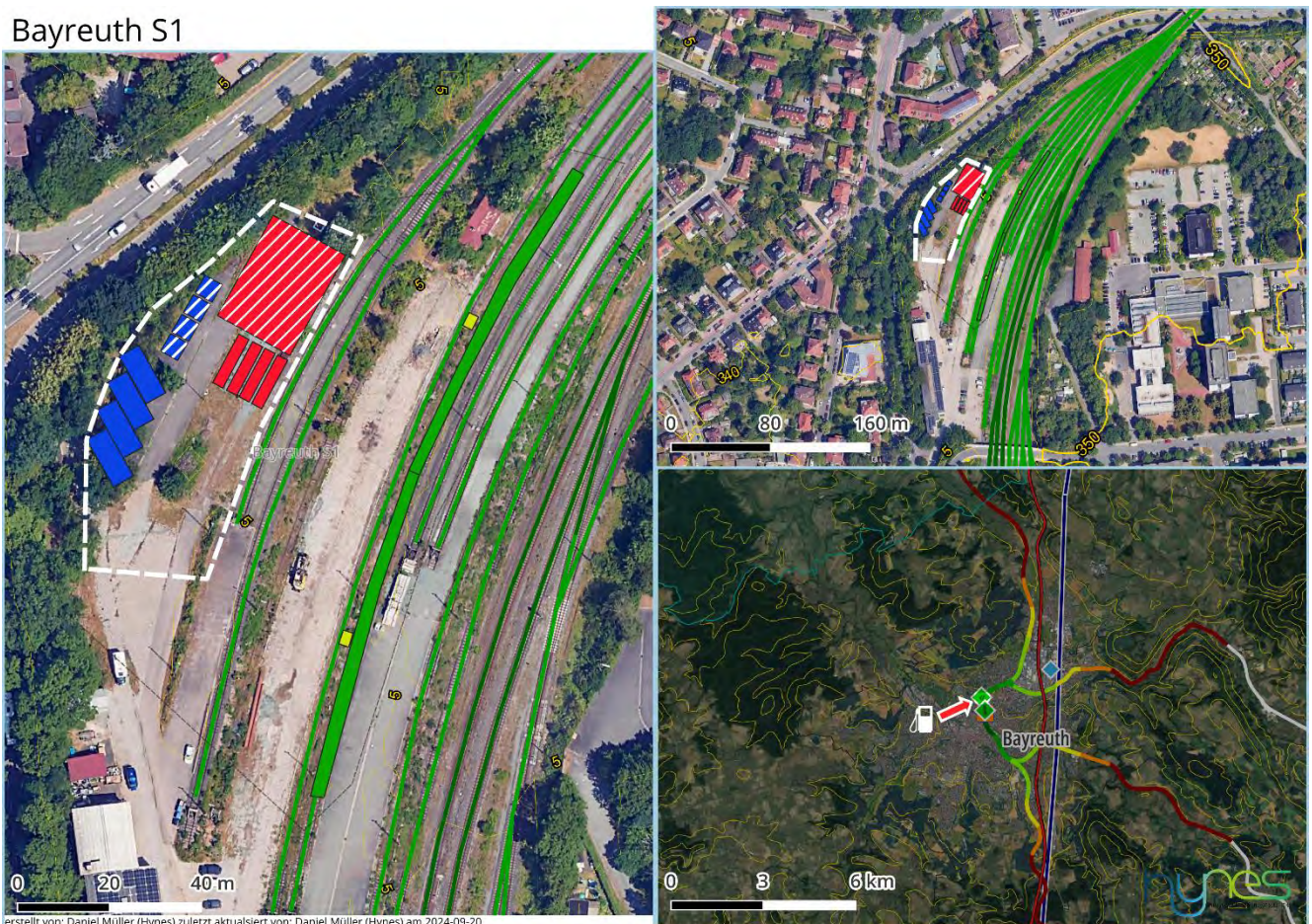


Abbildung 17-7: Potenzialstandortkarte Bayreuth Standort 1

Der Potenzialstandort Bayreuth 1 liegt nördlich des Haltepunkts Bayreuth auf einer Bahnanlage mit einigen Stumpfgleisen mit unbekannter Nutzung. Die betriebliche Machbarkeit ist hingegen sichergestellt.

Die Schaffung eines Betankungsgleises sowie eine schienengebundene Anlieferung des Wasserstoffs ist damit aussichtsreich, wenn auch die derzeitige Nutzung der Gleise vorher abgeklärt werden muss. Die Straßenanbindung ist durch die Lage an der Bürgerreuther Straße, welche den Standort über Bayreuth Nord an die A9 anschließt, gut.

Auch ist die Fläche mehr als ausreichend groß für das Platzieren der Anlagentechnik, wenn auch ein potenzieller Ausbau aufgrund der verlegten Gleise und der schmalen Form der Fläche als eher ungünstig gelten muss.

Die bisher genutzte Dieseltankstelle am Standort Bayreuth ist, wie auch der Haltepunkt selbst nicht weit von der Potenzialfläche entfernt, weswegen eine Umstellung als betrieblich aussichtsreich angesehen wird.

Der Abstand zur Wohnbebauung ist zu gering um ihn aus genehmigungsrechtlicher Perspektive als gut bewerten zu können, jedoch ist die Lage auf einer Bahnanlage als günstig zu bewerten. Ein Industriegebiet befindet sich nicht im funktionalen Umfeld.

Das führt auch dazu, dass keine Synergiepotenziale was andere Abnehmer oder Produzenten in der Industrie angeht im funktionalen Umfeld zu erwarten sind. Die Kläranlage Bayreuth liegt 2 km westlich des Standorts, ist jedoch über den Nordring und die Kulmbacher Straße gut zu erreichen, weswegen hier ein Potenzial gesehen wird.

Bayreuth S2

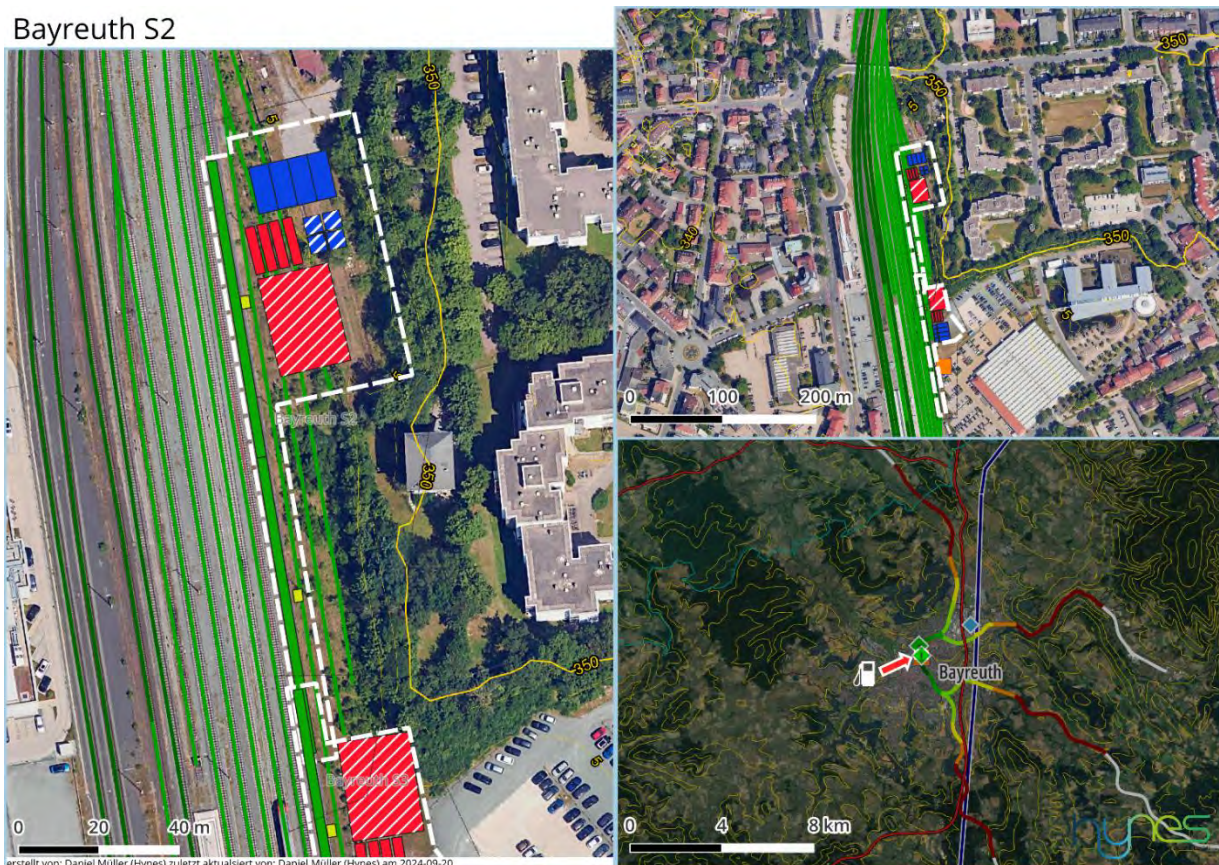


Abbildung 17-8: : Potenzialstandortkarte Bayreuth Standort 2

Bayreuth S3



Abbildung 17-9: Potenzialstandortkarte Bayreuth Standort 3

Die anderen beiden Potenzialflächen, die für Bayreuth identifiziert werden konnten, liegen östlich des Gleisverlaufs 300 m nördlich des Bahnhofs Bayreuth auf einem ehemaligen Gleisfächer, welcher unmittelbar an die in Betrieb befindlichen Gleise angrenzt. Durch das Fehlen eines FNP kann nicht eindeutig beantwortet werden, ob es sich um eine Bahnanlage handelt, die noch bahnwirtschaftlich genutzt werden kann, oder ob bereits eine Nutzungsänderung in die Wege geleitet wurde.

Zwar wäre durch die vorhandenen Stumpfgleise die Einrichtung eines Betankungsgleises und Versorgung über die Schiene aussichtsreich, die Fläche ausreichend vorhanden und bereits anthropogen überprägt und auch die Anbindung an die Straße ist ausreichend gegeben, jedoch wird aufgrund der Nähe der beiden Flächen zu immissionssensiblen Gebäuden die genehmigungsrechtliche und die betriebliche Machbarkeit stark in Frage gestellt.

Daher werden diese Flächen nur für den Fall relevant, dass Potenzialfläche 1 nicht verfügbar wäre.

17.3.6 Schwandorf

In Schwandorf gibt es drei Potenzialflächen. Standort 2 ist mit einer Punktzahl von 125 am besten bewertet, während Standort 1 mit 112 und Standort 3 mit 115 vergleichsweise nah beieinander in einem insgesamt guten Bewertungsbereich liegen.

Die Anzahl der bedienten Fahrzeuge liegt in Schwandorf mit 19 im mittleren Bereich und die Entfernung zum Elektrolyseur in Wunsiedel ist mit 80 km zu weit. Dafür führt eine Leitung des für 2030

vorgesehenen Wasserstoffkernnetzes nahe an Schwandorf in Nord-Süd-Richtung vorbei, was eine Stichleitung zur Versorgung zur realistischen Option macht. Auch die Versorgung über die Schiene wäre an allen Potenzialstandorten eine aussichtsreiche Option. Die Versorgung per Schiff ist hingegen keine Alternative, da sich kein geeigneter Hafen im funktionalen Umfeld befindet.

		Schwandorf			
Oberkategorie	Kategorie	Kriterium	1	2	3
Infrastrukturelle Kriterien	H ₂ -Versorgungsoption	Straße	7	7	5
		Schiene	10	10	10
		Wasser	0	0	0
		Nähe EHB	9	9	9
	Fläche	Freifläche (Anlagentechnik)	10	8	10
		Freiheitsgrad (Ausbaupotential)	7	5	8
Betriebliche Kriterien	Dieselbetankung im funktionalen Umfeld		10	10	6
	Betriebsintegration (Leerkilometer)		9	10	9
	Anzahl bedienter Fahrzeuge/ Linien		6	6	6
	Distanz zw. Tank und Elektrolyseur		0	0	0
Genehmigungsrechtliche Kriterien	Industriegebiet im funkt. Umfeld		4	4	6
	Betankungsgleis vorhanden?		7	10	7
	Immissionsorte (restriktiv: Abstand Wohnbebauung)		0	5	4
	Flächenkategorie		7	10	9
Wirtschaftliche Kriterien	Synergiepotentiale	H ₂ -Quellen	6	6	6
		H ₂ -Senken	7	7	7
		Kreislaufwirtschaft	7	7	7
		Hyland Region	1	1	1
Betriebliche Machbarkeit			5	10	5
Summe			112	125	115
Median			7	7	6

Tabelle 17-4: Bewertungsmatrix Standort Schwandorf

Schwandorf S1



Abbildung 17-10: Potenzialstandortkarte Schwandorf Standort 1

Schwandorf S2

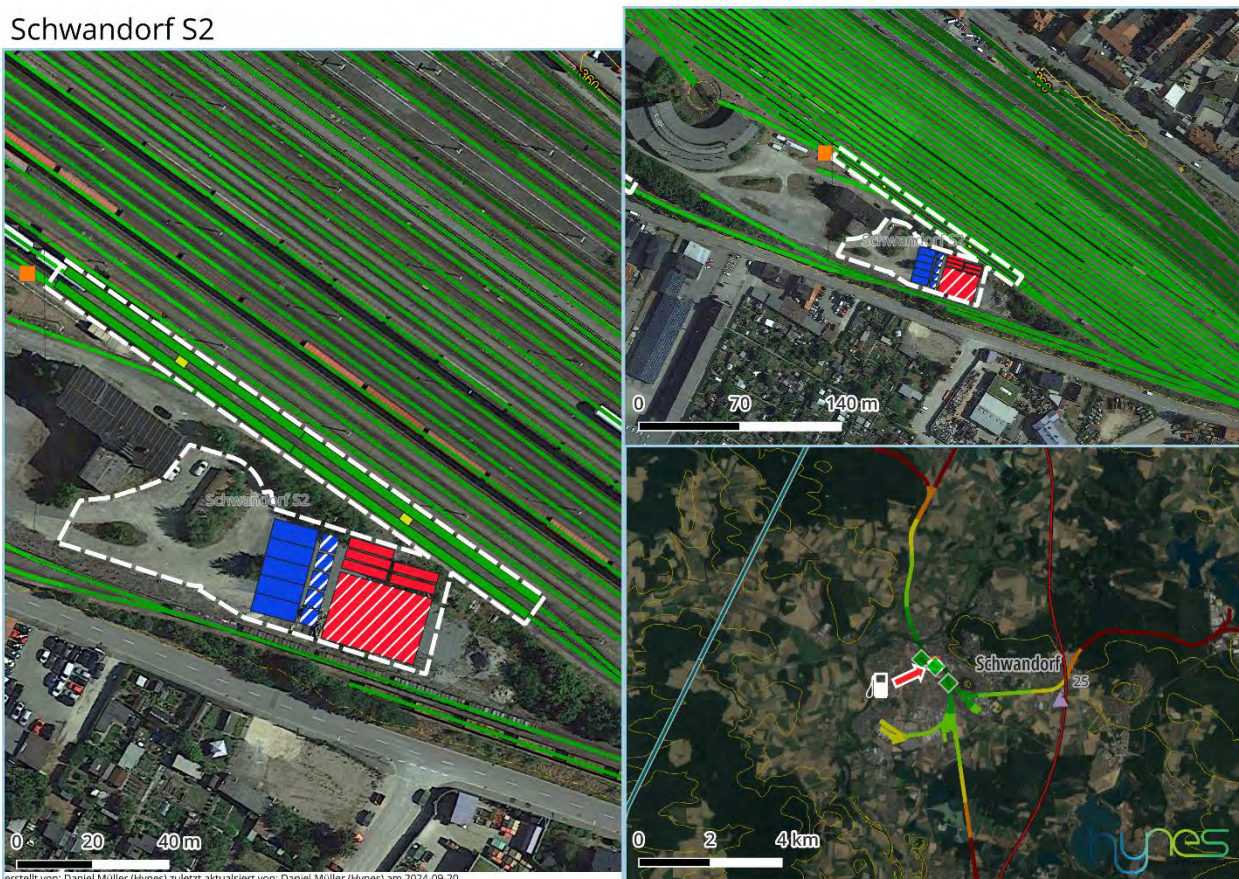


Abbildung 17-11: Potenzialstandortkarte Schwandorf Standort 2

Die Potenzialflächen Schwandorf 1 und 2 liegen auf der Bahnanlage, gegenüber des Schwandorfer Bahnhofs, auf welcher der Ringlokschuppen steht. Die Straßenanbindung für die straßengebundene Versorgung ist gut, da über die Egelseerstraße und Wackersdorfer Straße die A33 in knapp 5 km an der Anschlussstelle Schwandorf Mitte erreicht werden kann. Die bisher genutzte Dieseltankstelle der DB befindet sich ebenfalls auf diesem Gelände, welches von den Bahnsteigen in weniger als 1km erreicht werden kann. Die Betriebsintegration sollte daher an beiden Standorten sehr gut funktionieren.

Das Betankungsgleis des Potenzialstandorts 2 könnte auch in unter 500m Entfernung eingerichtet werden und befände sich dann auf demselben Gleisabschnitt wie das bisherige Betankungsgleis, was die Einrichtung nochmal problemloser möglich sein sollte.

Die Lage auf dem im FNP als Bahnanlage gekennzeichneten Gelände, ist aus genehmigungsrechtlicher Perspektive aussichtsreich. Die Potenzialfläche 1 ist durch Gehölze bewachsen, während Potenzialfläche 2 von (ehemaliger) anthropogener Nutzung geprägt ist. Südlich des Standorts 2 grenzt ein Mischgebiet und ein Kleingartengebiet an die Egelseerstraße an, während es für Standort 1 ein Wohngebiet ist. Letzteres ist hinsichtlich des Abstands zur immissionssensiblen Bebauung bei nächtlicher Betankung kritisch zu beurteilen. Bei Potenzialstandort 2 bedarf es für die immissionsschutzrechtliche Analyse einer genaueren Betrachtung. Zwar gibt es keine Industriegebiete im funktionalen Umfeld der beiden Standorte, jedoch ist durch die Bahnanlage ein angemessener Rahmen für genehmigungsrechtliche Einschränkungen durch Lärmemissionen zu erwarten.

Abgesehen von der Tatsache, dass Schwandorf in keinem der Hyland Projektgebiete liegt, sind die Synergiepotenziale gut. Südlich von Schwandorf gibt es entlang der Regensburger Straße und der nach Süden führenden Schienen Industriegebiete, auf welchen es auch produzierendes Gewerbe gibt.

Mit Nabaltec ist auch ein Chemikalienhersteller mit großem H₂-Potenzial in Schwandorf zu finden. Auch Biogasanlagen, PV-Freiflächenanlagen und ein Umspannwerk im Süden von Schwandorf bieten ein hohes Synergiepotenzial. Teile des Industriegebiets sind auch mit einem Gleisanschluss ausgestattet. Südöstlich des Industriegebiets liegt weiterhin die Kläranlage Schwandorf.

Aufgrund der genehmigungsrechtlichen Aussichten hinsichtlich der Flächenkategorie und dem Abstand zu immissionssensiblen Orten wird Standort 2 besser bewertet und für den Bau der HRS empfohlen. Die betriebliche Machbarkeit ist in beiden Fällen aussichtsreich, auch wenn bei Fläche 2 durch die vorig genannten Gründe, Herausforderungen entstehen können.

Schwandorf S3

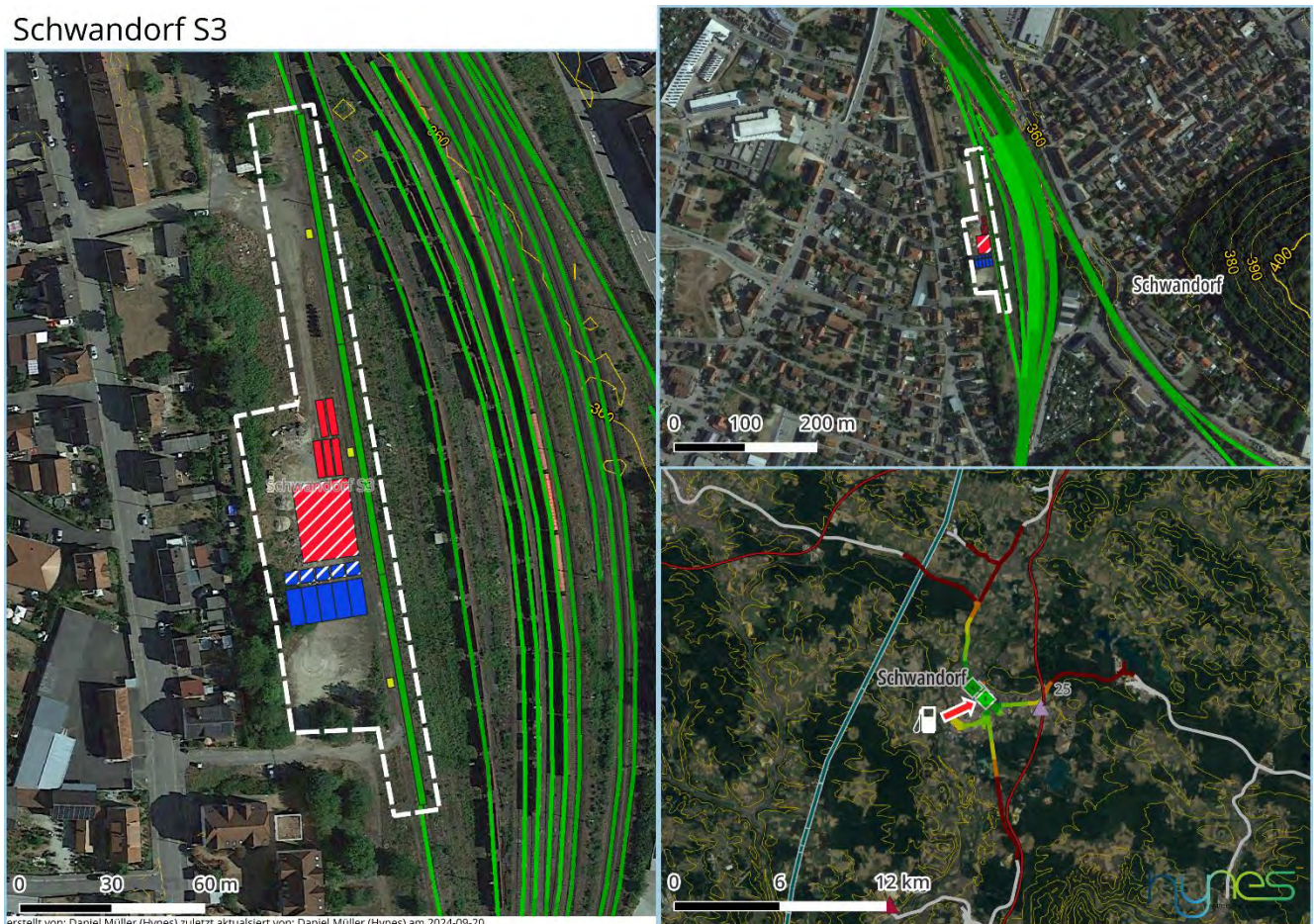


Abbildung 17-12: Potenzialstandortkarte Schwandorf Standort 3

Die Potenzialfläche Schwandorf 3 befindet sich – dem Gleisverlauf folgend – südlich des Bahnhofs, auf einer im FNP ebenfalls als Bahnanlage gekennzeichneten Fläche. Auf dieser befinden sich einige Stumpfgleise, welche in (unbekannter) Nutzung sind. Ein Betankungsgleis, ist daher im Bestand einrichtbar, muss jedoch mit der derzeitigen Nutzung abgestimmt werden. Für eine Versorgung über die Schiene ist die Ausgangslage dadurch ebenfalls sehr gut. Die Straßenanbindung für Lieferverkehr erfolgt über die Lindenstraße, eine Straße in einem als mit gemischter Bebauung gekennzeichneten Gebiet, westlich des Standorts und ist daher nur als befriedigend bis ausreichend zu bewerten. Die Fläche ist ausreichend groß für das Platzieren der erforderlichen Anlagentechnik und bietet zudem das Potenzial für Erweiterungen.

Die Entfernung zum Haltepunkt ist sehr gering und auch die bisher genutzte Dieselbetankungsanlage ist schnell erreicht, wenn sie auch nicht im direkten funktionalen Umfeld der Fläche liegt.

Genehmigungsrechtlich ist durch die Lage auf der Bahnanlage grundsätzlich eine gute Machbarkeit zu prognostizieren. Das direkt angrenzende Stadtgebiet entlang der Lindenstraße ist als Mischgebiet festgesetzt. Durch die immissionssensible Wohnbebauung in diesem kann es jedoch zu Hindernissen kommen.

Die Synergiepotenziale sind aufgrund der Entfernung der Standorte zueinander und der Größe Schwandorfs identisch bewertet worden, auch wenn sich die Potenzialfläche minimal näher an potenziellen Kooperationspartnern befindet.

Die betriebliche Machbarkeit ist durch die Flächenkategorie und die vorhandenen Gleise, sowie die Nähe zum Haltepunkt zwar begünstigt, könnte jedoch durch die angrenzende Wohnbebauung mit Hinsicht auf nächtliche Betankungsprozesse eingeschränkt sein.

Während Fläche 1 und 2 auf dem selben Areal liegen, liegt Potenzialfläche 3 von diesem getrennt. Sollte in Schwandorf demnach eine Gesamtlagermenge von über 5 t eingeplant werden, ist es aus genehmigungsrechtlicher Sicht ratsam, die HRS auf zwei getrennte Tankstellen aufzuteilen, wodurch Fläche 3 mit einer der anderen beiden zu kombinieren die einfachste Lösung darstellen würden.

17.3.7 Hof

In Hof wurden ebenfalls 3 Potenzialflächen identifiziert. Fläche 1 ist mit 96 Punkten für Hof die am höchsten bewertete und liegt in der Nähe des Hofer Hauptbahnhofs. Die Flächen 2 und 3 liegen, dem Gleisverlauf folgend, südöstlich des Bahnhofs, hinter dem Kreuzungsbauwerk über die Straße Alsenberg und sind mit 71 und 73 die standortübergreifend am schlechtesten bewerteten Flächen.

Der Standort Hof ist allgemein nicht über Wasserstraßen angebunden. Das Wasserstoffkernnetz führt zwar direkt an Hof vorbei, jedoch erst mit der Ausbaustufe 2040. Beide Versorgungsoptionen sind damit in Hof nicht realistisch.

Der Elektrolyseur in Wunsiedel ist knapp 30 km von Hof entfernt, wodurch eine Einbindung des dort produzierten Wasserstoffs denkbar ist.

Weiterhin befindet sich Hof auch nicht im Gebiet eines der Hyland Projekte, und auch größere Industrieanlagen die Synergiepotenziale bergen könnten, sind in Hof keine ausgemacht worden. Durch das Fehlen der Industrieanlagen, ist auch der genehmigungsrechtliche Umgang mit Lärmemittenten erschwert. In Hof gibt es zwar eine Kläranlage, diese ist von den Potenzialflächen recht weit entfernt, weswegen das Synergiepotenzial nur als ausreichend gelten können.

			Hof		
Oberkategorie	Kategorie	Kriterium	1	2	3
Infrastrukturelle Kriterien	H ₂ -Versorgungsoption	Straße	5	3	3
		Schiene	8	4	4
		Wasser	0	0	0
		Nähe EHB	5	5	5
	Fläche	Freifläche (Anlagentechnik)	7	10	5
		Freiheitsgrad (Ausbaupotential)	4	8	9
	Dieselbetankung im funktionalen Umfeld		8	4	4

Betriebliche Kriterien	Betriebsintegration (Leerkilometer)		9	9	9
	Anzahl bedienter Fahrzeuge/ Linien		5	5	5
	Distanz zw. Tank und Elektrolyseur		4	4	4
Genehmigungsrechtliche Kriterien	Industriegebiet im funkt. Umfeld		0	0	4
	Betankungsgleis vorhanden?		7	3	3
	Immissionsorte (restriktiv: Abstand Wohnbebauung)		4	4	6
	Flächenkategorie		10	2	2
Wirtschaftliche Kriterien	Synergiepotentiale	H ₂ -Quellen	2	2	2
		H ₂ -Senken	0	0	0
		Kreislaufwirtschaft	7	7	7
		Hyland Region	1	1	1
Betriebliche Machbarkeit			10	0	0
Summe			96	71	73
Median			5	4	4

Tabelle 17-5: Bewertungsmatrix Standort Hof

Hof S1

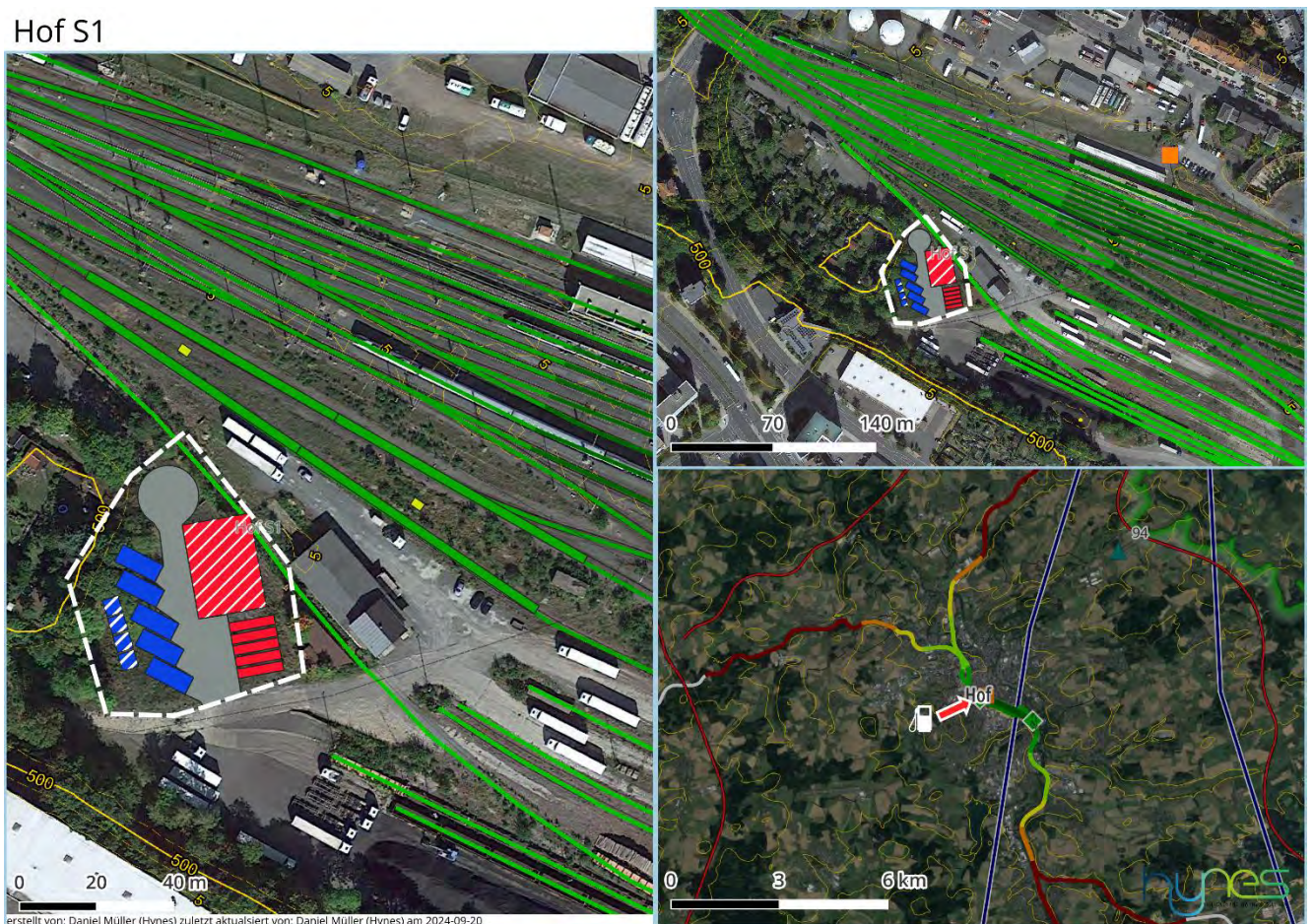


Abbildung 17-13: Potenzialstandortkarte Hof Standort 1

Die Potenzialfläche Hof 1 befindet sich auf einer im FNP als Bahnanlage gekennzeichneten Flächen nördlich der Hans Böckler Straße. Auf dem Gelände befinden sich Stumpfgleise, die einerseits die Versorgungsoption per Schiene offenhalten und andererseits, nach Abklären der derzeitigen Nutzung als Betankungsgleis dienen könnten. Die Straßenanbindung ist über die Ernst Reuter Straße zwar gegeben, die Entfernung zum nächsten Autobahnanschluss ist hingegen in der Verlängerung dieser als B15 respektive B173 erst nach mehr als 7km zu erreichen, was nur als ausreichend bewertet werden kann.

Das Areal, auf dem sich der Potenzialstandort befindet ist als Bahnanlage ausgewiesen, wobei die tatsächlich freie Fläche durch Kleingärten und Gehölzbewuchs klein ausfällt. Die Anlagentechnik würde mit einigen planerischen und baulichen Herausforderungen auf der Fläche platziert werden können, eine Erweiterung der Anlage wäre jedoch nicht mehr ohne Hindernisse möglich.

Die Betriebsintegration ist hinsichtlich der kurzen Distanz zwischen dem Haltepunkt und einem potenziellen Betankungsgleis sehr gut möglich. Die bisher genutzte Betankungsanlage für Diesel, befindet sich auf der gegenüber liegenden Seite der Gleise. Sie ist somit zwar nah an der HRS-Potenzialfläche, die betriebliche Umstellung der Betankungsvorgänge ist somit nicht trivial, aber umsetzbar.

Die Potenzialfläche ist durch die Hans-Böckler Straße und der Ernst-Reuter Straße von Wohnbebauung getrennt, weswegen immissionsschutz- respektive genehmigungsrechtlich eine gute Ausgangssituation anzunehmen ist. Die Fläche ist zudem anthropogen überprägt und befindet sich wie bereits erwähnt auf Bahnareal, weswegen die Flächenkategorie genehmigungsrechtlich betrachtet, sehr gut ist. Die betriebliche Machbarkeit ist auf dieser Fläche gesichert.

Hof S2

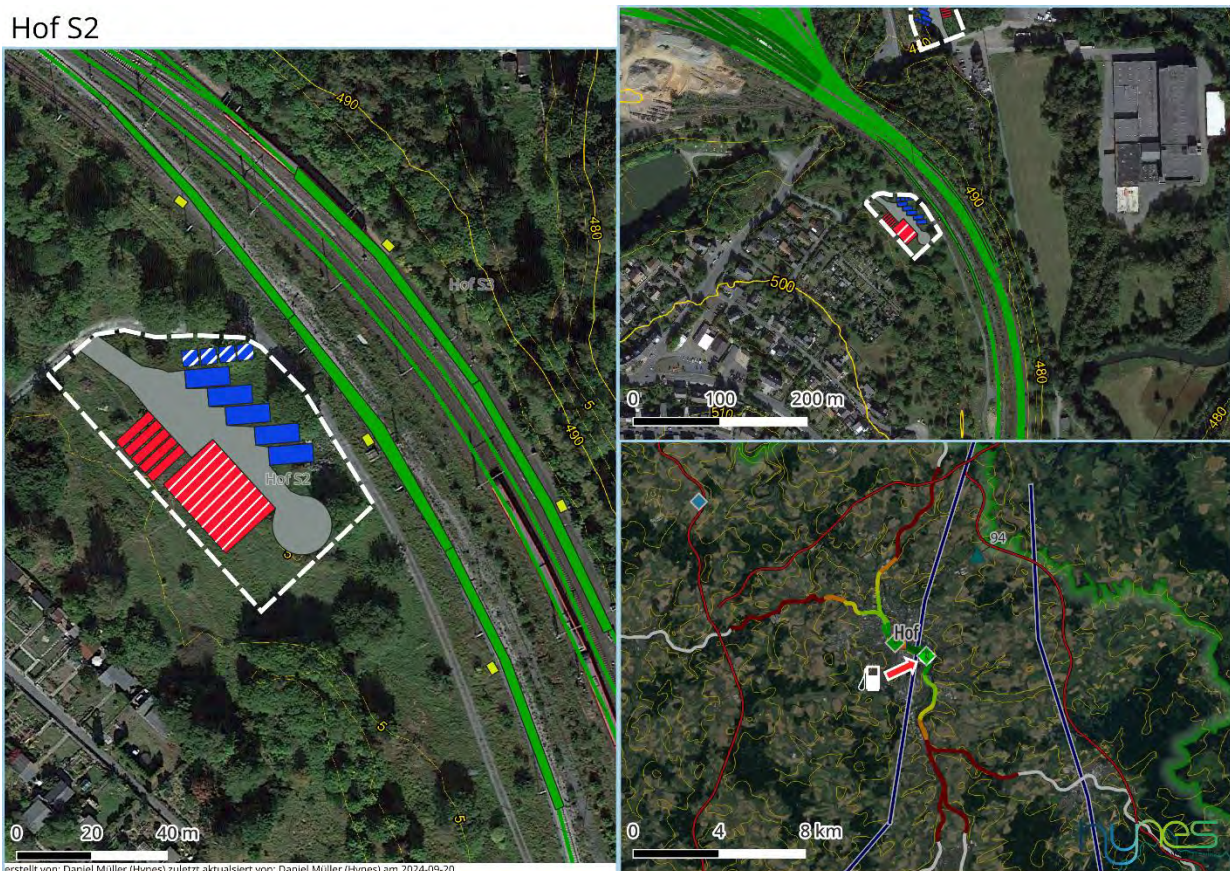


Abbildung 17-14: Potenzialstandortkarte Hof Standort 2

Hof S3

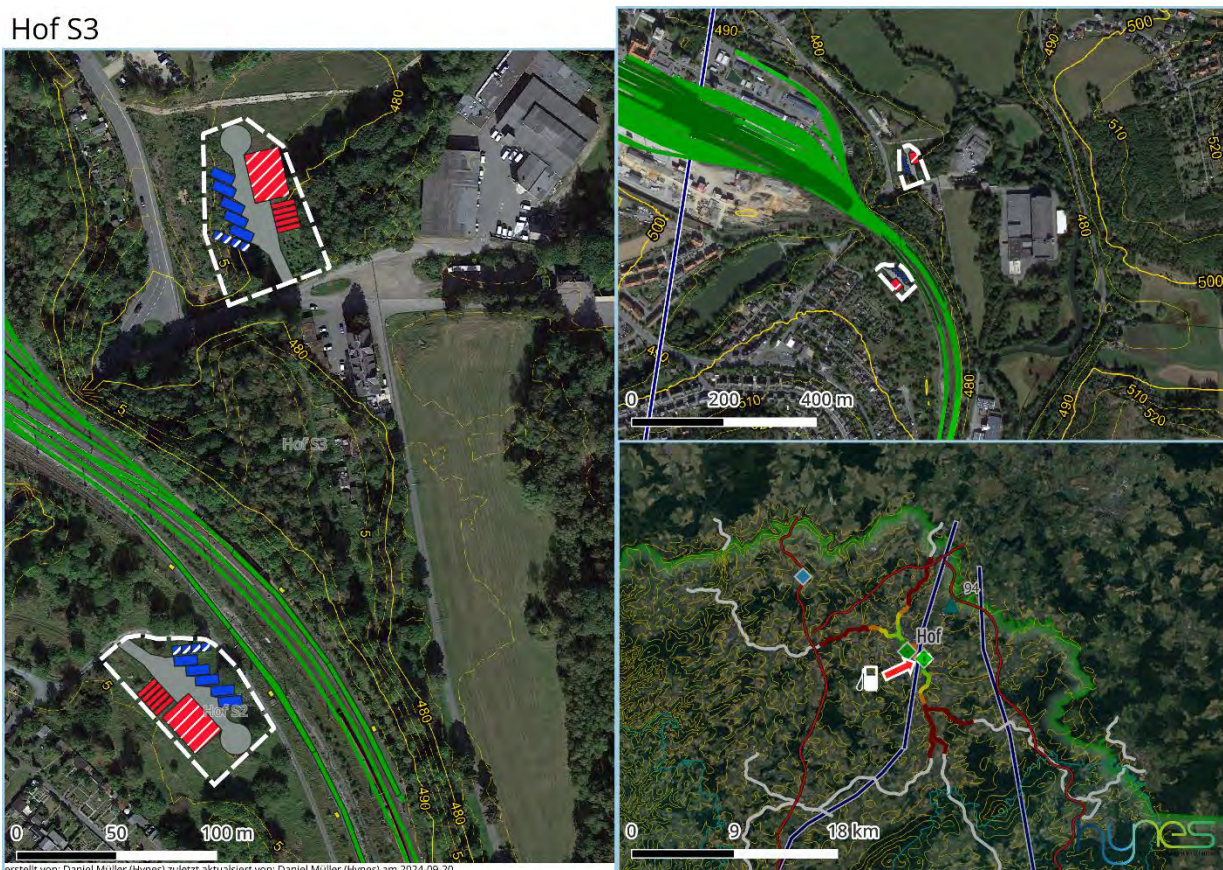


Abbildung 17-15: Potenzialstandortkarte Schwandorf Standort 3

Die Potenzialstandorte 2 und 3 befinden sich hinter dem Kreuzungsbauwerk südlich dem Gleisverlauf folgend, jeweils auf der gegenüberliegenden Seite der Gleise und weisen daher viele Gemeinsamkeiten auf.

Die straßengebundene Versorgung ist, wie auch beim ersten Potenzialstandort durch die große Distanz zu einer Autobahnanbindung nicht ideal. Bei den beiden Standorten 2 und 3 führt zudem die lokale Anbindung zu den Flächen durch ein Wohngebiet und mündet unmittelbar an den Standorten auf Straßen minderer Qualität, wodurch die Bewertung schlecht ausfällt. Auch über die Schiene sind die Standorte jedoch nicht gut zu versorgen, da sie jeweils über nur ein Stumpfgleis verfügen, welches potenziell auch der Betankung dienen würde. Die derzeitige Nutzung dieser Stumpfgleise ist nicht bekannt.

Beide Flächen sind hingegen ausreichend groß, um die Anlagentechnik platzieren und sie – falls notwendig – ausbauen zu können. Bei Fläche 3 wäre das Betankungsgleis jedoch räumlich von der restlichen Infrastruktur getrennt und müsste über eine Leitung verbunden werden, was die Planung der Anlagentechnik verkompliziert.

Die bisherige Dieselbetankung wurde im Gleisverlauf nördlich des Bahnhofs abgewickelt, während beide Potenzialflächen 2 und 3 südlich liegen, wodurch die betriebliche Umstellung verkompliziert wird. Die Distanz zum Haltepunkt ist jedoch mit unter 1 km kurz, was für die betriebliche Integration der Standorte gut ist.

Genehmigungsrechtlich unterscheiden sich die Standorte etwas. Standort 3, welcher nördlich des Gleisverlaufs liegt, befindet sich neben einer als Gewerbegebiet ausgezeichneten Fläche und einer

Straße und hat zudem eine größere Entfernung zu immissionssensiblen Gebäuden, an welche Standort 2 – südlich der Gleise – direkt angrenzt. Beide Standorte befinden sich auf nicht versiegelten Flächen mit natürlichem Bewuchs, weswegen die Bedingungen von §39 BNatSchG gelten.

Die betriebliche Machbarkeit beider Standorte ist nicht sichergestellt.

18 INDIVIDUELLE HRS-AUSLEGUNG

18.1 H2 Mengen

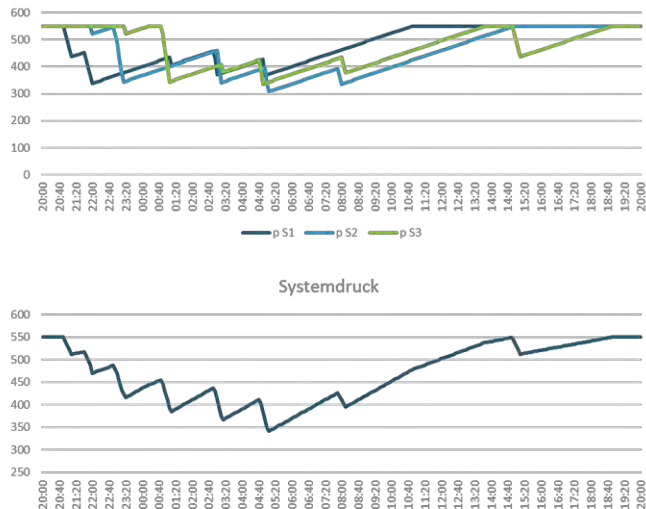
Welche H2-Menge, an jedem Standort benötigt wird, um einen reibungslosen und versorgungssicheren Betriebsablauf zu gewährleisten, wurde in Kapitel 15 erläutert.

18.2 H2-Druckkaskaden

Auf Basis des H2-Verbrauchs und der Umlaufplanung wurden für die Tankstellenstandorte Betankungssimulationen durchgeführt, um die notwendige Verdichterleistung zu ermitteln. Vorgegeben waren die vorzuhaltende H2-Menge, die Anzahl der Nacht- und Tagbetankungen. In der linken Tabelle sind die jeweiligen Annahmen aufgeführt. Zielgröße der Simulation ist eine möglichst kleine Verdichterleistung, bei gleichzeitig hohem Enddruck nach 24 h, um die Investitionskosten gering zu halten.

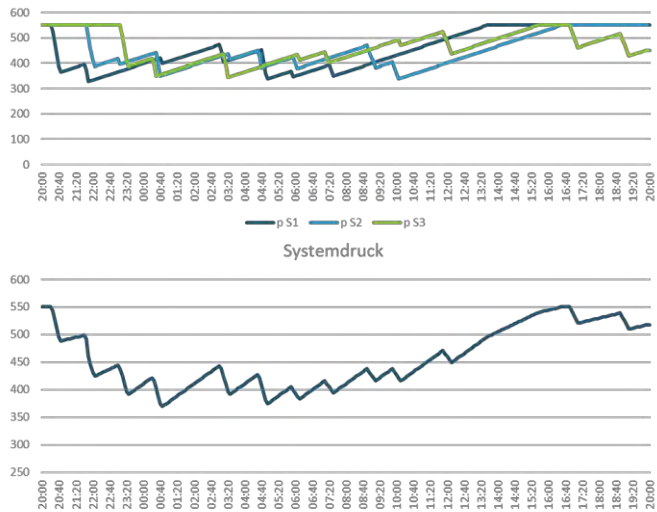
Nürnberg: Die wesentliche Determinante für die Auslegung in Nürnberg sind die außerhalb der Nachtbetankung erfolgenden Zwischenbetankungen. Es zeigt sich, dass mit einer Verdichterleistung von 225 kg/h ein stabiler Betrieb möglich ist.

Speicherkonzept		MEGC
Speichermenge	kg	4.000
Anzahl MEGC-Container	#	4
Zug-Kapazität	Kg	300
Betankungsgeschwindigkeit	kg/min	15
Verdichterleistung/ Sektion	kg/h	75
Anzahl Dispenser	#	2
Betankungsbeginn	hh:mm	20:00
Betankungsende	hh:mm	20:00
Maximaldruck	bar	550
Minimaldruck	bar	20
Sektionen	#	3
H2-Menge/ Sektion	Kg	1667
Nachtbetankungen	#	8
Tagbetankungen	#	4



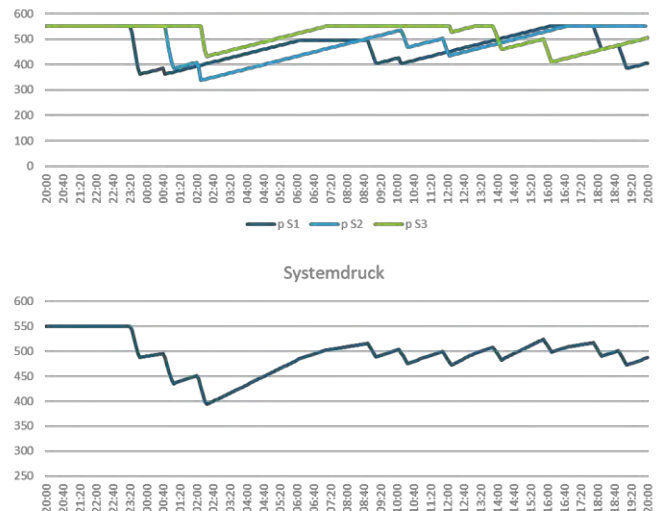
Schwandorf: Mit 13 Nachtbetankungen und 6 Tagbetankungen weist Schwandorf hohe Anforderungen an die Verdichter auf. Die Verdichterleistung wird hier maßgeblich von der Anzahl der Back-to-Back Betankungen von Fahrzeugen in Doppeltraktion während der Nacht und der untertäglich kontinuierlich benötigten H2-Menge bestimmt. Aufgrund dessen wird eine Verdichterleistung von 300 kg/h empfohlen.

Speicherkonzept		MEGC
Speichermenge	kg	5.000
Anzahl MEGC-Container	#	5
Zug-Kapazität	Kg	300
Betankungsgeschwindigkeit	kg/min	15
Verdichterleistung/ Sektion	kg/h	100
Anzahl Dispenser	#	2
Betankungsbeginn	hh:mm	20:00
Betankungsende	hh:mm	20:00
Maximaldruck	bar	550
Minimaldruck	bar	20
Sektionen	#	3
H2-Menge/ Sektion	Kg	1667
Nachtbetankungen	#	13
Tagbetankungen	#	6



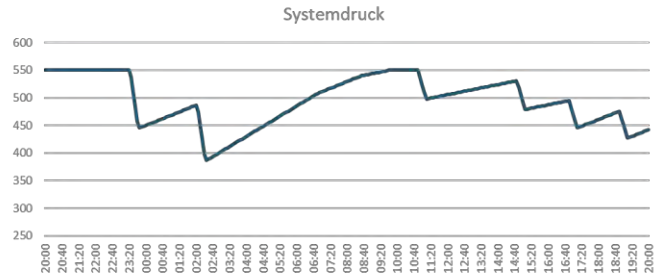
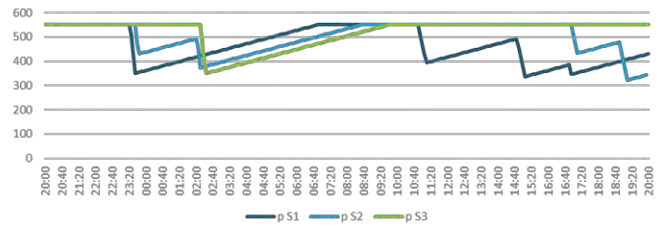
Hof: Die Tankstelle Hof weist als einzige mehr Tagbetankungen als Nachtbetankungen auf, was der wesentliche Auslegungsparameter ist. Tagbetankungen stellen geringere Anforderungen an die Tankstelle, da diese in den betrachteten Szenarien in Einfachtraktion erfolgen. Folglich wird eine Verdichterleistung von 225 kg/h empfohlen.

Speicherkonzept		MEGC
Speichermenge	kg	5.000
Anzahl MEGC-Container	#	5
Zug-Kapazität	Kg	300
Betankungsgeschwindigkeit	kg/min	15
Verdichterleistung/ Sektion	kg/h	75
Anzahl Dispenser	#	2
Betankungsbeginn	hh:mm	20:00
Betankungsende	hh:mm	20:00
Maximaldruck	bar	550
Minimaldruck	bar	20
Sektionen	#	3
H2-Menge/ Sektion	Kg	1667
Nachtbetankungen	#	6
Tagbetankungen	#	8



Bayreuth weist mit 4 Nach und 4 Tagbetankungen die niedrigste Anzahl an Betankungen und damit die geringsten H2-Speichermenge auf. Mit 150 kg/h Verdichterleistung lässt sich ein sicherer Betrieb darstellen.

Speicherkonzept		MEGC
Speichermenge	kg	3.000
Anzahl MEGC-Container	#	3
Zug-Kapazität	Kg	300
Betankungsgeschwindigkeit	kg/min	15
Verdichterleistung/ Sektion	kg/h	50
Anzahl Dispenser	#	4
Betankungsbeginn	hh:mm	20:00
Betankungsende	hh:mm	20:00
Maximaldruck	bar	550
Minimaldruck	bar	20
Sektionen	#	3
H2-Menge/ Sektion	Kg	1.000
Nachtbetankungen	#	4
Tagbetankungen	#	4



19 VERSORGUNGSKONZEPT UPSTREAM

In Kapitel 16.1 wurde auf die Anlieferung des Wasserstoffs zur HRS näher erläutert. Hierbei gibt es die Möglichkeit die HRS mit LKW zu versorgen oder direkt eine Pipeline bis zur HRS zu legen.

19.1 Wasserstofferzeugung

Wasserstoff kann auf Basis unterschiedlicher Ausgangsstoffe über verschiedene thermische, katalytische oder elektrochemische Verfahren hergestellt werden und ist seit mehr als 100 Jahren fester Bestandteil der chemischen Industrie und der Energiewirtschaft. Dennoch wird Wasserstoff weiterhin zu über 95% konventionell auf Basis fossiler Energieträger hergestellt. Ein nachhaltiges Verfahren stellt die Wasserelektrolyse dar. Bei der Wasserelektrolyse wird ionenfreies Wasser mit Hilfe von elektrischem Strom in Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt. Als Neben- bzw. Abfallprodukt fallen Sauerstoff und Wärme an, die technisch weiter genutzt werden können. Die Elektrolyse kann mit Strom aus verschiedensten Quellen betrieben werden, wobei sich die Art der Quelle auf die Treibhausbilanz des erzeugten Wasserstoffs auswirkt. Wird der Elektrolyseur mit Strom aus dem deutschen Strommix betrieben, fällt Kohlendioxid an. Bei der Nutzung von regenerativ erzeugtem Strom aus erneuerbaren Energien wie Wind und Solar zur Wasserstofferzeugung spricht man von grünem Wasserstoff. Neben grünem, also nachhaltig erzeugtem Wasserstoff haben sich noch weitere Farben für andere Herstellungsformen und Ausgangsstoffe etabliert. Die verschiedenen Farben werden meist in Form eines Wasserstoff-Regenbogens als eine vereinfachte Übersicht über die Wasserstofferzeugungsarten dargestellt.

Derzeit werden drei verschiedene Elektrolyseverfahren verwendet:

- PEM-Elektrolyseure (Protonen-Austausch-Membran)
- Alkalische Elektrolyseure
- Festoxid-Elektrolyseure.

Es ist eine deutliche Reduktion der Betriebskosten notwendig, um mit der Erzeugung aus fossilen Quellen konkurrieren zu können. In den letzten Jahren sind die Kosten für Elektrolyseure gesunken und es wird davon ausgegangen, dass die Herstellungskosten noch weiter sinken werden. Eine weitere Option für die Wasserstofferzeugung ist die Dampfreformierung, bei der Erdgas oder Biogas in einer katalytischen Reaktion verwendet wird. Im Gegensatz zu Elektrolyseuren entstehen bei dieser Technologie umweltschädliche Emissionen.

Es wird empfohlen, zunächst an bestehenden Elektrolyseprojekte anzuknüpfen, welche sich in der Region in Planung befinden (dazu Anhang 4 [21]).

19.1.1 Eigene Wasserstofferzeugung

Die Standortwahl und Positionierung eines eigenen Elektrolyseurs sind entscheidend, um die Investitionsrendite zu maximieren und eine hohe Nutzung sicherzustellen. Folgende Aspekte sollten dabei berücksichtigt werden:

1. Bedarfsanalyse

- Identifiziere potenzielle Nutzergruppen in der Region: Dazu gehören insbesondere Betreiber von Wasserstoffzügen, Lkw-Flotten, Bussen, Hafen- oder Flughafenbetreiber und industrielle Abnehmer. Es ist wichtig, Regionen zu wählen, in denen bereits ein Interesse an Wasserstofffahrzeugen besteht oder wo deren Einsatz geplant ist.
- Analysiere bestehende und geplante Wasserstoffinfrastrukturprojekte: Diese Analyse ermöglicht die Identifizierung von Lücken in der bestehenden Infrastruktur und bietet die Möglichkeit, Synergien mit anderen Projekten zu nutzen.

2. Zugang zu erneuerbarer Energie

- Die Nähe zu Quellen erneuerbarer Energien (Windparks, Solarparks) ist essenziell, um die Elektrolyse möglichst kostengünstig und umweltfreundlich betreiben zu können. Je näher die Wasserstoffproduktion an den Erzeugungsanlagen liegt, desto geringer sind die Transportkosten und Verluste.

3. Logistische Überlegungen

- Berücksichtige die logistische Anbindung an Transportwege: Eine gute Erreichbarkeit durch Straßen- oder Schienenverkehr ist wichtig, um die Wasserstofftankstellen sowohl für Nutzer als auch für die Lieferung von Wasserstoff optimal zugänglich zu machen.
- Plane die Tankstellen in einem Radius von etwa 100 km Abstand: Dies ermöglicht eine gleichmäßige Verteilung des Wasserstoffs und reduziert die Transportkosten.

4. Rechtliche und regulatorische Rahmenbedingungen

- Analysiere die lokalen Bauvorschriften, Sicherheitsauflagen und Umweltvorschriften. In Deutschland müssen spezielle Anforderungen an die Lagerung und den Umgang mit Wasserstoff erfüllt werden. Erkundige dich nach regionalen Fördermöglichkeiten oder Subventionen, die den Bau und Betrieb von Wasserstoffinfrastruktur unterstützen könnten.

5. Wirtschaftliche Faktoren

- Berechne die Investitions- und Betriebskosten für jeden Standort, einschließlich der Kosten für den Bau der Tankstelle, den Erwerb von Grundstücken, die Erschließung der Grundstücke, die Installation von Tanks, Kompressoren und anderen notwendigen Einrichtungen.
- Berücksichtige potenzielle Fördergelder oder finanzielle Anreize der Bundesregierung oder der EU zur Förderung der Wasserstoffinfrastruktur.

6. Technologische Überlegungen

- Wähle Standorte mit ausreichender Netzkapazität für den Betrieb eines Elektrolyseurs. Eine starke Anbindung ans Stromnetz ist wichtig, um den kontinuierlichen Betrieb des Elektrolyseurs sicherzustellen und die Produktionskosten niedrig zu halten.

Wird der Bau eines eigenen Elektrolyseurs in Betracht gezogen werden, müssen einige Aspekte bedacht werden, die im Folgenden kurz in einer SWOT-Analyse zusammengefasst wurden.

Stärken (Strengths):

Technische Vorteile:

- Unabhängigkeit von externen Wasserstofflieferanten: Ein eigener Elektrolyseur ermöglicht die Produktion von Wasserstoff direkt vor Ort, reduziert die Abhängigkeit von Lieferanten und minimiert Transportkosten.
- Flexibilität in der Produktion: Die Möglichkeit, die Produktion je nach Bedarf zu steuern und an Preisschwankungen des Stroms anzupassen, kann die Betriebskosten reduzieren.

Wirtschaftliche Vorteile:

- Potenziell geringere Produktionskosten: Langfristig könnten die Kosten pro Kilogramm Wasserstoff niedriger sein als bei externem Bezug, insbesondere wenn überschüssige erneuerbare Energie (z.B. Überschussstrom aus Wind- oder Solaranlagen) genutzt werden können.

Logistische Vorteile:

- Minimierung der Transportkosten: Die Produktion vor Ort reduziert den Bedarf an aufwändiger und kostspieliger Logistik für den Wasserstofftransport.

Schwächen (Weaknesses):

Technische Herausforderungen:

- Erhöhtes Projektrisiko: Durch eine zusätzliche H₂-Erzeugung im funktionalen Umfeld der Betankung, wird das Risiko der Genehmigungsfähigkeit erhöht.
- Hohe Anfangsinvestitionen: Der Bau und die Installation eines Elektrolyseurs sind kapitalintensiv. Es fallen hohe Kosten für den Kauf und die Installation der Ausrüstung sowie für die Standortvorbereitung an.
- Technologische Komplexität: Die Einrichtung und der Betrieb eines Elektrolyseurs erfordern spezielles technisches Know-how und geschultes Personal für Wartung und Betrieb.

Wirtschaftliche Nachteile:

- Unsicherheit über Strompreise: Die Rentabilität eines Elektrolyseurs hängt stark von den Stromkosten ab. Schwankende Energiepreise und unsichere Regulatorik können die Produktionskosten erheblich beeinflussen.
- Lange Amortisationszeit: Aufgrund der hohen Anfangsinvestitionen sind lange Nutzungsdauern erforderlich, bis die H₂-Erzeugungsanlage ihre Kosten durch Einsparungen oder Einnahmen amortisiert.

Logistische Herausforderungen:

Standortabhängigkeit: Strombezug, Netzbelastung und Regulatorik stellen hohe Anforderungen an mögliche Standorte.

Rechtliche Herausforderungen:

- Komplexe Genehmigungsverfahren: Der Bau eines Elektrolyseurs unterliegt in Deutschland umfangreichen rechtlichen Vorschriften, die zeitaufwendig und kostspielig sind.
- Regulatorische Unsicherheiten: Änderungen in der Gesetzgebung oder den Subventionsstrukturen können die Rentabilität des Projekts beeinflussen.

Chancen (Opportunities):

Technologische Entwicklungen:

- Fortschritte in der Elektrolýsetechnologie: Neue Technologien könnten die Effizienz und Wirtschaftlichkeit der Wasserstoffproduktion verbessern.
- Integration von Wasserstoff in bestehende Energiesysteme: Die Nachfrage nach Wasserstoff wird voraussichtlich steigen, da immer mehr Sektoren auf saubere Energiequellen umsteigen.

Wirtschaftliche Vorteile:

- Wachsende Marktchancen: Die zunehmende Nachfrage nach grünem Wasserstoff in verschiedenen Sektoren bietet die Möglichkeit, neue Märkte zu erschließen und zusätzliche Einnahmequellen zu generieren.

Risiken (Threats):

Technische Risiken:

- Ungeplante Ausfälle oder technische Probleme: Störungen beim Betrieb des Elektrolyseurs könnten die Wasserstoffversorgung unterbrechen und zu erheblichen Kosten führen.

Wirtschaftliche Risiken:

- Marktrisiken: Schwankungen in der Nachfrage nach Wasserstoff und Preisvolatilität könnten die Wirtschaftlichkeit beeinträchtigen.
- Hohe Stromkosten: Wenn der Zugang zu günstiger erneuerbarer Energie begrenzt ist, könnten hohe Stromkosten die Produktion unrentabel machen.

Logistische Risiken:

- Einschränkungen durch Netzkapazität: Begrenzte Netzkapazitäten könnten die Effizienz und den Betrieb des Elektrolyseurs beeinträchtigen.

Rechtliche Risiken:

- Regulierungsänderungen: Gesetzesänderungen oder verschärfte Vorschriften könnten die Kosten erhöhen oder zusätzliche Anforderungen stellen.
- Umweltrechtliche Bedenken: Potenzielle Umweltauflagen oder Proteste könnten den Bau oder Betrieb verzögern oder verhindern.

Empfohlen wird daher den Bau eines eigenen Elektrolyseurs sorgfältig zu prüfen.

Da in Nürnberg aufgrund der Fahrzeuganzahl der Wasserstoffbedarf und damit der logistische Aufwand für die Anlieferung am höchsten ist, bietet sich hier besonders ein eigener Elektrolyseur an. Dabei wurde neben den unten erläuterten genehmigungsrechtlichen Parametern, Synergiepotentiale als Kriterium für die Standortsuche mit eingebunden, sowie die verfügbare Fläche.

Zu den Best Practice Beispielen für Elektrolyseure in der benötigten Größenordnung, sind der Elektrolyseur in Wunsiedel und der Energiepark Mainz. Das Layout des Energiepark Mainz benötigt geringfügig weniger Fläche als das Wunsiedler Model. Letzteres hat jedoch eine Nennleistung von 8,75 MW (bis 1.350t H₂/a) während in Mainz 6 MW (bis 600t H₂/a) installiert sind.

Die Modelübertragung auf die Nürnberg Standorte ist nicht als abschließende Planung zu verstehen, sondern soll einen Eindruck für die Größenverhältnisse der Wasserstoffinfrastruktur geben. Die Bestandteile sind an die leistungstechnischen und lokalgeographischen Gegebenheiten anzupassen.

Zwei der Standorte befinden sich auf Freiflächen im Bereich der Kläranlage Muggendorf, welche in der Nähe der Betankungsoptionen auf dem Bahngelände bei der Jansenbrücke ist. Hierdurch ist einerseits die immissions- und damit genehmigungsrechtliche Situation für Errichtung und Betrieb einfacher und andererseits ergeben sich dadurch Synergiepotenziale, da der bei der Elektrolyse eigentlich als Nebenprodukt anfallende Sauerstoff in der Kläranlage für eine 4. Reinigungsstufe genutzt werden kann.

Ein weiterer Standort befindet sich im Hafensbereich im Süden der Stadt. Auch hier ist die immissions- und genehmigungsrechtliche Situation für Errichtung und Betrieb aufgrund der umgebenden Flächennutzung günstig. Außerdem ergeben sich auch hier Synergiepotenzial für in der Logistik eingesetzte Flurförderzeuge oder für Abwärmenutzung. Die Trimodalität des Hafens bietet zudem erweiterte Möglichkeiten in der Disposition. Nachteil dieses Standortes ist die Entfernung zum zugehörigen Haltepunkt und damit auch ein erweiterter Logistikaufwand, der entweder den Wasserstoff selbst bei einer HRS-Option in Haltepunktnähe oder die NT-XEMU's betrifft, sollte die Wasserstofftankstelle nach Option 6 errichtet werden.

Elektrolysestandortoption 5 und 6 befindet sich in unmittelbarer Nähe zu den Betankungsoptionen 3, 4 und 5. Die Vor- und Nachteile sind dieselben wie beim Standort im Hafensbereich.



Abbildung 19-1: Übersichtskarte Elektrolysestandortoptionen

19.2 Distribution

Neben dem Transport über weite Strecken, gilt es in Versorgungskonzepten die Verteilungsoptionen zwischen dezentralen Erzeugungen und Verbrauchern aufzuzeigen und technisch- sowie wirtschaftlich zu bewerten.

Eine Versorgung über Pipelines und H2-Hubs soll in den kommenden 15 Jahren entstehen, hierbei werden jedoch zunächst vor allem stark besiedelte Wirtschaftsregionen fokussiert, wie die Bundesregierung in der «nationalen Wasserstoffstrategie» darlegt. Auch seitens der Gasnetzbetreiber wird sich mit dem Thema Neu- und Umbau von Wasserstoffleitungen beschäftigt, was im Netzentwicklungsplan konkretisiert, dargestellt wird.

Für den Transport über längere Strecken gibt es verschiedene technische Möglichkeiten, die alle Vor- und Nachteile mit sich bringen. Der passende Transportweg des Wasserstoffs ist von einigen projektspezifischen Parametern abhängig. Zunächst ist die finanzielle Stärke der Akteure einzuschätzen. LKW sind die günstigste Lösung in der Anschaffung, über größere Strecken wird der Transport jedoch zunehmend spezifisch teurer. Ebenfalls muss die Frage nach dem Transportvolumen beantwortet werden. Bei kleinen Mengen ist der LKW die sinnvollste Möglichkeit. Sollen größere Mengen in die Region gebracht werden, wird die Schiene interessant. Auch der Zeithorizont für die Umsetzung und die Langfristigkeit des Nutzungsszenarios sind entscheidend bei der Wahl des Transportwegs. Beim langen Planungshorizont für dieses Projekt, können prinzipiell alle Alternativen umgesetzt werden und es kann ausgelotet werden, welcher Transportweg die optimale Lösung

darstellt. Große Investitionen wie eine Pipeline können überhaupt nur sinnvoll sein, wenn der Nutzungszeitraum der Investitionen ausreichend lang ist. Die Investition in entsprechende Kesselwagen ist evtl. nicht sinnvoll, wenn der Verlauf einer Pipeline durch die Region bereits geplant ist. Zuletzt spielt die Verfügbarkeit der Verkehrsinfrastruktur eine entscheidende Rolle. Gibt es in der Region ausgebaute Umschlagshäfen und Güterbahnhöfe in deren Radius die Abnehmer liegen, kann das korrespondierende Transportmedium sinnvoll sein. Bei entsprechender Straßensituation ist der Transport mit dem LKW sinnvoll.

	Pipeline	Straße	Schiene	Wasserstraße
H2-Formen	gasförmig	gasförmig, flüssig, chemisch gebunden	gasförmig, flüssig	gasförmig, flüssig, chemisch gebunden
Umsetzungshorizont	langfristig, hohe Investitionen	kurzfristig, schrittweise Investitionen	mittelfristig, schrittweise Investitionen	langfristig, hohe Investitionen
Mögliche Transportkapazitäten	>= 100 t/d	400 – 1.000 kg (g), 4.000 kg (l)	11 t (g), 44 t (l)	Ca. 75 t (l)
Transportdistanz	200 – 3.000 km	Bis ca. 80 km	Ca. 500 km	> 20.000 km
Informationen	Netz hat Speicherwirkung	Container oder Tanker möglich, bisher nur konventionelle Antriebe	Entladeterminale und Schieneninfrastruktur müssen vorhanden sein	passende Infrastruktur und Anbindung notwendig

Tabelle 19-1: Transportwege für Wasserstoff im Überblick

Die straßengebundene Distribution erfolgt je nach Trailer auf verschiedenen Druckniveaus. Es kommen heute vor allem 200 bar, vereinzelt 300 bar oder 500 bar Trailer zum Einsatz. Generell gilt: Je höher der Druck, desto mehr Wasserstoff kann pro Gefäß transportiert werden. So können je nach Trailer-Modell heute zwischen 400 kg bis zu etwa 1.000 kg transportiert werden. Der Transport von komprimiertem, gasförmigem Wasserstoff erfolgt in verschiedenen Bauformen von Trailern. Der Wasserstoff kann in kleinen bis mittleren Mengen in Druckgasbehälter gefüllt und straßengebunden per Lkw transportiert werden. Es können dabei sogenannte Tube Trailer oder Multi-Element-Gas-Container Trailer genutzt werden. Die in Bündeln zusammengefassten zylindrischen Gasflaschen werden in einem Schutzrahmen zusammengefasst und so kompakt transportiert. Es werden entweder Tubes aus Stahl oder den leichteren Composite-Speichern eingesetzt, die das Eigengewicht der Trailer deutlich verringern können. Im weiteren Verlauf wird sich aufgrund der technischen Reife und Marktverfügbarkeit auf die gasförmige Druckwasserstoffversorgung via Tube-Trailer konzentriert.

Das Untersuchungsgebiet bringt spezifische infrastrukturelle Voraussetzungen mit sich, weswegen die genannten Transportmöglichkeiten im konkreten Projektzusammenhang bewertet werden müssen. Für das Untersuchungsgebiet werden die Transportoptionen – nach heutigem Stand der Infrastruktur – wie folgt bewertet:

Transportmodus	Einschätzung	Bewertung für das Untersuchungsgebiet
Straße	<ul style="list-style-type: none"> - Hoher bestehender Ausbaugrad der Straßeninfrastruktur - Hohe technische- und Marktreife - Hohe Flexibilität - Transportkapazitäten begrenzt 	gut
Pipeline	<ul style="list-style-type: none"> - Anfangsinvestitionen notwendig - Kernnetz in Region geplant - Hohe Abnahmemengen in Nürnberg 	gut
Schiene	<ul style="list-style-type: none"> - Anfangsinvestition notwendig - Betriebliche Strukturen (grundsätzlich) vorhanden - Hohes lokales Synergiepotenzial als H2-Hub im kombinierten Verkehr möglich, jedoch konkret nicht ausschöpfbar - Bedarfsgerecht skalierbar - Niedrige technische- und Marktreife 	mittel
Wasserstraße	<ul style="list-style-type: none"> - Hohe Anfangsinvestitionen in Gefäße und Infrastruktur notwendig - Schiffbare Gewässer und (Güter-)Hafen nur in Nürnberg vorhanden - Niedrige technische- und Marktreife 	schlecht

Tabelle 19-2: Bewertung der Transportmöglichkeiten im Untersuchungsgebiet

Aufgrund der infrastrukturellen Situation im Untersuchungsgebiet – wie in Kapitel 17.3 dargelegt – wird grundsätzlich eine straßengebundene Versorgung via MEGC-Trailern empfohlen. Durch die gute Anbindung Nürnbergs an das zukünftige Wasserstoffkernnetz, ist auch eine pipelinegebundene Versorgung mittelfristig denkbar. Mit dem Wasserstoffbedarf am Standort Nürnberg ist eine kontinuierlich hohe Abnahmemenge sichergestellt und damit ein Pipelineanschluss gerechtfertigt. Für Schwandorf gilt es trotz der hohen Tagesmenge weitere H2-Anwender zu identifizieren und gemeinsam einen Kernnetzanschluss anzustreben. Die weiteren HRS Standorte werden straßengebundenen via MEGC Trailern versorgt.

Alternativ zu selbsterzeugtem Wasserstoff und per Trailer angeliefertem Wasserstoff, kann der Wasserstoff leitungsgebunden transportiert werden. Es sind auch Mischkonzepte aus Nearsite-Elektrolyse und Rohrleitungstransport zur Tankstelle umsetzbar.

Es wurden 2 Pipeline-Infrastrukturprojekte identifiziert, die für eine HRS-Anbindung geeignet sein können. Das Neubauprojekt Rothenburg-Forchheim und das Umwidmungsprojekt der Erdgaspipeline Erlangen-Tennenlohe-Nürnberg der N-Ergie. Letztere wird bereits 2028 umgewidmet und stellt ab 2032 eine Verlängerung des EHBs bis nach Nürnberg dar³³. Beim European Hydrogen Backbones geht es darum, ein europaweites Wasserstoffnetz aufzubauen, um Wasserstoff als Schlüsselement der Dekarbonisierung marktfertig zu machen. Hierfür werden bisherige Transportleitungen von Erdgas auf Wasserstoff (und langfristig grünen Wasserstoff) umgestellt und mit Neubauten ergänzt, die an die neuen geographisch-beschaffungsstrukturellen Gegebenheiten angepasst sind. In Deutschland läuft das Projekt unter dem Namen Wasserstoffkernnetz.

³³ Dazu: Antragsentwurf für das Wasserstoff-Kernnetz, Anlage 4 - Übersichtskarte Leitungsnetzinfrastruktur (https://fnb-gas.de/wp-content/uploads/2023/03/2023_03_31_NEP-2022_Anlage-4_Uebersichtskarten-Leitungsnetzinfrastruktur-1.pdf)

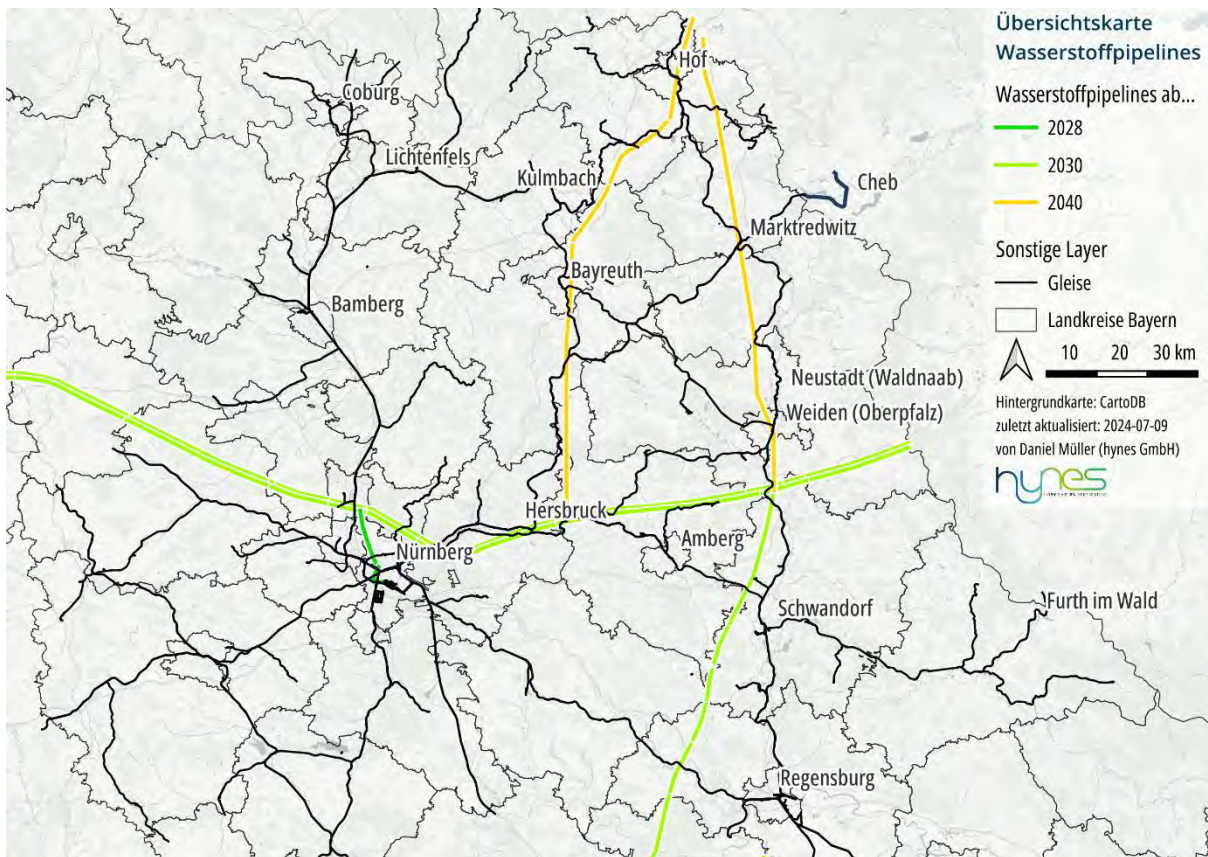


Abbildung 19-2: Übersichtskarte Wasserstoffpipelines

An der Übergabestelle Waidhaus im Osten des Untersuchungsgebiets wird zudem ein kalorisches Äquivalent von 6 GW eingespeist, was dann durch das Untersuchungsgebiet hindurch verteilt wird.

Die Verlegekosten für Wasserstoffpipelines sind vom Leitungsdurchmesser und damit von der zu transportierenden Menge abhängig. Nachfolgende Tabelle des European Hydrogen Backbone aus 2022 gibt einen Überblick die jeweiligen CAPEX in 3 Szenarien.

		Niedrige Kosten	Mittlere Kosten	Hohe Kosten
CAPEX Neubau Wasserstoffpipeline [Mio. €/km]	Klein 500 mm	1,4	1,5	1,8
	Mittel 900 mm	2	2,2	2,7
	Groß 1200 mm	2,5	2,8	3,4
CAPEX Umwidmung Erdgaspipeline [Mio. €/km]	Klein 500 mm	0,2	0,3	0,5
	Mittel 900 mm	0,2	0,4	0,5
	Groß 1200 mm	0,3	0,5	0,6

Tabelle 19-3: Verlegekosten für Wasserstoffpipelines

Die geplante Wasserstoffinfrastruktur in Nürnberg wird durch das Wasserstoffkernnetz bereits erheblich ausgebaut, eine Sticheitung ist durch die Umwidmung der Pipeline Erlangen-Tennenlohe-Nürnberg bereits grob gegeben. Der Pipelinetransport stellt somit für den Standort Nürnberg eine weitergehend zu untersuchende Versorgungsoption dar. In Hof könnte ab 2040 der Wasserstoff ebenfalls durch die Pipeline angeliefert werden, während die anderen Standorte weiterhin mit Trailern versorgt werden

müssen. Dennoch bietet die Pipelineanbindung des Untersuchungsraums insgesamt neue Verteiloptionen, wie beispielsweise eine Hub-Lösung mit Pipelineanschluss als Wasserstoffverteilzentrum für die Tankstellen in der Umgebung.

19.3 Grundlegende Konzepte

Nachdem die Möglichkeiten des Transports dargestellt wurden, werden folgend allgemeine Konzepte der Versorgung erläutert.

Zunächst lassen sich Versorgungskonzepte anhand ihrer Wasserstoffbezugsquelle unterscheiden. Es gibt On-Site-Erzeugung, bei der Wasserstoff am Ort der Betankung bzw. des Verbrauchs produziert wird und Off-Site-Erzeugung. Hier wird der Wasserstoff von einer oder mehreren externen Produktionsanlagen an die HRS geliefert. Dabei kann es sich um eine große Wasserstoffproduktionsanlage, mehrere kleine Elektrolyseure mit zwischengeschaltetem Hub oder um Anlagen handeln, in der der Wasserstoff als Nebenprodukt anfällt³⁴. Der Wasserstoff wird ausserhalb der Projektregion oder sogar ausserhalb Deutschlands erzeugt. Ein Grund hierfür kann die höhere Verfügbarkeit von erneuerbaren Stromquellen sein, wodurch die Wasserstoffproduktionskosten niedriger ausfallen³⁵. Bei Projekten, die regional erzeugten Wasserstoff nutzen, ist die Integration in den Projektkontext hingegen einfacher und effizienter möglich. Das Einbinden vorhandener Wasserstoffquellen wird so forciert. Dazwischen kann noch die Near-site-Produktion unterschieden werden, wo der Wasserstoff nicht vor Ort, aber in der Nähe der HRS produziert wird. Aufgrund der, vergleichsweise hohen Baukosten für eine H₂-Pipeline, sollte die Distanz möglichst kurz gehalten werden. Jedoch ist der Druckbereich, über den Wasserstoff in einer Pipeline transportiert werden kann, groß. Kleinere dezentrale Anlagen, etwa zur Produktion direkt an einer Tankstelle, spielen bisher eine eher geringe Rolle.

Darüber hinaus entsteht auch bei Wasserstoffinfrastruktur durch Skalen-, Verbund- und Netzwerkeffekte Kostensynergien. Diese sollte durch die Zusammenarbeit mit anderen Unternehmen angestrebt werden. Hierzu wurden einerseits die HyLand Projekte im Untersuchungsgebiet mit einbezogen und auch in der Standortbewertung wurde auf die Nähe zu Unternehmen mit potenziellem Wasserstoffbedarf oder Wasserstoffüberschuss aus der Produktion hingewiesen. Hierbei können unterschiedliche Distributionsstrukturen etabliert werden. Aus umgesetzten Wasserstoffprojekten können drei Ansätze abgeleitet werden: Hub-Konzept, dezentrales Konzept und lokales Konzept.

Es gibt die Möglichkeit ein zentrales Wasserstoffverteilzentrum – oft als Hub und der Ansatz folglich als Hub-Konzept bezeichnet – einzurichten, von welchem ausgehend dann die Verteilung zu den Abnehmern in der Region erfolgt. Die Aktivitäten werden so gebündelt und stellen die nachgelagerte Versorgung sicher und organisieren diese. Im Projekt «H₂Rivers» findet dieses Konzept beispielsweise Anwendung. Hierdurch können die höchstmöglichen Skaleneffekte erreicht werden und größere importierte Mengen können ebenso gespeichert werden wie lokal produzierte. Jedoch fällt die gesamte nachgeschaltete Wertschöpfungskette aus, sollte das Hubs ausfallen oder Lieferschwierigkeiten haben. Diese fehlende Diversität ist daher mit einem gewissen Risiko verbunden.

Erfolgt die Verteilung an die Abnehmer über eine größere Anzahl an entsprechend kleineren, zum Teil miteinander vernetzten Wasserstoffverteilzentren, handelt es sich um ein dezentrales Konzept. Als

³⁴ Die Chlorproduktion und das thermische Cracken von Kohlenwasserstoffen sind zwei Beispiele für Anlagen, die Wasserstoff als Nebenprodukt produzieren. Das ist jedoch kein grüner Wasserstoff.

³⁵ Beispielsweise in Teilen Afrikas, dazu: <https://www.wasserstoff-leitprojekte.de/partner-projekte/afrika>

Best-Practice Beispiel kann hier das Projekt «eFarm Nordfriesland» angeführt werden³⁶. Durch die so mögliche Anbieterdiversität und die verteilten Speicher ist das Gesamtsystem ausfallresilienter, es müssen jedoch höhere Investitionen getätigt werden, da mehrere Hubs erbaut werden müssen. Dadurch, und durch die Größe der einzelnen Hubs werden die Skaleneffekte verringert. Zudem ist die Planung der Transportwege komplexer und die Belastung dieser höher.

Das lokale Konzept strebt (situativ ergänzend) die Erzeugung in unmittelbarer Nähe der Abnehmer in die Versorgung an. Im Unterschied zu den vorigen beiden Konzepten, wird hierbei keine größere regional angeschlossene Verteilstruktur angestrebt oder geschaffen, sondern ein einzelnes Unternehmen oder eine sehr kleine Teilregion bilden den Projektkontext. Dieses Versorgungskonzept findet vorwiegend im Testbetrieb Anwendung, da es im Regelbetrieb für die Erzeuger und die Verbraucher mit Risiken verbunden ist: Zum Beispiel muss für die Erzeugung eine dedizierte und dimensional korrespondierende regenerative Stromerzeugung aufgebaut werden, die sich in der Nähe zur Wasserstoffherstellungsanlagen befindet. Die Anlagen sind sehr teuer, wodurch ein vertraglich verbundenes Konsortium der Partner erforderlich wird, was beispielsweise eine Verpflichtung zur Abnahme festgeschriebener Mengen beinhaltet. Das lokale Szenario wird daher nur als Ergänzung zu einem übergeordneten Konzept als realistisch angesehen.

Auch der direkte Import von einem Versorger außerhalb der Region ohne weitere Verteilung ist denkbar und kurzfristig umsetzbar. Hierdurch entsteht keine Notwendigkeit für Investitionen für und den Unterhalt von Versorgungszentren und die Abwicklung ist einfach. Es entsteht jedoch eine größere Unsicherheit und Abhängigkeit bei der Versorgung, wodurch es zu enormen Problemen beim Lieferausfall kommen. Demnach ist eine Lösung, die nur auf Import setzt nicht für den Einsatz in der öffentlichen Personenbeförderung zu empfehlen.

Ein dezentrales Versorgungssystem wird im Untersuchungsgebiet als beste Option eingeschätzt. Eine eigene Wasserstoffproduktion ist ebenfalls möglich, wird allein aber keine ausreichende infrastrukturelle Resilienz bieten.

Bei der Kooperation in einem Versorgungskonzept sind bei der Planung und Evaluation des Netzwerks folgende Punkte zu beachten:

1. Ermittlung der Bedarfs- und Erzeugungspotenziale: Zunächst muss ermittelt werden, wo in der Region Wasserstoff erzeugt wird oder wo es einen Überschuss an Strom gibt, welcher für die Erzeugung genutzt werden kann. Danach werden die Verbraucher und deren Mengen lokalisiert werden.
2. Strategische Positionierung der Verteilzentren: Hierbei geht es darum, den bestmöglichen Kompromiss zwischen guter logistischer Anbindung und geographischer Nähe zu den Abnehmern sicherzustellen.
3. Versorgungsmöglichkeiten und -wege: Bei der Positionierung sollte auch die Anbindung an unterschiedliche Transportmöglichkeiten mitgedacht werden. Auf lokale Lieferanten zurückzugreifen ist in der Regel von Vorteil, darüber hinaus, sollten Schnittstellen in Form von Autobahnen, Güterbahnhöfen, bi- oder trimodalen Binnenhäfen sowie überregionalen Pipelineverläufen angestrebt werden.
4. Alternative Lieferantenoptionen schaffen: Es sollten verschiedene Versorgungsmöglichkeiten etabliert werden, damit bei Ausfall eines Anbieters oder Lieferanten schnell für Ersatz gesorgt werden kann. Hierfür kann entweder ein Anbieterpool aufgebaut werden oder flexible Versorger anknüpfen, die größere Mengen direkt verkaufen können.

³⁶ <https://www.efarm.nf/efarm-nordfriesland/>

Für das konkrete Projekt in Oberfranken sollten zunächst die lokalen Netzwerke (u.A. HyLand) kontaktiert werden, die bereits bestehen und ein Überblick über die Wasserstoffaktivitäten in der Region geschaffen werden, um konkrete Kooperationen anzustreben.

19.4 Synergien mit anderen H2-Anwendern

Eine Möglichkeit die Wirtschaftlichkeit einer Wasserstoffherzeugung einschließlich Distributionsinfrastruktur zu erhöhen ist Synergiepotenziale mit anderen Anwendern zu erschließen.

Potenzielle Kooperationspartner gibt es in vielen Wirtschaftsbereichen und -sektoren. Die Vorteile der Wasserstofftechnik gegenüber anderen Technologien zur Dekarbonisierung sind die Möglichkeit zum schnellen Betanken, die hohe gravimetrische Energiedichte des Wasserstoffs, die Speicherbarkeit und das Sektorenkopplungspotenzial.

Im Verkehr und der Logistik sind die Einsatzmöglichkeiten von Wasserstoff vielfältig. Sie erstrecken sich – neben dem Einsatz im Schienenverkehr – vom Einsatz im Schwerlast- und Schiffsverkehr über Anwendungen im ÖPNV bis zu intralogistischen Anwendungen, wie bei Flurförderzeugen. In der Industrie, Energiewirtschaft und Handel gibt es darüber hinaus einige Anwendungen, in welchen der Einsatz von Wasserstoff zukünftig wahrscheinlich ist.

Neben den Verbrauchern sind auch potenzielle Erzeuger und Erzeugungsstandorte sowie notwendige Transport- und Distributionspartner zu beachten.

Die Serien- bzw. Marktreife der meisten Technologien ist dabei jedoch noch nicht gegeben und neben den noch aufzubauenden Versorgungsnetzwerken und -strategien – regional wie überregional – sind Finanzierung, Infrastruktur sowie die Akzeptanz derzeit Hemmnisse des Einsatzes.

Dennoch wurde für das Untersuchungsgebiet Unternehmen mit Synergiepotenzialen recherchiert und lokalisiert. Auf dieser Basis können bei weitergehender Planung Kooperationen und gemeinsame Infrastrukturbestandteile aufgebaut werden.

Recherchiert wurden Logistikunternehmen wie Spediteure, Verteilzentren oder Zentrallager mit eigenem Fuhrpark, da einige Logistikanbieter, den Einsatz von wasserstoffbetriebenen LKWs für den Fernverkehr in Erwägung ziehen. Daneben gibt es in jeder Stadt oder jedem Kreis lokale Lieferdienste und Fahrzeugflotten kommunaler Unternehmen sowie öffentliche Verkehrsbetriebe wie z.B. in Bayreuth, die häufig Interesse an einer Umstellung haben, wie das bereits in einigen HyLand Teilprojekten initiiert wird. Diese wurden jedoch nicht einzeln recherchiert.

Weiterhin interessant sind (Güter-)Häfen und Flughäfen, da sie einerseits für den Transport und die Lagerung von Wasserstoff Potenziale haben und andererseits Wasserstoffeinsatz für Bodendienste, schwere Gerätschaften und langfristig gegebenenfalls auch als Treibstoff für Flugzeuge respektive Schiffe in Betracht kommen.

Große Produktionsunternehmen mit Anlagen in der Region, die Wasserstoff zur Reduzierung der Kohlenstoffemissionen in ihren industriellen Prozessen einsetzen könnten oder solche, die Wasserstoff als Rohstoff benötigen, wurden ebenfalls recherchiert und dargestellt. Hierbei wurde versucht Branchen mit schwer zu elektrifizierenden Prozessen oder sehr hohen Bedarfen herauszuarbeiten. Recherchiert wurden daher Unternehmen in den Bereichen Automobilherstellung, Bauunternehmen, Chemieindustrie, Elektrotechnik, Glasindustrie, keramische Industrie, Holzverarbeitung und Möbelherstellung, Klinikprodukte, Lebensmittelindustrie, Logistik, Maschinenbau, Metallverarbeitung,

Oberflächenveredelung, Papierindustrie, Petrochemie, Pflanzengroßhandel, Verpackungen und Zement.

Neben den Wasserstoffverbrauchern wurden auch die (grünen) Erzeugungsanlagen in der Region gesammelt. Hier gibt es bereits einen Elektrolyseur in Wunsiedel, welcher im Zuge von HyExperts I: Wasserstoff-Modellregion Fichtelgebirge erbaut wurde.

19.4.1 Synergiepotenziale im Untersuchungsgebiet

Die Synergiepotenziale im Verkehr und der Logistik sind im Untersuchungsgebiet lediglich in Nürnberg realistisch gegeben. Nürnberg ist ein Verkehrsknotenpunkt und beherbergt einen von zwei internationalen Flughäfen Bayerns, einen trimodalen Hafen, eine Wasserstofftankstelle für PKW mit gutem Ausbaupotenzial als auch mehrere Autobahnen, die sich bei Nürnberg kreuzen.

Es befinden sich einige potenzielle Abnehmer wie Logistikdienstleister und Spediteure mit größerem Wagenumschlag im Gebiet des trimodalen Hafens, welcher an sich bereits Synergiepotenziale für Wasserstoffbedarfe in der Schifffahrt selbst und Intralogistik bietet.

Auch die anderen größeren produzierenden Gewerbe in Nürnberg könnten künftig für den Warentransport oder die Intralogistik Wasserstoff nachfragen. Der Gütertransport mit leichten und schweren Nutzfahrzeugen ist eine der Leitgrößen für die Prognose der Wasserstoffnachfrage im Verkehr. In der in Kapitel 14.2.7 behandelten Studie, werden Bedarfe in der Metropolregion Nürnberg prognostiziert, welche mehr als 50 Wasserstofftankstellen benötigen würde.

Der Albrecht-Dürer-Flughafen könnte ebenfalls Synergiepotenziale entwickeln, wobei der Einsatz von wasserstoffbasierten Treibstoffen in der Luftfahrt derzeit noch nicht ausreichend erforscht ist, um das bei der Planung in diesem Projektkontext zu berücksichtigen. Weswegen hier das Einsatzpotenzial im Ground Handling wichtiger ist.

In der Wirtschaft können neben dem Wasserstoff selbst Abwärme und Sauerstoff (Elektrolyse) einer Verwertung zugeführt werden. Mögliche Anwendungen sind in der Kreislaufwirtschaft (Wasseraufbereitung) und Intralogistik (Flurförderzeuge) zu finden.

Die Synergien mit anderen Unternehmen – nimmt man den Einsatz in der Intralogistik und des Gütertransports raus – sind besonders in der Chemie-, Glas- und Papierindustrie zu finden. Unternehmen dieser Branchen sind im Untersuchungsraum zwar zu finden, sind jedoch zu weit verstreut, als dass sie lohnenswerte Synergiepotenziale bieten können.

In und um Nürnberg befinden sich diverse Unternehmen, die kleinere Bedarfe für spezifische, schwer zu elektrifizierende Prozesse benötigen könnten. Die in Kapitel 14.2.7 behandelte Studie kommt ebenfalls zu dem Ergebnis, dass die großen Nachfrageindustrien in der Metropolregion Nürnberg nicht vorhanden sind.

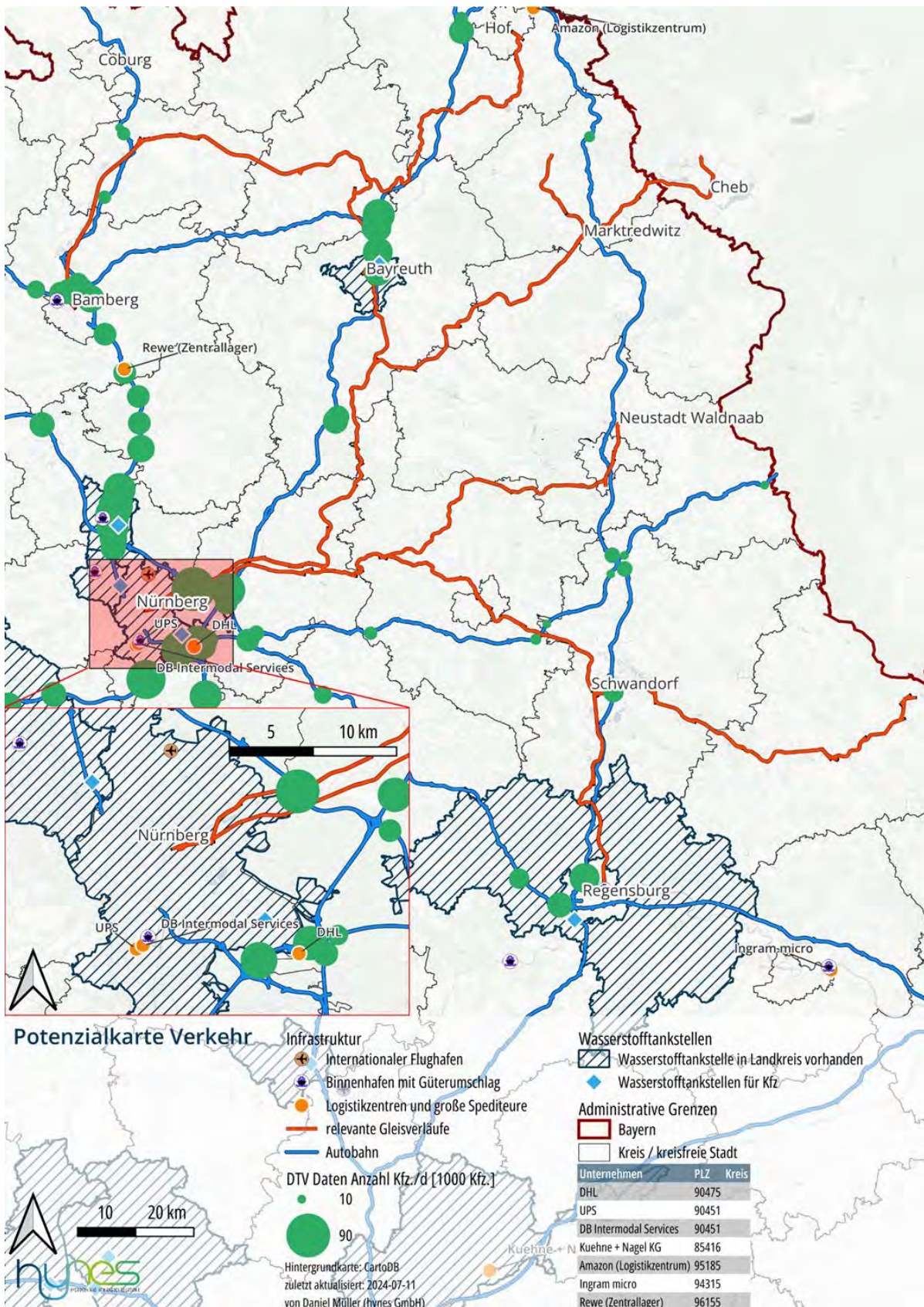


Abbildung 19-3: Synergie-Potenzialkarte Verkehr

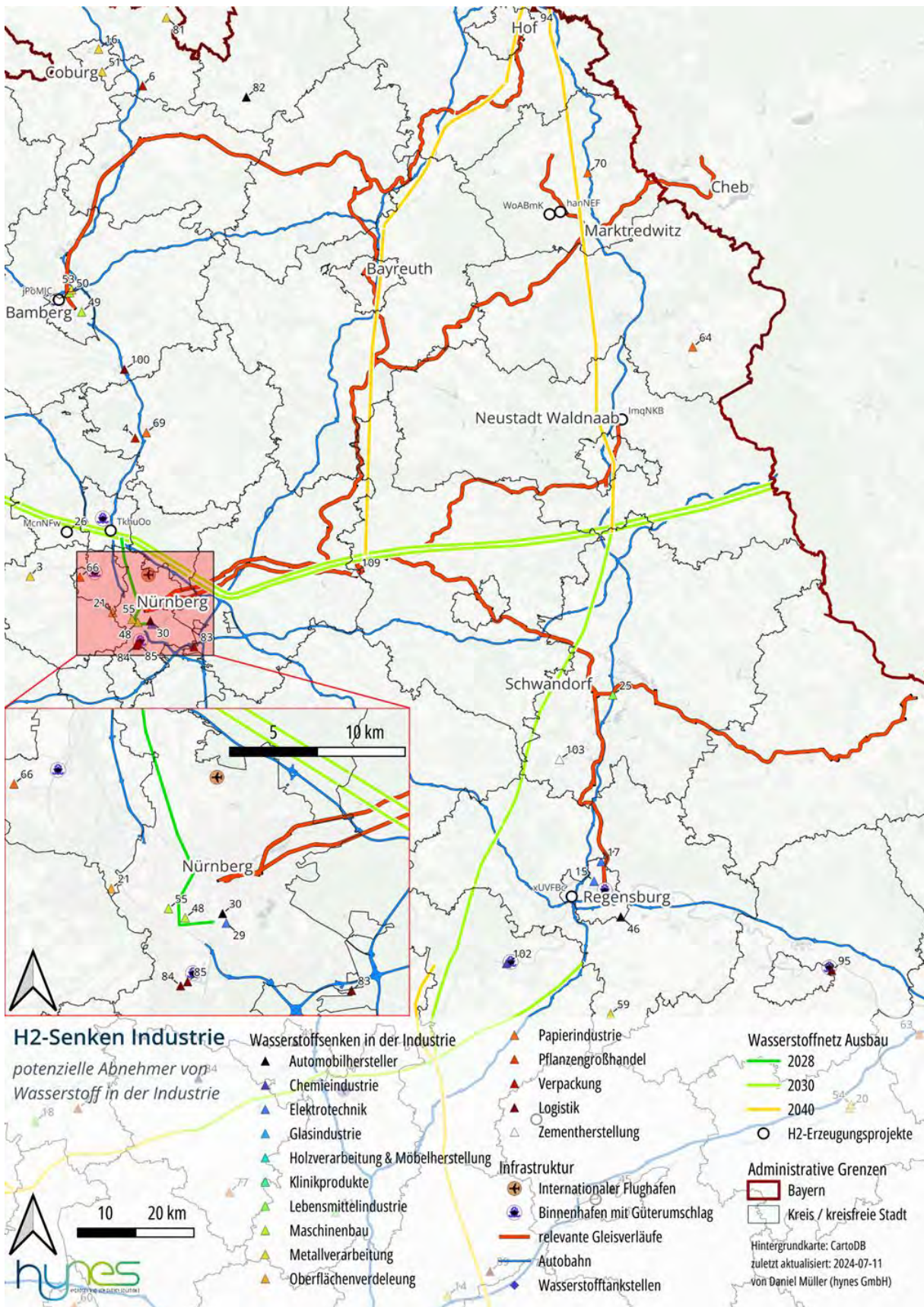


Abbildung 19-4: Karte mit potenziellen Abnehmern von Wasserstoff in der Industrie

20 KOSTENSCHÄTZUNG WASSERSTOFFINFRASTRUKTUR

Die Investitionskosten für H₂-Tankstellen variieren in der Literatur sehr stark und sind abhängig von einer Vielzahl von Faktoren. Die wesentlichen Determinanten sind:

- Verdichtertechnik,
- HD-Speichermenge und Speicherkonzept,
- Versorgungskonzept und
- Immissionsschutzrechtliche Auflagen.

Die nachfolgende Abbildung gibt einen Überblick über die spezifischen Kostenbestandteile je kg einer H₂-Tankstelle.



Abbildung 20-1: Darstellung Kostenbestandteile einer H₂-Tankstelle

Auf Basis aktueller Literaturwerte zu Wasserstofftankstellen wurden spezifische Kosten in €/kg abgeleitet. Die verwendeten Quellen und Werte sind folgender Tabelle zu entnehmen:

Quelle	Spez. Investitionskosten [€/ kg]	
	Min	Max
FCH JU 2017; New Bus ReFuelling for European Hydrogen Bus Depots; Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU), 2017	2.333 €	4.333 €
e-mobil BW 2023; Landesagentur für neue Mobilitätslösungen und Automotive Baden-Württemberg; H ₂ -Infrastruktur für Nutzfahrzeuge im Fernverkehr - Aktueller Entwicklungsstand und Perspektiven März 2023	2.125 €	2.500 €
Elgowainy, A.; Reddi, K. (2017): Heavy-Duty Refueling Station Analysis Model (HRSAM)	2.861 €	3.411 €

Tabelle 20-1: Spezifische Investitionskosten basierend auf Literaturwerten

In den nachfolgenden Abbildungen sind die Investitionskosten für die Errichtung der HRS an den jeweiligen Standorten dargestellt. Diese basieren auf der H₂-Mengenberechnungen in Kapitel 15 für in Abhängigkeit der maximalen Lagerkapazität.

Für die Standorte in Nürnberg, Hof und Schwandorf liegen die Investitionen zwischen 12 und 17 Mio. €. Der Standort Bayreuth weist geringfügig niedrigere Investitionen in Höhe von 10 bis 14 Mio. € auf.

Die Betriebskosten werden mit 4% der CAPEX angenommen und belaufen sich auf jährlich ca. 390 T€ für das Best-Case- und 680 T€ für das Worst-Case-Szenario.

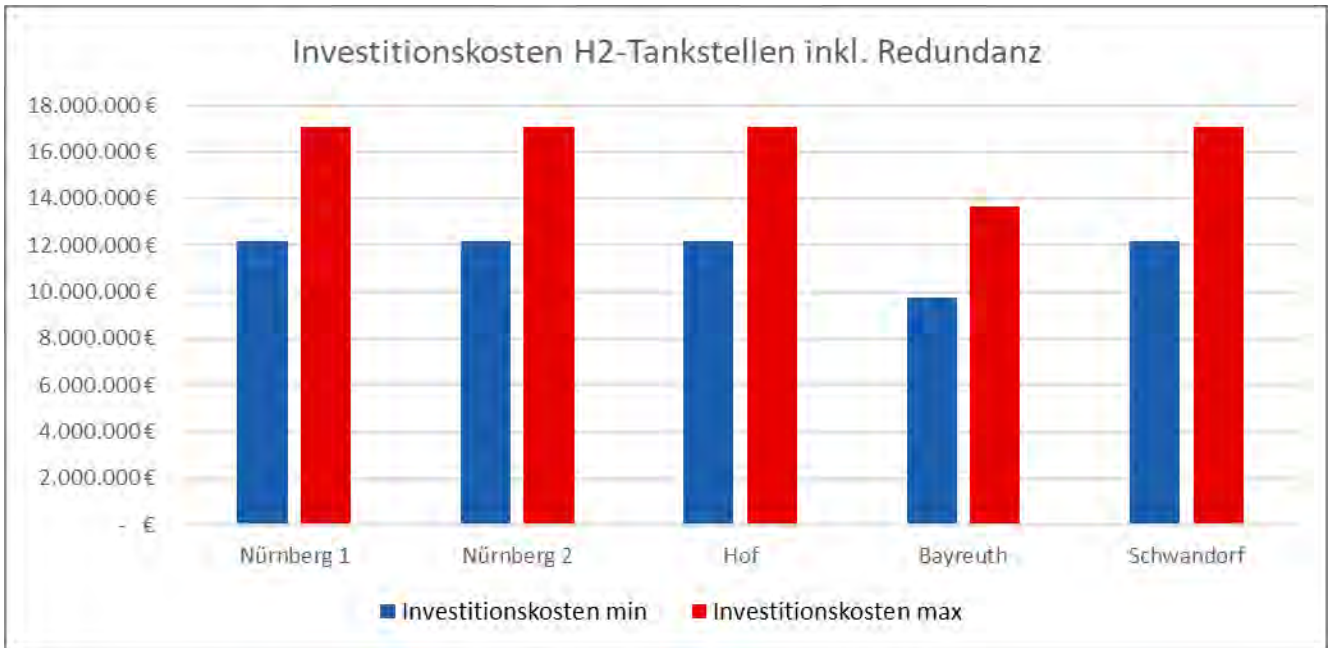


Abbildung 20-2: Balkendiagramm zu den Investitionskosten pro Standort

Aus technischen und betrieblichen Kriterien ist die Versorgung von 51 NT-XEMU mit Wasserstoff möglich. In Anbetracht der Investitionen in eine innovative Infrastruktur ist die Einführung von min. 51 NT-XEMU aber als Pfadentscheidung mit dazugehörigen Nutzungsdauern zu verstehen. Dies vorausgesetzt bestehen Projektrisiken hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit, des soliden Tankstellenbetriebs, der Genehmigung, der sicheren H₂-Versorgung und der Fahrzeugparameter, welche weiter untersucht werden müssen. Nachfolgende Grafik zeigt eine grobe Einschätzung der identifizierten relevanten Risiken.

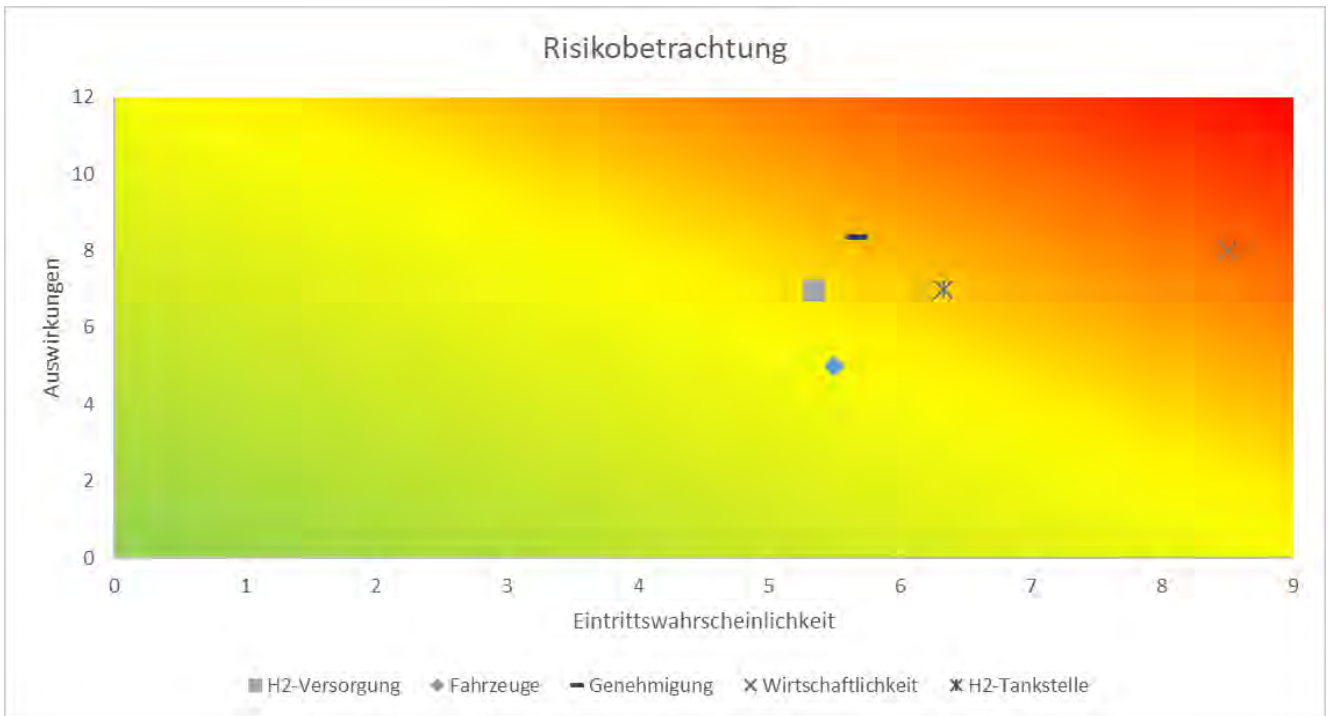


Abbildung 20-3: Darstellung und Einordnungen der vorhandenen Risiken

ANHANG A1 – Analyse der Teilstrecken

Zum Schlussbericht der Machbarkeitsstudie Oberfranken-Achse (ECH-541.01-102 Version 1.0)

1 Analyse der Teilstrecken

1.1 Kriterien

Die Teilstrecken wurden nach den folgenden Kriterien analysiert:

- Situation bei den Bahnhöfen entlang der Teilstrecken: Es sind Gleise zu elektrifizieren und damit verbunden, Anpassungen an den Sicherungsanlagen und dem Erdungs- und Rückleitungssystem der Bahn notwendig.
- Anzahl Bahnübergänge (BÜ): eine Elektrifizierung bedingt bei Bahnübergängen eine Anpassung der Sicherungsanlagen sowie eine Anbindung an die Erdung und Rückleitungssystem der Bahn.
- Kreuzungsstellen / Doppelspurabschnitt (bei Einspurstrecken): zusätzliches Gleis ist zu elektrifizieren. Es sind zudem Anpassungen der Sicherungsanlagen sowie eine Anbindung an die Erdungs- und Rückleitungssystem der Eisenbahn (oder eine Anpassung des bestehenden Erdungs- und Rückleitungssystems) notwendig.
- Längere Brücken oder Straßenunterführungen (SU): bei Bauwerkslängen grösser einer Abspannlänge (~50 m) sind Masten auf den Bauwerken selbst notwendig, was aufwändiger zu errichten ist als auf der normalen Strecke.
- Überführungen (über die Eisenbahnstrecke, wie für Straßenverkehr oder Personen): unter Umständen ist hier die Höhe zwischen Gleis und Bauwerk begrenzt, was eine teurere Sonderkonstruktion beim Bau der Oberleitung bedingt.
- Tunnel: bei Tunneln sind die Baukosten für die Oberleitung höher als auf freier Strecke.

1.2 Übersicht der Teilstrecken

ID	Strecke	Streckenlänge [km]	Anzahl Gleise
1	Hochstadt-Marktzeuln - Mainleus (5100)	16.5	2
2	Mainleus - Kulmbach (5100)	5.4	2
3	Kulmbach - Untersteinach (5100)	6.3	2
4	Untersteinach - Neuenmarkt-Wirsberg (5100)	6.1	2
5a	Neuenmarkt-Wirsberg - Marktschorgast (5100)	7.5	2
5b	Trebgast - Neuenmarkt-Wirsberg (5051)	4.8	1
5c	Neuenmarkt-Wirsberg Süd - Neuenmarkt-Wirsberg Ost (5007)	0.7	1
6	Bayreuth - Trebgast (5051)	15.7	1
7	Kirchenlaibach - Bayreuth (5051)	18.8	1
8	Marktschorgast - Stambach (5100)	11.2	1
9	Stambach - Münchberg (5100)	9.9	2
10	Münchberg - Seulbitz (5100)	6.6	2
11	Seulbitz - Oberkotzau (5100)	12.1	2
12	Rehau - Oberkotzau (5027)	8.2	1
13	Hof - Rothenbürg (5021)	12.0	1

Machbarkeitsstudie Oberfranken-Achse
Anhang 1 Analyse der Teilstrecken

ECH-541.01-103
Version 1.0

ID	Strecke	Streckenlänge [km]	Anzahl Gleise
14	Neukirchen - Freihung (5060)	29.5	1
15	Freihung - Weiden (5060)	22.1	1
16	Altenstadt - Neustadt a.d. Waldnaab	1.02	1

Tabelle 1-1: Tabellarische Übersicht der Teilstrecken im Untersuchungsgebiet der Oberfrankenstudie

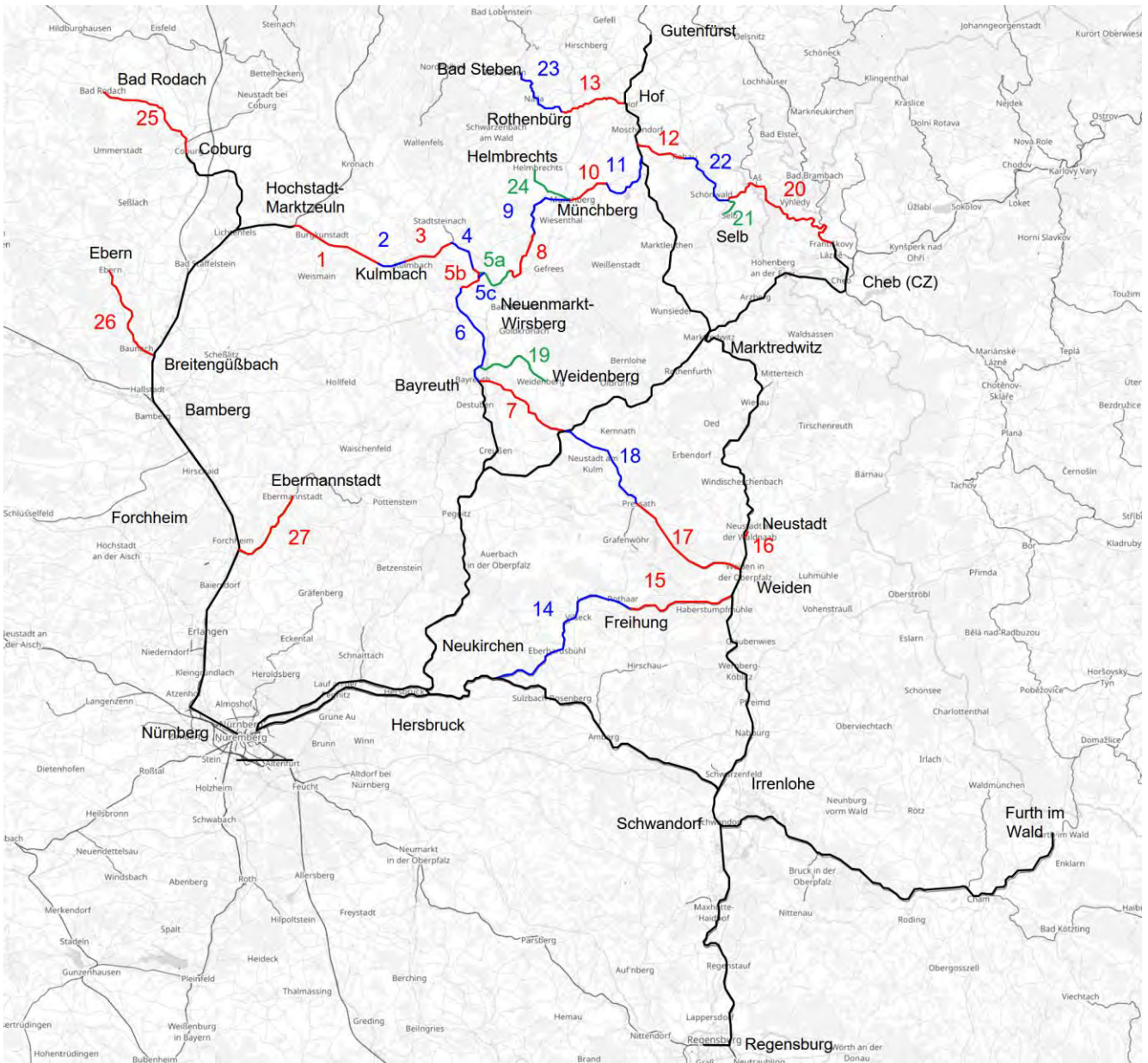


Abbildung 1-1: Grafische Übersicht der Teilstrecken im Untersuchungsgebiet der Oberfrankenstudie

1.3 Detailanalyse

1.3.1 ID 1: Hochstadt-Marktzeuln – Mainleus

Streckenlänge	16.5 km
Anzahl Gleise	2
Relevante topografische Eigenschaften der Teilstrecke	Mehrheitlich gerade
Situation bei den Start- und Endbahnhöfen bezgl. Elektrifizierung	Hochstadt-Marktzeuln (8 Gleise), elektrifiziert Mainleus (2 Gleise), nicht elektrifiziert
Situation bei den restlichen Bahnhöfen / Haltepunkten:	Burgkunstadt (2 Gleise) Mainroth (2 Gleise)
Bahnübergänge	Gross (geteert): 12
Kreuzungsstellen / Doppelspurabschnitt:	-
Längere Brücken oder Straßenunterführungen:	Brücke über Main ca 46m Brücke nach Hochstadt Marktzeuln, ca 133m Brücke über Prötschenbach ca 60m
Überführungen	B173 bei Hochstadt-Marktzeuln Weismain Strasse nach Burgkunstadt Hauptstrasse bei Mainleus
Tunnel:	-
Diverses:	-

1.3.2 ID 2: Mainleus – Kulmbach

Streckenlänge	5.4 km
Anzahl Gleise	2
Relevante topografische Eigenschaften der Teilstrecke	Mehrheitlich gerade
Situation bei den Start- und Endbahnhöfen bezgl. Elektrifizierung	Mainleus (2 Gleise), nicht elektrifiziert Kulmbach (4 Gleise), nicht elektrifiziert
Situation bei den restlichen Bahnhöfen / Haltepunkten:	-
Bahnübergänge:	Gross (geteert): 2
Kreuzungsstellen / Doppelspurabschnitt:	Spurwechsel vor Kulmbach, ca. 200m
Längere Brücken oder Straßenunterführungen:	Brücke über Weisser Main ca. 59m Brücke vor Kulmbach ca 70m
Überführungen	Theodor-Hauss-Alee vor Kulmbach B85 vor Kulmbach
Tunnel:	-
Diverses:	-

1.3.3 ID 3: Kulmbach – Untersteinach

Streckenlänge	6.3 km
Anzahl Gleise	2
Relevante topografische Eigenschaften der Teilstrecke	Mehrheitlich gerade
Situation bei den Start- und Endbahnhöfen bezgl. Elektrifizierung	Kulmbach (4 Gleise), nicht elektrifiziert Untersteinach b. Stadtsteinach (3 Gleise), nicht elektrifiziert
Situation bei den restlichen Bahnhöfen / Haltepunkten:	-
Bahnübergänge:	Gross (geteert): 4
Kreuzungsstellen / Doppelspurabschnitt:	-
Längere Brücken oder Straßenunterführungen:	Brücke über weisser Main ca. 67.03m
Überführungen	Berliner Brücke, Kulmbach
Tunnel:	-
Diverses:	-

1.3.4 ID 4: Untersteinach – Neuenmarkt-Wirsberg

Streckenlänge	6.1 km
Anzahl Gleise	2
Relevante topografische Eigenschaften der Teilstrecke	Mehrheitlich gerade
Situation bei den Start- und Endbahnhöfen bezgl. Elektrifizierung	Untersteinach b. Stadtsteinach (3 Gleise), nicht elektrifiziert Neuenmarkt-Wirsberg (11 Gleise), nicht elektrifiziert
Situation bei den restlichen Bahnhöfen / Haltepunkten:	Ludwigschorgast (2 Gleise)
Bahnübergänge:	Klein (Landstrasse): 1 Gross (geteert): 1
Kreuzungsstellen / Doppelspurabschnitt:	-
Längere Brücken oder Straßenunterführungen:	-
Überführungen	B289 bei Untersteinach
Tunnel:	-
Diverses:	-

1.3.5 ID 5a: Neuenmarkt-Wirsberg – Marktschorgast

Streckenlänge	7.5 km
Anzahl Gleise	2
Relevante topografische Eigenschaften der Teilstrecke	Schiefe Ebene, steiler Anstieg in Richtung Marktschorgast (150 Hm)
Situation bei den Start- und Endbahnhöfen bezgl. Elektrifizierung	Neuenmarkt-Wirsberg (11 Gleise), nicht elektrifiziert Marktschorgast (2 Gleise), nicht elektrifiziert
Situation bei den restlichen Bahnhöfen / Haltepunkten:	-
Bahnübergänge:	-
Kreuzungsstellen / Doppelspurabschnitt:	-
Längere Brücken oder Straßenunterführungen:	Bahn auf Mauer bei Himmelkorn, ca 150m Bahn auf Mauer bei Himmelkorn, ca 67m Bahn auf Mauer bei Himmelkorn, ca 97 Bahnbrücke vor Marktschorgast ca 67m Brücke vor Marktschorgast ca 150m
Überführungen	Hauptstrasse, Neuenmarkt Strasse nach Neuenmarkt B303, Himmelkron Bernecker Strasse, Marktschorgast
Tunnel:	-
Diverses:	-

1.3.6 ID 5b: Trebgast – Neuenmarkt-Wirsberg

Streckenlänge	4.8 km
Anzahl Gleise	1
Relevante topografische Eigenschaften der Teilstrecke	Mehrheitlich gerade
Situation bei den Start- und Endbahnhöfen bezgl. Elektrifizierung	Trebgast (2 Gleise), nicht elektrifiziert Neuenmarkt-Wirsberg (11 Gleise), nicht elektrifiziert
Situation bei den restlichen Bahnhöfen / Haltepunkten:	-
Bahnübergänge:	Gross (geteert): 2
Kreuzungsstellen / Doppelspurabschnitt:	-
Längere Brücken oder Straßenunterführungen:	Brücke über weisser Main ca 71m
Überführungen	Hauptstrasse, Neuenmarkt
Tunnel:	-
Diverses:	Brücke Ausgang Bhf Neuenmarkt nochmals erwähnt (wie 5a)

1.3.7 ID 5c: Neuenmarkt-Wirsberg Süd – Neuenmarkt-Wirsberg Ost

Streckenlänge	0.7 km
Anzahl Gleise	1
Relevante topografische Eigenschaften der Teilstrecke	Schlömener Kurve, Verbindung von Bayreuth nach Hof
Situation bei den Start- und Endbahnhöfen bezgl. Elektrifizierung	-
Situation bei den restlichen Bahnhöfen / Haltepunkten:	-
Bahnübergänge:	-
Kreuzungsstellen / Doppelspurabschnitt:	-
Längere Brücken oder Straßenunterführungen:	-
Überführungen	Strasse, bei Schlömener Kurve
Tunnel:	-
Diverses:	-

1.3.8 ID 6: Bayreuth – Trebgast

Streckenlänge	15.7 km
Anzahl Gleise	1
Relevante topografische Eigenschaften der Teilstrecke	Mehrheitlich gerade
Situation bei den Start- und Endbahnhöfen bezgl. Elektrifizierung	Trebgast (2 Gleise), nicht elektrifiziert Bayreuth (9 Gleise), nicht elektrifiziert
Situation bei den restlichen Bahnhöfen / Haltepunkten:	Harsdorf (2 Gleise) Ramsenthal (1 Gleis) Bindlach (2 Gleise)
Bahnübergänge:	Gross (geteert): 9
Kreuzungsstellen / Doppelspurabschnitt:	-
Längere Brücken oder Straßenunterführungen:	Brücke bei Bayreuth, ca 56m
Überführungen	A70, Harsdorf St2183, nach Ramsthal Grüner Baum, Bayreuth Strasse über Bahnbrücke bei Bayreuth Wilhelm-von-Diez-Strasse, Bayreuth
Tunnel:	-
Diverses:	-

1.3.9 ID 7: Kirchenlaibach – Bayreuth

Streckenlänge	18.8 km
Anzahl Gleise	1
Relevante topografische Eigenschaften der Teilstrecke	Mehrheitlich gerade
Situation bei den Start- und Endbahnhöfen bezgl. Elektrifizierung	Bayreuth Hbf: 9 Gleise, nicht elektrifiziert Kirchenlaibach (7 Gleise), nicht elektrifiziert
Situation bei den restlichen Bahnhöfen / Haltepunkten:	Stockau (2 Gleise) Seybothenreuth (1 Gleis)
Bahnübergänge:	Gross (geteert): 6 Fussgängerübergang: 1 Klein (Landstrasse): 1
Kreuzungsstellen / Doppelspurabschnitt:	Vor Kirchenlaibach, 70m
Längere Brücken oder Straßenunterführungen:	Brücke über Tunnelstrasse in Bayreuth ca 47m Brücke über Roter Main, Bayreuth ca 105m Brücke über Wieland-Wagner-Strasse in Bayreuth ca. 52m Brücke über Roter Main, ca 74m
Überführungen	A9 Bayreuth Strasse bei Schloss Colmdorf, Bayreuth Königsallee, Bayreuth Strasse vor Neunkirchen Seulbitzer Strasse, Weidenberg Strasse nach Stockau B22, Seybothenreuth St2184, Speichersdorf Fussgängerübergang, vor Kirchenlaibach
Tunnel:	-
Diverses:	-

1.3.10 ID 8: Marktschorgast – Stambach

Streckenlänge	11.2 km
Anzahl Gleise	1
Relevante topografische Eigenschaften der Teilstrecke	Mehrheitlich gerade, nach Marktschorgast grosse Kurven
Situation bei den Start- und Endbahnhöfen bezgl. Elektrifizierung	Marktschorgast (2 Gleise) , nicht elektrifiziert Stambach (2 Gleise), nicht elektrifiziert
Situation bei den restlichen Bahnhöfen / Haltepunkten:	-
Bahnübergänge:	Gross (geteert): 3 Klein (Landstrasse): 2
Kreuzungsstellen / Doppelspurabschnitt:	-
Längere Brücken oder Straßenunterführungen:	-

Überführungen	Strasse nach Markschorngast BT7, Gefrees
Tunnel:	-
Diverses:	-

1.3.11 ID 9: Stammbach – Münchberg

Streckenlänge	9.9 km
Anzahl Gleise	2
Relevante topografische Eigenschaften der Teilstrecke	Gerade Strecken und grosse Kurven
Situation bei den Start- und Endbahnhöfen bezgl. Elektrifizierung	Stammbach (2 Gleise), nicht elektrifiziert Münchberg (4 Gleise), nicht elektrifiziert
Situation bei den restlichen Bahnhöfen / Haltepunkten:	-
Bahnübergänge:	Gross (geteert): 1
Kreuzungsstellen / Doppelspurabschnitt:	-
Längere Brücken oder Straßenunterführungen:	-
Überführungen	Strasse bei Pulschnitberg A9, Münchberg
Tunnel:	-
Diverses:	-

1.3.12 ID 10: Münchberg – Seulbitz

Streckenlänge	6.6 km
Anzahl Gleise	2
Relevante topografische Eigenschaften der Teilstrecke	Mehrheitlich gerade
Situation bei den Start- und Endbahnhöfen bezgl. Elektrifizierung	Münchberg (4 Gleise), nicht elektrifiziert Seulbitz (2 Gleise), nicht elektrifiziert
Situation bei den restlichen Bahnhöfen / Haltepunkten:	-
Bahnübergänge:	Gross (geteert): 1 Klein (Landstrasse): 1
Kreuzungsstellen / Doppelspurabschnitt:	Nach Münchberg, ca. 60m
Längere Brücken oder Straßenunterführungen:	-
Überführungen	Strasse nach Münchberg
Tunnel:	-
Diverses:	-

1.3.13 ID 11: Seulbitz – Oberkotzau

Streckenlänge	12.1 km
Anzahl Gleise	2
Relevante topografische Eigenschaften der Teilstrecke	Mehrheitlich gerade, einige grosse Kurven
Situation bei den Start- und Endbahnhöfen bezgl. Elektrifizierung	Seulbitz (2 Gleise), nicht elektrifiziert Oberkotzau (3 Gleise), 2 bis 2035 elektrifiziert
Situation bei den restlichen Bahnhöfen / Haltepunkten:	Förbau (2 Gleise) Schwarzenbach (Saale) (2 Gleise)
Bahnübergänge:	Gross (geteert): 3 Klein (Landstrasse): 1
Kreuzungsstellen / Doppelspurabschnitt:	Vor Schwarzenbach, ca. 50m
Längere Brücken oder Straßenunterführungen:	-
Überführungen	B289, Schwarzenbach Fussgängerübergang vor Oberkotzau Frankenbrücke, Oberkotzau
Tunnel:	-
Diverses:	-

1.3.14 ID 12: Rehau – Oberkotzau

Streckenlänge	8.2 km
Anzahl Gleise	1
Relevante topografische Eigenschaften der Teilstrecke	Einige Kurven
Situation bei den Start- und Endbahnhöfen bezgl. Elektrifizierung	Oberkotzau (3 Gleise), 2 bis 2035 elektrifiziert Rehau (2 Gleise), nicht elektrifiziert
Situation bei den restlichen Bahnhöfen / Haltepunkten:	Wurlitz (1 Gleis)
Bahnübergänge:	Gross (geteert): 2 Klein (Landstrasse): 1
Kreuzungsstellen / Doppelspurabschnitt:	-
Längere Brücken oder Straßenunterführungen:	-
Überführungen	Frankenbrücke, Oberkotzau Pfarrstrasse, Oberkotzau Strasse, Oberkotzau Gebäudeverbindung, Rehau
Tunnel:	-
Diverses:	-

1.3.15 ID 13: Hof – Rothenbürg

Streckenlänge	12.0 km
Anzahl Gleise	1
Relevante topografische Eigenschaften der Teilstrecke	Viele Kurven
Situation bei den Start- und Endbahnhöfen bezgl. Elektrifizierung	Hof Hbf (19 Gleise), Ab 2035 elektrifiziert Rothenbürg (1 Gleis), nicht elektrifiziert
Situation bei den restlichen Bahnhöfen / Haltepunkten:	Hof-Neuhof (2 Gleise) Köditz (1 Gleis) Stegenwaldhaus (1 Gleis)
Bahnübergänge:	Gross (geteert): 2 Klein (Landstrasse): 3 Fussgänger: 2
Kreuzungsstellen / Doppelspurabschnitt:	-
Längere Brücken oder Straßenunterführungen:	Brücke über Hans-Bröckler-Strasse, Hof, ca 50m
Überführungen	Luftsteg, Hof B2, Hof B173, Hof Strasse vor Stegenwaldhaus A9, vor Stegenwaldhaus
Tunnel:	-
Diverses:	-

1.3.16 ID 14: Neukirchen – Freihung

Streckenlänge	29.5 km
Anzahl Gleise	1
Relevante topografische Eigenschaften der Teilstrecke	Mehrheitlich gerade
Situation bei den Start- und Endbahnhöfen bezgl. Elektrifizierung	Neukirchen b. Sulzbach-Rosenberg 5 Gleise, Ab 2040 elektrifiziert Freihung (2 Gleise), nicht elektrifiziert
Situation bei den restlichen Bahnhöfen / Haltepunkten:	Vilseck (3 Gleise)
Bahnübergänge:	Gross (geteert): 9
Kreuzungsstellen / Doppelspurabschnitt:	Doppelspur bei Forstthof, ca. 850m Doppelspur um Bhf Vilseck, ca. 400m
Längere Brücken oder Straßenunterführungen:	-
Überführungen	Landstrasse nach Neukirchen Strasse nach Neukirchen Strasse bei Lockenricht Strasse bei Fromberg 85, Sulzbach Strasse, bei Forstthof

Tunnel:	-
Diverses:	Zwischen Vilseck und Freihung entlang Truppenübungsplatz Grafenwöhr

1.3.17 ID 15: Freihung – Weiden

Streckenlänge	22.1 km
Anzahl Gleise	1
Relevante topografische Eigenschaften der Teilstrecke	Mehrheitlich gerade
Situation bei den Start- und Endbahnhöfen bezgl. Elektrifizierung	Freihung (2 Gleise), nicht elektrifiziert Weiden (Oberpf) 10 Gleise, Ab 2040 elektrifiziert
Situation bei den restlichen Bahnhöfen / Haltepunkten:	Thansüß (1 Gleis) Röthenbach (Oberpfalz) (1 Gleis) Weiherhammer (3 Gleise)
Bahnübergänge:	Gross (geteert): 4 Klein (Landstrasse):4 Fussgängerübergang: 1
Kreuzungsstellen / Doppelspurabschnitt:	Doppelspur um Bhf Weiherhammer, ca. 400m
Längere Brücken oder Straßenunterführungen:	Brücke über Hammerweiher, vor Röthenbach ca. 55m Brücke über Haidenhaab, nach Weiherhammer ca. 140m
Überführungen	299, nach Freihung Mauerhofweg, nach Thansüß Strasse vor Weiherhammer Rothenstädter Strasse, nach Etzenricht Regensburger Strasse (St2657), bei Weiden St 2238, bei Weiden A93, bei Weiden
Tunnel:	-
Diverses:	-

1.3.18 ID 16: Altenstadt – Neustadt an der Waldnaab

Streckenlänge	1.020
Anzahl Gleise	1
Relevante topografische Eigenschaften der Teilstrecke	S-förmige Kurve und Brücke (180m)
Situation bei den Start- und Endbahnhöfen bezgl. Elektrifizierung	Weiche 350m nach Altenstadt (Waldnaab); Anbindung an den Ostkorridor, welcher 2040 elektrifiziert wird. Keine Elektrifizierung in Neustadt a.d Waldnaab
Situation bei den restlichen Bahnhöfen / Haltepunkten:	-
Bahnübergänge:	-
Kreuzungsstellen / Doppelspurabschnitt:	-
Längere Brücken oder Straßenunterführungen:	180m über Waldnaab und Theisseilerstrasse
Überführungen	-
Tunnel:	-
Diverses:	-

ANHANG A2 – Ergebnisse zu den Netzsimulationen

Zum Schlussbericht der Machbarkeitsstudie Oberfranken-Achse (ECH-541.01-102 Version 1.0)

1 Ergebnisse zum Zeithorizont 2035

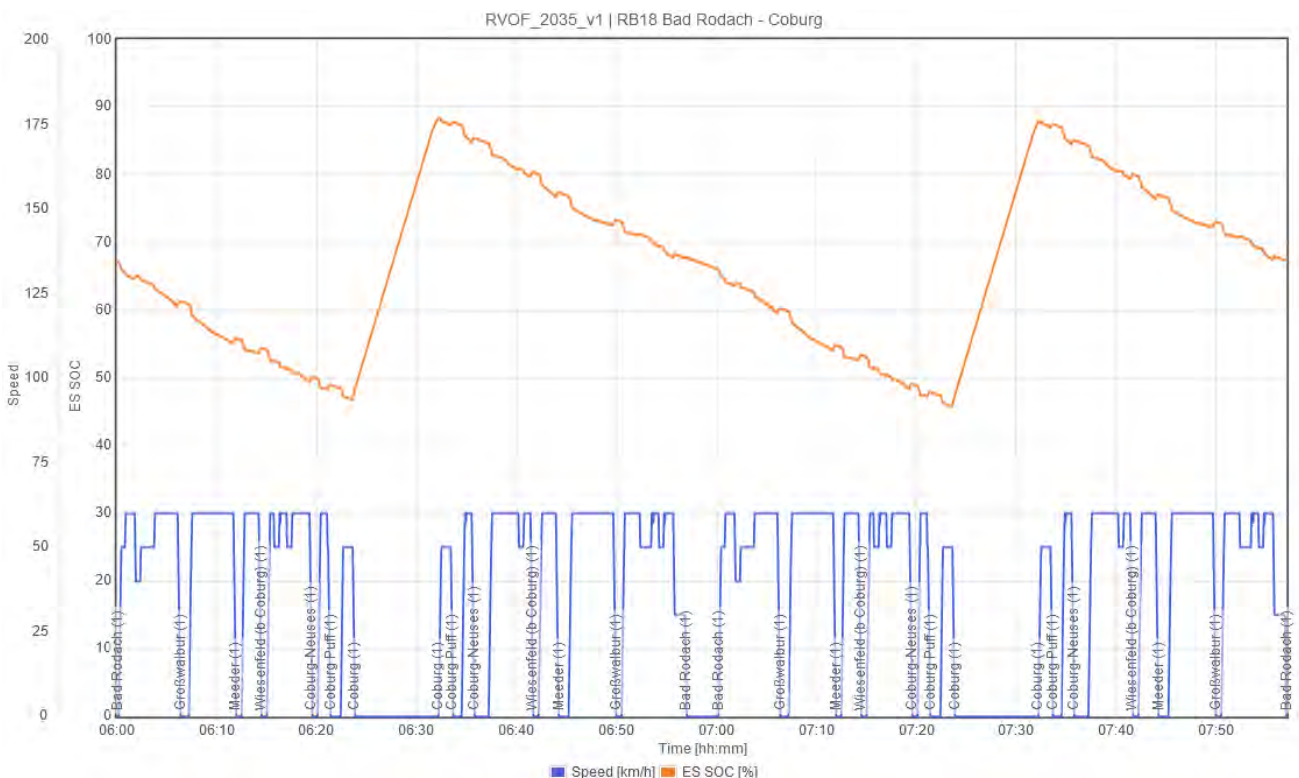
1.1 Batterieladung entlang der Linie für die Maßnahmenpakete im Regionalverkehr Oberfranken zum Zeithorizont 2035

Basierend auf den Annahmen zu Reichweiten und Ladezeiten wurden pro Linie im Regionalverkehr Oberfranken drei mögliche Maßnahmenpakete für den Zeithorizont 2035 definiert und simulatorisch untersucht (siehe Kapitel 8.2 im Schlussbericht ECH-541.01-102). Wie in Kapitel 7.3.3 im Schlussbericht beschrieben, darf grundsätzlich eine Energie-Reserve von 30 % SoC (State of Charge) nicht unterschritten werden, dies als sogenannter Betriebspuffer. Auch gilt das Kriterium, dass die Energiebilanz nach einem Umlauf nicht negativ sein darf, da sich ansonsten der Speicher über mehrere Umläufe kontinuierlich entlädt.

Von den Maßnahmen, welche hinsichtlich dieser beiden Kriterien als ausreichend bewertet werden können, ist für die hinsichtlich Ladebilanz schlechteste Variante der Verlauf des Energieinhalts über mehrere Umläufe nachfolgend dargestellt.

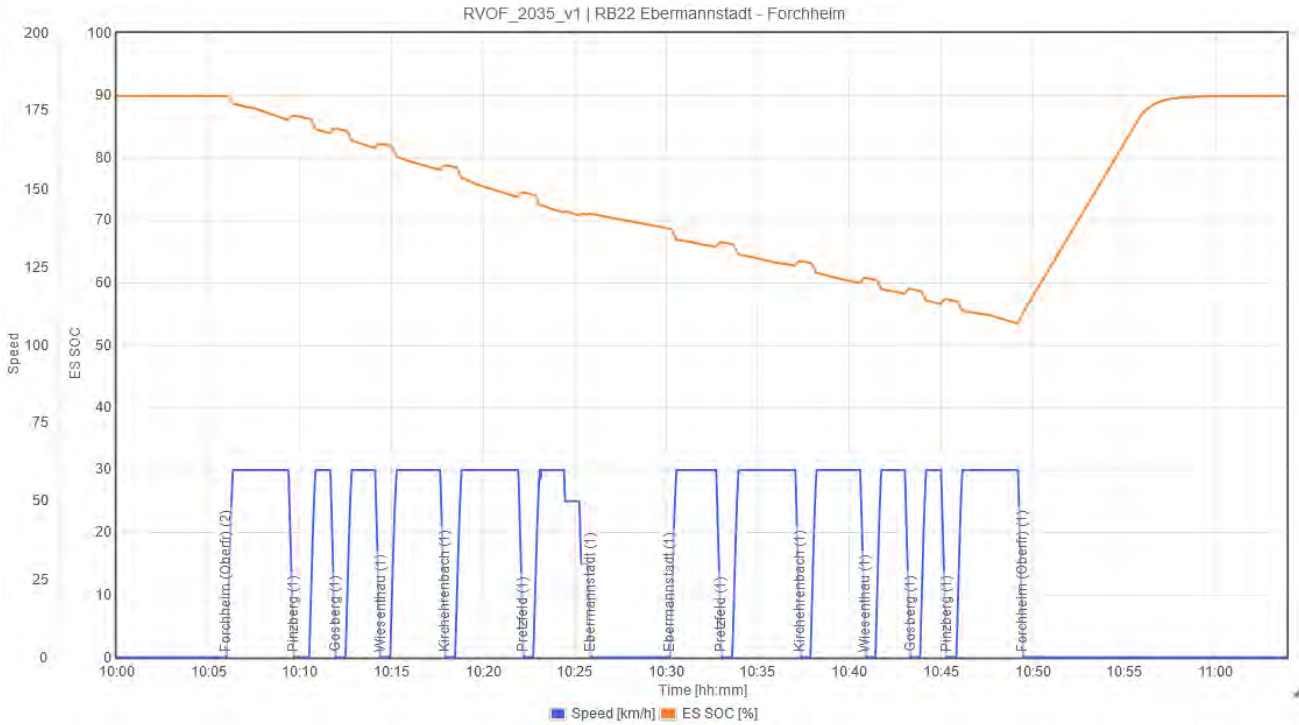
1.1.1 RB 18 Bad Rodach – Coburg

RB 18 Bad Rodach – Coburg, simuliert im Zustand 2035 ohne zusätzliche Maßnahmen (Maßnahmepaket 1).



1.1.2 RB 22 Forchheim – Ebermannstadt

RB 22 Forchheim – Ebermannstadt, simuliert im Zustand 2035 mit Elektrifizierung des Gleis 8 in Forchheim (Maßnahmepaket 1).

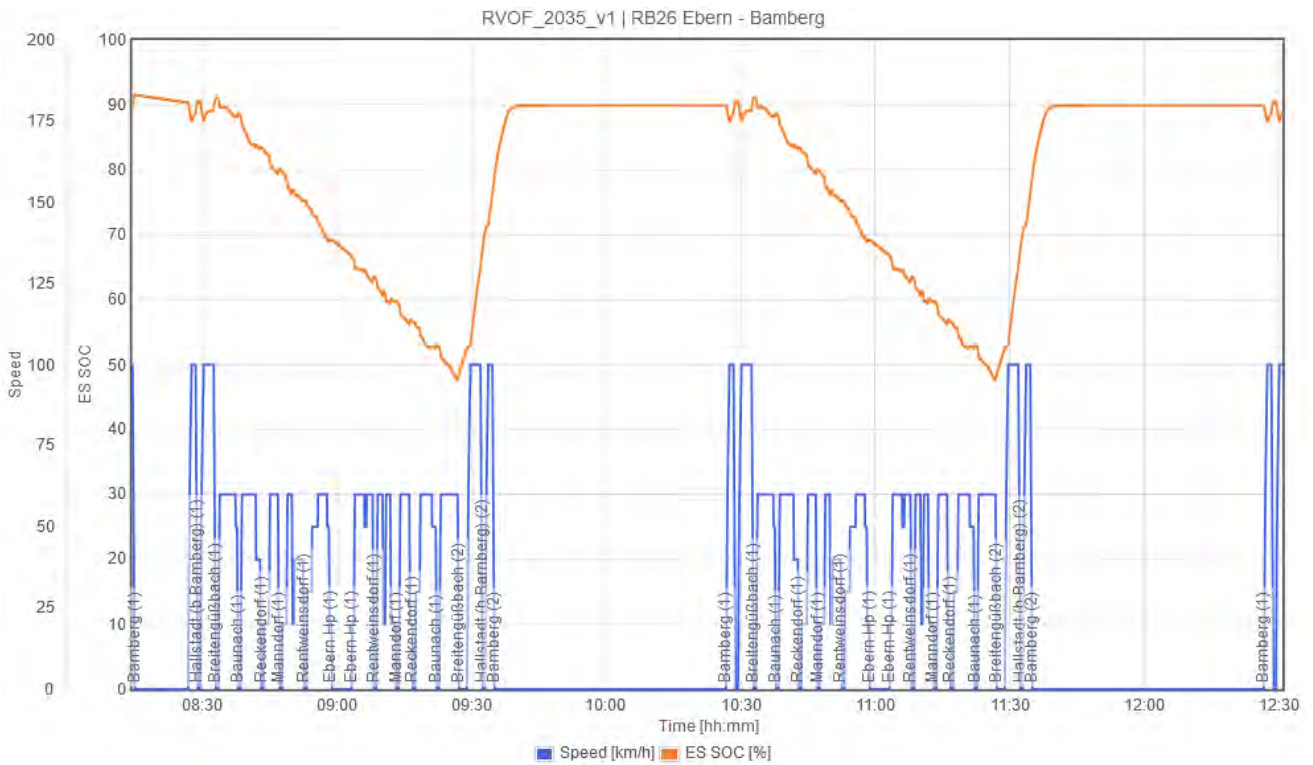


1.1.3 RB 22 / RB 26 HVZ Ebermannstadt – Bamberg – Ebern

RB 22 / RB 26 HVZ Ebermannstadt – Bamberg – Ebern im Übergang auf RB 26 Bamberg – Ebern, simuliert im Zustand 2035 ohne zusätzliche Maßnahmen (Maßnahmepaket 1).

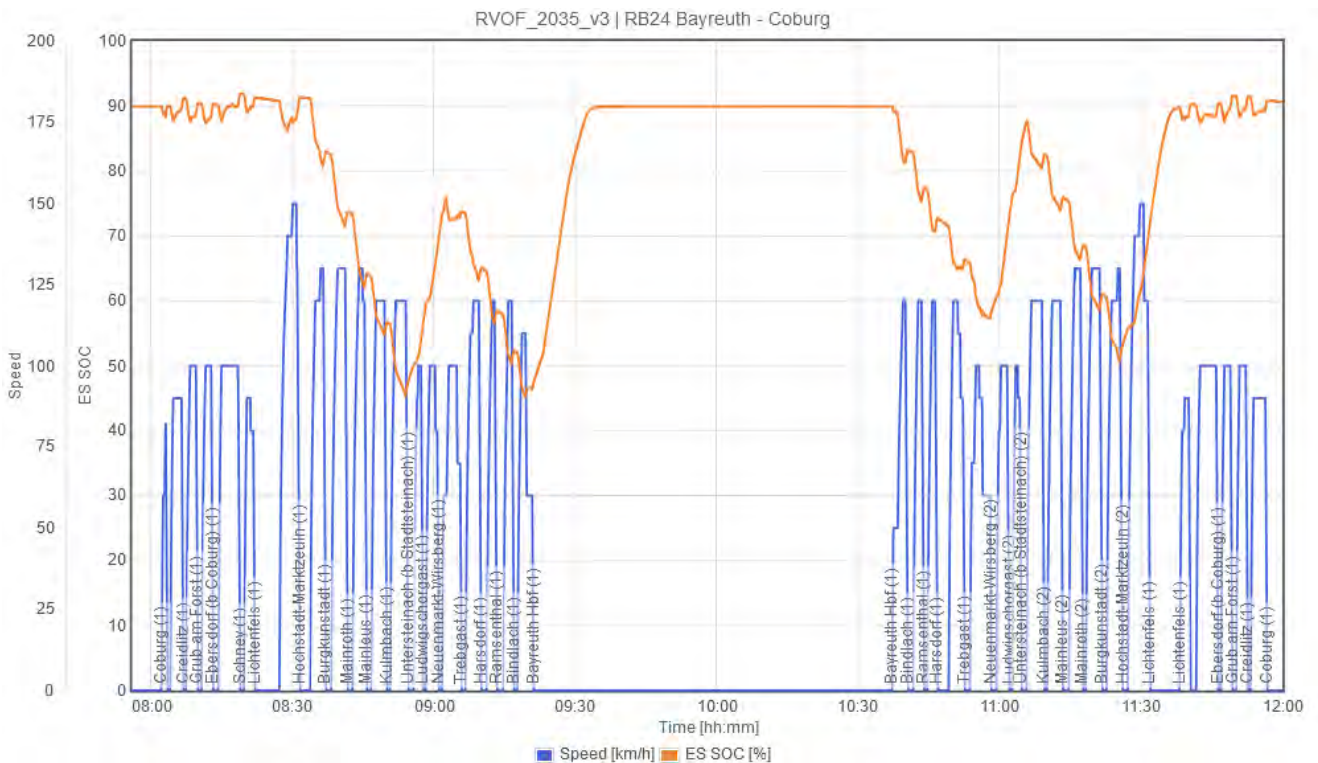
Machbarkeitsstudie Oberfranken-Achse
Anhang 2 Ergebnisse Netzsimulationen

ECH-541.01-104
Version 1.0



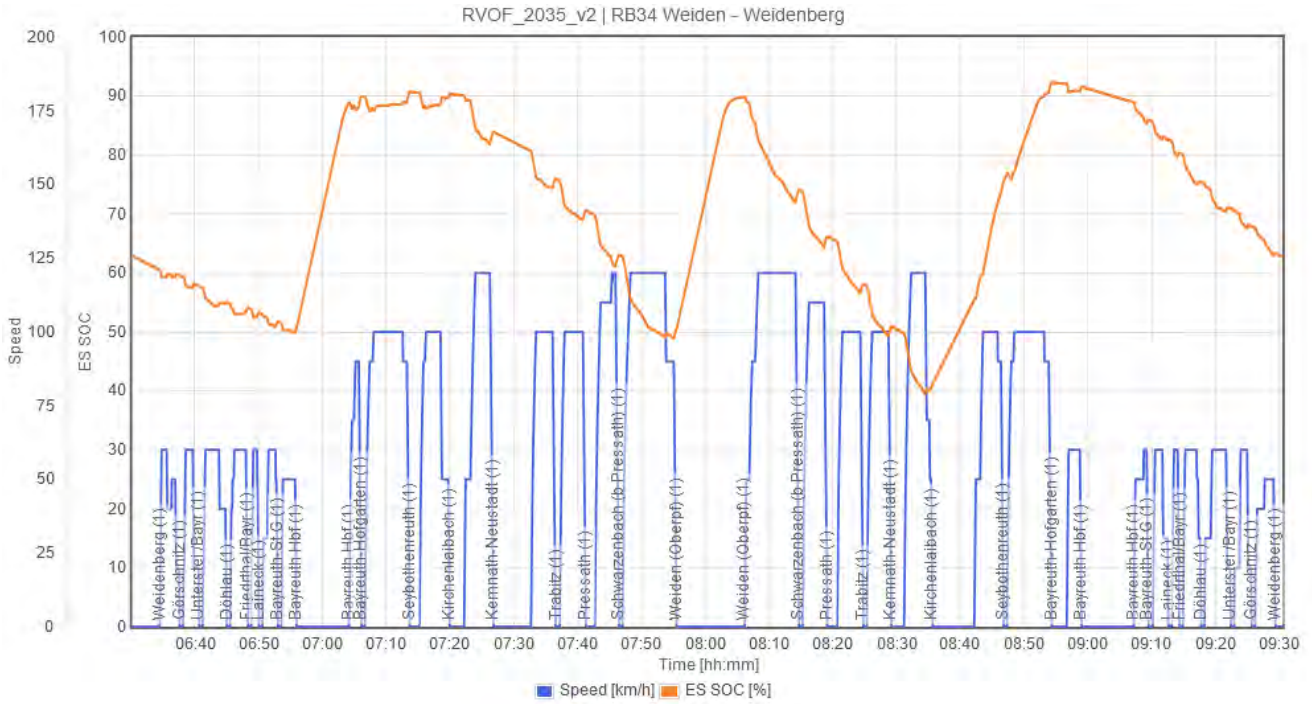
1.1.4 RB 24 Coburg – Bayreuth

RB 24 Coburg – Bayreuth, simuliert im Zustand 2035. Zusätzlich elektrifiziert sind die Strecke Untersteinach – Neuenmarkt-Wirsberg, sowie der Bf Bayreuth (Maßnahmepaket 3).



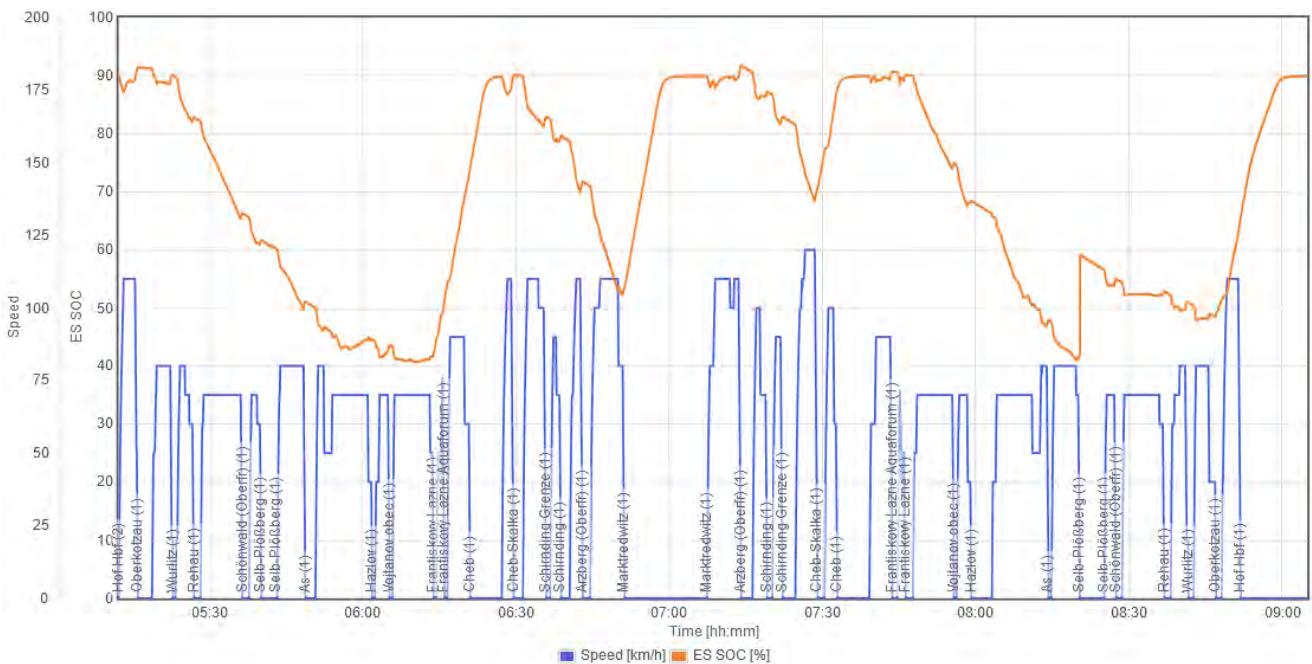
1.1.5 RB 34 Weidenberg – Weiden

RB 34 Weidenberg – Weiden simuliert im Zustand 2035. Zusätzlich elektrifiziert sind die Strecke Bayreuth – Kirchenlaibach, sowie der Bf Weiden (Maßnahmepaket 2).



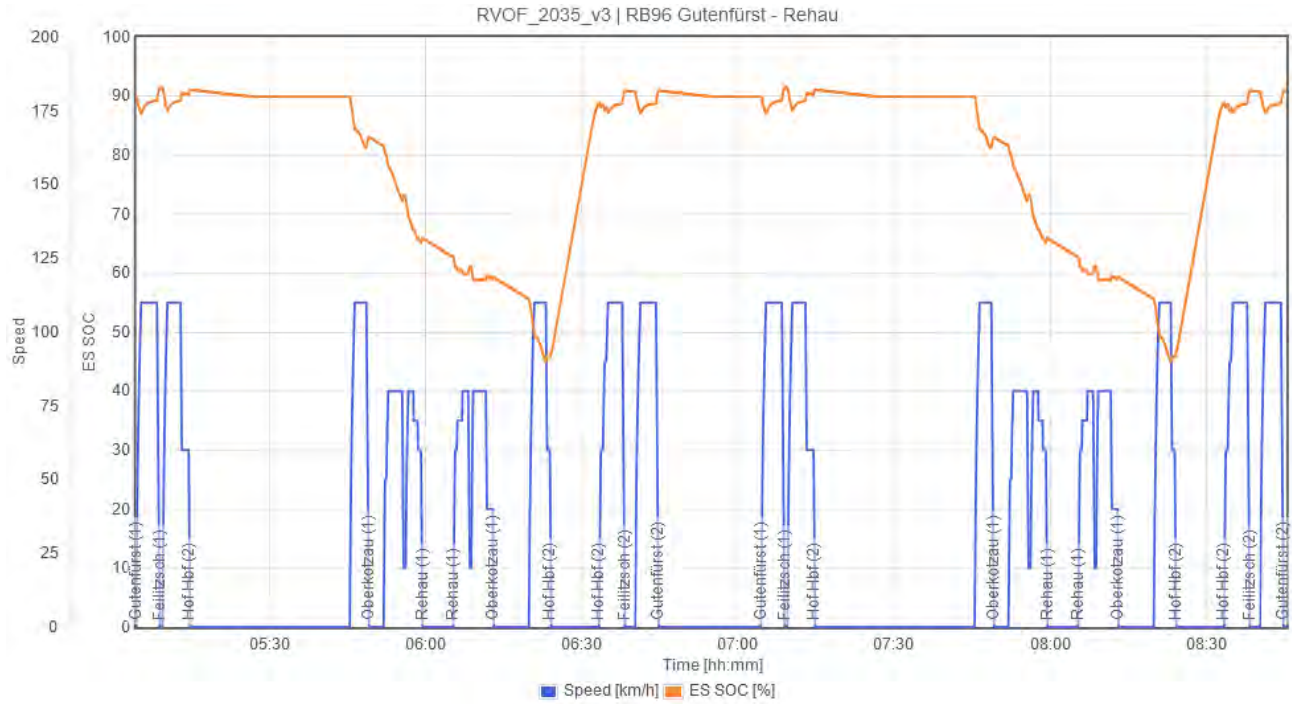
1.1.6 RB 95 Hof – Cheb (CZ) – Marktredwitz

RB 95 Hof – Cheb (CZ) – Marktredwitz, simuliert im Zustand 2035 mit Elektrifizierung des Gleis 2 im Bf Oberkotzau (Maßnahmepaket 1).



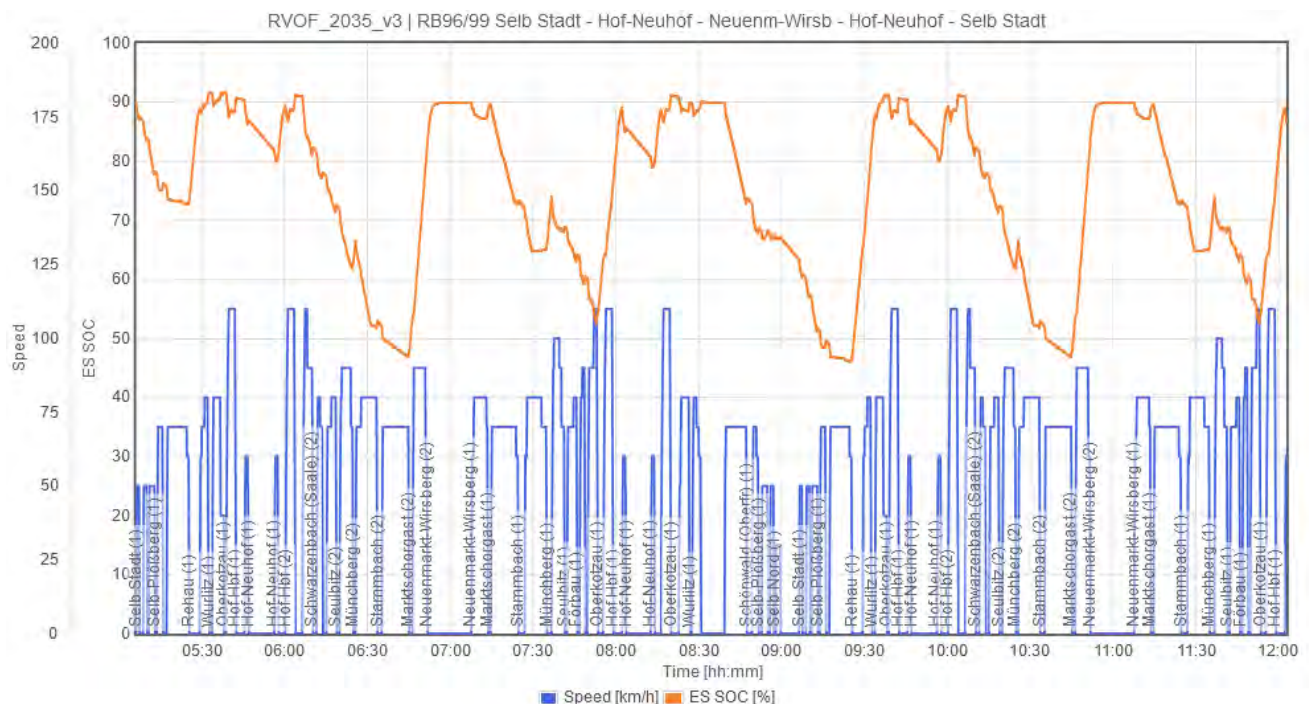
1.1.7 RB 96 HVZ Gutenfürst – Hof Hbf – Rehau

RB 96 HVZ Gutenfürst – Hof Hbf – Rehau, simuliert im Zustand 2035 ohne zusätzliche Maßnahmen (Maßnahmepaket 3).



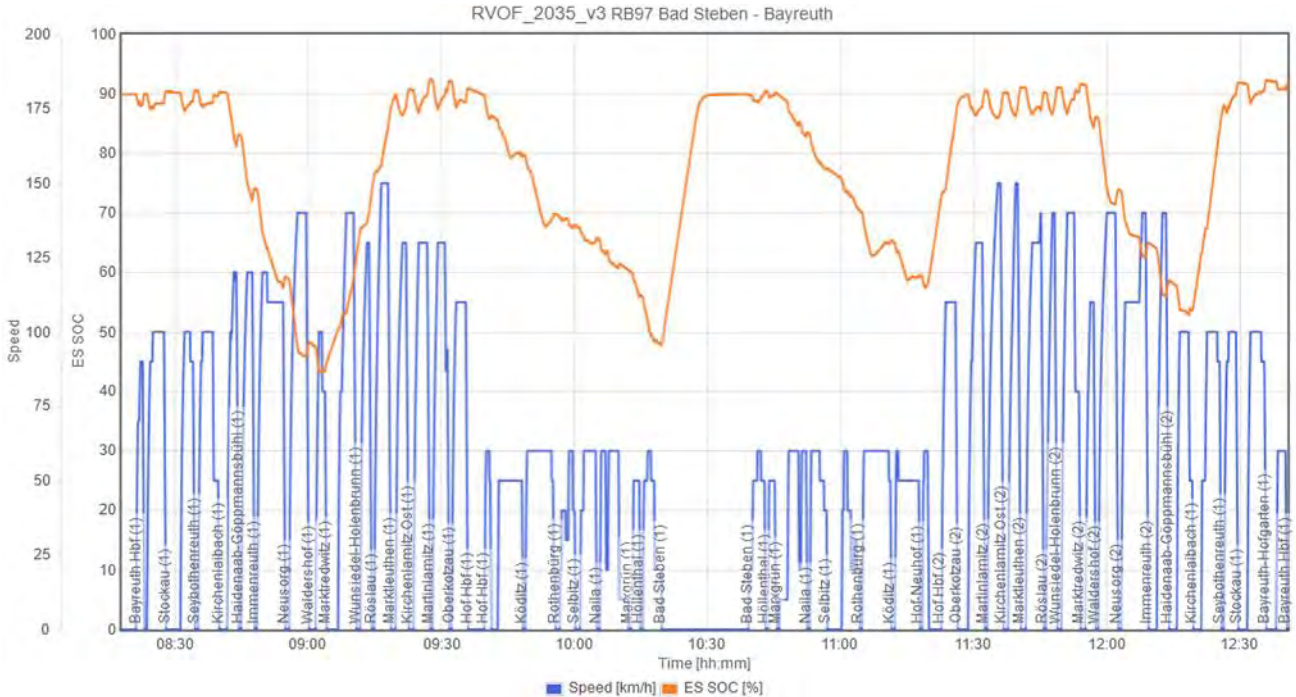
1.1.8 RB 96 / RB 99 Hof-Neuhof – Selb Stadt – Hof-Neuhof – Neuenmarkt-Wirsberg

RB 96 / RB 99 Hof-Neuhof – Selb Stadt – Hof-Neuhof – Neuenmarkt-Wirsberg – Hof-Neuhof, simuliert im Zustand 2035. Zusätzlich elektrifiziert sind die Strecken Neuenmarkt-Wirsberg – Marktschorgast und Oberkotzau – Rehau, sowie der Bhf Münchberg (Maßnahmepaket 3).



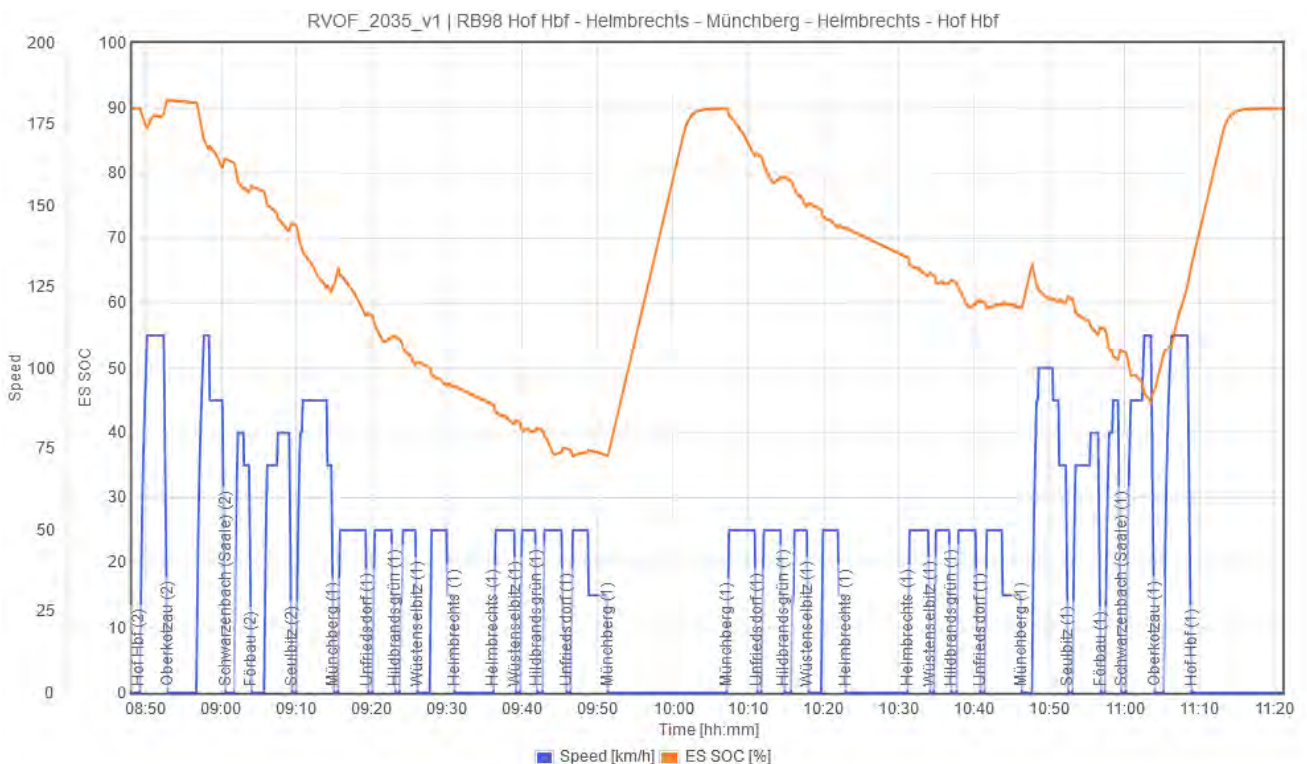
1.1.9 RB 97 Bayreuth – Marktredwitz – Bad Steben

RB 97 Bayreuth – Marktredwitz – Bad Steben, simuliert im Zustand 2035. Zusätzlich elektrifiziert sind die Strecke Bayreuth – Kirchenlaibach, sowie der Bhf Bad Steben (Maßnahmepaket 3).



1.1.10 RB 98 Helmbrechts – Hof

RB 98 Helmbrechts – Hof, simuliert im Zustand 2035 mit Elektrifizierung des Bhf Münchberg (Maßnahmepaket 1).



2 Ergebnisse zum Zeithorizont 2040

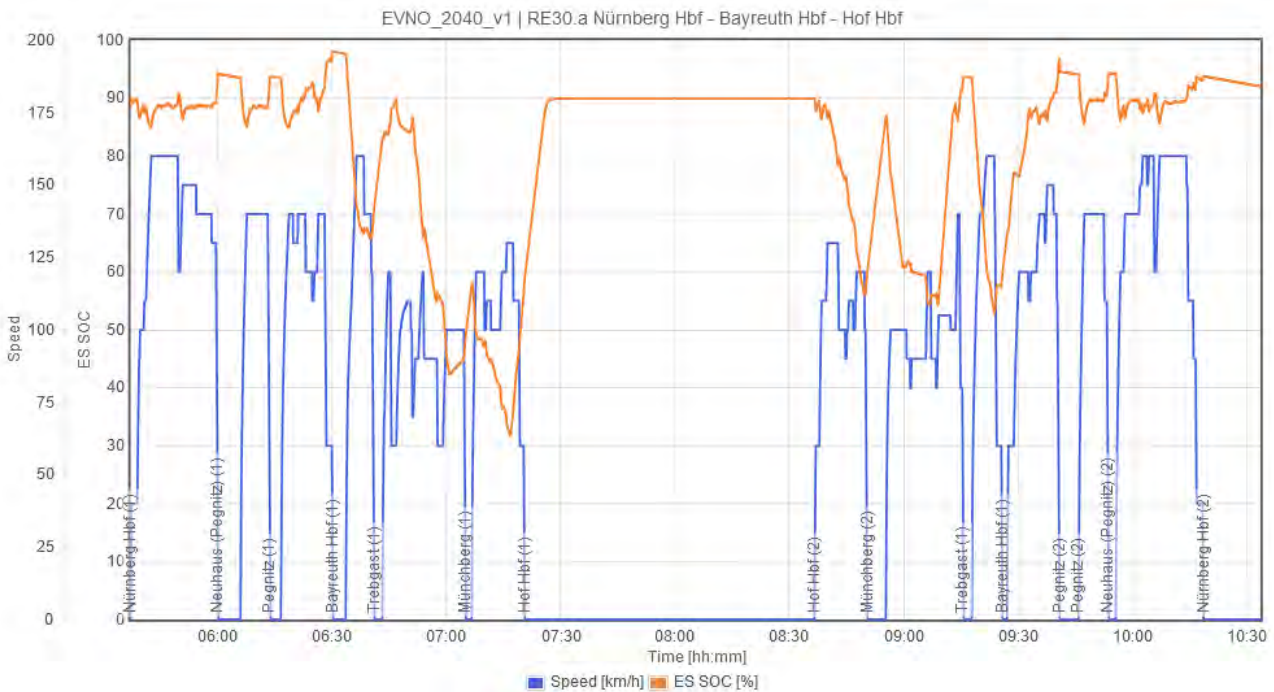
2.1 Batterieladung entlang der Linie für die Maßnahmenpakete im Expressverkehr Nordostbayern vom Zeithorizont 2040

Basierend auf den Annahmen zu Reichweiten und Ladezeiten wurden pro Linie im Expressverkehr Nordostbayern drei mögliche Maßnahmenpakete für den Zeithorizont 2040 definiert und simulatorisch untersucht (siehe Kapitel 9.2 im Schlussbericht ECH-541.01-102). Wie in Kapitel 7.3.3 im Schlussbericht beschrieben, darf grundsätzlich eine Energie-Reserve von 30 % SoC (State of Charge) nicht unterschritten werden, dies als sogenannter Betriebspuffer. Auch gilt das Kriterium, dass die Energiebilanz nach einem Umlauf nicht negativ sein darf, da sich ansonsten der Speicher über mehrere Umläufe kontinuierlich entlädt.

Von den Maßnahmen, welche hinsichtlich dieser beiden Kriterien als ausreichend bewertet werden können, ist für die hinsichtlich Ladebilanz schlechteste Variante der Verlauf des Energieinhalts über mehrere Umläufe nachfolgend dargestellt. Zudem sind nachfolgend nur diejenigen Linien dargestellt, welche ab 2040 (mit den unterstellten Elektrifizierungen) nicht über 100 % Oberleitung verfügen und dementsprechend teilweise im Batteriemodus verkehren.

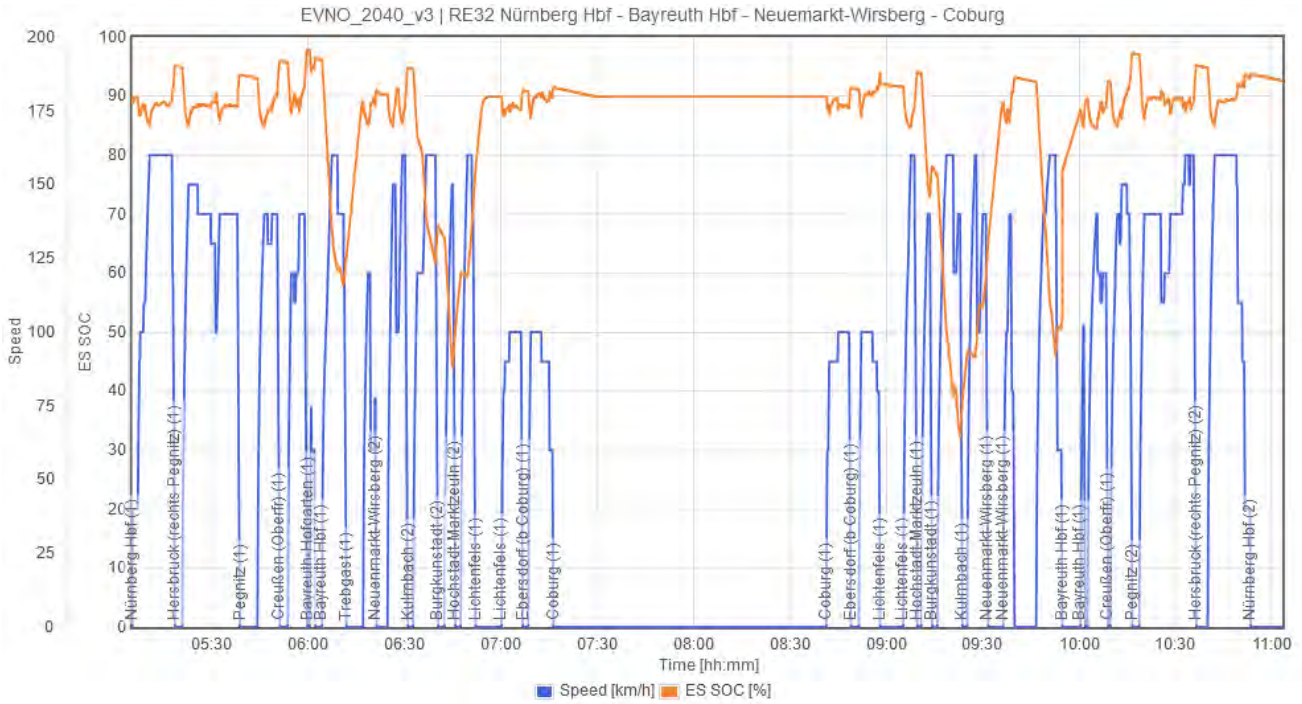
2.1.1 RE 30a Nürnberg – Hof

RE 30a Nürnberg – Hof, simuliert im Zeithorizont 2040 mit Elektrifizierung Trebgast – Marktschorgast und Bahnhof Münchberg (Maßnahmepaket 1).



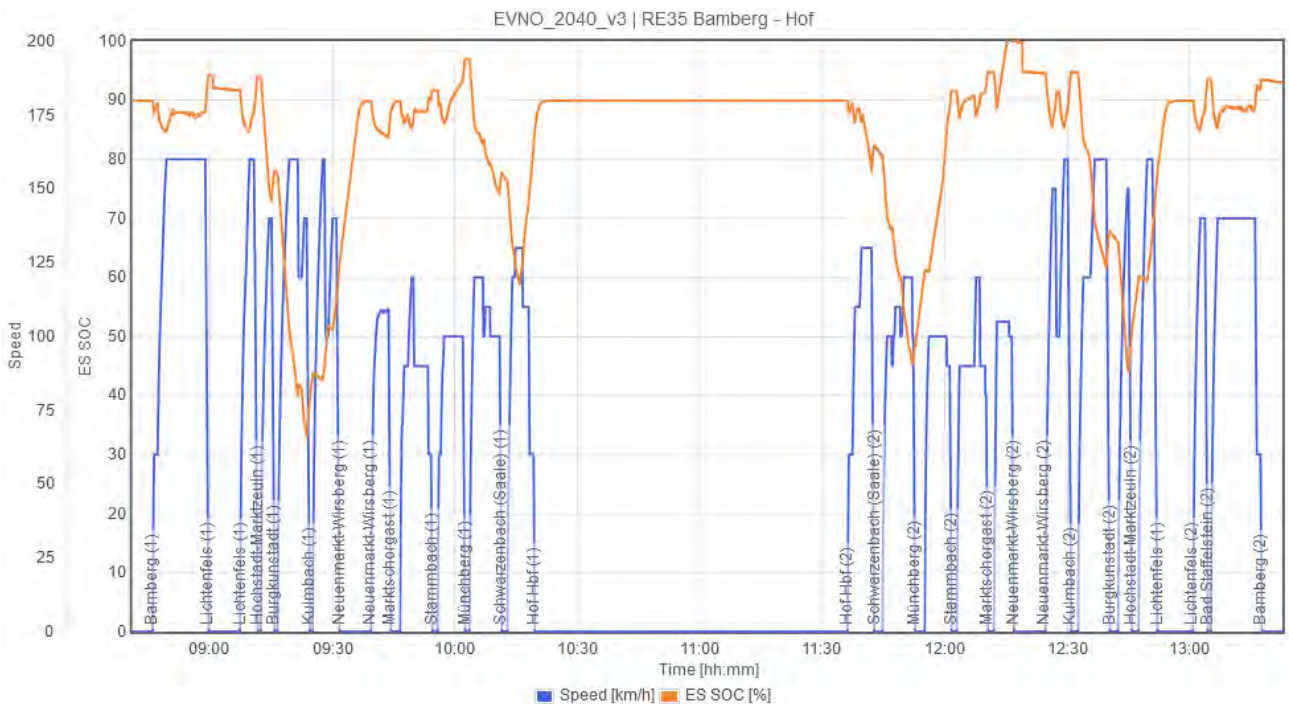
2.1.2 RE 32 Nürnberg – Coburg

RE 32 Nürnberg – Bayreuth – Coburg, simuliert im Zeithorizont 2040 mit Elektrifizierung Kulmbach – Trebgast (Maßnahmepaket 3).



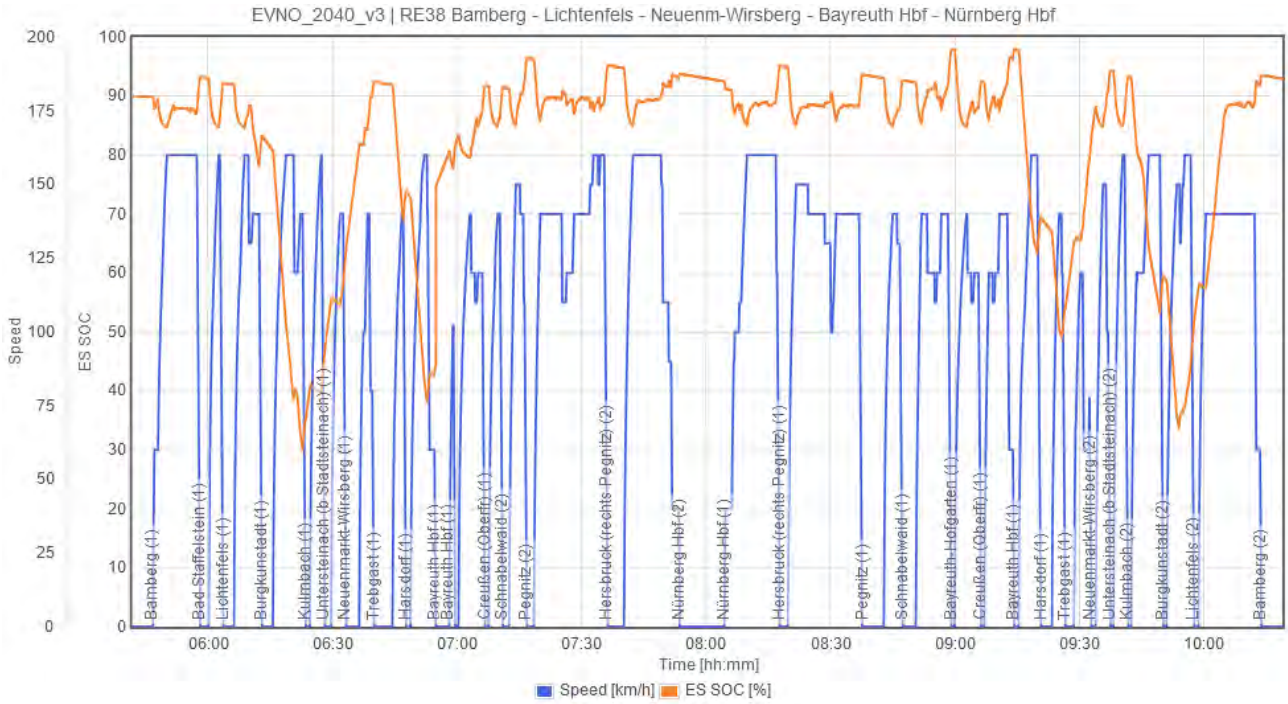
2.1.3 RE 35 Bamberg – Hof

RE 38 Bamberg - Hof, simuliert im Zeithorizont 2040 mit Elektrifizierung Kulmbach – Münchberg (Maßnahmepaket 3).



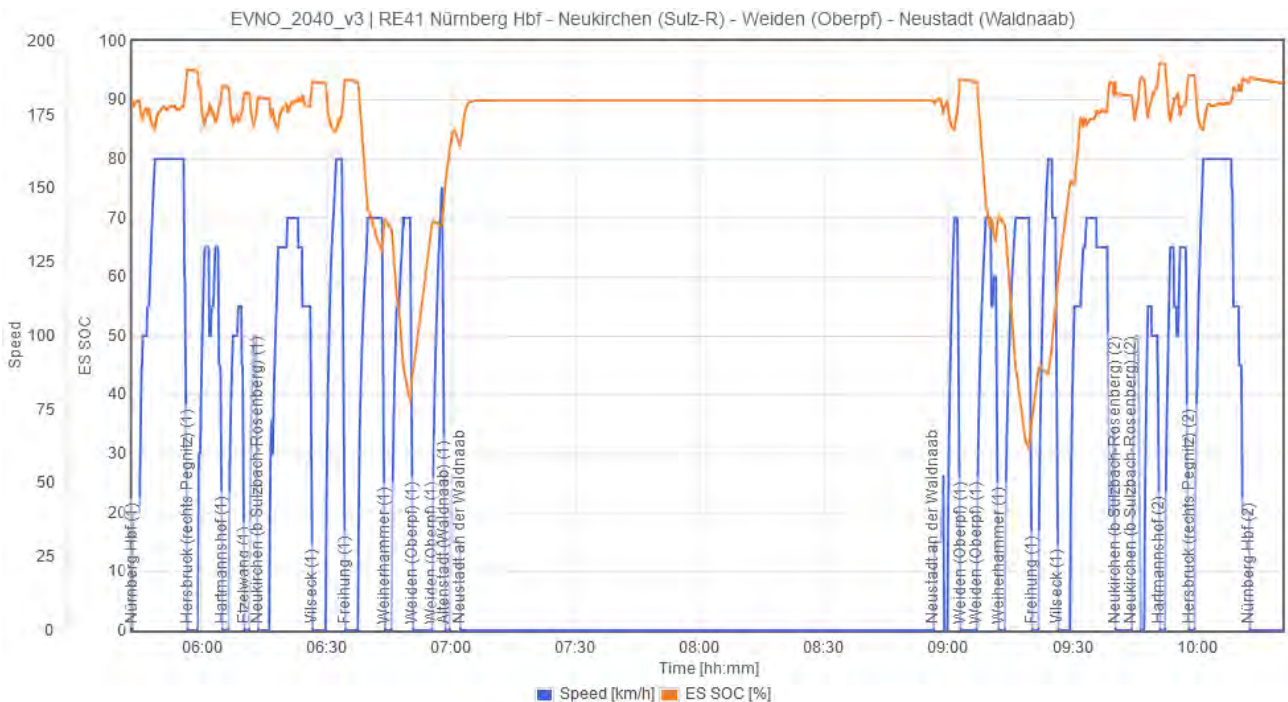
2.1.4 RE 38 Nürnberg – Bamberg

RE 38 Nürnberg – Bayreuth – Bamberg, simuliert im Zeithorizont 2040 mit Elektrifizierung Kulmbach - Trebgast (Maßnahmepaket 3).



2.1.5 RE 41 Nürnberg – Neukirchen – Neustadt an der Waldnaab

RE 41 Nürnberg – Neukirchen – Neustadt an der Waldnaab, simuliert im Zeithorizont 2040 mit Elektrifizierung Neukirchen – Freihung und einer Ladstation in Neustadt (Maßnahmepaket 3).



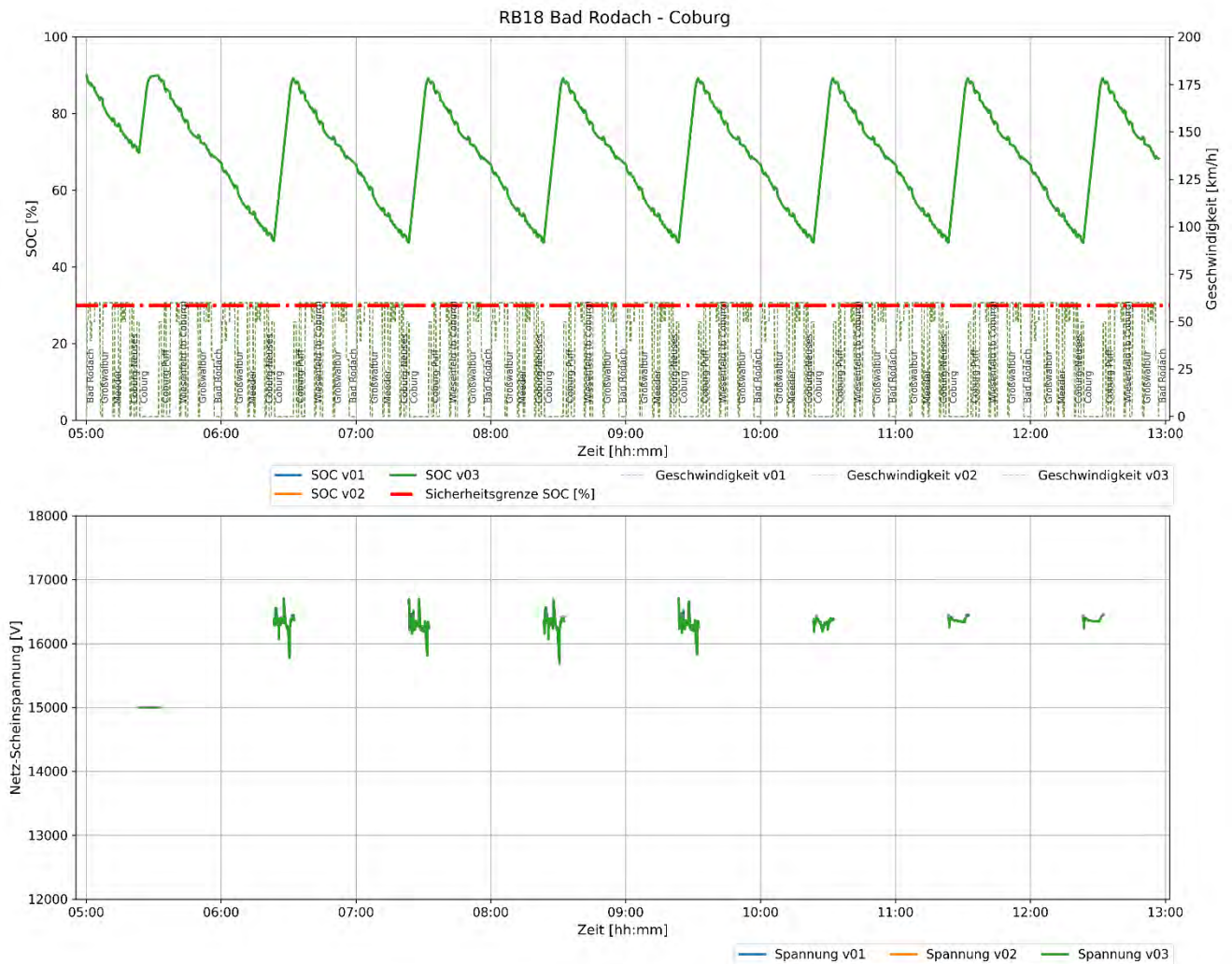
2.2 Batterieladung, Geschwindigkeit und Spannungshaltung entlang der Linie für die Arbeitsvarianten 1-3

Die nachfolgenden Grafiken zeigen pro Linie / Fahrzeugumlauf für die Arbeitsvarianten 1-3 (gemäß Kapitel 9.4 aus dem Schlussbericht ECH-541.01-102) die Batterieladung entlang der Strecke, das gefahrene Geschwindigkeitsprofil sowie die Spannung am Stromabnehmer (Scheinspannung).

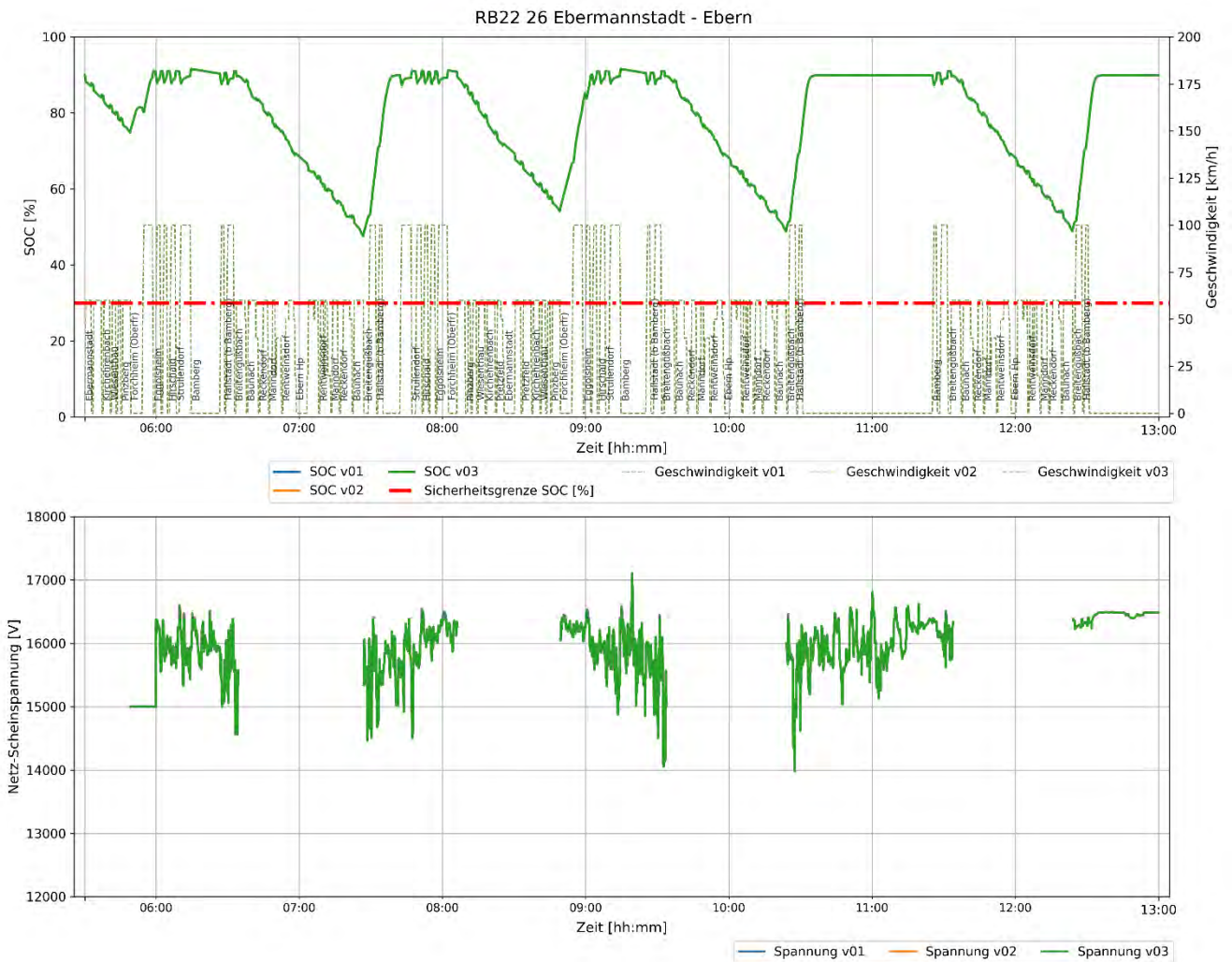
Erläuterungen zu den dargestellten Grafiken:

- In den Simulationen wurde das elektrische Netz um 06:00 Uhr zugeschaltet. Vorher verkehren die Züge unter Oberleitung mit Nennspannung 15 kV.
- Unterbrüche im Spannungsverlauf: keine Oberleitung vorhanden
- Sprünge im Spannungsverlauf sind durch Kompositionswechsel oder vor / nach dem Ladevorgang bei den Ladestationen zu erklären. Diese sind vernachlässigbar.
- Die minimale zulässige Batterieladung von 30 % SOC (siehe Kapitel 7.3.3 im Schlussbericht) ist als rote strichpunktierte Linie eingezeichnet

2.2.1 RB 18 Coburg – Bad Rodach



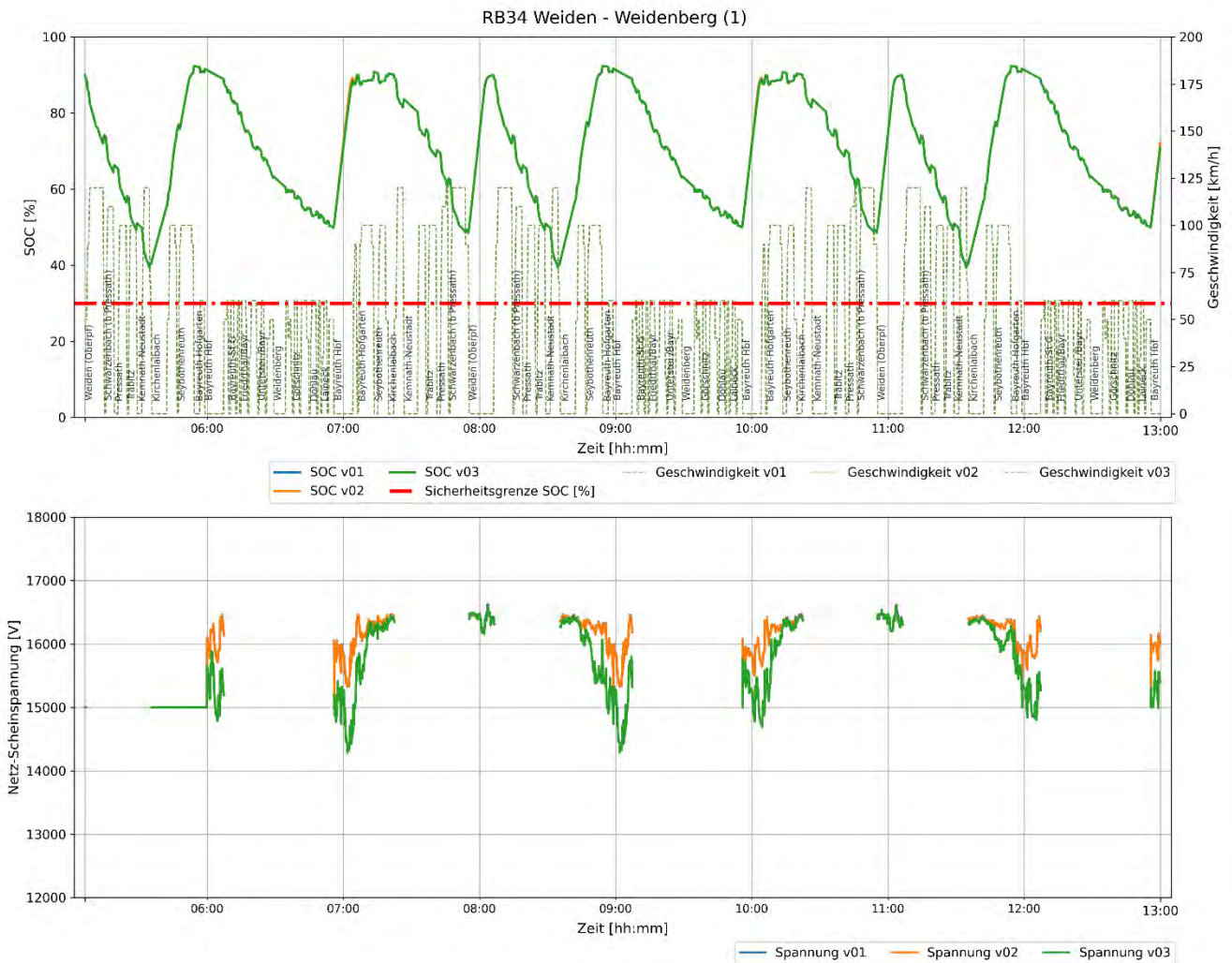
2.2.2 RB 22 / RB 26 HVZ Ebermannstadt – Bamberg – Ebern



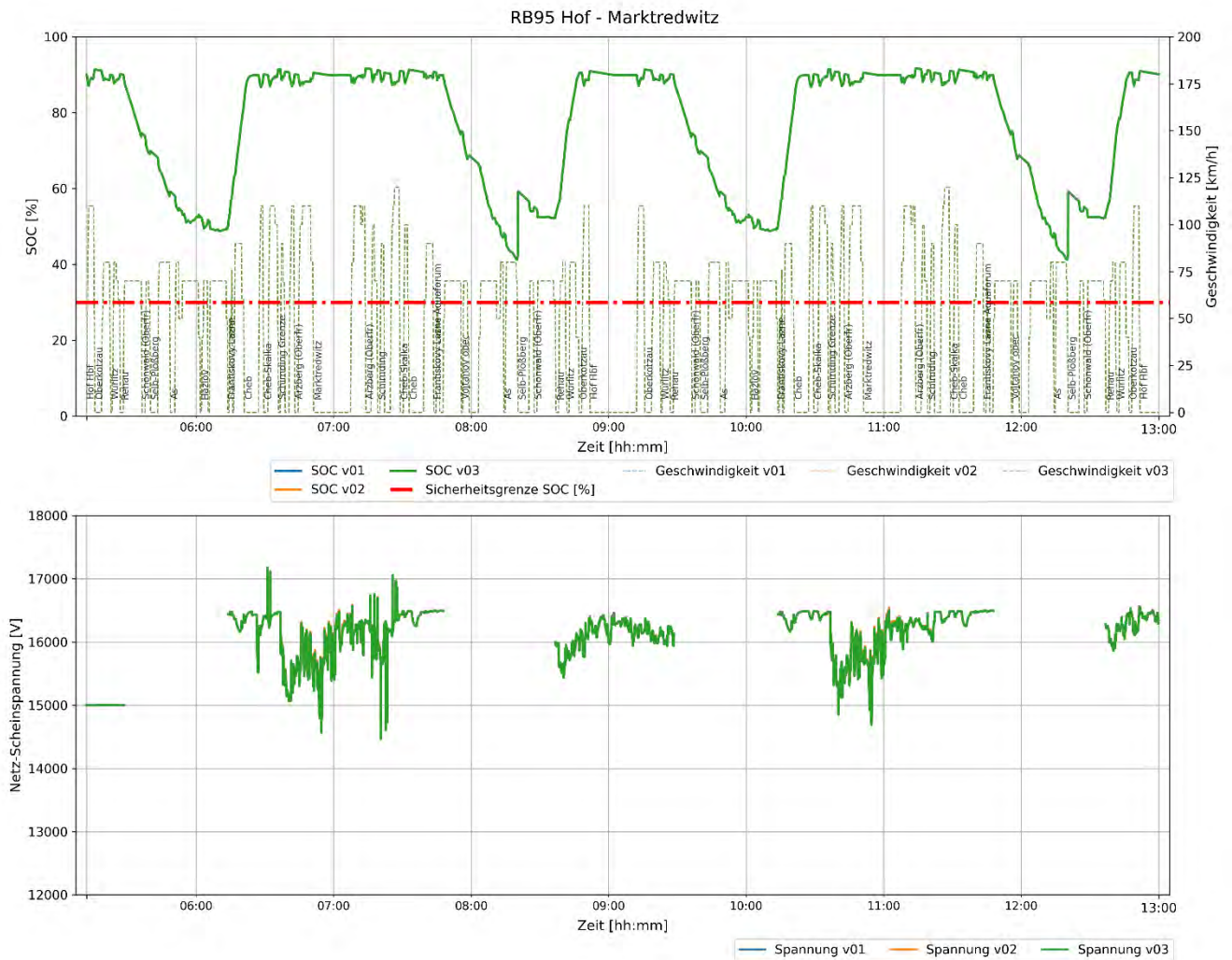
2.2.3 RB 24 Coburg – Bayreuth



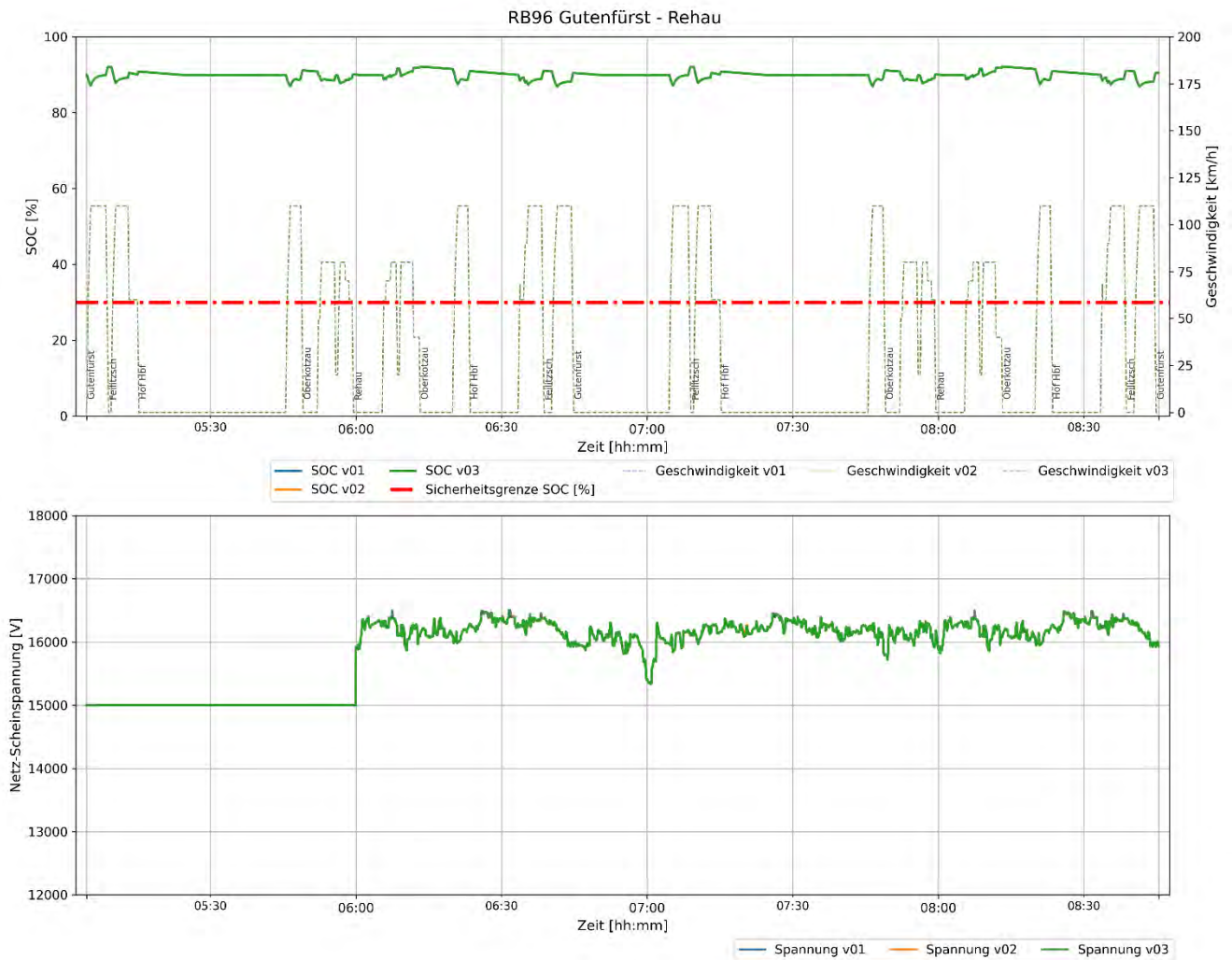
2.2.4 RB 34 Weidenberg – Weiden



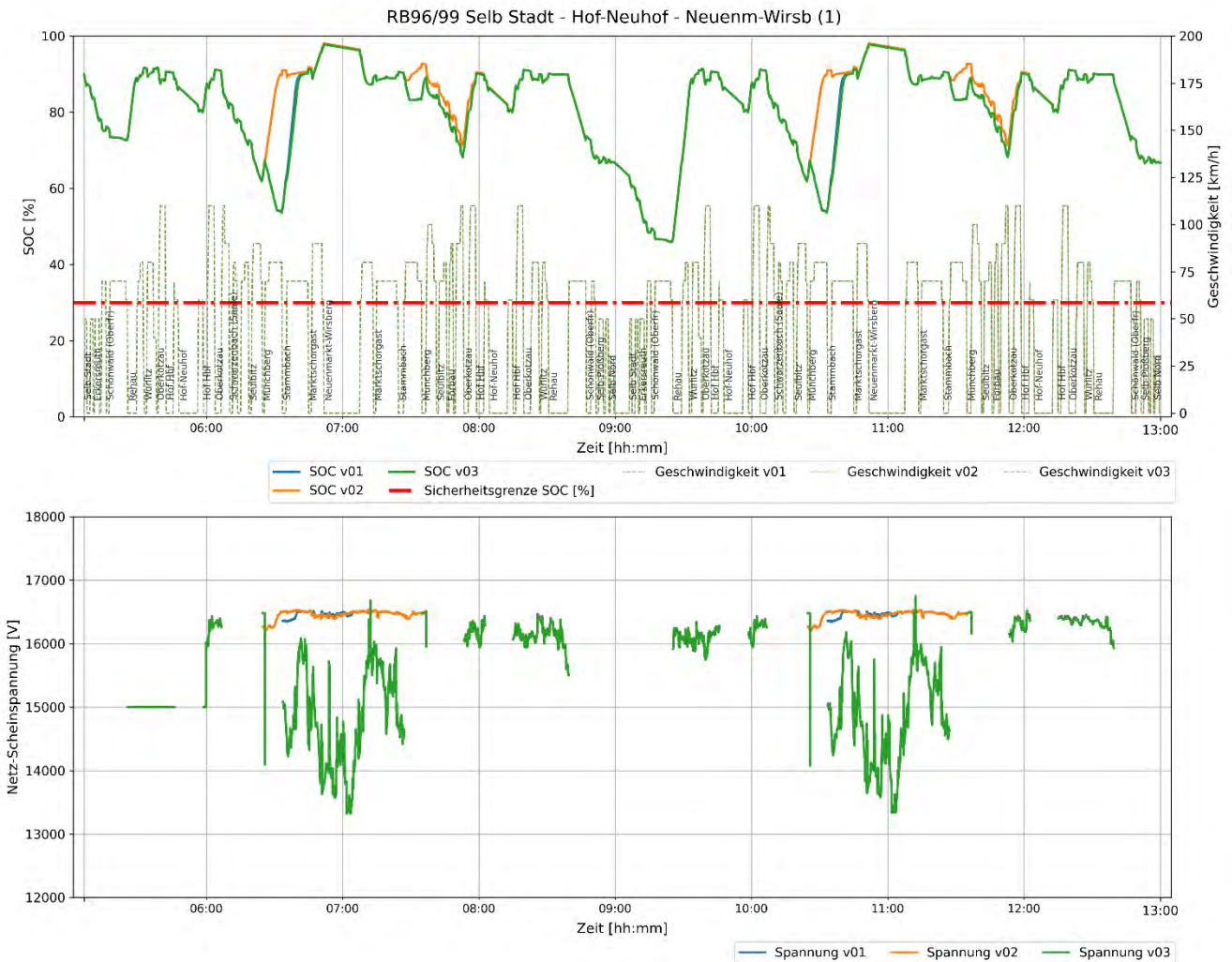
2.2.5 RB 95 Hof – Cheb (CZ) – Marktredwitz



2.2.6 RB 96 HVZ Gutenfürst – Hof Hbf – Rehau



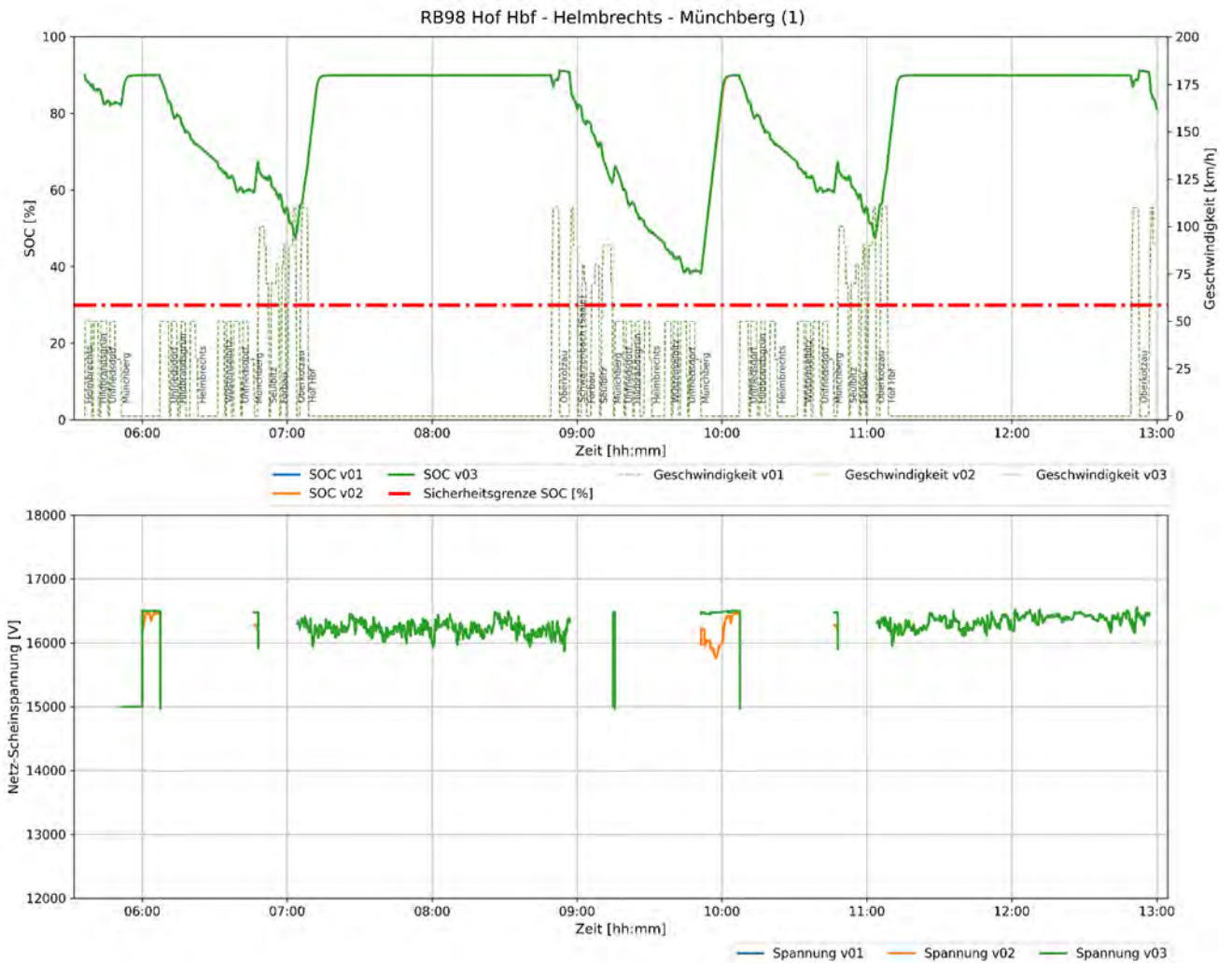
2.2.7 RB 96 / RB 99 Hof-Neuhof – Selb Stadt – Hof-Neuhof – Neuenmarkt-Wirsberg – Hof-Neuhof



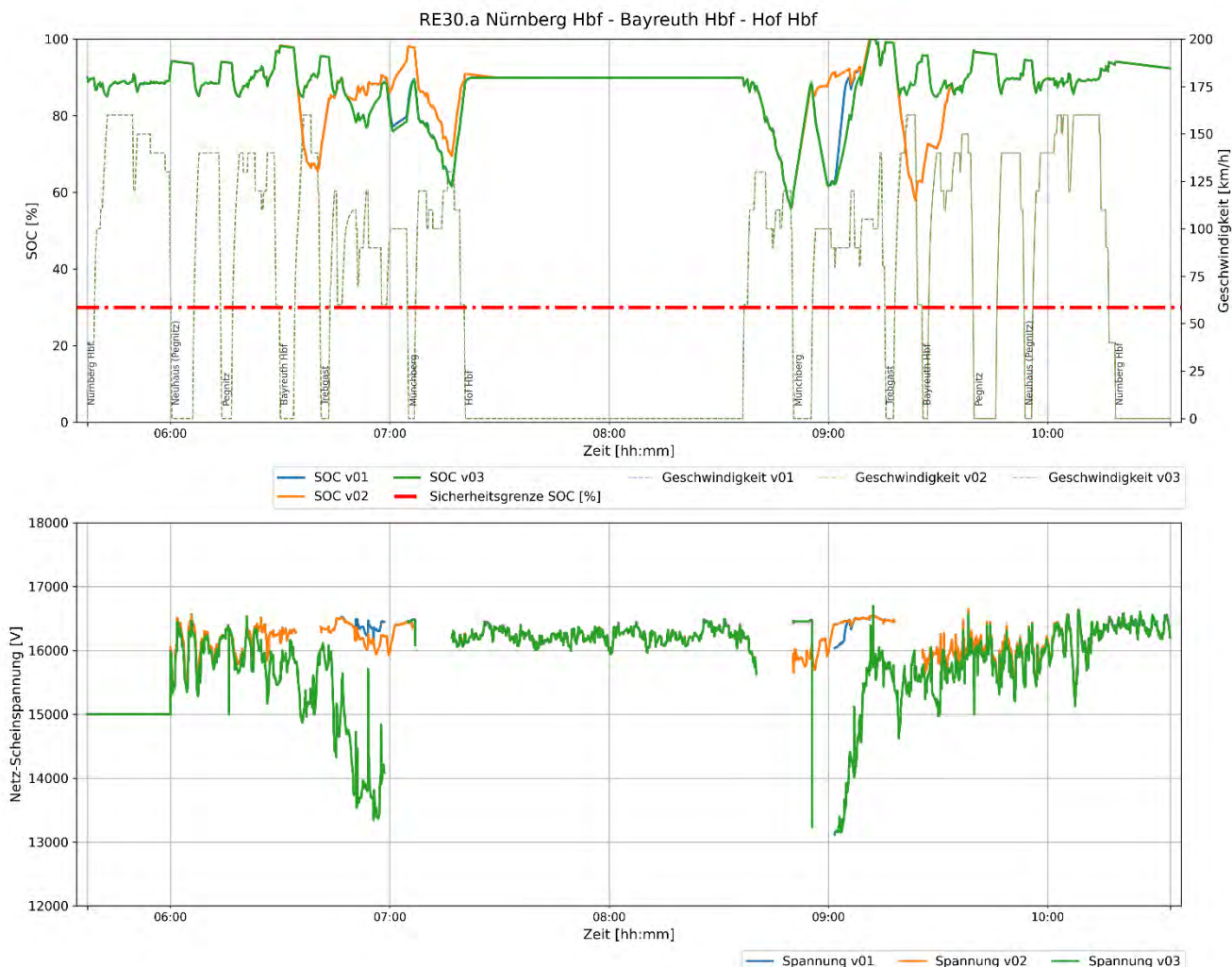
2.2.8 RB 97 Bayreuth – Marktredwitz – Bad Steben



2.2.9 RB 98 Helmbrechts – Hof



2.2.10 RE 30a Nürnberg – Hof



2.2.11 RE 32 Nürnberg – Coburg

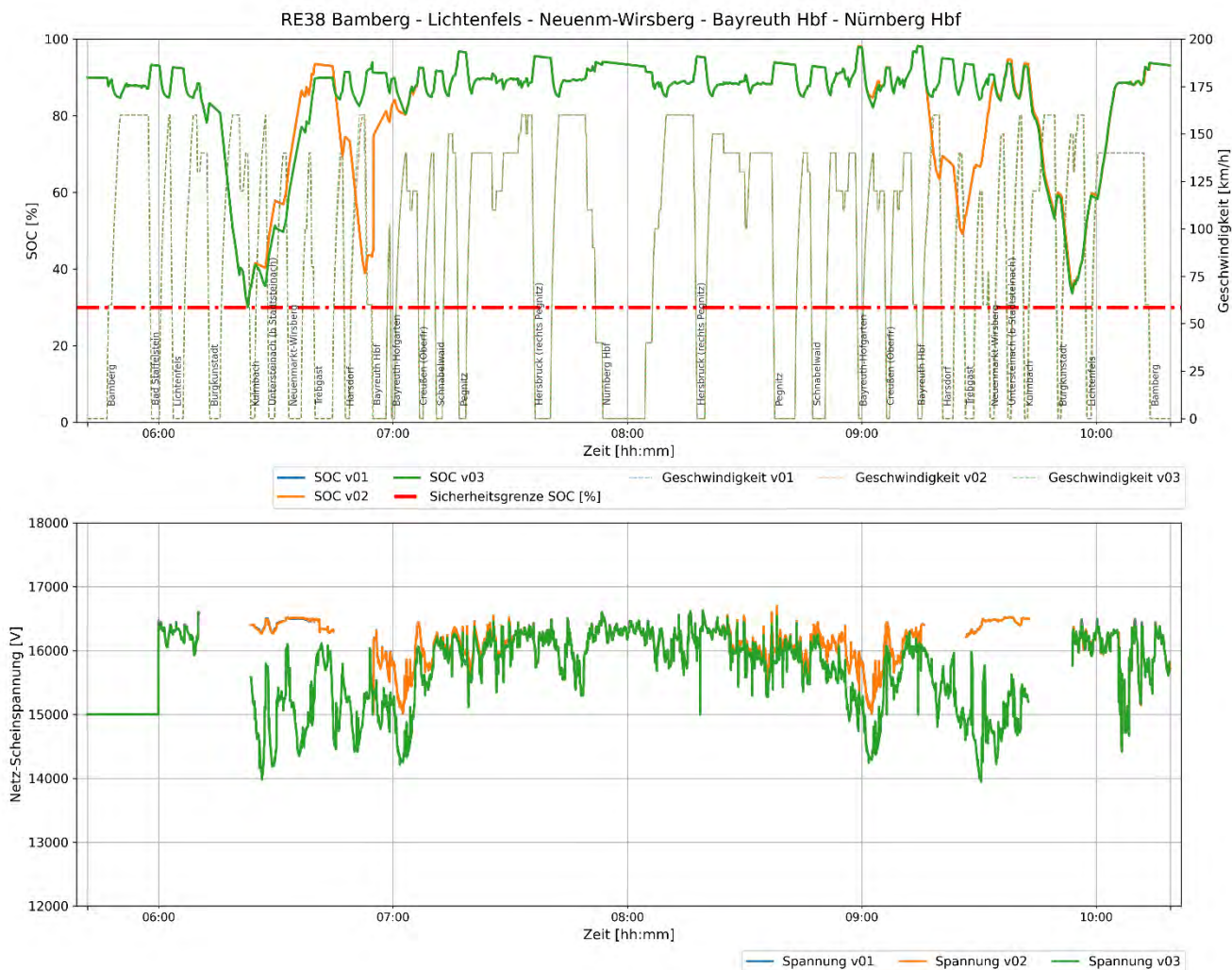


2.2.12 RE 35 Bamberg – Hof

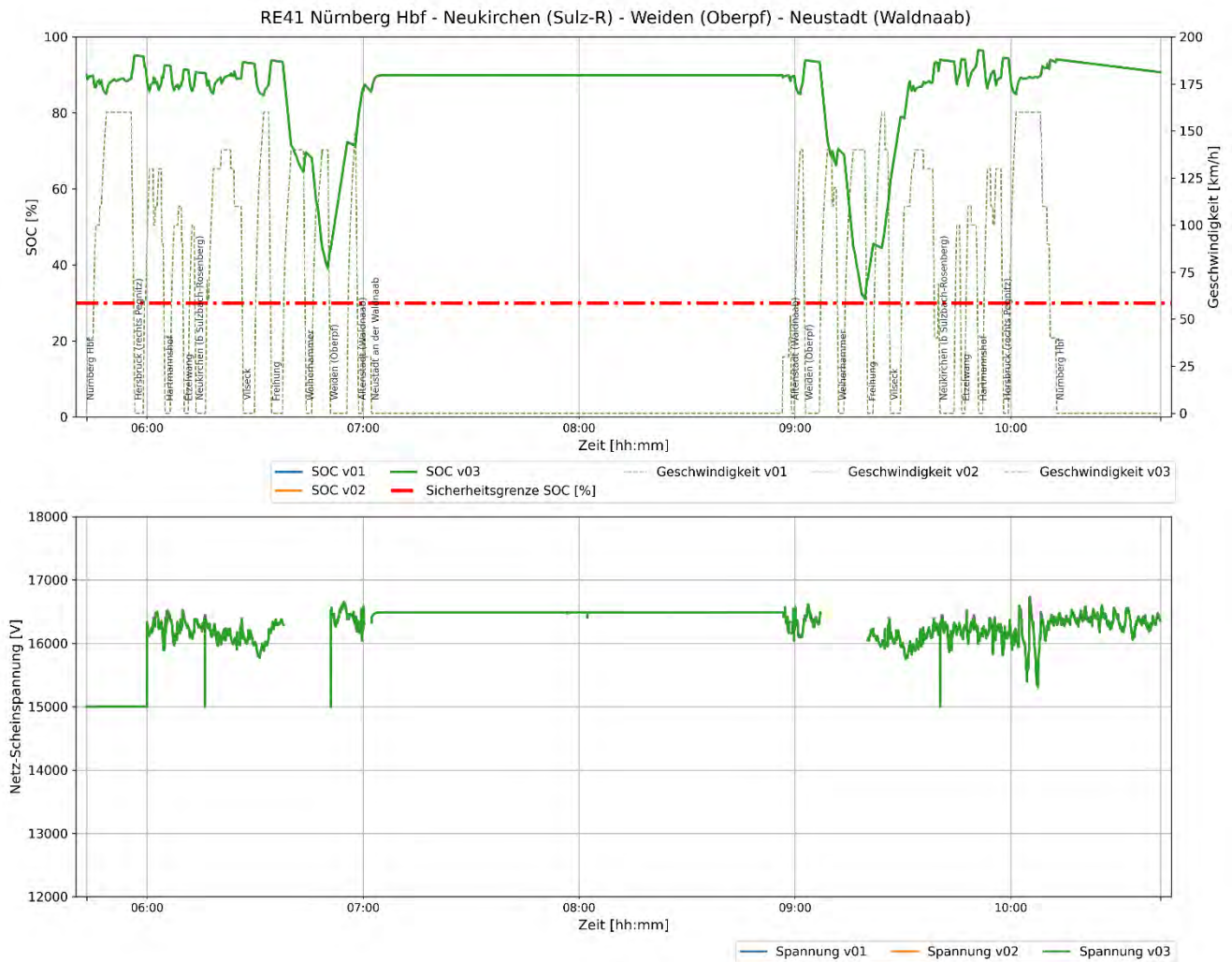


Anmerkung zur obigen Grafik: Der Spannungsverlauf in den Zeitfenstern 09:00 – 09:35 Uhr und zwischen 12:20 – 13:00 Uhr ist aufgrund des Flügelungskonzepts nicht korrekt dargestellt. Zwischen Lichtenfels und Neuenmarkt-Wirsberg wird die Spannung nicht im durchgehenden Fahrzeug Bamberg – Hof gemessen, sondern bei einem Fahrzeug der RE 38.

2.2.13 RE 38 Nürnberg – Bamberg



2.2.14 RE 41 Nürnberg – Neustadt an der Waldnaab

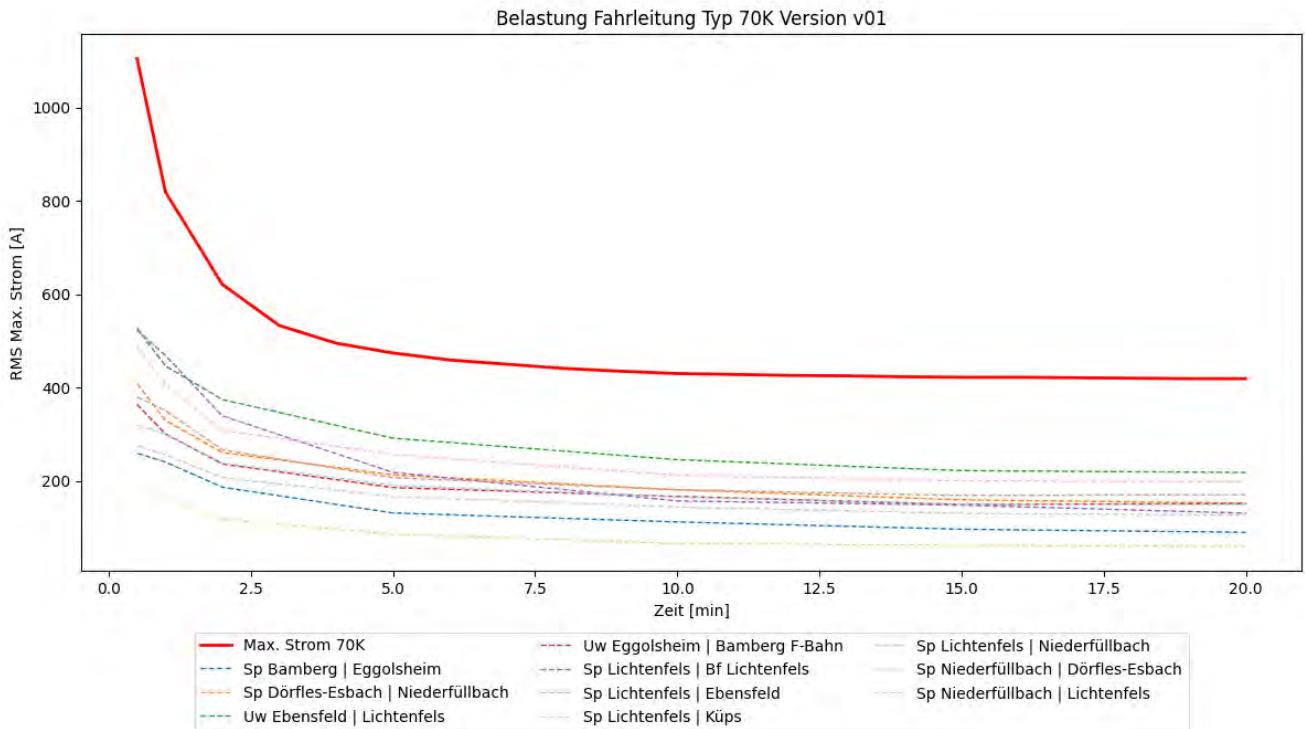


3 Strombelastung in der Oberleitungsanlage

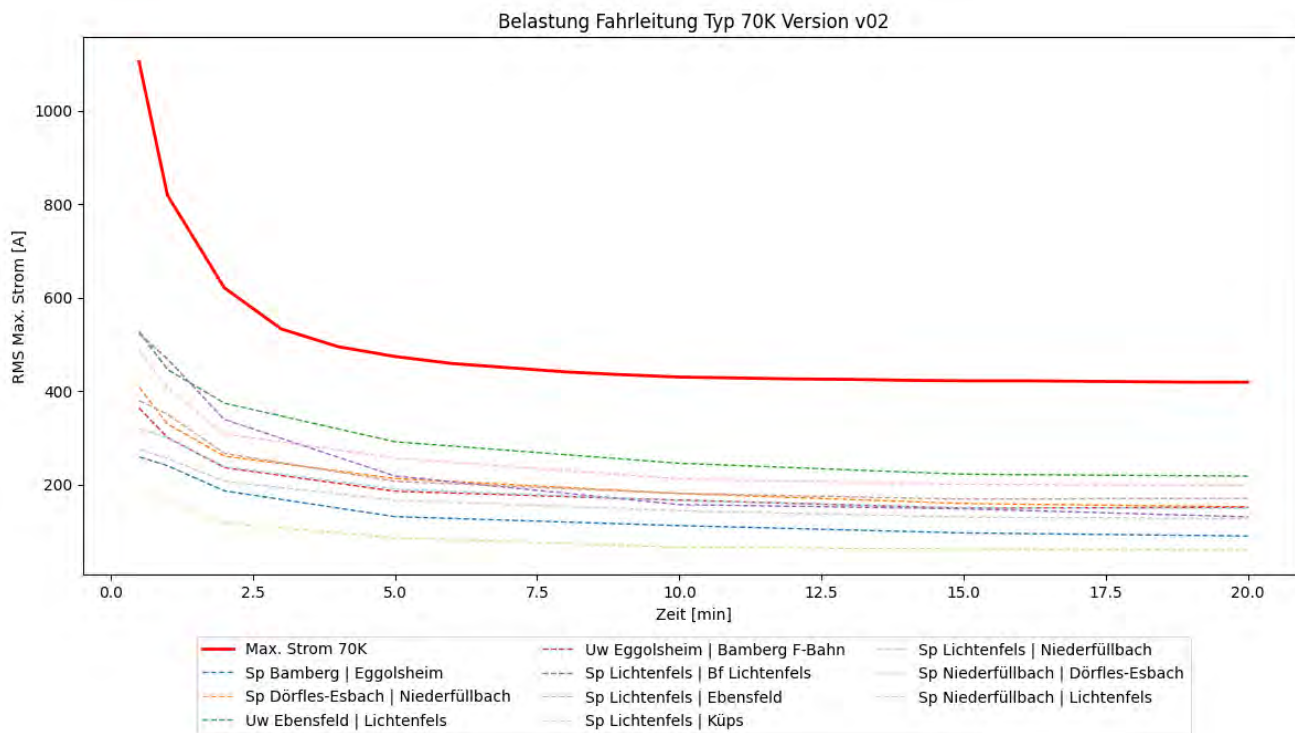
Die Leiter einer Fahrleitungsanlage weisen einen thermischen Grenzstrom für die Dauerbelastung auf (unter vorgegebenen Umweltbedingungen). Gemäß Angaben der DB Energie ist für die Beurteilung der Fahrleitungsbelastung die zeitgewichtete Strombelastungsgrenzkurve relevant. Die nachfolgenden Grafiken zeigen die Ergebnisse pro untersuchte Arbeitsvariante im Zeithorizont 2040 (siehe Kapitel 9.4 im Schlussbericht ECH-541.01-102).

3.1 Fahrleitung Typ 70 K

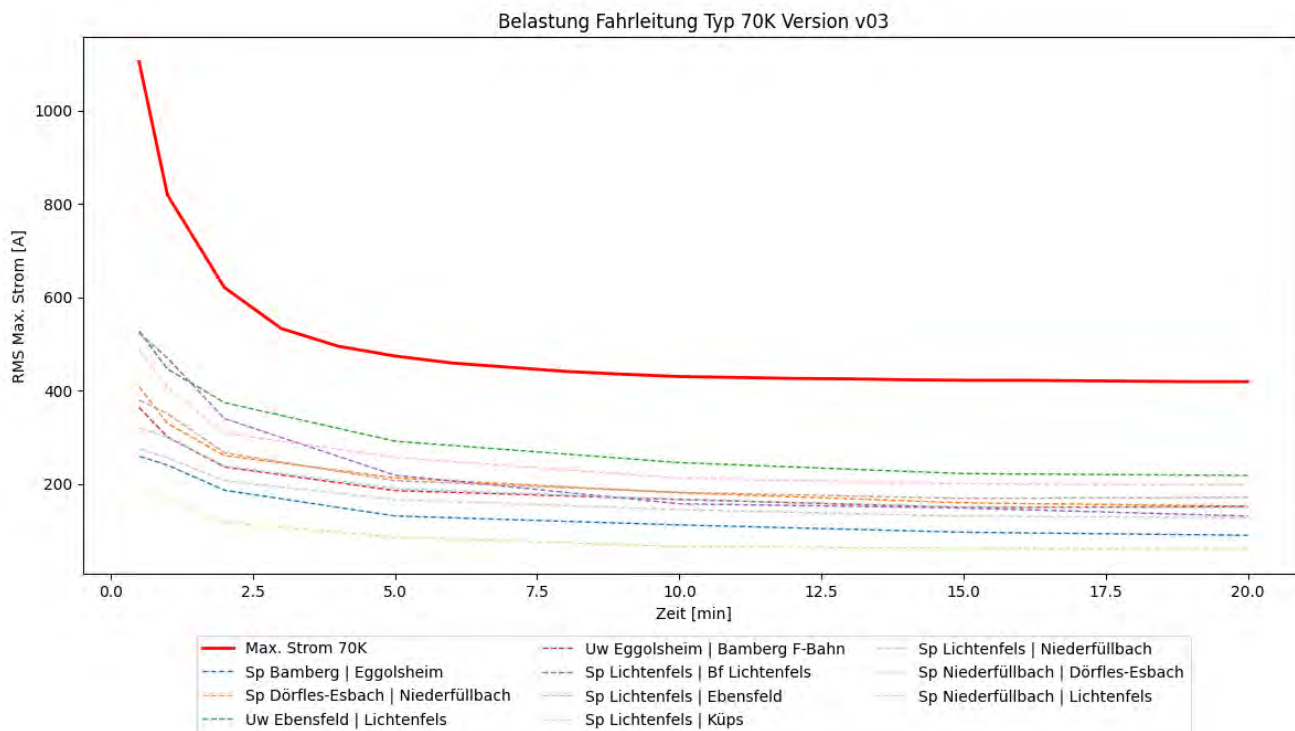
3.1.1 Ergebnisse Arbeitsvariante 1



3.1.2 Ergebnisse Arbeitsvariante 2

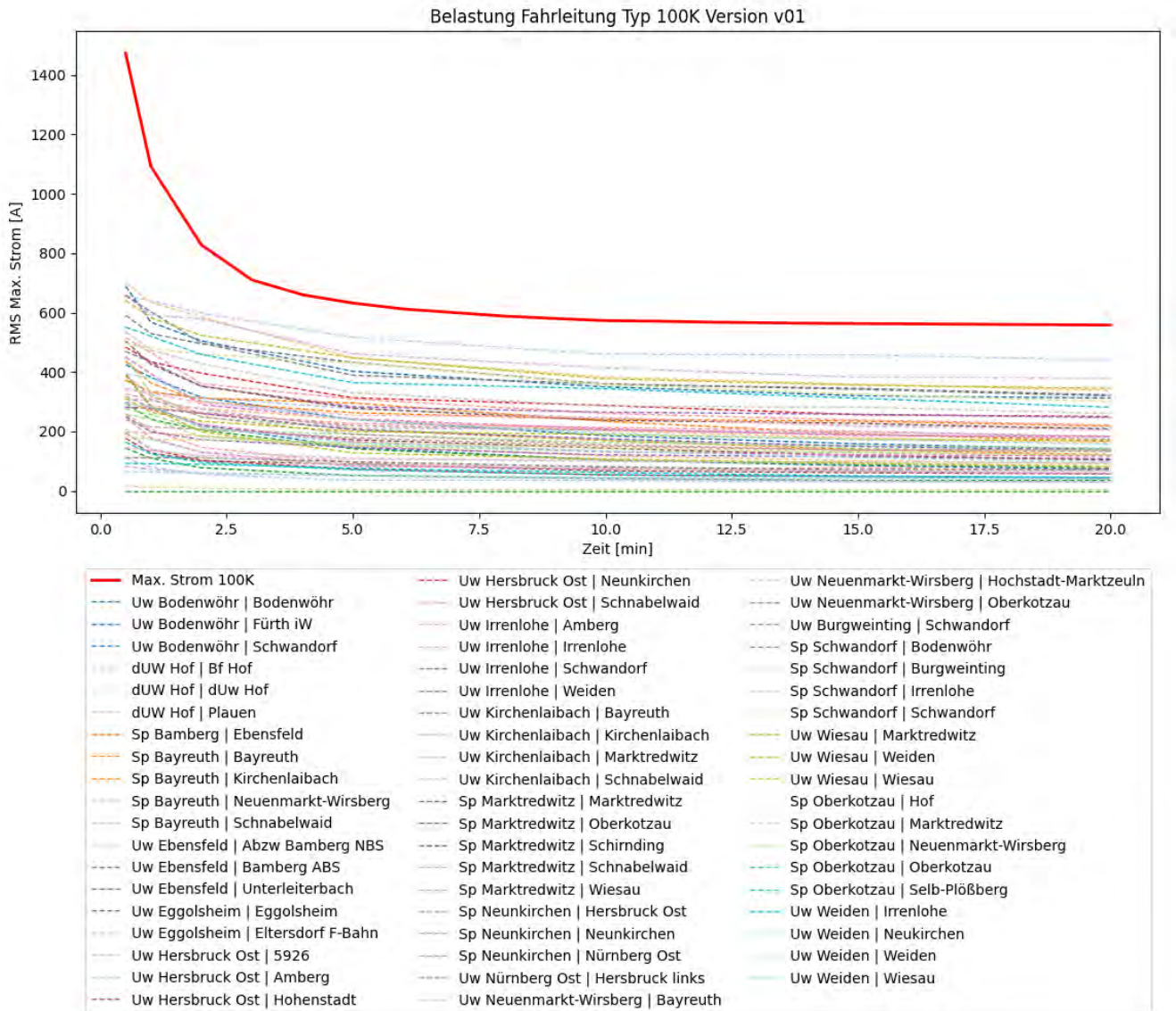


3.1.3 Ergebnisse Arbeitsvariante 3

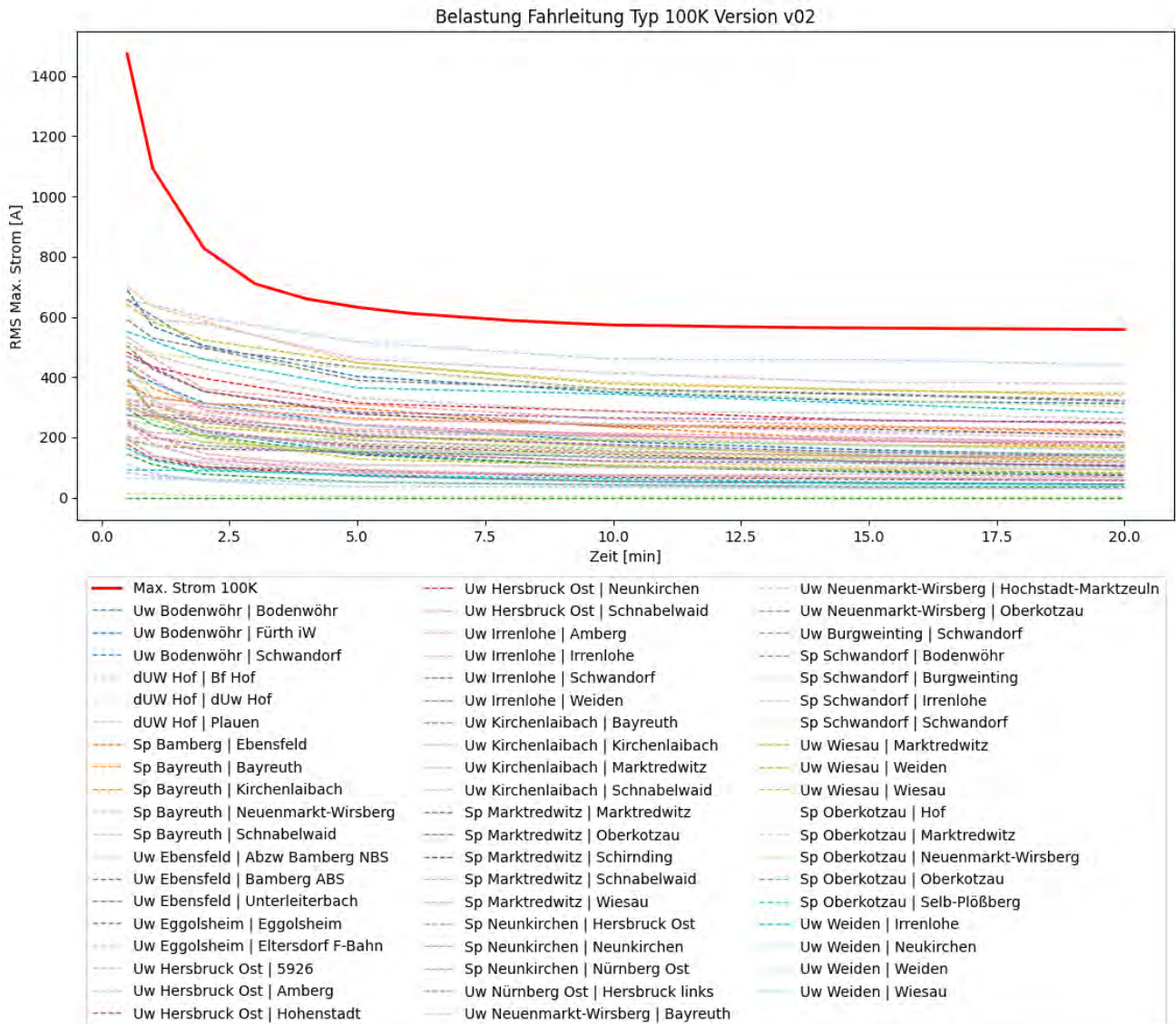


3.2 Fahrleitung Typ 100 K

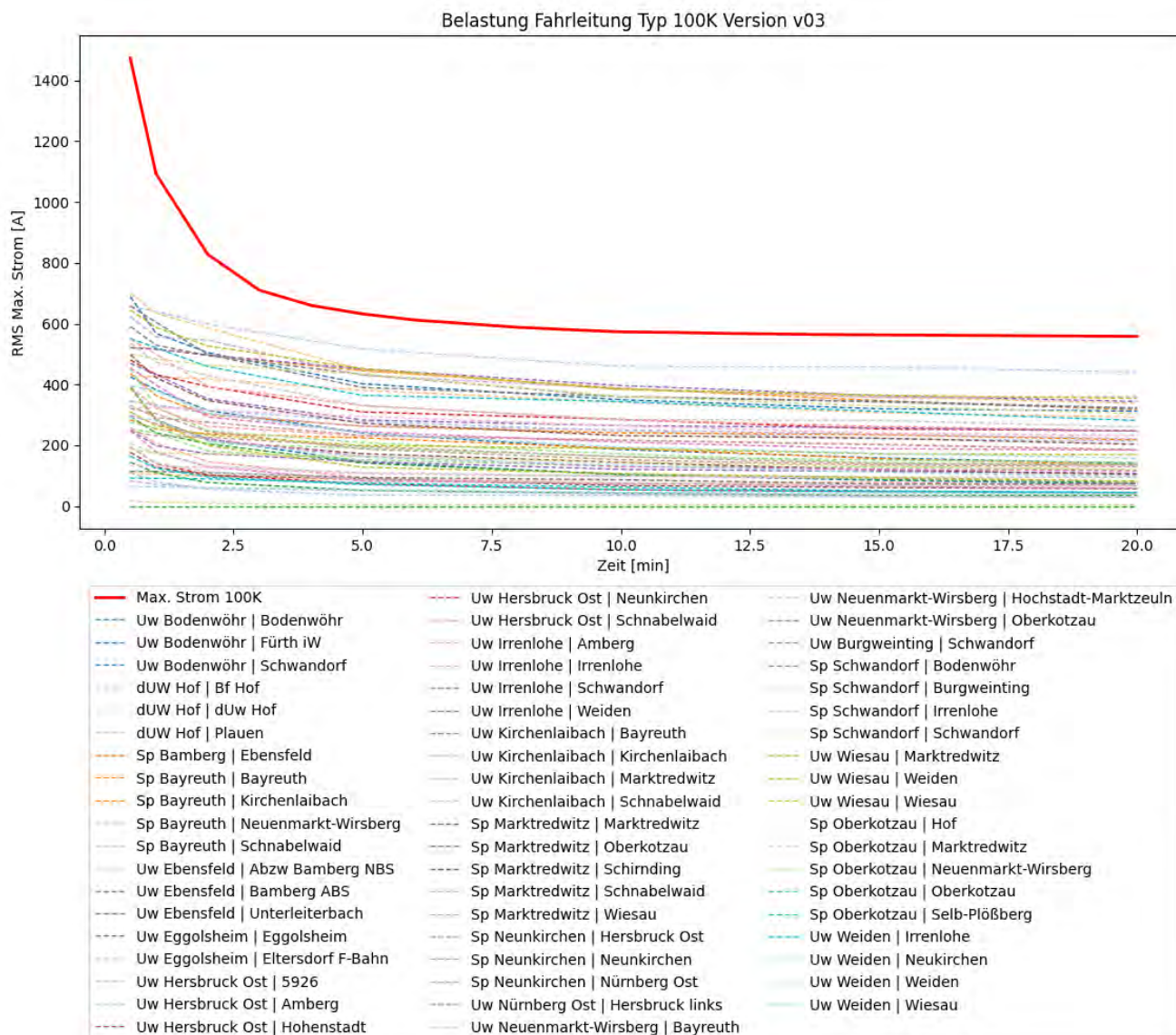
3.2.1 Ergebnisse Arbeitsvariante 1



3.2.2 Ergebnisse Arbeitsvariante 2

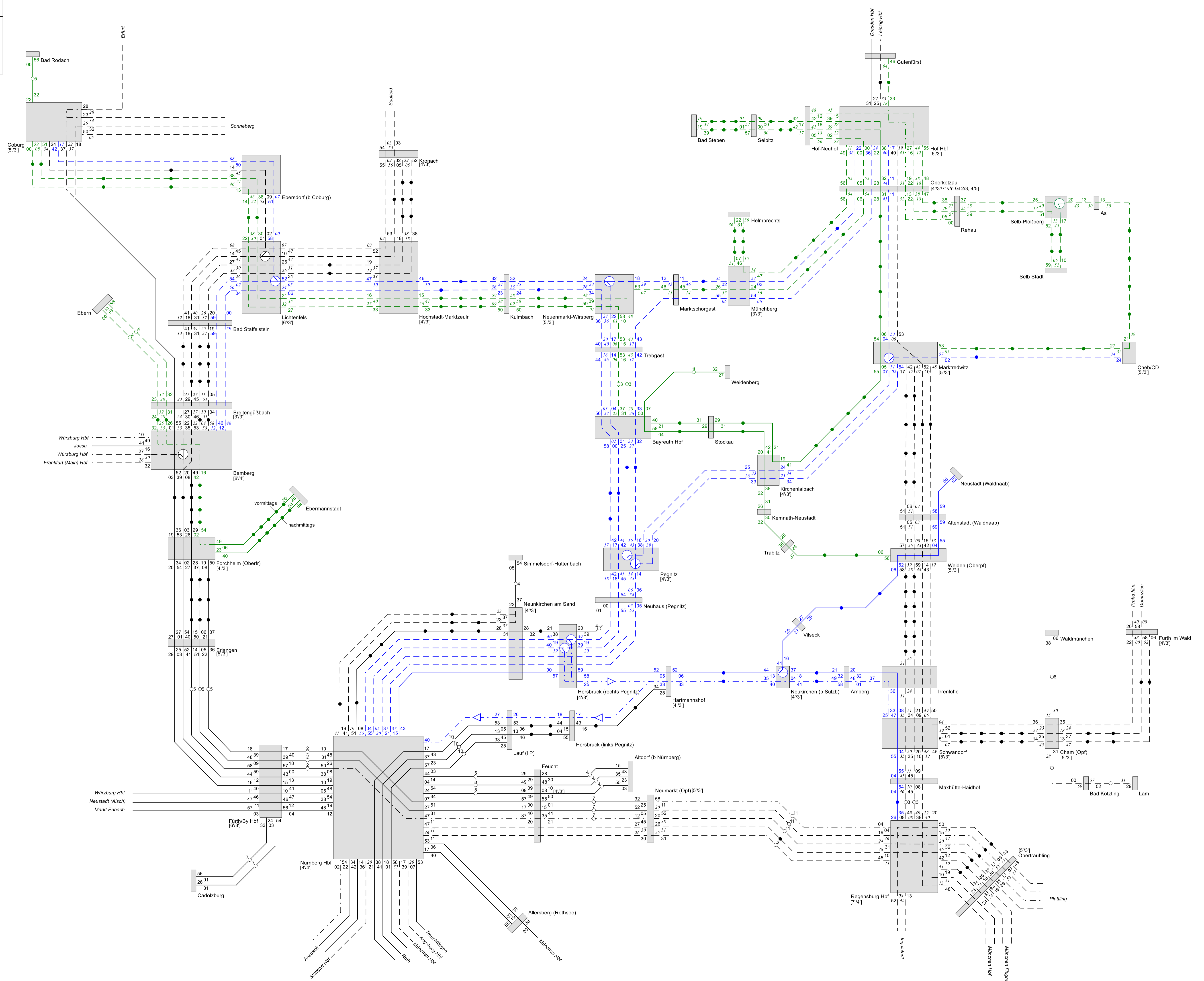


3.2.3 Ergebnisse Arbeitsvariante 3



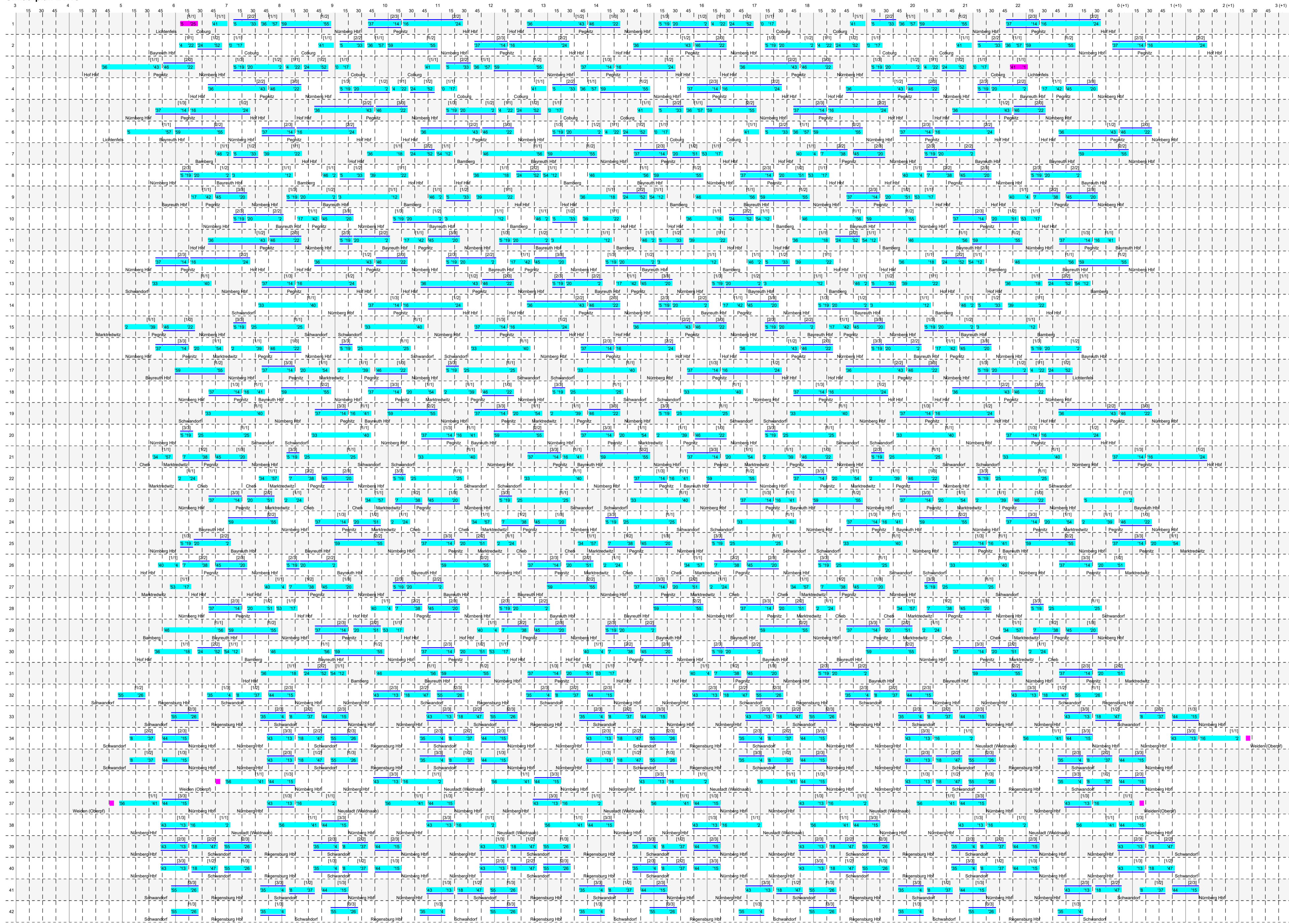
ANHANG A3 – Netzgrafik Umlauf- und Bildfahrpläne

Zum Schlussbericht der Machbarkeitsstudie Oberfranken-Achse (ECH-541.01-102 Version 1.0)



- Legende:**
- Expressverkehr Nordostbayern mit Neigtechnik
 - Regionalverkehr Oberfranken
 - übriger Verkehr
 - halbstündlicher Zug
 - stündlicher Zug
 - zweistündlicher Zug
 - HVZ-Zug/Einzellagen
 - 37
23 Ankunftszeit in geraden Stunden
 - 26
01 Ankunftszeit in ungeraden Stunden
 - ein / mehrere Zwischenhalte
 - Flügeln und Vereinigen
 - [5/3] minimale Übergangszeiten, nicht bahnsteigleich / bahnsteigleich

Umlaufplan EVNO



	verkehrs	betriebl.	gesamt
1	1027 km 11:18	20 km 0:20	1 mal 17:19 Schicht
2	1112 km 11:23	0 km 0:00	1 mal 19:20 Schicht
3	1027 km 11:13	20 km 0:20	1 mal 17:25 Schicht
4	1108 km 11:08	0 km 0:00	1 mal 16:44 Schicht
5	1215 km 10:58	0 km 0:00	1 mal 16:44 Schicht
6	1171 km 12:47	0 km 0:00	1 mal 19:16 Schicht
7	900 km 9:09	0 km 0:00	1 mal 17:04 Schicht
8	1050 km 11:08	0 km 0:00	1 mal 16:57 Schicht
9	1105 km 11:12	0 km 0:00	1 mal 17:03 Schicht
10	982 km 10:37	0 km 0:00	1 mal 15:12 Schicht
11	1074 km 11:46	0 km 0:00	1 mal 17:04 Schicht
12	1148 km 12:32	0 km 0:00	1 mal 18:18 Schicht
13	1102 km 11:33	0 km 0:00	1 mal 17:39 Schicht
14	925 km 10:06	0 km 0:00	1 mal 14:49 Schicht
15	1101 km 11:06	0 km 0:00	1 mal 17:16 Schicht
16	1104 km 11:08	0 km 0:00	1 mal 17:25 Schicht
17	1104 km 10:52	0 km 0:00	1 mal 16:53 Schicht
18	951 km 10:11	0 km 0:00	1 mal 15:44 Schicht
19	1040 km 11:19	0 km 0:00	1 mal 17:48 Schicht
20	972 km 10:51	0 km 0:00	1 mal 17:19 Schicht
21	1124 km 12:20	0 km 0:00	1 mal 19:50 Schicht
22	892 km 10:00	0 km 0:00	1 mal 16:20 Schicht
23	1017 km 10:40	0 km 0:00	1 mal 17:24 Schicht
24	1017 km 10:40	0 km 0:00	1 mal 17:22 Schicht
25	986 km 10:24	0 km 0:00	1 mal 18:48 Schicht
26	965 km 10:54	0 km 0:00	1 mal 18:11 Schicht
27	1000 km 10:03	0 km 0:00	1 mal 15:31 Schicht
28	913 km 9:11	0 km 0:00	1 mal 16:48 Schicht
29	1108 km 10:02	0 km 0:00	1 mal 17:34 Schicht
30	984 km 10:21	0 km 0:00	1 mal 16:48 Schicht
31	957 km 9:39	0 km 0:00	1 mal 16:15 Schicht
32	854 km 9:29	0 km 0:00	1 mal 18:31 Schicht
33	904 km 10:00	0 km 0:00	1 mal 19:27 Schicht
34	907 km 10:46	5 km 0:05	1 mal 21:04 Schicht
35	904 km 9:57	0 km 0:00	1 mal 19:04 Schicht
36	775 km 9:19	5 km 0:05	1 mal 17:29 Schicht
37	908 km 10:06	10 km 0:10	1 mal 19:27 Schicht
38	908 km 10:08	0 km 0:00	1 mal 18:31 Schicht
39	904 km 9:58	0 km 0:00	1 mal 19:04 Schicht
40	904 km 9:58	0 km 0:00	1 mal 19:04 Schicht
41	904 km 9:57	0 km 0:00	1 mal 19:27 Schicht
42	511 km 5:58	0 km 0:00	1 mal 17:09 Schicht

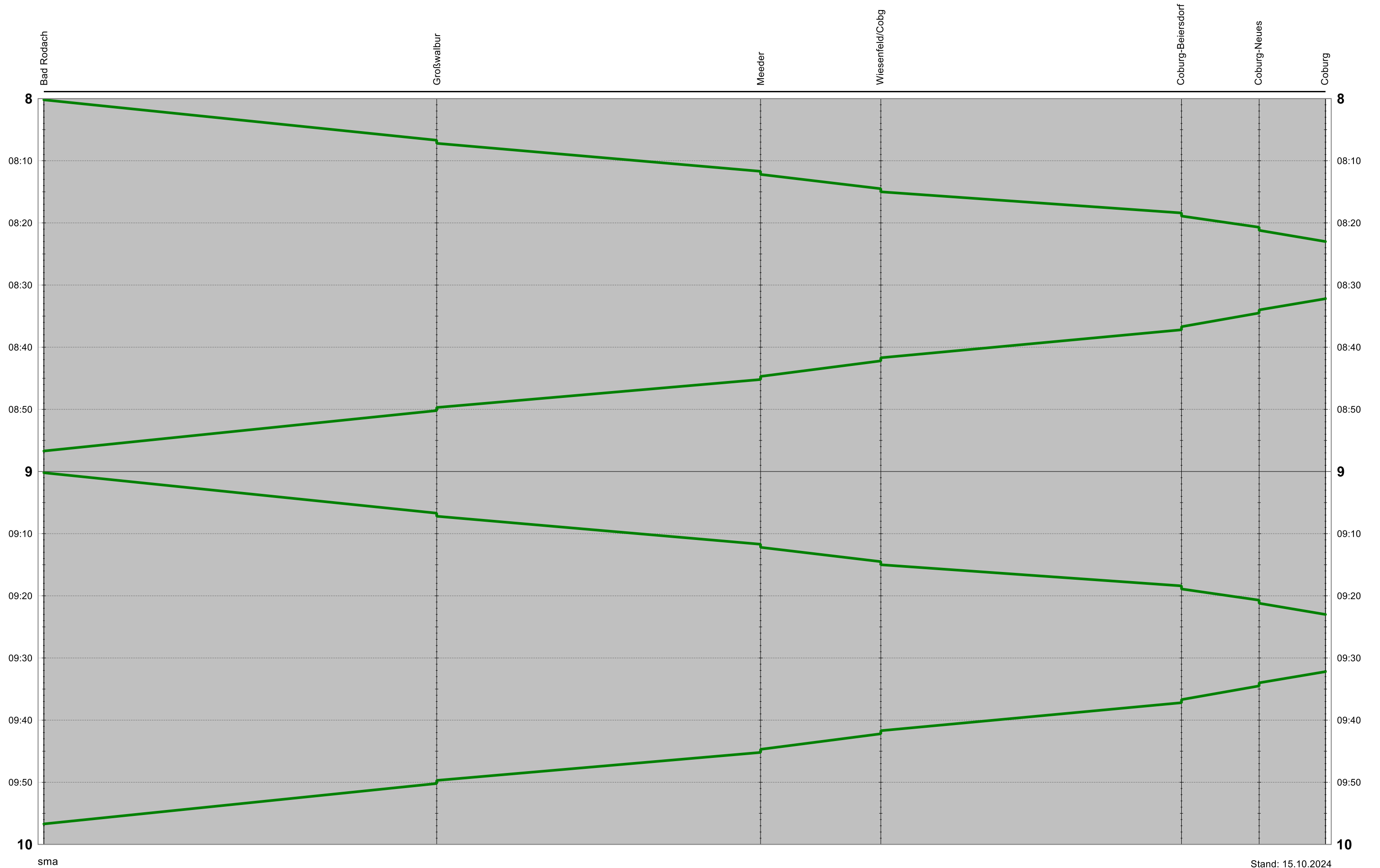
Umlaufplan EVNO

Linie	3		4		5		6		7		8		9		10		11		12		13		14		15		16		17		18		19		20		21		22		23		0(+1)		1(+1)		2(+1)		3(+1)		verkehrl.	betriebl.	gesamt
	15	30	45	15	30	45	15	30	45	15	30	45	15	30	45	15	30	45	15	30	45	15	30	45	15	30	45	15	30	45	15	30	45	15	30	45	15	30	45	15	30	45											
43																																																726 km 7.58	0 km 0.00	1 mal 15.39 Schicht			
44																																																	726 km 7.58	0 km 0.00	1 mal 15.39 Schicht		
45																																																	600 km 10.08	10 km 0.10	1 mal 19.32 Schicht		
46																																																	812 km 8.58	0 km 0.00	1 mal 17.52 Schicht		
47																																																	469 km 5.27	0 km 0.00	1 mal 15.28 Schicht		
48																																																	426 km 4.59	0 km 0.00	1 mal 14.00 Schicht		
49																																																	900 km 10.08	0 km 0.00	1 mal 18.31 Schicht		
50																																																	904 km 9.58	0 km 0.00	1 mal 19.04 Schicht		
51																																																	904 km 9.58	0 km 0.00	1 mal 19.04 Schicht		

RB 18: Bad Rodach - Coburg

TGL

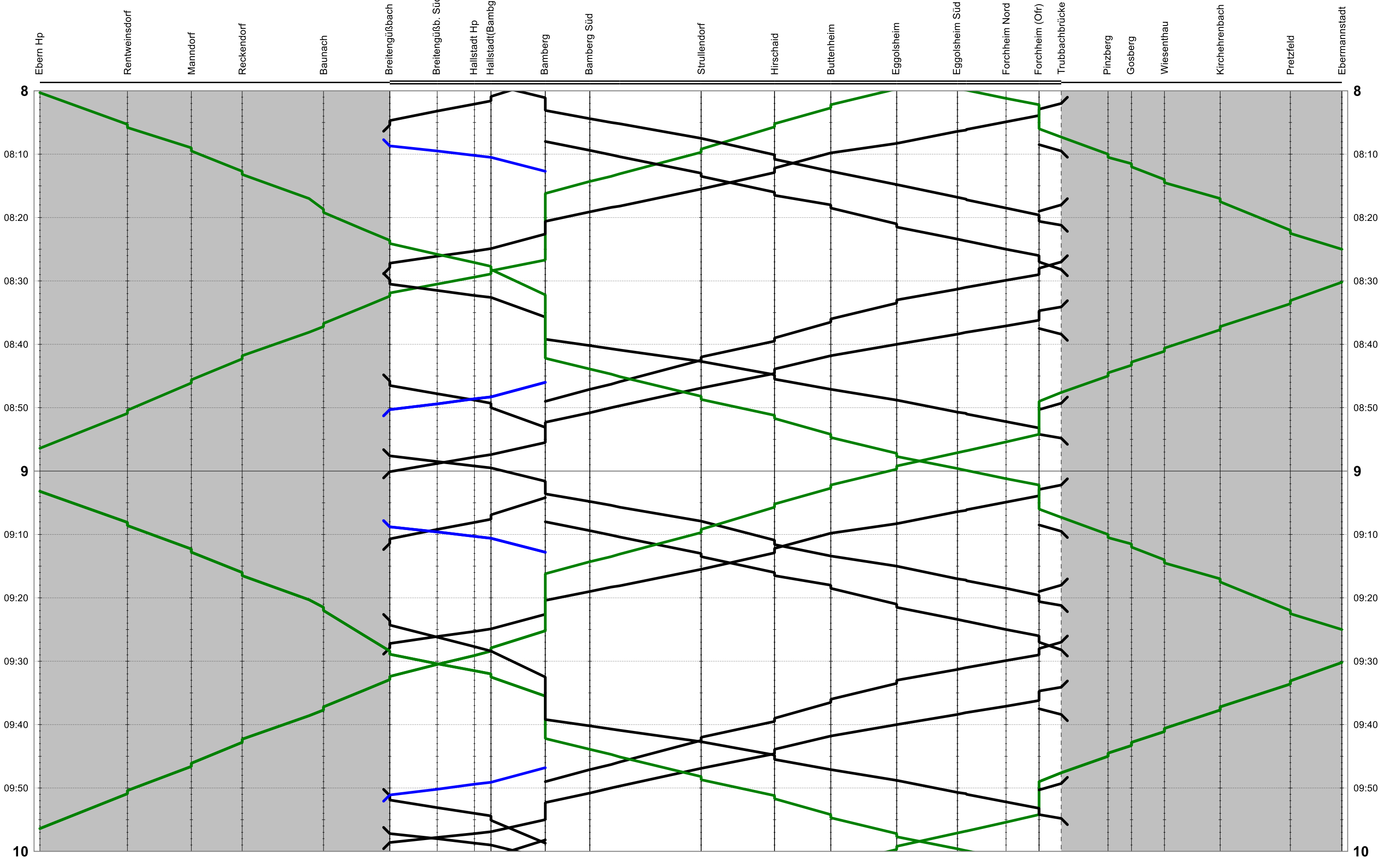
Zuggruppenversion Regionalverkehr Bayern - 3062_Studie_BEMU_XEMU_Oberfranken.



RB 22_RB 26: Ebern - Bamberg - Ebermannstadt

TGL

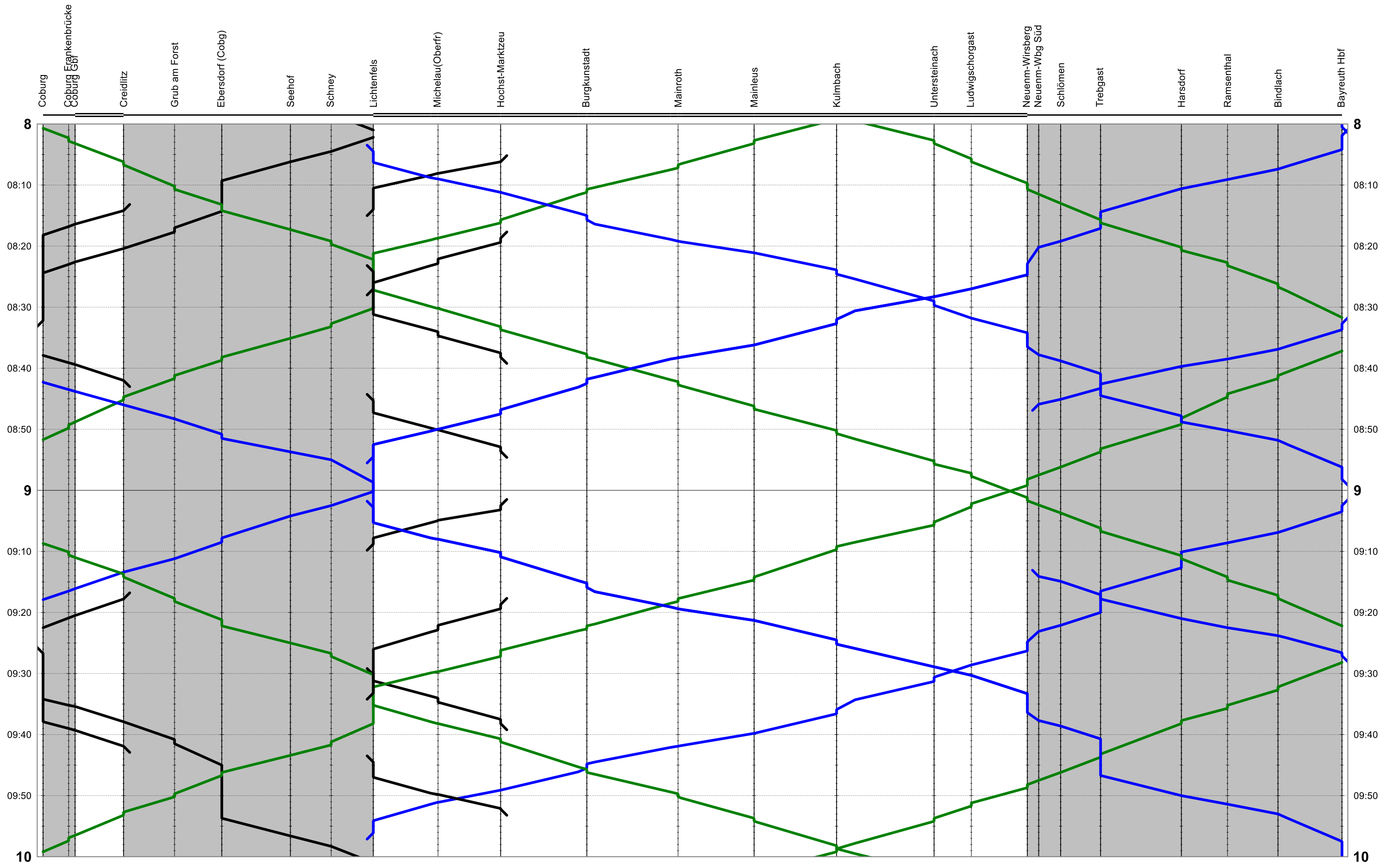
Zuggruppenversion Regionalverkehr Bayern - 3062_Studie_BEMU_XEMU_Oberfranken.



RB 24: Coburg - Bayreuth

TGL

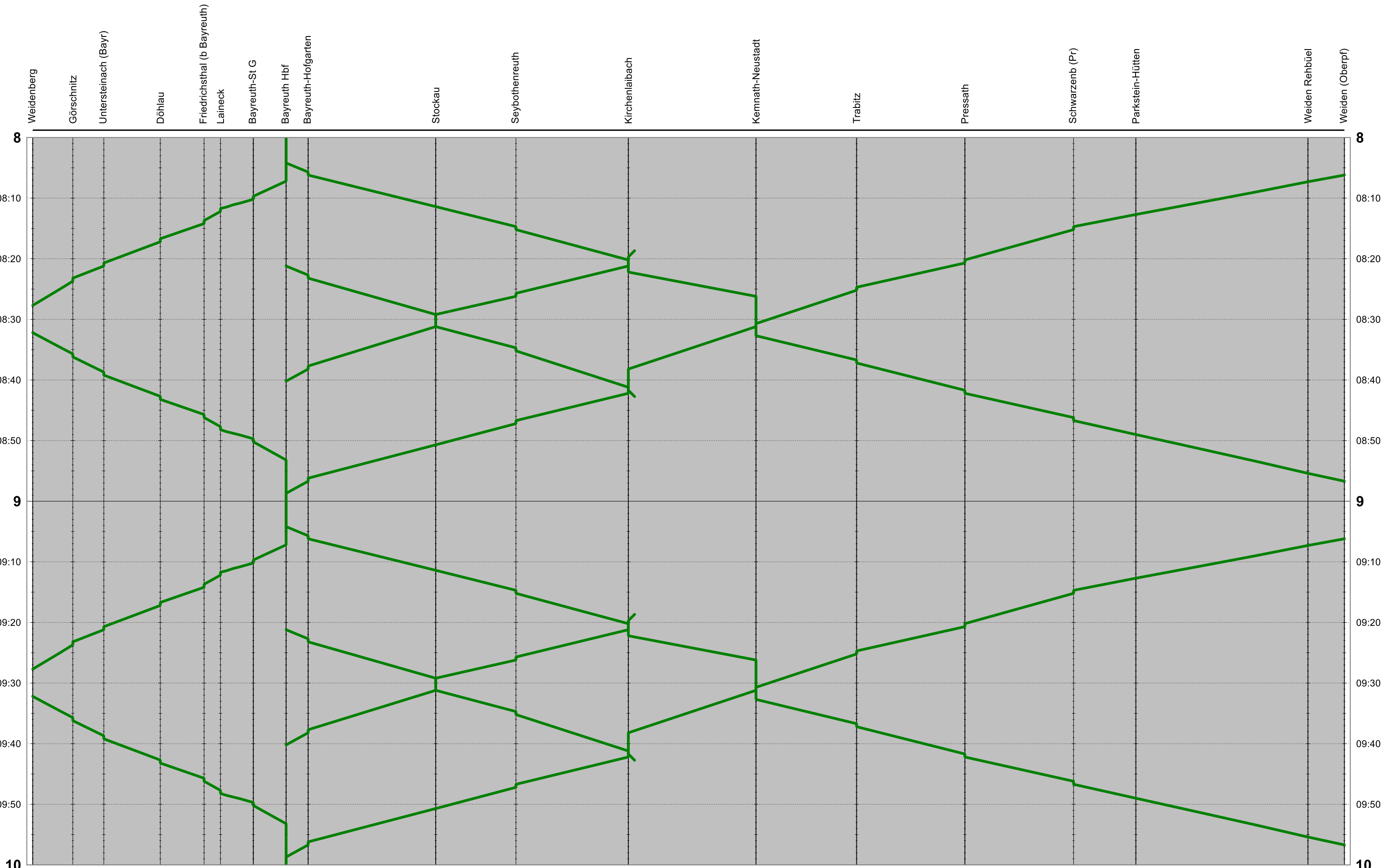
Zuggruppenversion Regionalverkehr Bayern - 3062_Studie_BEMU_XEMU_Oberfranken.



RB 34: Weidenberg - Weiden

TGL

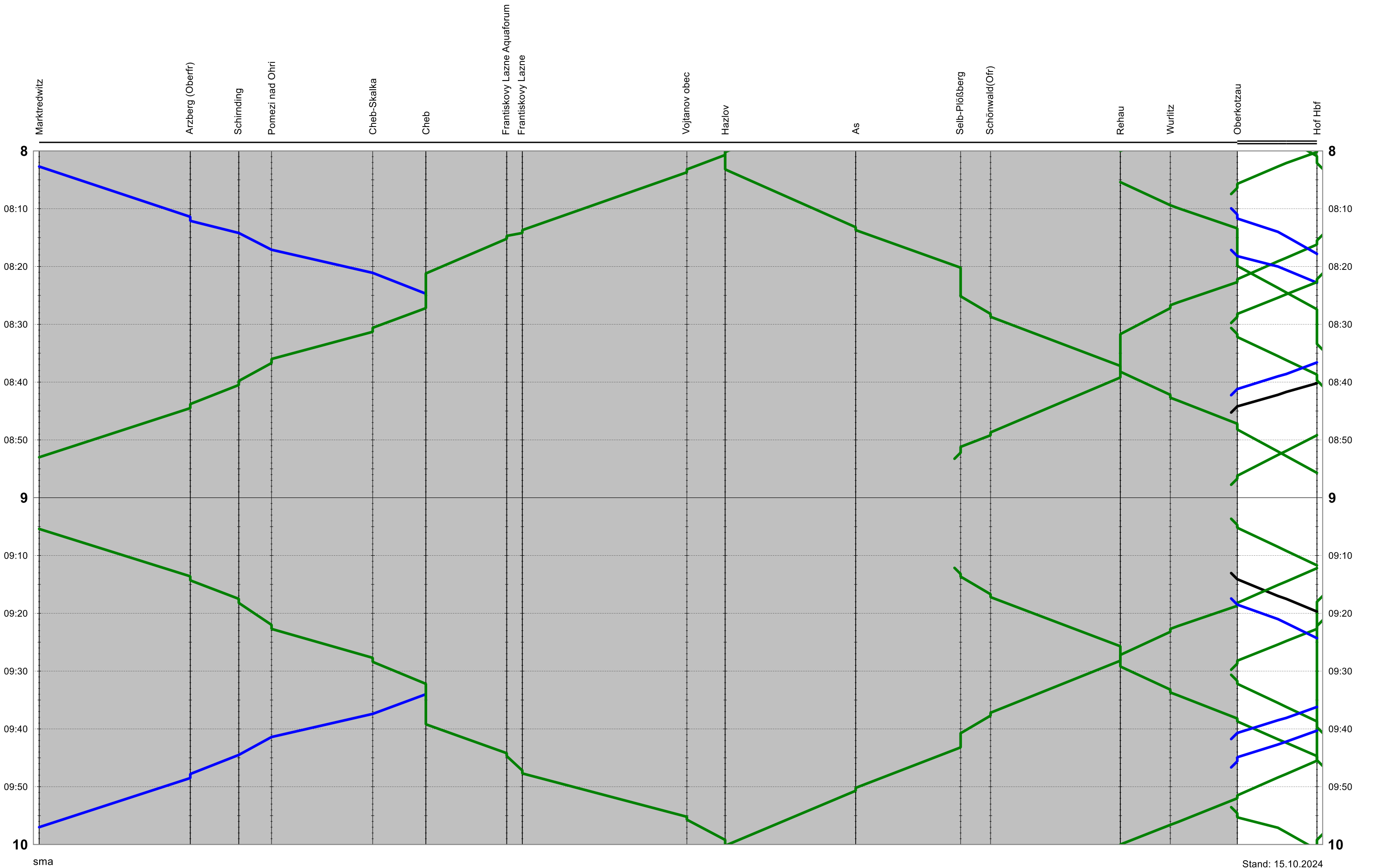
Zuggruppenversion Regionalverkehr Bayern - 3062_Studie_BEMU_XEMU_Oberfranken.



RB 95: Marktredwitz - Cheb - Hof

TGL

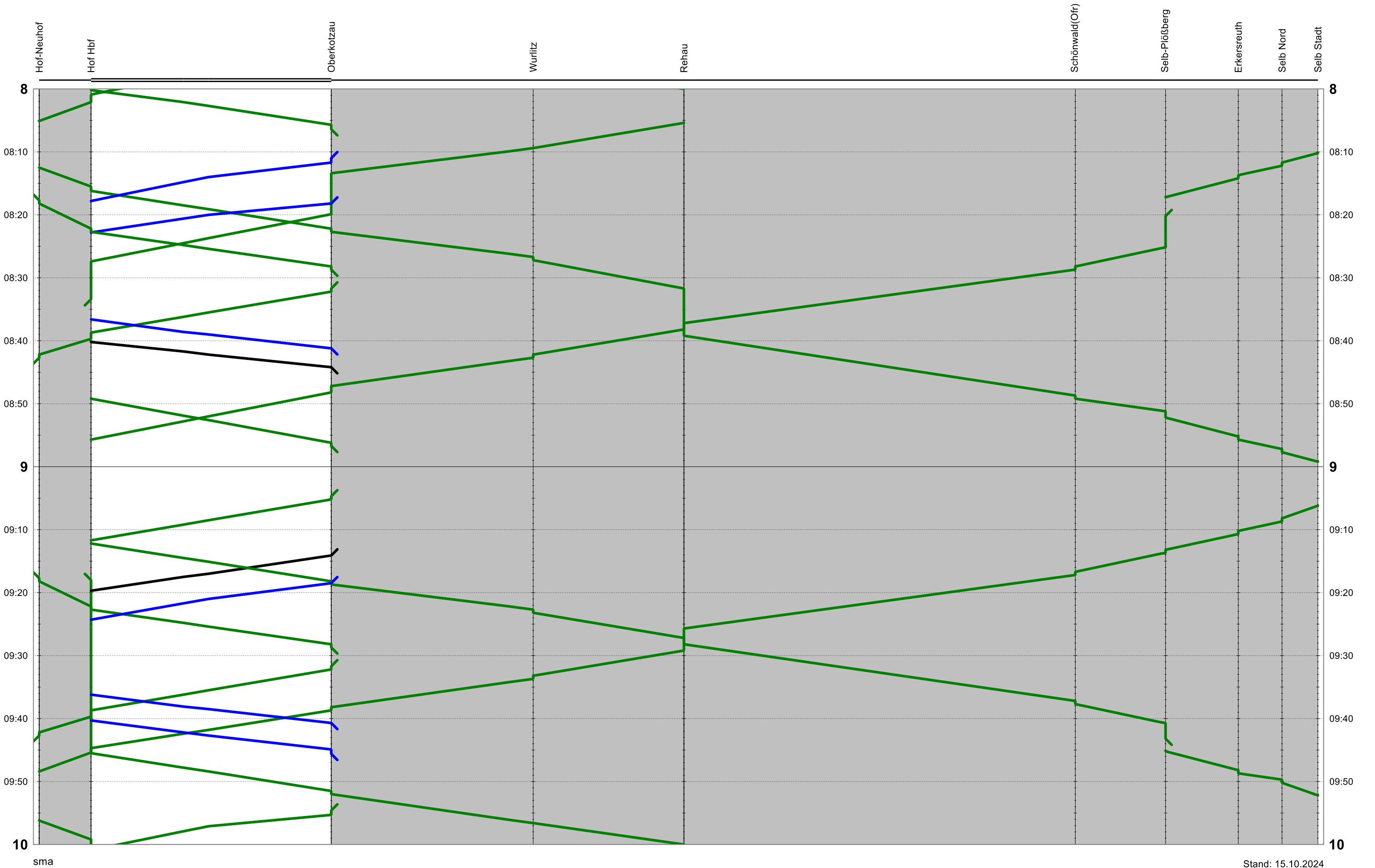
Zuggruppenversion Regionalverkehr Bayern - 3062_Studie_BEMU_XEMU_Oberfranken.



RB 96: Hof-Neuhof - Hof - Selb Stadt

TGL

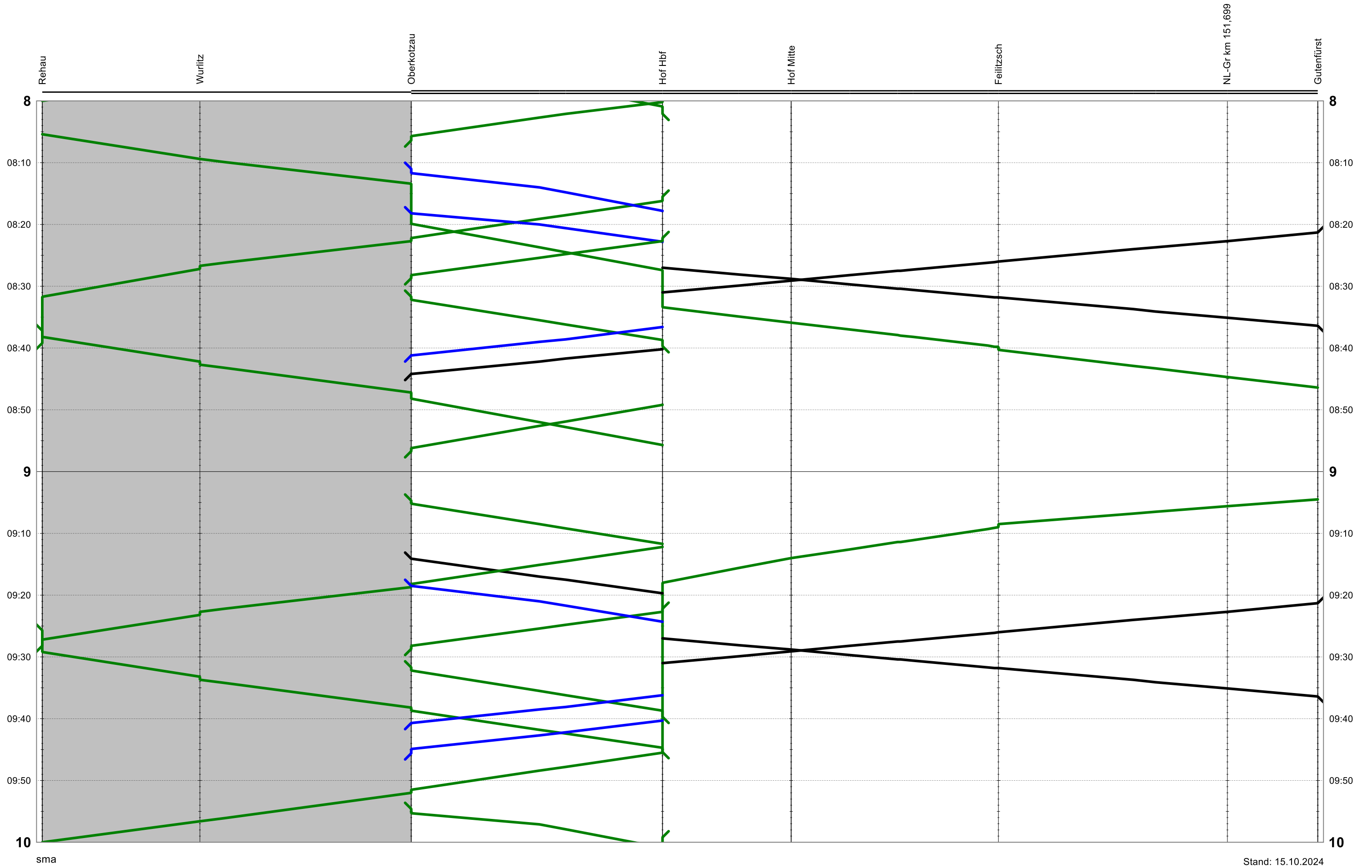
Zuggruppenversion Regionalverkehr Bayern - 3062_Studie_BEMU_XEMU_Oberfranken.



RB 96 HVZ: Rehau - Hof - Gutenfürst

TGL

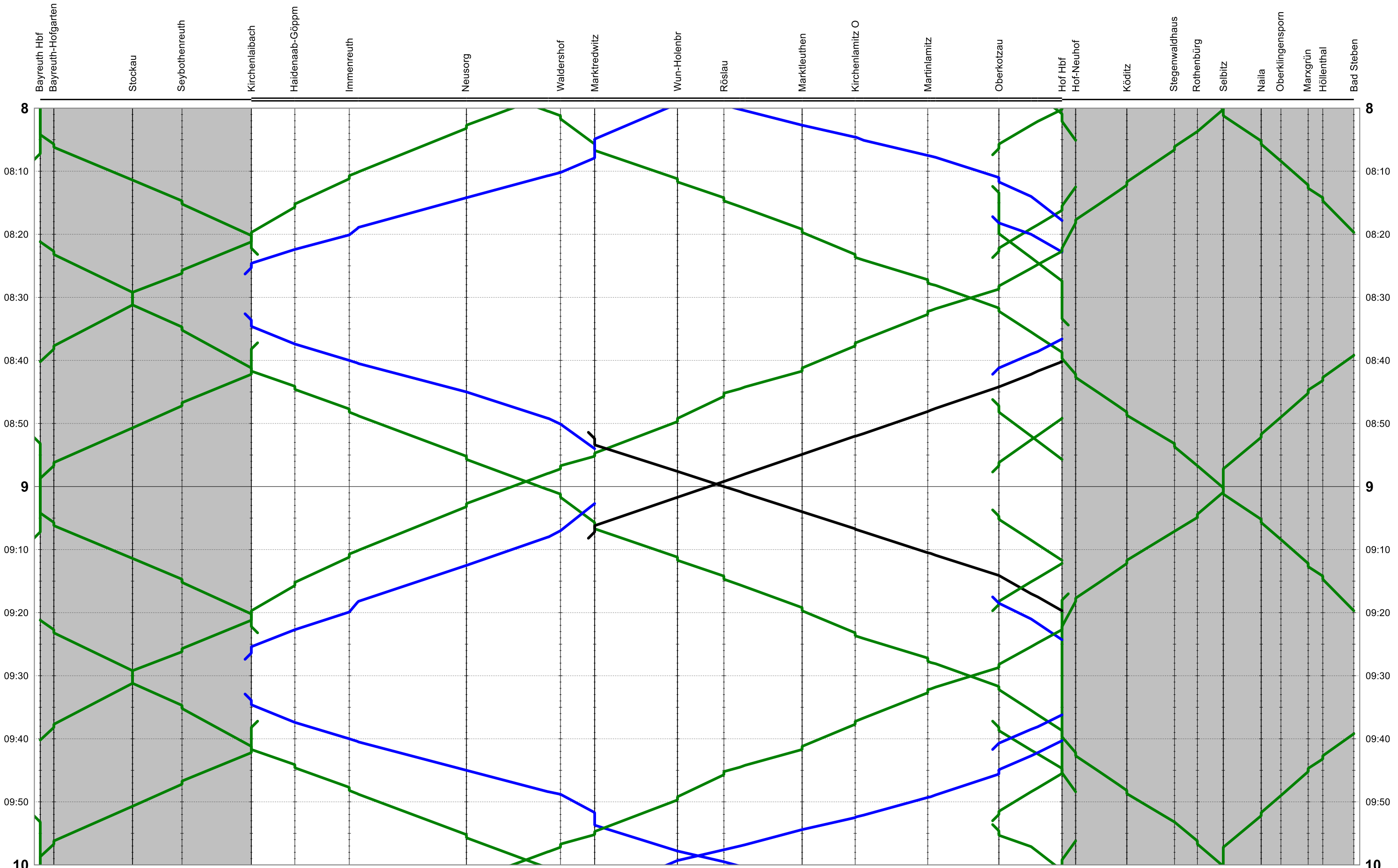
Zuggruppenversion Regionalverkehr Bayern - 3062_Studie_BEMU_XEMU_Oberfranken.



RB 97: Bayreuth - Marktredwitz - Hof - Bad Steben

TGL

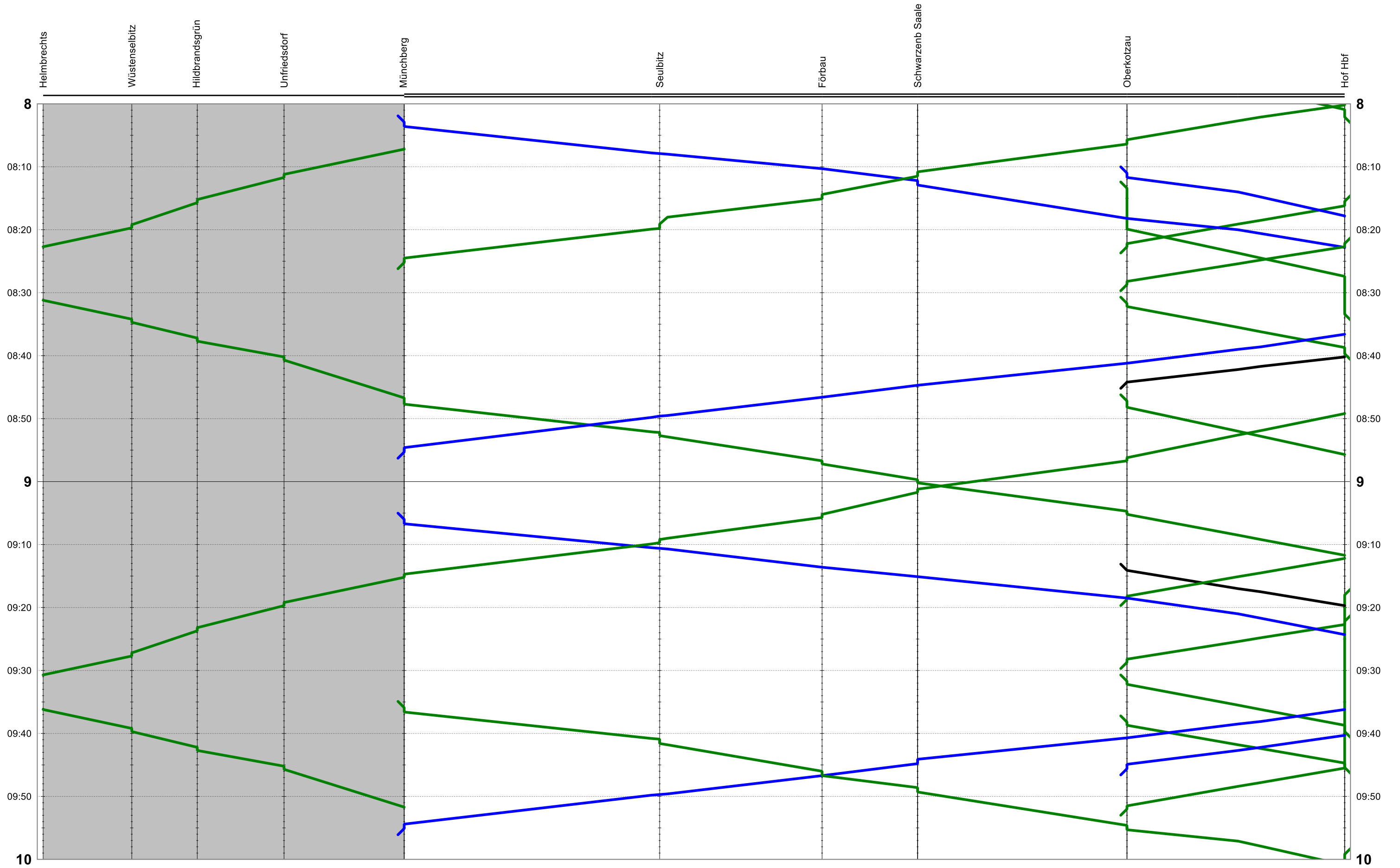
Zuggruppenversion Regionalverkehr Bayern - 3062_Studie_BEMU_XEMU_Oberfranken.



RB 98: Helmbrechts - Hof

TGL

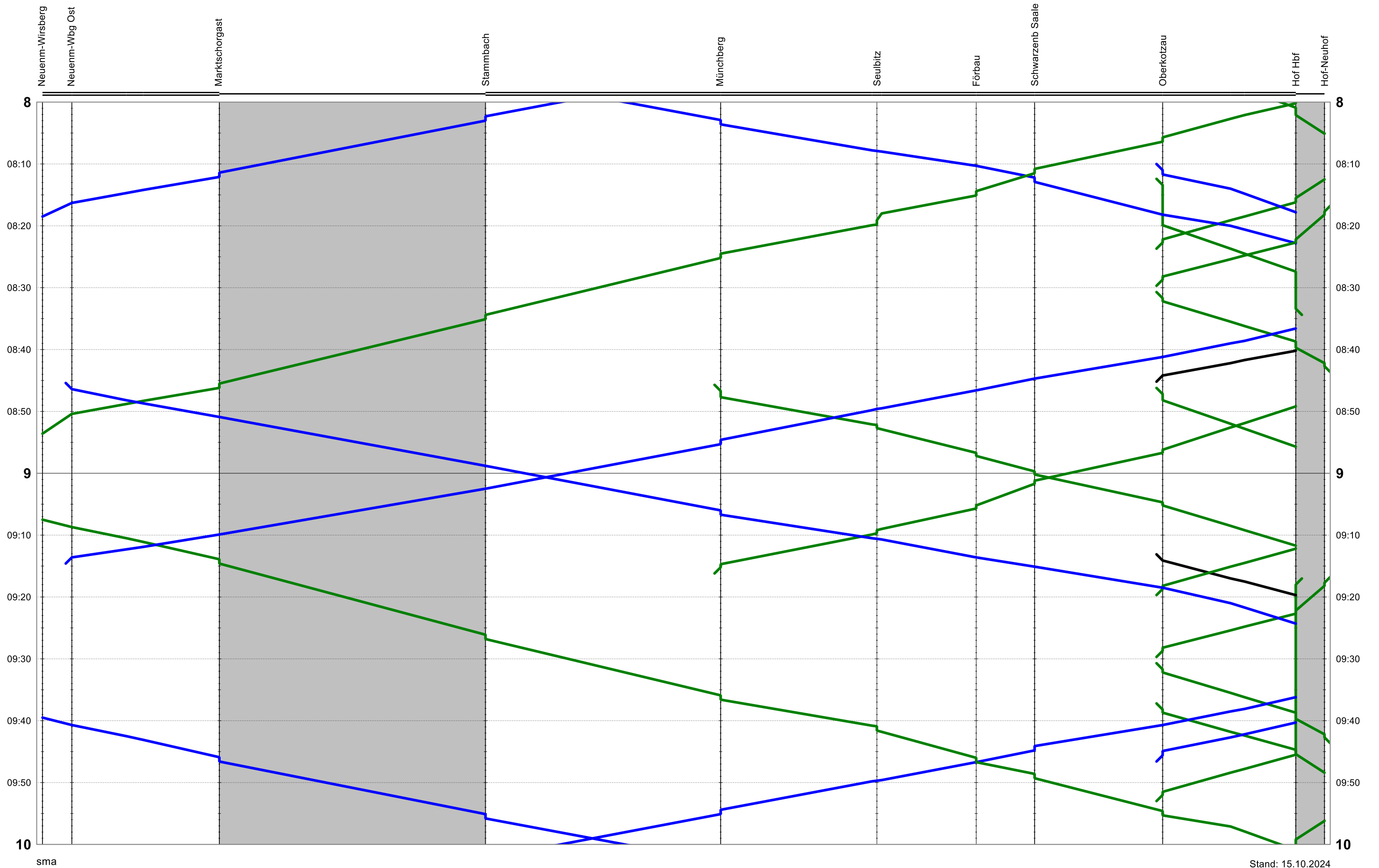
Zuggruppenversion Regionalverkehr Bayern - 3062_Studie_BEMU_XEMU_Oberfranken.



RB 99: Neuenmarkt-Wirsberg - Hof - Hof-Neuhof

TGL

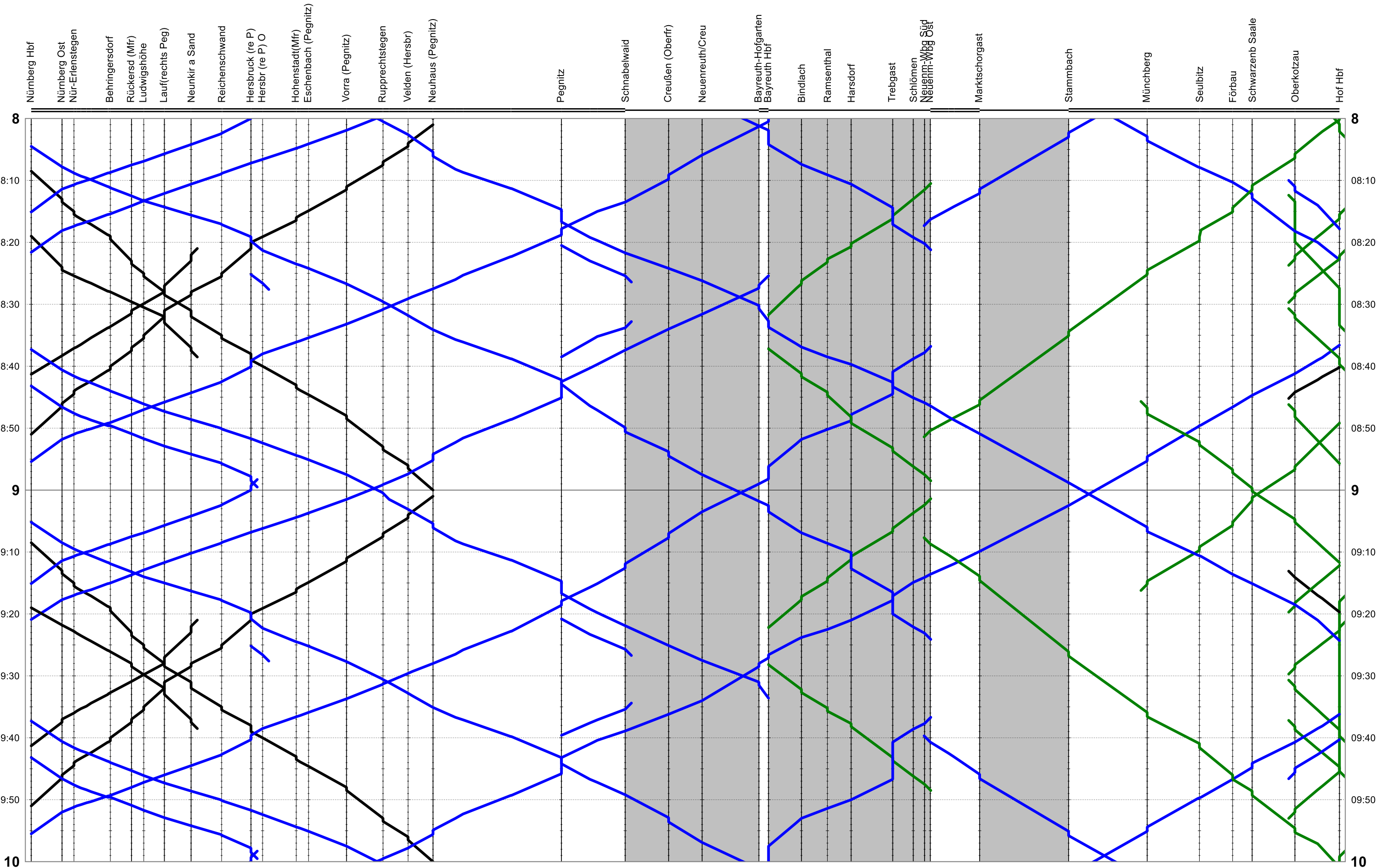
Zuggruppenversion Regionalverkehr Bayern - 3062_Studie_BEMU_XEMU_Oberfranken.



RE 30: Nürnberg - Bayreuth - Hof

TGL

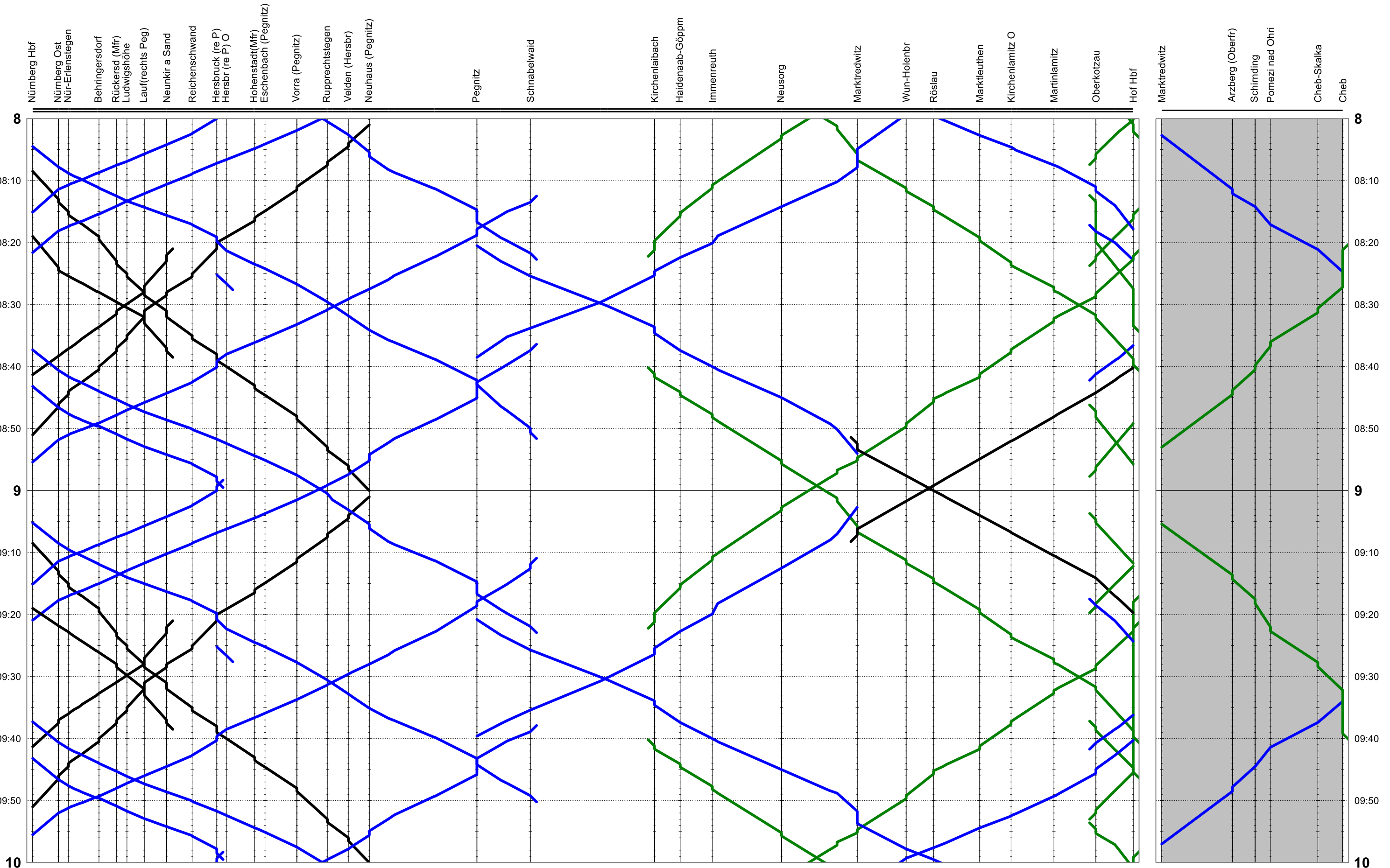
Zuggruppenversion Regionalverkehr Bayern - 3062_Studie_BEMU_XEMU_Oberfranken.



RE 31_33_39: Nürnberg - Pegnitz - Marktredwitz - Hof/Cheb

TGL

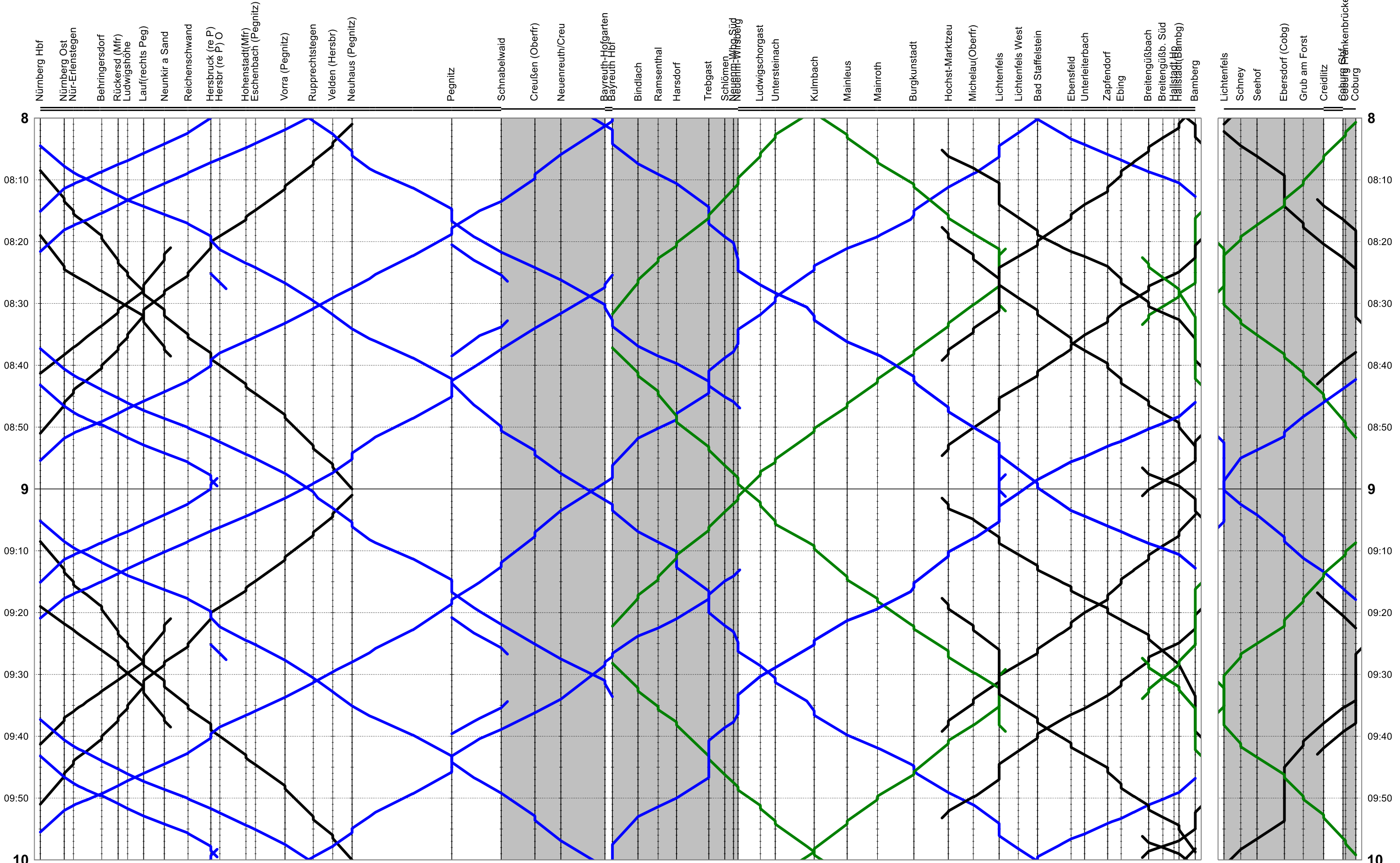
Zuggruppenversion Regionalverkehr Bayern - 3062_Studie_BEMU_XEMU_Oberfranken.



RE 32_38: Nürnberg - Bayreuth - Lichtenfels - Bamberg/Coburg

TGL

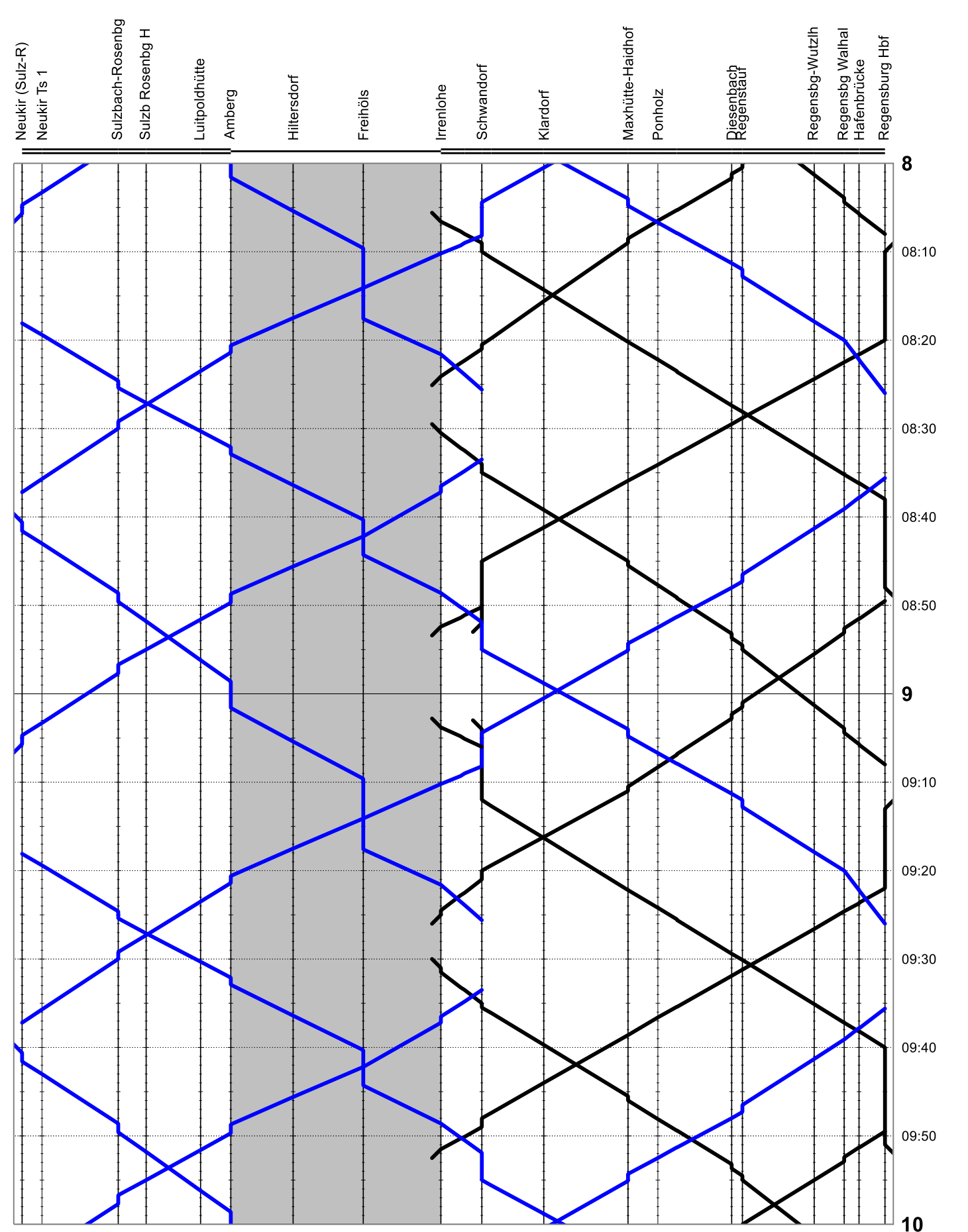
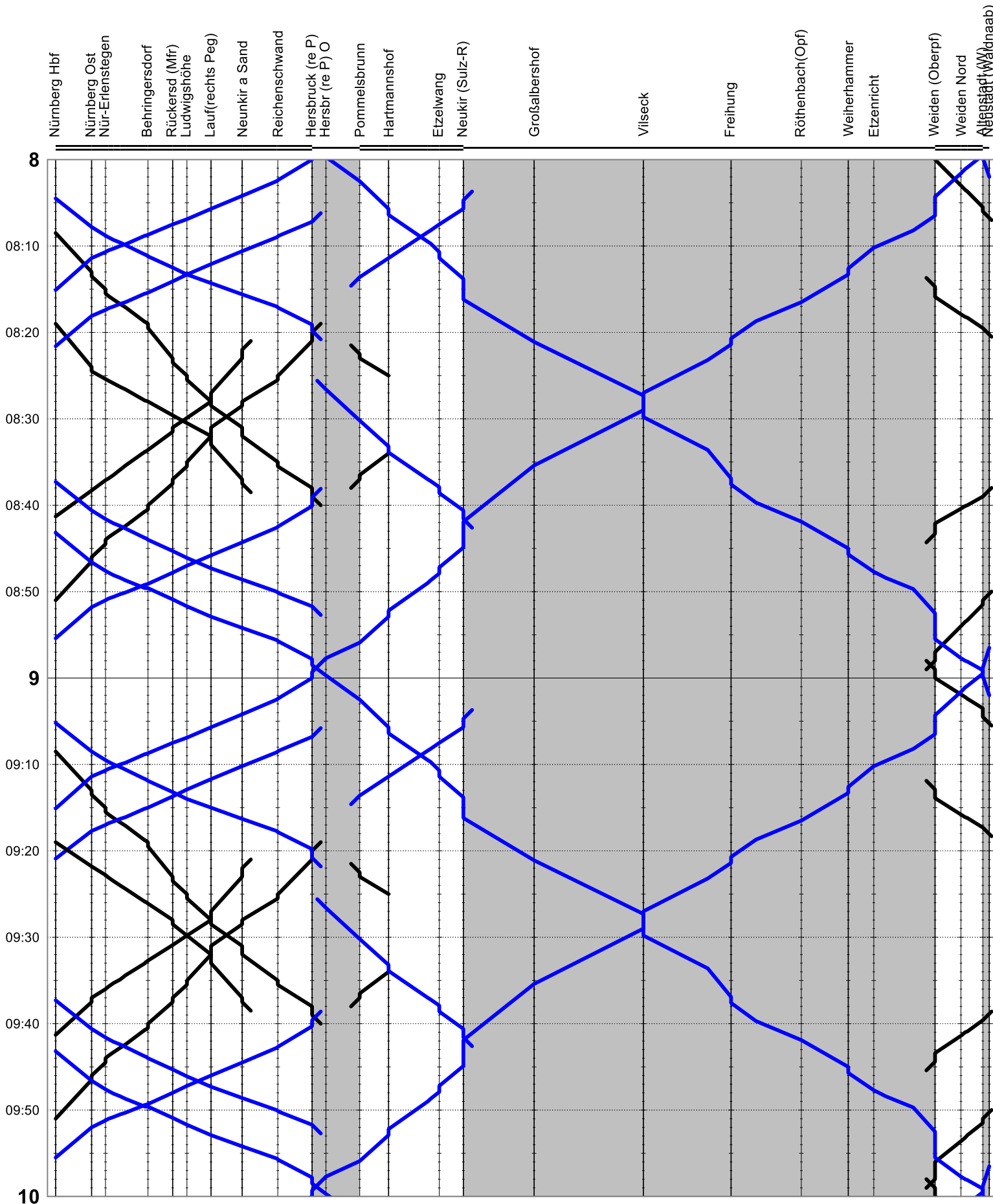
Zuggruppenversion Regionalverkehr Bayern - 3062_Studie_BEMU_XEMU_Oberfranken.



RE 40_41: Nürnberg - Neukirchen - Weiden/Regensburg

TGL

Zuggruppenversion Regionalverkehr Bayern - 3062_Studie_BEMU_XEMU_Oberfranken.



ANHANG A4 – Grafiken Wasserstoffinfrastruktur von hynes GmbH

Zum Schlussbericht der Machbarkeitsstudie Oberfranken-Achse (ECH-541.01-102 Version 1.0)

1 Datentabelle GIS

Im Rahmen einer Grundlagenrecherche wurden Daten aus dem Projekt, von den Projektpartnern sowie frei zugängliche Quellen ausgemacht, bewertet und verarbeitet. Nachfolgende Tabelle zeigt die in der Studie verwendeten Datensätze / Layer.

Für die Quellenqualität gilt folgende Legende:

- 1 – offizielle Quelle (Land, Bund, EU, renommierte, zuverlässige Institute etc.),
- 2 – freie, nicht (oder nicht bekannt) redigierte Internetquellen (Osm, Google, Geofabrik),
- 3 – Eigenrecherche, Luftbildanalyse,
- 4 – Sonstige

Datensatz/Layer	Format	Quelle	Quellenqualität	Bearbeitung	Originaldatensatz
Google Satellite	XYZ, WMS	Google	n.a.	0	-
OSM Standard	XYZ, WMS	OSM	2	0	-
Positron	XYZ, WMS	DBCarto	2	0	Originaldatensatz
Landkreise_Bayern	Polygone Vektor	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie	1	benötigte ausgeschnitten	Verwaltungsgebiete 1:250 000 Geobasis-DE
240917_UntersuchungsgebietOberfranken	Polygone Vektor	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, AG	1	benötigte ausgeschnitten, Gebiete nach AG erweitert	-
BY_Landesgrenze	Polygone Vektor	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie	1	benötigte ausgeschnitten	Verwaltungsgebiete 1:250 000 Geobasis-DE
Höhenlinien (gelb)	XYZ, WMS	Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung Bayern	1	0	-

Datensatz/Layer	Format	Quelle	Quellenqualität	Bearbeitung	Originaldatensatz
B-Pläne/FNPs	Raster	jeweilige Stadt/Kommune	1	Georeferenziert	-
ffh_epsg25832	Polygone Vektor	Bayerisches Landesamt für Umwelt	1	benötigte ausgeschnitten	-
nsg_epsg25832	Polygone Vektor	Bayerisches Landesamt für Umwelt	1	benötigte ausgeschnitten	-
lsg_epsg25832	Polygone Vektor	Bayerisches Landesamt für Umwelt	1	benötigte ausgeschnitten	-
twsg_epsg25832	Polygone Vektor	Bayerisches Landesamt für Umwelt	1	benötigte ausgeschnitten	-
nsg_epsg25832	Polygone Vektor	Bayerisches Landesamt für Umwelt	1	benötigte ausgeschnitten	-
bio_sbk_epsg25832_shp	Polygone Vektor	Bayerisches Landesamt für Umwelt	1	0	-
StraßenAuswahl_[Landkreis]	Linien Vektor	OSM	2	benötigte ausgeschnitten, von nicht relevanten gesäubert	-
240610_Tankstellen DB	Punkt Vektor	DB Energie GmbH	1	benötigte ausgeschnitten	-
relevante_Zugstrecken_mitElekt.shp	Linien Vektor	OSM	2	benötigte ausgeschnitten, von nicht relevanten (Tramgleise etc) gesäubert, kategorisiert	-
240408_Autobahnen_Bundestraßen	Linien Vektor	OSM	2	benötigte ausgeschnitten, von nicht relevanten gesäubert	-
230420_Kernnetz_inklGasUmwandlung	Linien Vektor	OGE und FNB	1	erweitert um FNB Antrag in Nürnberg	-
Hafen_Bayern	Punkt Vektor	hynes	3	Eigenrecherche	-
Flughäfen_Bayern	Punkt Vektor	hynes	3	Eigenrecherche	-
Isochronen	Linien Vektor	hynes	3	berechnet	relevante_Zugstrecken.shp
POI_Oberfranken/Wasserstofferzeuger	Punkt Vektor	hynes	3	Eigenrecherche	-

Datensatz/Layer	Format	Quelle	Quellenqualität	Bearbeitung	Originaldatensatz
231128_HyLand_NOBY_3857	Polygone Vektor	Hyland	1	Hyland Landkreise ausgeschnitten	Verwaltungsgebiete 1:250 000 Geobasis-DE
240919_Senken_Oberfranken	Punkt Vektor	hynes	3	Eigenrecherche	-
230209_Tankstellen_Bayern	Punkt Vektor	hynes	3	Eigenrecherche	-
240304_Tankstelle_Hoechst_HE_2857_F	Polygone Vektor	hynes	3	Luftbildanalyse und Eigenrecherche	-
240812_Städterelevant_mitBetankungen	Punkt Vektor	hynes	3	berechnet	-
Pufferflaechen_Puffer200m_merged_NOBY_3857_F	Polygone Vektor	hynes	3	Luftbildauswertung und FNP	-
Nürnberg/Hof/Neustadt/Markredwitz/Coburg/Bamberg/Regensburg MEGC X	Polygone Vektor	hynes	3	Herleitung aus Frankfurt Höchst	-
240410_Elektrolyseur_Nuremberg_MainzX	Polygone Vektor	hynes	3	Herleitung aus Mainz Energiepark	-
240410_Elektrolyseur_Nuremberg_WunsiedelX	Polygone Vektor	hynes	3	Herleitung aus Elektrolyseur Wunsiedel	-
240708_Nuremberg_Elektrolysestandorte_Atlaslayer	Polygone Vektor	hynes	4	Layer nur für Druckausgabe relevant	-

2 Tabellarische Darstellung der Bewertungsmatrix aller ausgemachten Potenzialstandorte in Oberfranken

Nachfolgende Bewertungsmatrizes basieren auf den Kriterienkatalog aus Kapitel 17.3.3 im Schlussbericht ECH-541.01-102.

Bewertungsdimension			Standorte																	
			Nürnberg									Bayreuth			Schwandorf			Hof		
Oberkategorie	Kategorie	Kriterium	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Infrastrukturelle Kriterien	H ₂ -Versorgungsoption	Straße	8	6	9	9	9	9	8	6	8	8	6	6	7	7	5	5	3	3
		Schiene	10	6	4	4	3	3	10	10	10	10	10	10	10	10	10	8	4	4
		Wasser	4	4	3	3	2	10	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Nähe EHB	10	10	10	10	10	10	10	10	10	4	4	4	9	9	9	5	5	5
	Fläche	Freifläche (Anlagentechnik)	10	4	10	10	10	10	10	2	4	8	8	8	10	8	10	7	10	5
		Freiheitsgrad (Ausbaupotential)	5	2	10	10	10	10	10	0	3	4	6	6	7	5	8	4	8	9
Betriebliche Kriterien	Dieselbetankung im funktionalen Umfeld		10	8	0	0	0	0	0	10	10	9	10	10	10	10	6	8	4	4
	Betriebsintegration (Leerkilometer)		4	4	2	2	0	0	4	3	3	8	10	10	9	10	9	9	9	9
	Anzahl bedienter Fahrzeuge/ Linien		10	10	10	10	10	10	10	10	10	3	3	3	6	6	6	5	5	5
	Distanz zw. Tank und Elektrolyseur		0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	0	0	0	4	4	4
Genehmigungsrechtliche Kriterien	Industriegebiet im funkt. Umfeld		8	8	10	10	5	10	6	8	8	2	2	2	4	4	6	0	0	4
	Betankungsgleis vorhanden?		10	5	0	0	0	0	10	7	10	7	7	7	7	10	7	7	3	3
	Immissionsorte (restriktiv: Abstand Wohnbebauung)		7	7	10	10	10	9	5	7	7	5	0	0	0	5	4	4	4	6
	Flächenkategorie		10	10	10	10	3	3	10	10	10	8	5	4	7	10	9	10	2	2
Wirtschaftliche Kriterien	Synergiepotentiale	H ₂ -Quellen	3	3	6	6	5	9	3	3	3	2	2	2	6	6	6	2	2	2
		H ₂ -Senken	4	4	3	3	3	2	3	3	4	2	2	2	7	7	7	0	0	0

Machbarkeitsstudie Oberfranken-Achse
Anhang 4 Grafiken Wasserstoffinfrastruktur

ECH-541.01-106
Version 1.0

		Kreislaufwirtschaft	9	9	2	2	2	7	0	9	9	6	4	4	7	7	7	7	7	7
		Hyland Region	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3	1	1	1	1	1	1
Betriebliche Machbarkeit			10	5	0	0	0	0	10	0	0	10	0	0	5	10	5	10	0	0
Summe			132	105	99	99	82	102	113	102	113	103	86	85	112	125	115	96	71	73
Median			8	5	4	4	3	7	6	6	7	5	4	4	7	7	6	5	4	4

Bewertungsdimension			bemerkenswerter Standort	andere Nachtstellorte					
			Kulmbach	Regensburg		Bamberg	Coburg	Marktredwitz	Neustadt Waldnaab
Oberkategorie	Kategorie	Kriterium	1	1	2	1	1	1	1
Infrastrukturelle Kriterien	H ₂ -Versorgungsoption	Straße	5	9	9	8	4	5	7
		Schiene	10	10	10	10	10	8	6
		Wasser	0	5	5	8	0	0	0
		Nähe EHB	9	9	9	6	0	5	4
	Fläche	Freifläche (Anlagentechnik)	10	7	4	10	10	6	6
		Freiheitsgrad (Ausbaupotential)	10	6	3	10	10	3	4
Betriebliche Kriterien	Dieselbetankung im funktionalen Umfeld		0	10	5	10	0	8	0
	Betriebsintegration (Leerkilometer)		8	5	7	10	4	10	8
	Anzahl bedienter Fahrzeuge/ Linien		0						
	Distanz zw. Tank und Elektrolyseur		7	0	0	0	0	9	0

Machbarkeitsstudie Oberfranken-Achse
 Anhang 4 Grafiken Wasserstoffinfrastruktur

ECH-541.01-106
 Version 1.0

Genehmigungs- rechtliche Kriterien	Industriegebiet im funkt. Umfeld		10	0	0	7	0	2	3
	Betankungsgleis vorhanden?								
	Immissionsorte (restriktiv: Abstand Wohnbebauung)		10	5	10	10	6	6	10
	Flächenkategorie		8	10	10	10	10	8	8
Wirtschaftliche Kriterien	Synergiepotentiale	H ₂ -Quellen	7	2	2	2	0	4	0
		H ₂ -Senken	0	9	9	3	1	3	9
		Kreislaufwirtschaft	8	4	4	7	8	0	3
		Hyland Region	10	0	0	3	3	10	10
Betriebliche Machbarkeit									
Summe			112	91	87	114	66	87	78
Median			8	5	5	8	3	5	4

3 Potenzialstandort- und Synergiekarten

Ergänzend zu den Potenzialstandortkarten im Schlussbericht ECH-541.01-102 unter Kapitel 17.3 sind nachfolgende weitere, weniger gut bewertete Potenzialflächen dargestellt.

Für alle Potenzialstandort-Karten gilt folgende Legende:

Zeichenerklärung für Potenzialstandortkarten

Tankstellenanalyse

◆ HRS Potenzialstandorte

Tankstellenbestandteile

- Betankungsgleis
- Dispenser
- Traileranlieferung
- Niederdruckspeicher
- Verdichterhalle
- MEGC
- Straßenanbindung
- Eingezäunter Bereich

Isochoren [km]

- 0,5
- 1
- 1,5
- 2
- 3
- 4
- 5
- 10

Potenzielle Wasserstoffsinken

- ▲ Automobilhersteller
- ▲ Bauunternehmen
- ▲ Chemieindustrie
- ▲ Elektrotechnik
- ▲ Glasindustrie
- ▲ Holzverarbeitung & Möbelherstellung
- ▲ Klinikprodukte
- ▲ Lebensmittelindustrie
- ▲ Logistik
- ▲ Maschinenbau
- ▲ Metallverarbeitung
- ▲ Oberflächenverdeulung
- ▲ Papierindustrie
- ▲ Petrochemie
- ▲ Pflanzengroßhandel
- ▲ Verpackung
- ▲ Zement

Wasserstoffinfrastruktur

- ◆ Wasserstofftankstellen Kfz
- Elektrolyseur Wunsiedel
- Hyland Landkreise

Transport und Verkehr

- relevante Gleise
- Wasserstoffkernnetz geplant für...
 - 2028
 - 2030
 - 2040
- Straßen
 - Autobahn
 - Bundesstraße (außerorts)
- Flughäfen_Bayern
 - ✈ Internationaler Flughafen
 - ✈ Militärflughafen
 - ✈ Regionalflughafen
 - ✈ Trimodale Häfen

Allgemeines

- Höhenlinien
- Untersuchungsgebiet
- Landkreise
- Hintergrundkarte: Google Satellite

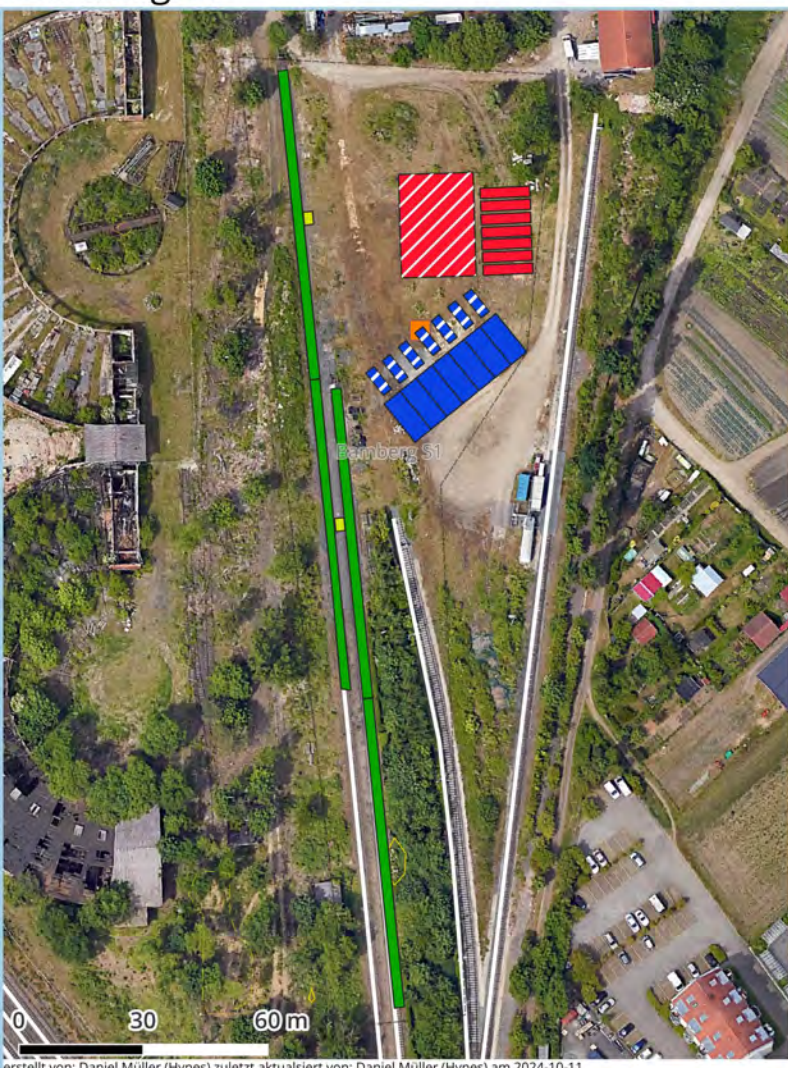


erstellt von: Daniel Müller (Hynes)
zuletzt aktualisiert von: Daniel Müller (Hynes) am 2024-10-11

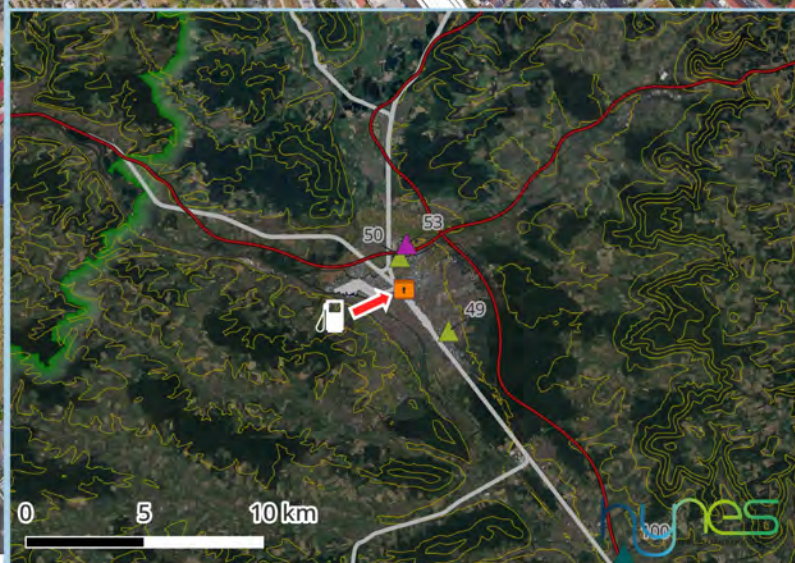


Am Schluss des vorliegenden Anhangs sind zudem Synergiepotenzial-Karten im Untersuchungsgebiet (siehe Kapitel 19.4.1 im Schlussbericht ECH-541.01-102) dargestellt.

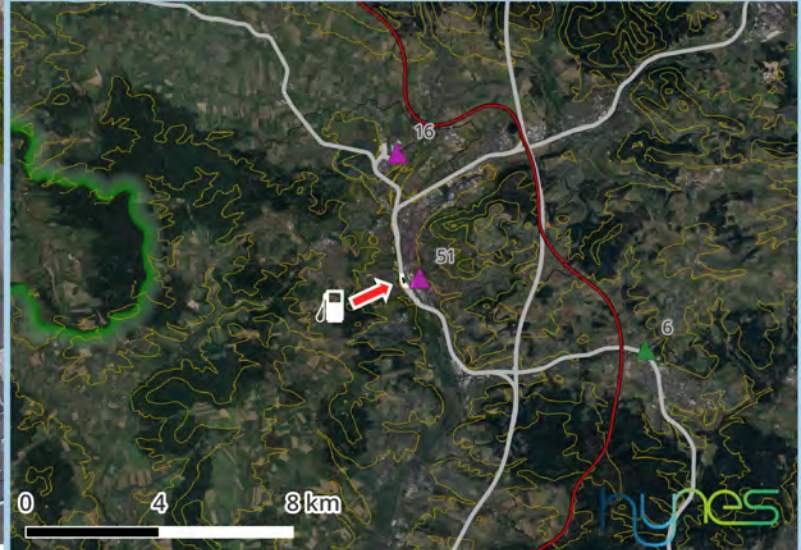
Bamberg S1



erstellt von: Daniel Müller (Hynes) zuletzt aktualisiert von: Daniel Müller (Hynes) am 2024-10-11



Coburg S1

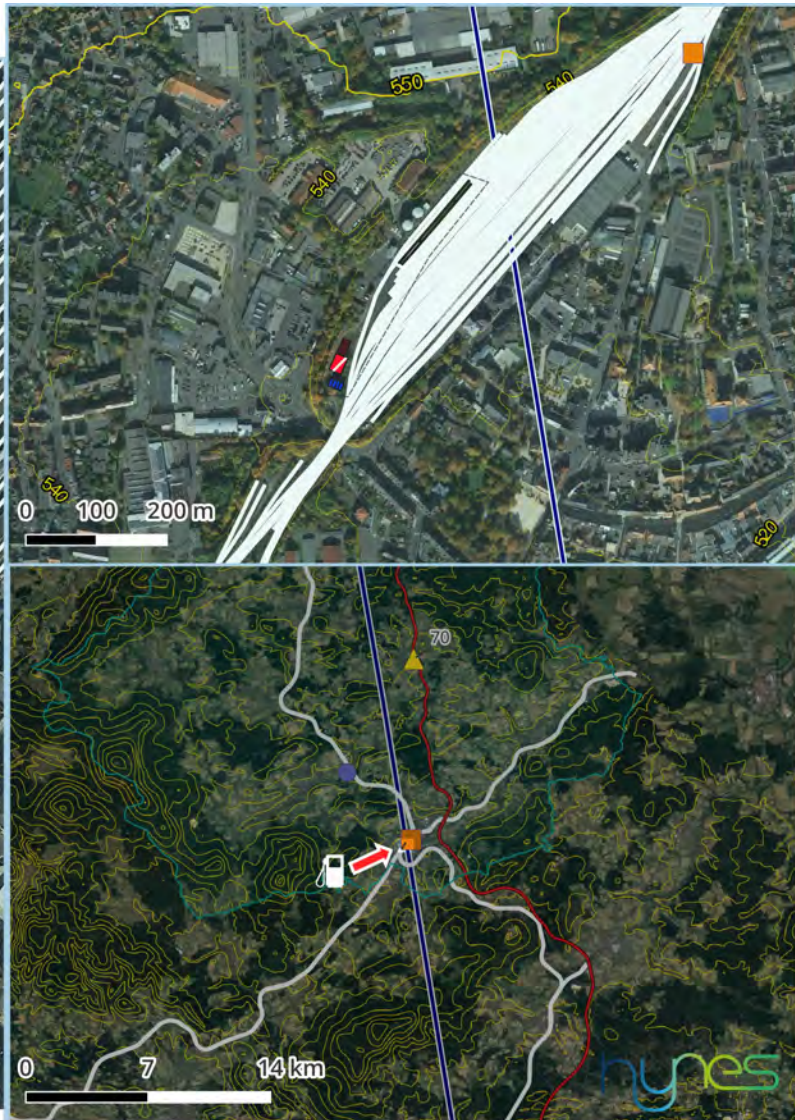


erstellt von: Daniel Müller (Hynes) zuletzt aktualisiert von: Daniel Müller (Hynes) am 2024-10-11

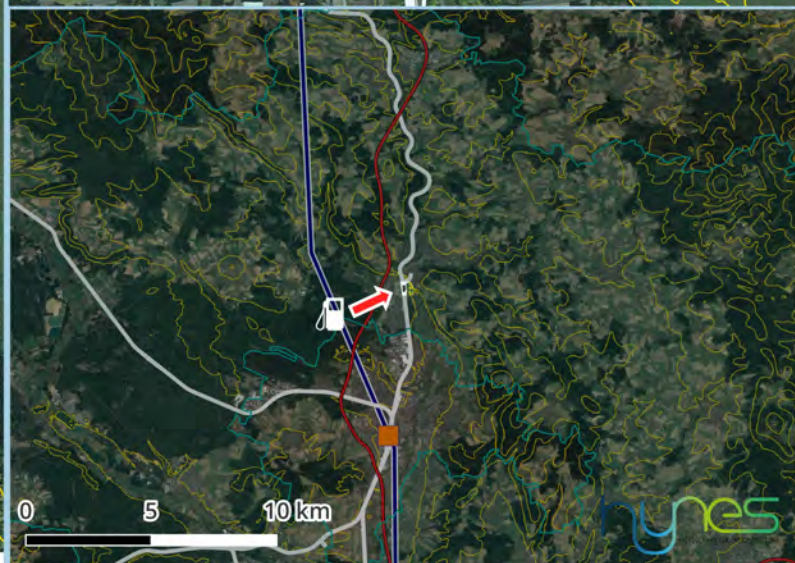
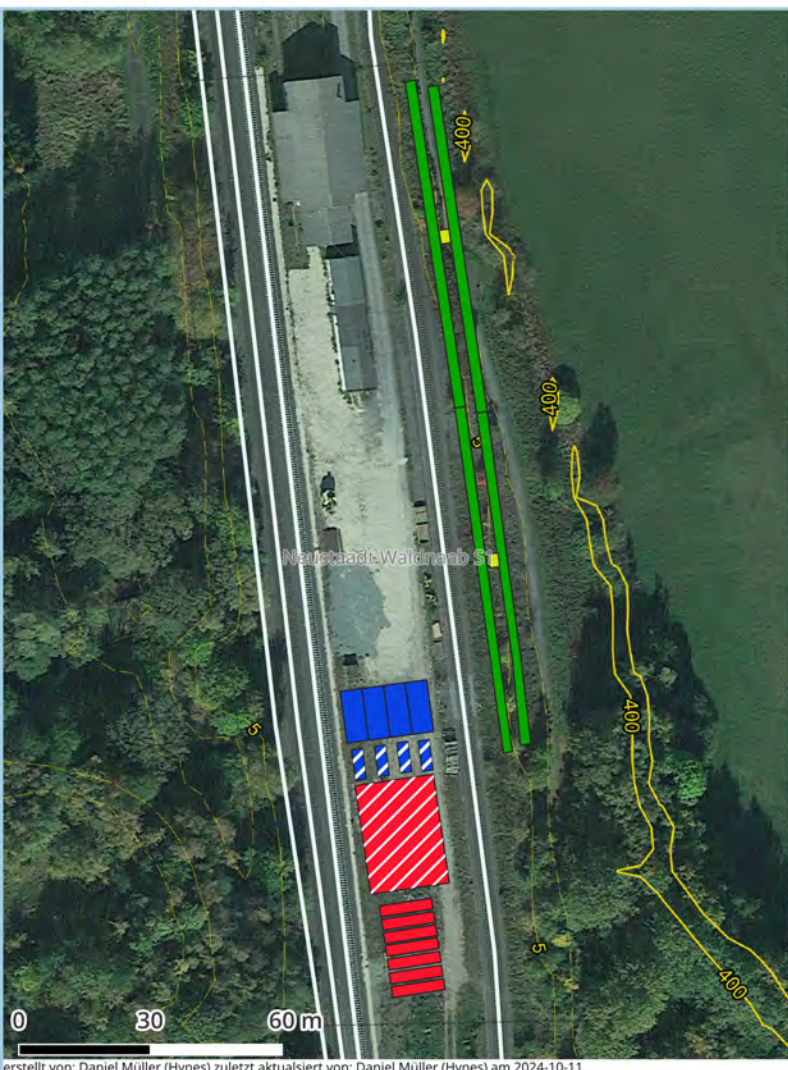
Marktredwitz S1



erstellt von: Daniel Müller (Hynes) zuletzt aktualisiert von: Daniel Müller (Hynes) am 2024-10-11

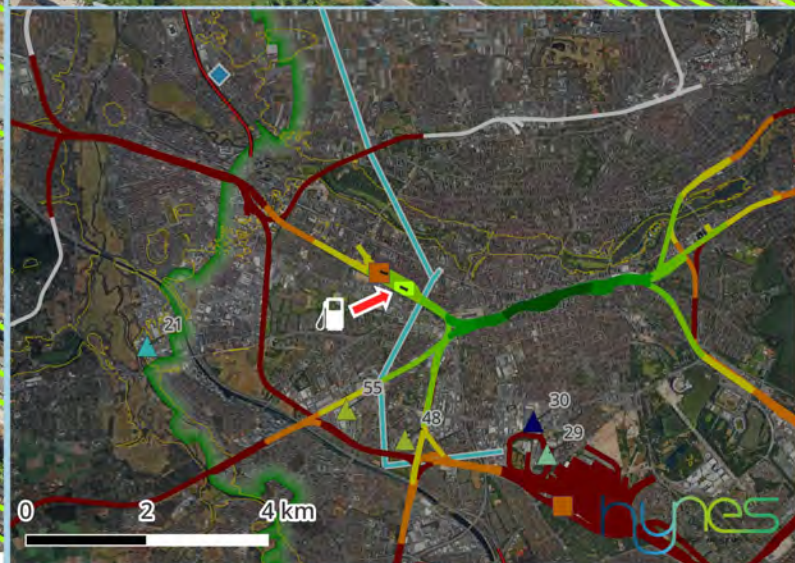
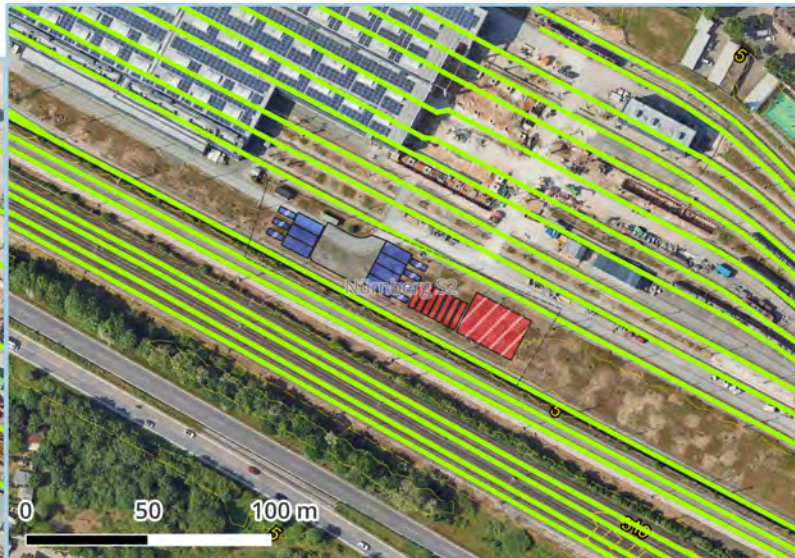
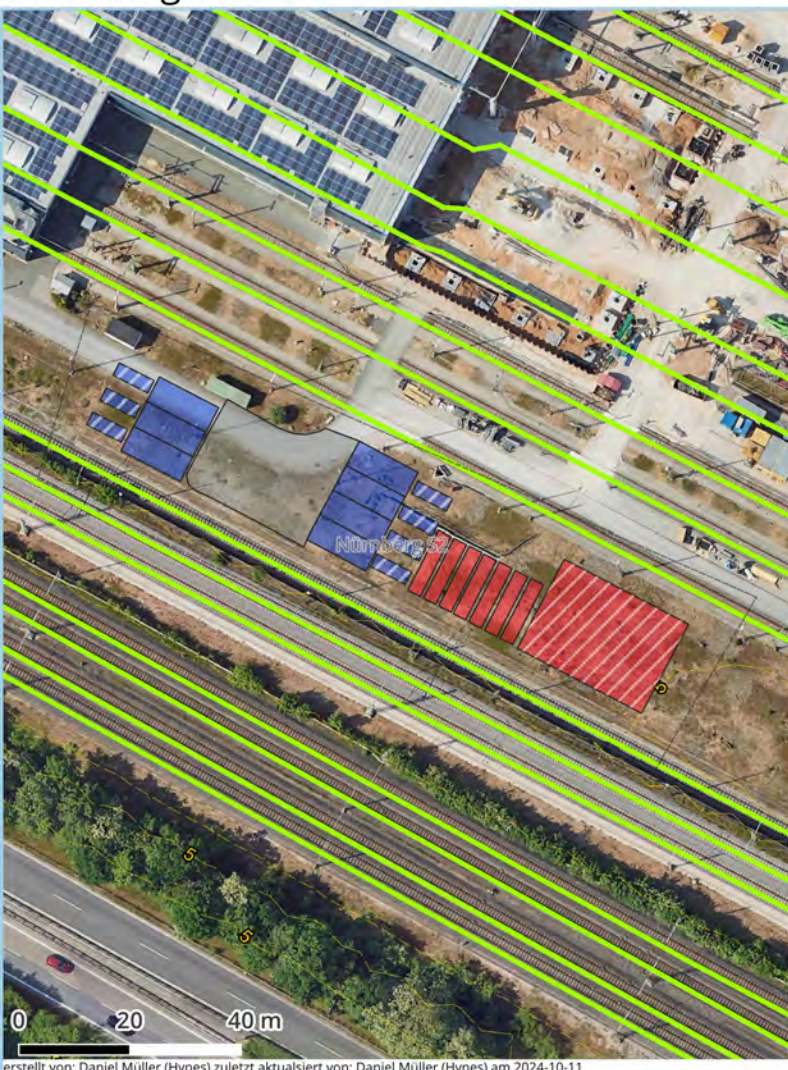


Neustaadt Waldnaab S1



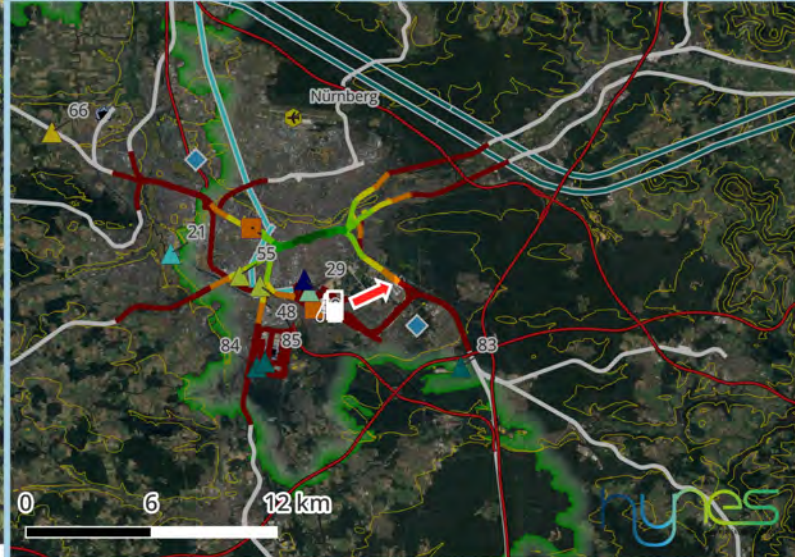
erstellt von: Daniel Müller (Hynes) zuletzt aktualisiert von: Daniel Müller (Hynes) am 2024-10-11

Nürnberg S2



erstellt von: Daniel Müller (Hynes) zuletzt aktualisiert von: Daniel Müller (Hynes) am 2024-10-11

Nürnberg S3 und S4



erstellt von: Daniel Müller (Hynes) zuletzt aktualisiert von: Daniel Müller (Hynes) am 2024-10-11

Nürnberg S5



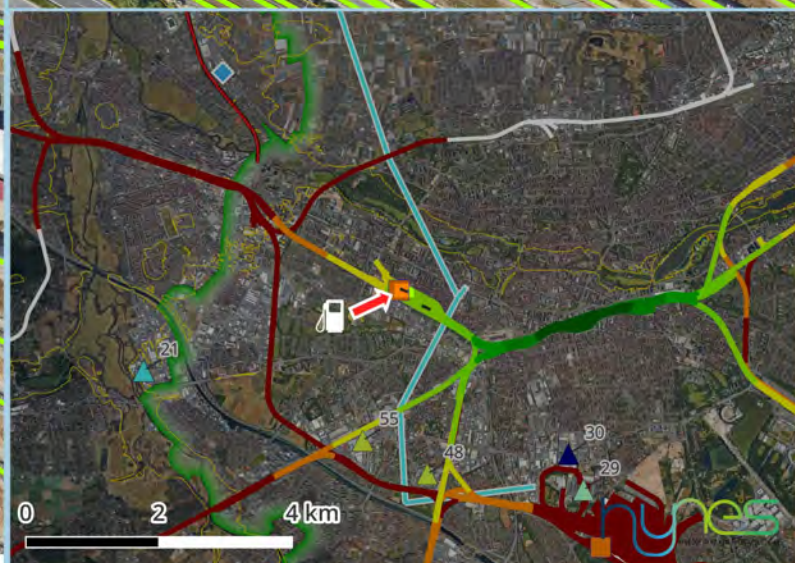
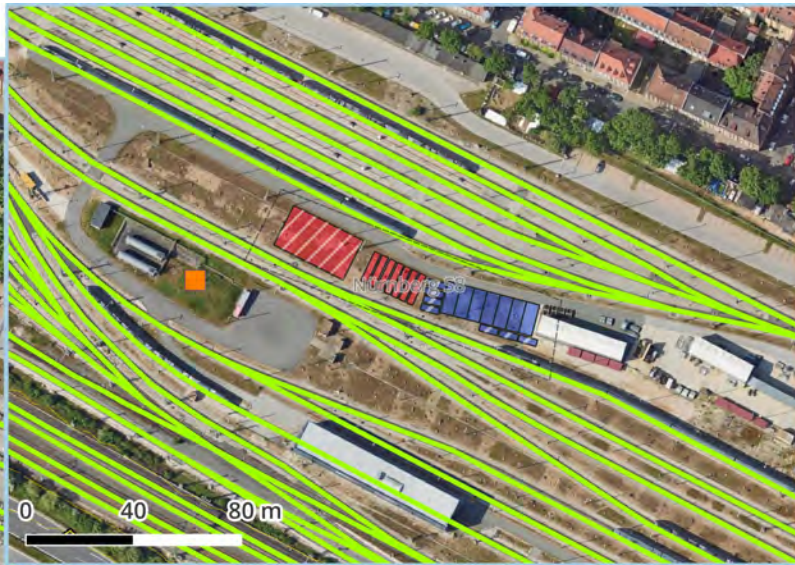
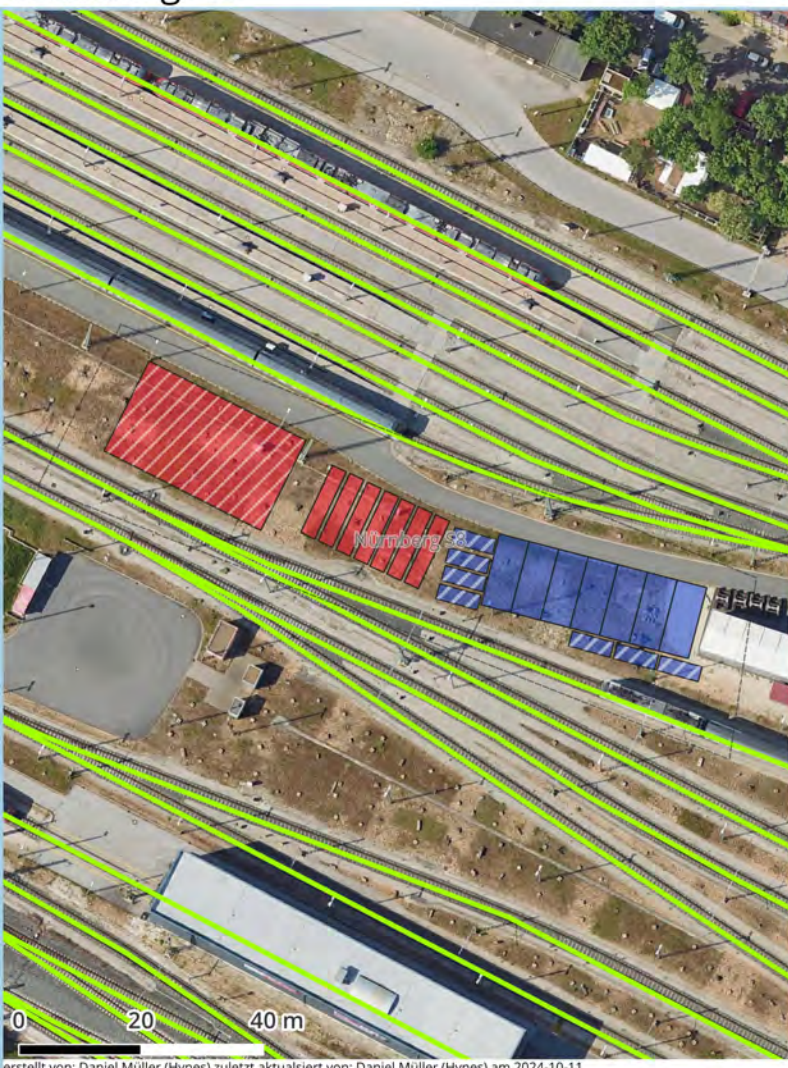
erstellt von: Daniel Müller (Hynes) zuletzt aktualisiert von: Daniel Müller (Hynes) am 2024-10-11



Nürnberg S6

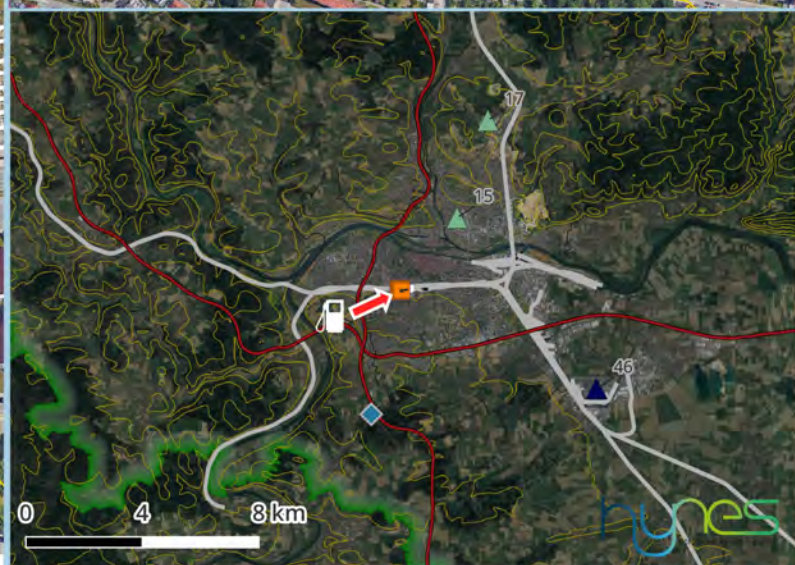
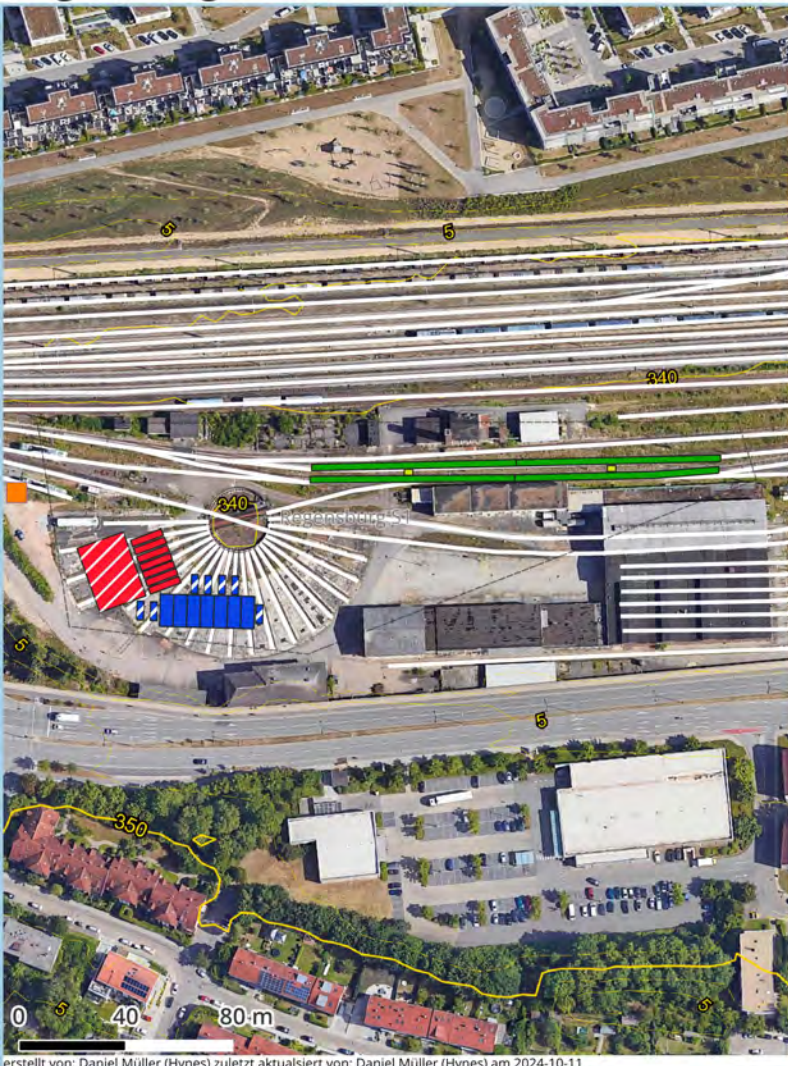


Nürnberg S8



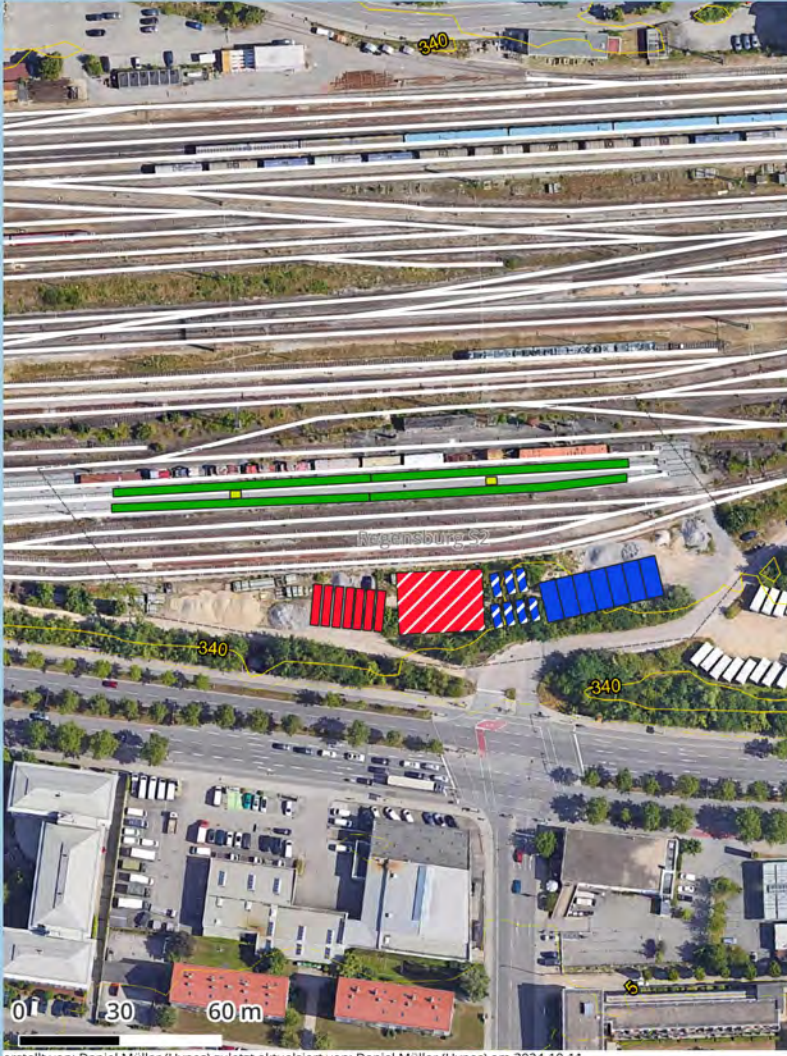
erstellt von: Daniel Müller (Hynes) zuletzt aktualisiert von: Daniel Müller (Hynes) am 2024-10-11

Regensburg S1



erstellt von: Daniel Müller (Hynes) zuletzt aktualisiert von: Daniel Müller (Hynes) am 2024-10-11

Regensburg S2



erstellt von: Daniel Müller (Hynes) zuletzt aktualisiert von: Daniel Müller (Hynes) am 2024-10-11

Zeichenerklärung für Potenzialstandortkarten

Tankstellenanalyse

◆ HRS Potenzialstandorte

Tankstellenbestandteile

■ Betankungsgleis

■ Dispenser

■ Traileranlieferung

■ Niederdruckspeicher

■ Verdichterhalle

■ MEGC

■ Straßenanbindung

■ Eingezäunter Bereich

Isochoren [km]

— 0,5

— 1

— 1,5

— 2

— 3

— 4

— 5

— 10

Potenzielle Wasserstoffsenken

▲ Automobilhersteller

▲ Bauunternehmen

▲ Chemieindustrie

▲ Elektrotechnik

▲ Glasindustrie

▲ Holzverarbeitung & Möbelherstellung

▲ Klinikprodukte

▲ Lebensmittelindustrie

▲ Logistik

▲ Maschinenbau

▲ Metallverarbeitung

▲ Oberflächenverdeleung

▲ Papierindustrie

▲ Petrochemie

▲ Pflanzengroßhandel

▲ Verpackung

▲ Zement

Wasserstoffinfrastruktur

◆ Wasserstofftankstellen Kfz

● Elektrolyseur Wunsiedel

□ Hyland Landkreise

Transport und Verkehr

■ relevante Gleise

Wasserstoffkernnetz geplant für...

— 2028

— 2030

— 2040

Straßen

— Autobahn

— Bundesstraße (außerorts)

Flughäfen_Bayern

✈ Internationaler Flughafen

✈ Militärflughafen

✈ Regionalflughafen

✈ Trimodale Häfen

Allgemeines

— Höhenlinien

■ Untersuchungsgebiet

□ Landkreise

Hintergrundkarte: Google Satellite



erstellt von: Daniel Müller (Hynes)

zuletzt aktualisiert von: Daniel Müller (Hynes) am 2024-10-11



Übersichtskarte Elektrolyseurstandortoptionen

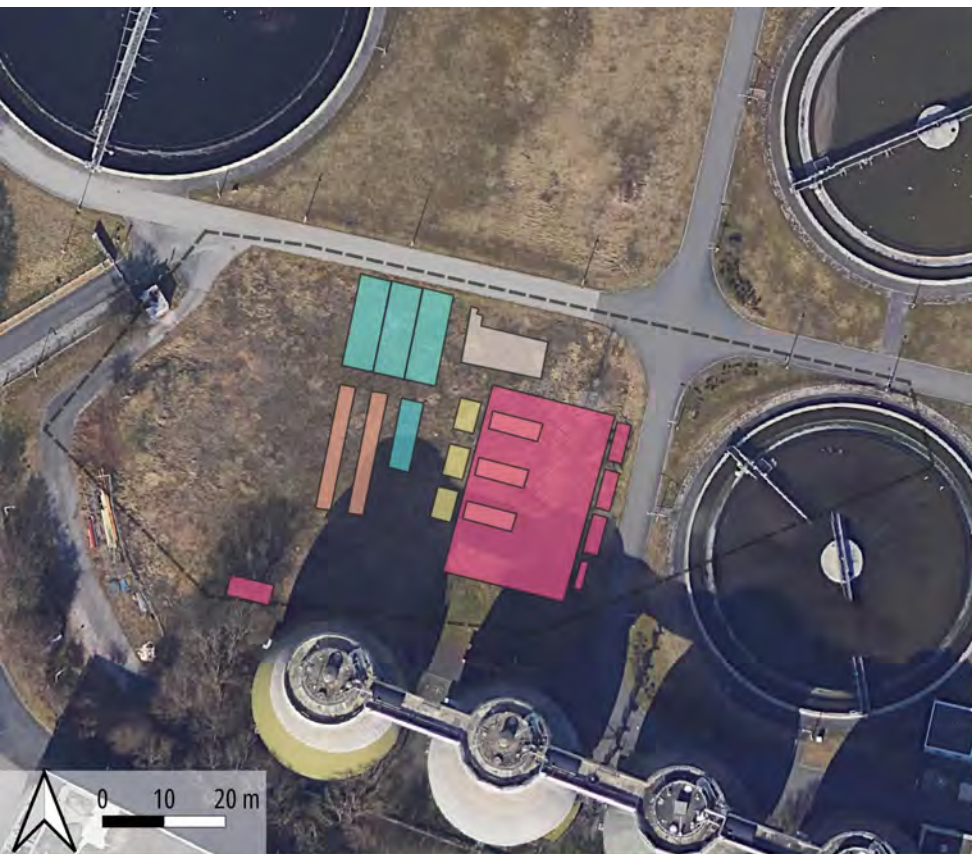


1

2 km

Hintergrundkarte: Google Satellite
zuletzt aktualisiert: 2024-07-09
von Daniel Müller (hynes GmbH)





- Bestandteile Elektrolyseurstandort**
- Elektrischer Netzanschluss
 - Elektrolysehalle
 - Elektrolysesystem
 - Gasaufbereitung & Speicherung

- Gleichrichterstation
- Verdichter
- Straßenanbindung
- Traileranlieferung
- Wasserstoff Erdgasnetzspeisung

- sonstige Layer**
- Gleise
 - Landkreise Bayern
- Hintergrundkarte: Google Satellite
 zuletzt aktualisiert: 2024-07-09
 von Daniel Müller (hynes GmbH)

Elektrolyseur Standort 1
Mainzer Aufbau



HYDROGEN AND NEW ENERGY SOLUTIONS



- Bestandteile Elektrolyseurstandort**
- Elektrischer Netzanschluss
 - Elektrolysehalle
 - Elektrolysesystem
 - Gasaufbereitung & Speicherung

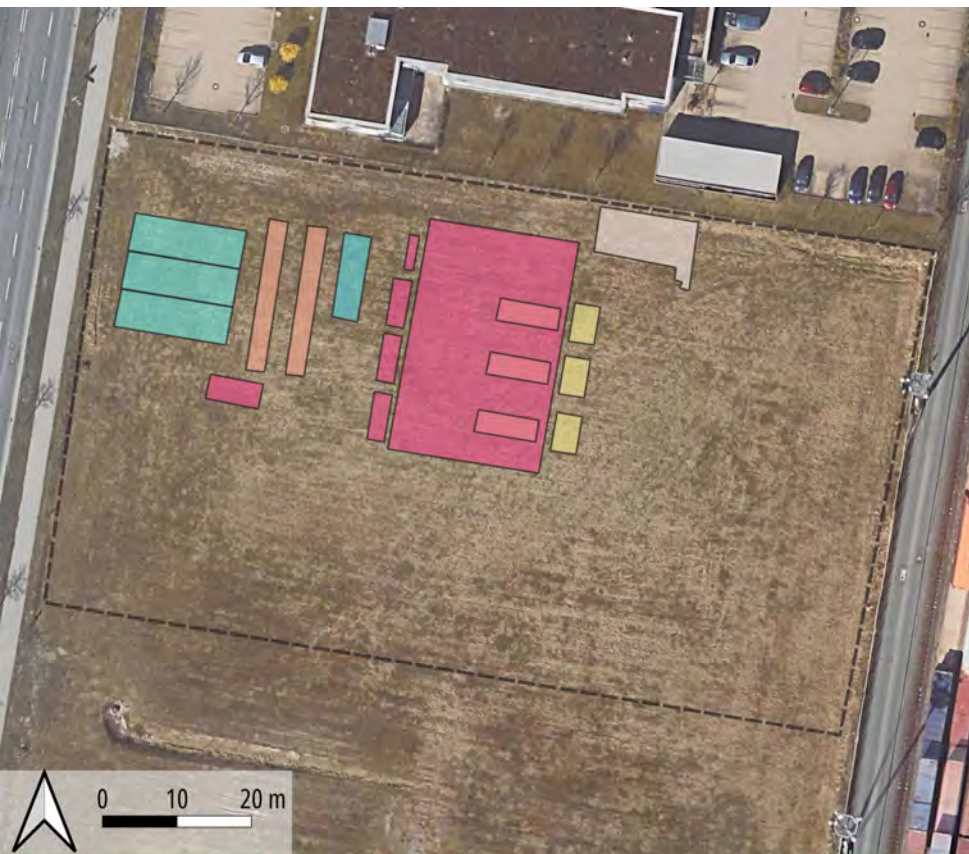
- Gleichrichterstation
- Verdichter
- Straßenanbindung
- Traileranlieferung
- Wasserstoff Erdgasnetzspeisung

- sonstige Layer**
- Gleise
 - Landkreise Bayern

**Elektrolyseur Standort 2
Mainzer Aufbau**

Hintergrundkarte: Google Satellite
zuletzt aktualisiert: 2024-07-09
von Daniel Müller (hynes GmbH)





- Bestandteile Elektrolyseurstandort**
- Elektrischer Netzanschluss
 - Elektrolysehalle
 - Elektrolysesystem
 - Gasaufbereitung & Speicherung

- Gleichrichterstation
- Verdichter
- Straßenanbindung
- Traileranlieferung
- Wasserstoff Erdgasnetzspeisung

- sonstige Layer**
- Gleise
 - Landkreise Bayern
- Hintergrundkarte: Google Satellite
 zuletzt aktualisiert: 2024-07-09
 von Daniel Müller (hynes GmbH)

**Elektrolyseur Standort 3
Mainzer Aufbau**



HYDROGEN AND NEW ENERGY SOLUTIONS



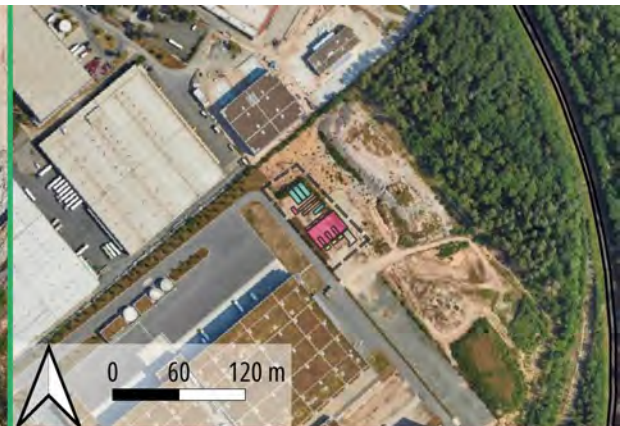
- Bestandteile Elektrolyseurstandort**
- Elektrischer Netzanschluss
 - Elektrolysehalle
 - Elektrolysesystem
 - Gasaufbereitung & Speicherung

- Gleichrichterstation
- Verdichter
- Straßenanbindung
- Traileranlieferung
- Wasserstoff Erdgasnetzspeisung

- sonstige Layer**
- Gleise
 - Landkreise Bayern
- Hintergrundkarte: Google Satellite
 zuletzt aktualisiert: 2024-07-09
 von Daniel Müller (hynes GmbH)

**Elektrolyseur Standort 4
Mainzer Aufbau**





- Bestandteile Elektrolyseurstandort**
- Elektrischer Netzanschluss
 - Elektrolysehalle
 - Elektrolysesystem
 - Gasaufbereitung & Speicherung

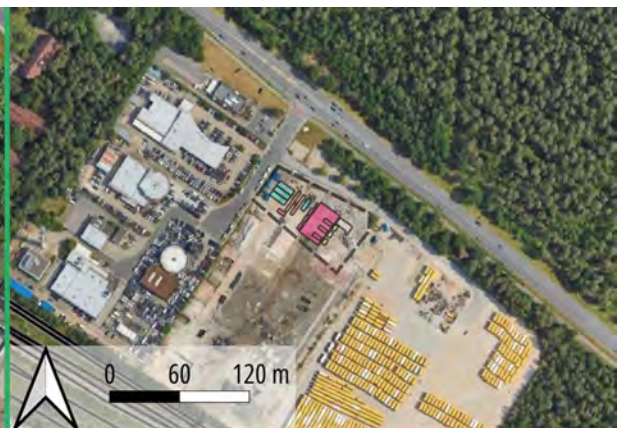
- Gleichrichterstation
- Verdichter
- Straßenanbindung
- Traileranlieferung
- Wasserstoff Erdgasnetzspeisung

- sonstige Layer**
- Gleise
 - Landkreise Bayern

**Elektrolyseur Standort 5
Mainzer Aufbau**

Hintergrundkarte: Google Satellite
zuletzt aktualisiert: 2024-07-09
von Daniel Müller (hynes GmbH)





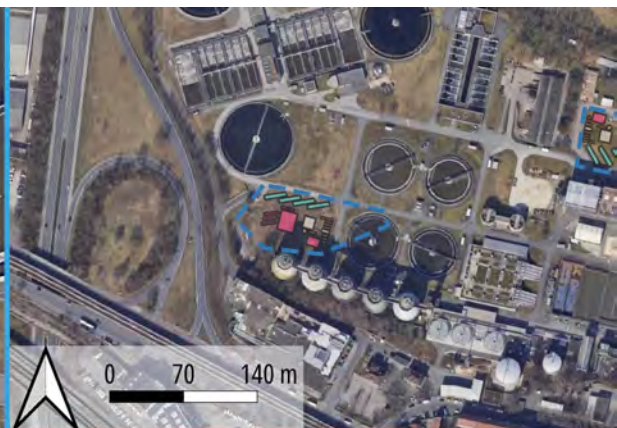
- Bestandteile Elektrolyseurstandort**
- Elektrischer Netzanschluss
 - Elektrolysehalle
 - Elektrolysesystem
 - Gasaufbereitung & Speicherung

- Gleichrichterstation
- Verdichter
- Straßenanbindung
- Traileranlieferung
- Wasserstoff Erdgasnetzspeisung

- sonstige Layer**
- Gleise
 - Landkreise Bayern
- Hintergrundkarte: Google Satellite
zuletzt aktualisiert: 2024-07-09
von Daniel Müller (hynes GmbH)

**Elektrolyseur Standort 6
Mainzer Aufbau**





- Bestandteile Elektrolyseurstandort**
- Elektrischer Netzanschluss
 - Elektrolysehalle
 - Elektrolysesystem
 - Gasaufbereitung & Speicherung

- Gleichrichterstation
- Verdichter
- Straßenanbindung
- Traileranlieferung
- Wasserstoff Erdgasnetzspeisung

- sonstige Layer**
- Gleise
 - Landkreise Bayern
- Hintergrundkarte: Google Satellite
 zuletzt aktualisiert: 2024-07-09
 von Daniel Müller (hynes GmbH)

Elektrolyseur Standort 1
Wunsiedel Aufbau





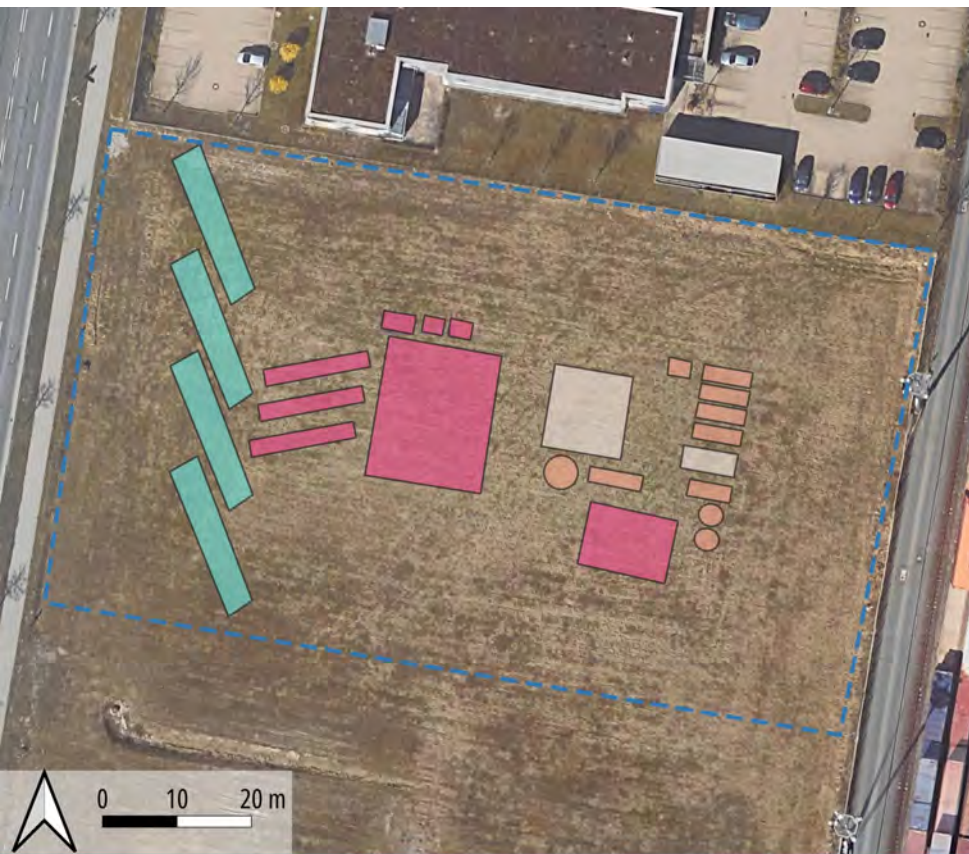
- Bestandteile Elektrolyseurstandort**
- Elektrischer Netzanschluss
 - Elektrolysehalle
 - Elektrolysesystem
 - Gasaufbereitung & Speicherung

- Gleichrichterstation
- Verdichter
- Straßenanbindung
- Traileranlieferung
- Wasserstoff Erdgasnetzspeisung

- sonstige Layer**
- Gleise
 - Landkreise Bayern
- Hintergrundkarte: Google Satellite
 zuletzt aktualisiert: 2024-07-09
 von Daniel Müller (hynes GmbH)

Elektrolyseur Standort 2
Wunsiedel Aufbau





- Bestandteile Elektrolyseurstandort**
- Elektrischer Netzanschluss
 - Elektrolysehalle
 - Elektrolysesystem
 - Gasaufbereitung & Speicherung

- Gleichrichterstation
- Verdichter
- Straßenanbindung
- Traileranlieferung
- Wasserstoff Erdgasnetzinspeisung

- sonstige Layer**
- Gleise
 - Landkreise Bayern
- Hintergrundkarte: Google Satellite
 zuletzt aktualisiert: 2024-07-09
 von Daniel Müller (hynes GmbH)

**Elektrolyseur Standort 3
 Wunsiedel Aufbau**





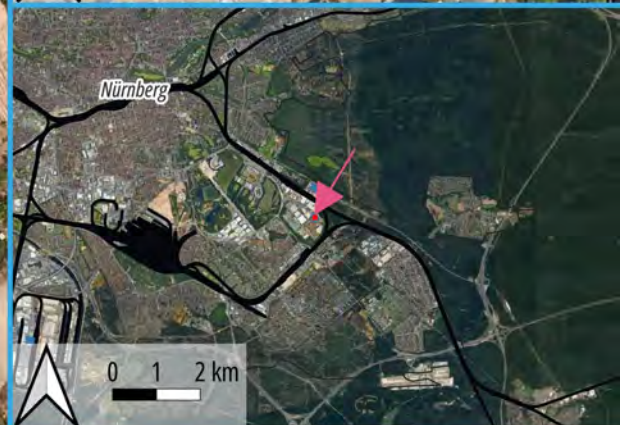
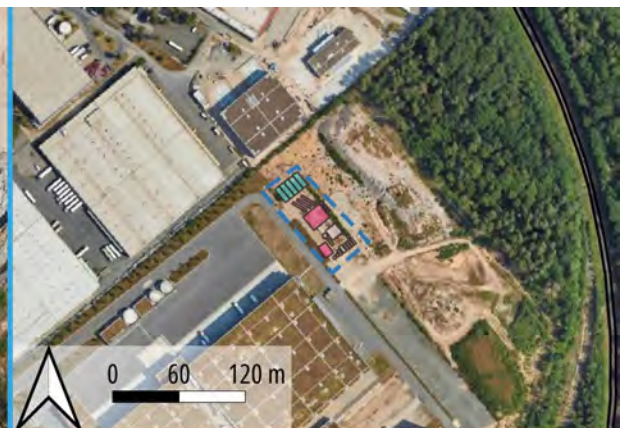
- Bestandteile Elektrolyseurstandort**
- Elektrischer Netzanschluss
 - Elektrolysehalle
 - Elektrolysesystem
 - Gasaufbereitung & Speicherung

- Gleichrichterstation
- Verdichter
- Straßenanbindung
- Traileranlieferung
- Wasserstoff Erdgasnetzspeisung

- sonstige Layer**
- Gleise
 - Landkreise Bayern
- Hintergrundkarte: Google Satellite
 zuletzt aktualisiert: 2024-07-09
 von Daniel Müller (hynes GmbH)

**Elektrolyseur Standort 4
 Wunsiedel Aufbau**





- Bestandteile Elektrolyseurstandort**
- Elektrischer Netzanschluss
 - Elektrolysehalle
 - Elektrolysesystem
 - Gasaufbereitung & Speicherung

- Gleichrichterstation
- Verdichter
- Straßenanbindung
- Traileranlieferung
- Wasserstoff Erdgasnetzspeisung

- sonstige Layer**
- Gleise
 - Landkreise Bayern

**Elektrolyseur Standort 5
Wunsiedel Aufbau**

Hintergrundkarte: Google Satellite
zuletzt aktualisiert: 2024-07-09
von Daniel Müller (hynes GmbH)





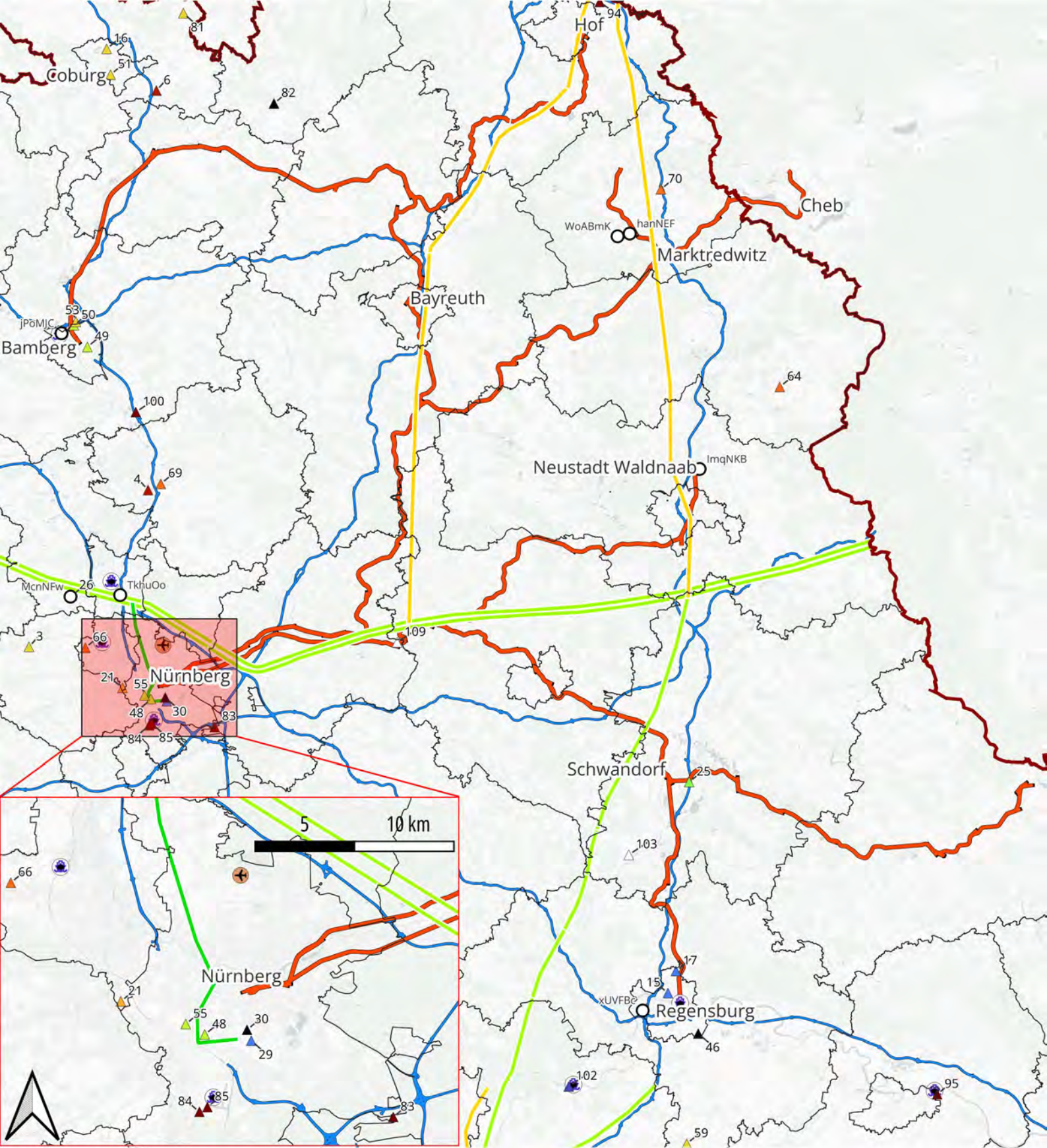
- Bestandteile Elektrolyseurstandort**
- Elektrischer Netzanschluss
 - Elektrolysehalle
 - Elektrolysesystem
 - Gasaufbereitung & Speicherung

- Gleichrichterstation
- Verdichter
- Straßenanbindung
- Traileranlieferung
- Wasserstoff Erdgasnetzspeisung

- sonstige Layer**
- Gleise
 - Landkreise Bayern
- Hintergrundkarte: Google Satellite
 zuletzt aktualisiert: 2024-07-09
 von Daniel Müller (hynes GmbH)

**Elektrolyseur Standort 6
 Wunsiedel Aufbau**





H2-Senken Industrie

potenzielle Abnehmer von Wasserstoff in der Industrie

- Wasserstoffsinken in der Industrie
- ▲ Automobilhersteller
 - ▲ Chemieindustrie
 - ▲ Elektrotechnik
 - ▲ Glasindustrie
 - ▲ Holzverarbeitung & Möbelherstellung
 - ▲ Klinikprodukte
 - ▲ Lebensmittelindustrie
 - ▲ Maschinenbau
 - ▲ Metallverarbeitung
 - ▲ Oberflächenverdeleung

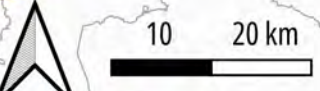
- ▲ Papierindustrie
- ▲ Pflanzengroßhandel
- ▲ Verpackung
- ▲ Logistik
- △ Zementherstellung

- Infrastruktur
- ✈ Internationaler Flughafen
 - 🚢 Binnenhafen mit Güterumschlag
 - relevante Gleisverläufe
 - Autobahn
 - ◆ Wasserstofftankstellen

- Wasserstoffnetz Ausbau
- 2028
 - 2030
 - 2040
 - H2-Erzeugungsprojekte

- Administrative Grenzen
- ▭ Bayern
 - ▭ Kreis / kreisfreie Stadt

Hintergrundkarte: CartoDB
 zuletzt aktualisiert: 2024-07-11
 von Daniel Müller (hynes GmbH)



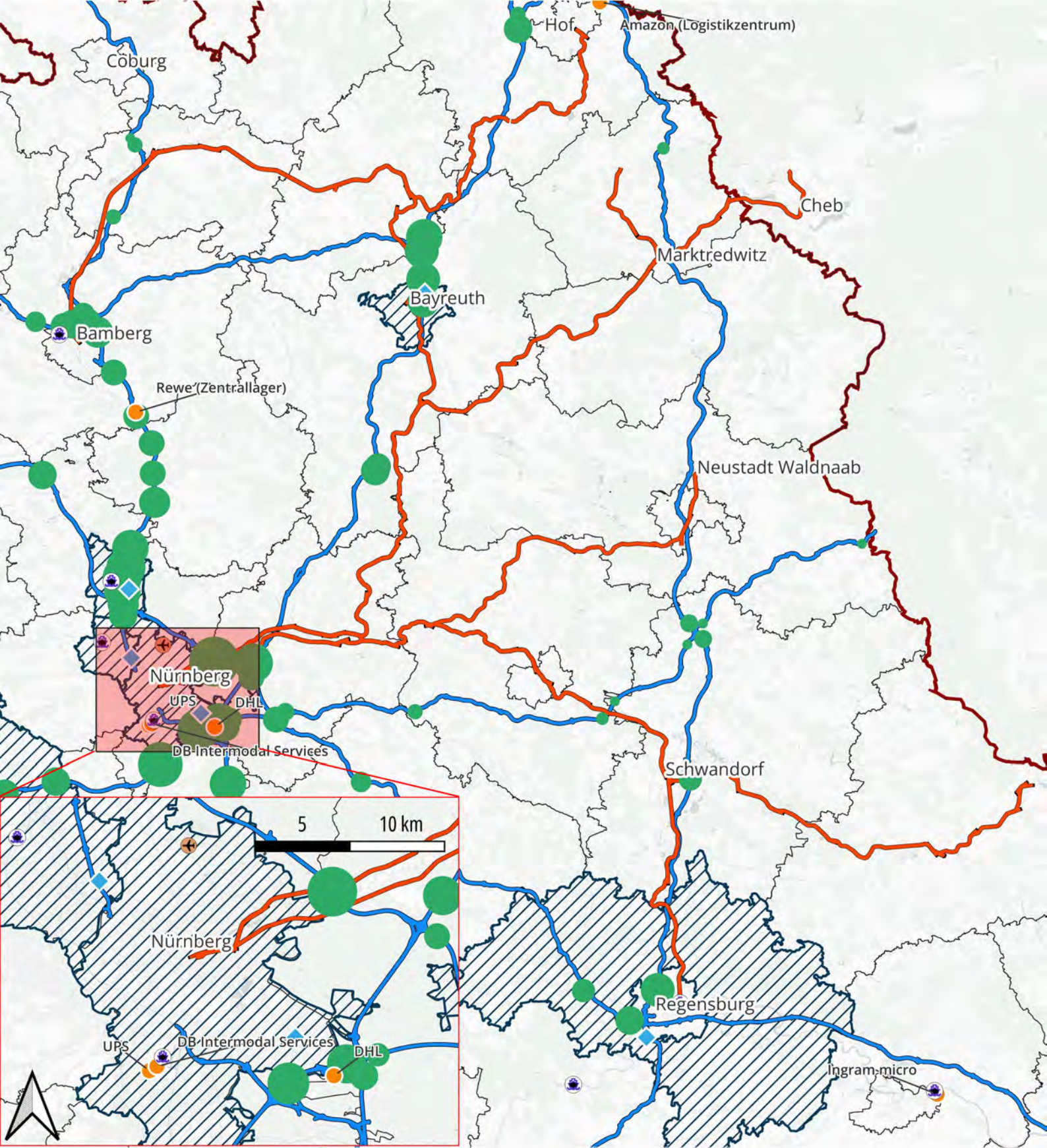
Unternehmen mit potenziellem H2-Bedarf

id	Unternehmen	Branche	Kreis
3	ErlingKlinger AG	Metallverarbeitung	Fürth
4	Schuhmacher Packaging GmbH	Verpackung	Forchheim
6	Schuhmacher Packaging GmbH	Verpackung	Coburg
11	Hipp	Lebensmittelindustrie	Pfaffenhofen an der Ilm
14	Hawe Hydraulik	Metallverarbeitung	Freising
15	Maschinenfabrik Reinhausen GmbH	Elektrotechnik	Regensburg (Kreisfreie Stadt)
16	Kaeser Kompressoren SE	Metallverarbeitung	Coburg (Kreisfreie Stadt)
17	Maschinenfabrik Reinhausen GmbH	Elektrotechnik	Regensburg (Kreisfreie Stadt)
18	Zott SE & Co. KG	Lebensmittelindustrie	Donau-Ries
20	Einhell Germany AG	Metallverarbeitung	Dingolfing-Landau
21	Leonhard Kurz Stiftung & Co. KG	Oberflächenveredelung	Fürth (Kreisfreie Stadt)
25	Wolf Wurstspezialitäten	Lebensmittelindustrie	Schwandorf
26	Schaeffler AG	Metallverarbeitung	Erlangen-Höchststadt
27	Dehner Logistik GmbH & Co. KG	Pflanzengroßhandel	Donau-Ries
29	Siemens AG	Elektrotechnik	Nürnberg
30	MAN Truck & Bus	Automobilhersteller	Nürnberg
34	Sonax Hoffmann Mineral	Chemieindustrie	Neuburg-Schrobenhausen
37	Schlenk SE	Chemieindustrie	Roth
41	Audi AG	Automobilhersteller	Ingolstadt
45	BMW AG	Automobilhersteller	Landshut
46	BMW AG	Automobilhersteller	Regensburg (Kreisfreie Stadt)
48	Robert Bosch GmbH	Maschinenbau	Nürnberg
49	Bosch GmbH	Maschinenbau	Bamberg (Kreisfreie Stadt)
50	Bosch GmbH	Maschinenbau	Bamberg
51	Brose Fahrzeugteile SE & Co. KG	Metallverarbeitung	Coburg (Kreisfreie Stadt)
53	Brose Fahrzeugteile SE & Co. KG	Metallverarbeitung	Bamberg
54	Dräxlmeier Group	Metallverarbeitung	Dingolfing-Landau
55	Rexroth Bosch AG	Maschinenbau	Nürnberg
59	Webasto Roof & Components SE	Metallverarbeitung	Regensburg
60	UPM Papierfabrik	Papierindustrie	Augsburg (Kreisfreie Stadt)
63	UPM Papierfabrik	Papierindustrie	Deggendorf
64	Liebensteiner Kartonagenwerk GmbH	Papierindustrie	Tirschenreuth
66	Emil Stahl GmbH & Co. KG	Papierindustrie	Fürth (Kreisfreie Stadt)
69	Wellpappe Forchheim GmbH & Co. KG	Papierindustrie	Forchheim
70	Packwell GmbH	Papierindustrie	Wunsiedel im Fichtelgebirge

id	Unternehmen	Branche	Kreis
71	Bayernoil Raffineriegesellschaft mbH	Petrochemie	Kelheim
73	Bayernoil Raffineriegesellschaft mbH	Petrochemie	Pfaffenhofen an der Ilm
75	Gunvor Raffinerie Ingolstadt GmbH	Petrochemie	Ingolstadt
77	LEIPA Georg Leinfelder GmbH	Papierindustrie	Neuburg-Schrobenhausen
81	DIEPA Drahtseilwerk Dietz GmbH & Co. KG	Metallverarbeitung	Coburg
82	Dr. Schneider Unternehmensgruppe	Automobilhersteller	Kronach
83	DHL	Logistik	Nürnberger Land
84	UPS	Logistik	Nürnberg
85	DB Intermodal Services	Logistik	Nürnberg
89	Kuehne + Nagel KG	Logistik	Freising
94	Amazon (Logistikzentrum)	Logistik	Hof
95	Ingram micro	Logistik	Straubing-Bogen
100	Rewe (Zentrallager)	Logistik	Bamberg
102	Kelheim Fibres	Chemieindustrie	Kelheim
103	HeidelbergCement AG	Zement	Schwandorf
108	Solnhofer Portland-Zementwerke GmbH & Co. KG	Zement	Eichstätt
109	Sebald Zement GmbH	Zement	Nürnberger Land

H2-Erzeugungsprojekte

Kennung	Titel	Status
jPoMJC	Bosch Power Unit	k.A.
TkhuOo	Green Hydrogen @ Blue Danube Elyance (Teil Bayern)	laufend
hanNEF	PtG-Anlage Wunsiedel	laufend
ImqNKB	HyExperts II: Landkreis NEW	laufend
WoABmK	HyExperts I: Wasserstoff-Modellregion Fichtelgebirge	abgeschlossen
RkQgvt	HyPerformer I: Wasserstoff-Modellregion Landshut - München - Ebersberg	laufend
xUVFbc	BayH2	laufend
McNFw	Elektrolyse für industrielle Anwendungen	vorbereitend
CXBDfh	Elektrolyseur mit PV-Anlage	laufend



Potenzialkarte Verkehr

- Infrastruktur**
- Internationaler Flughafen
 - Binnenhafen mit Güterumschlag
 - Logistikzentren und große Spediteure
 - relevante Gleisverläufe
 - Autobahn

- Wasserstofftankstellen**
- Wasserstofftankstelle in Landkreis vorhanden
 - Wasserstofftankstellen für Kfz

- Administrative Grenzen**
- Bayern
 - Kreis / kreisfreie Stadt

- DTV Daten Anzahl Kfz./d [1000 Kfz.]**
- 10
 - 90

Unternehmen	PLZ	Kreis
DHL	90475	
UPS	90451	
DB Intermodal Services	90451	
Kuehne + Nagel KG	85416	
Amazon (Logistikzentrum)	95185	
Ingram micro	94315	
Rewe (Zentrallager)	96155	



Hintergrundkarte: CartoDB
 zuletzt aktualisiert: 2024-07-11
 von Daniel Müller (hynes GmbH)