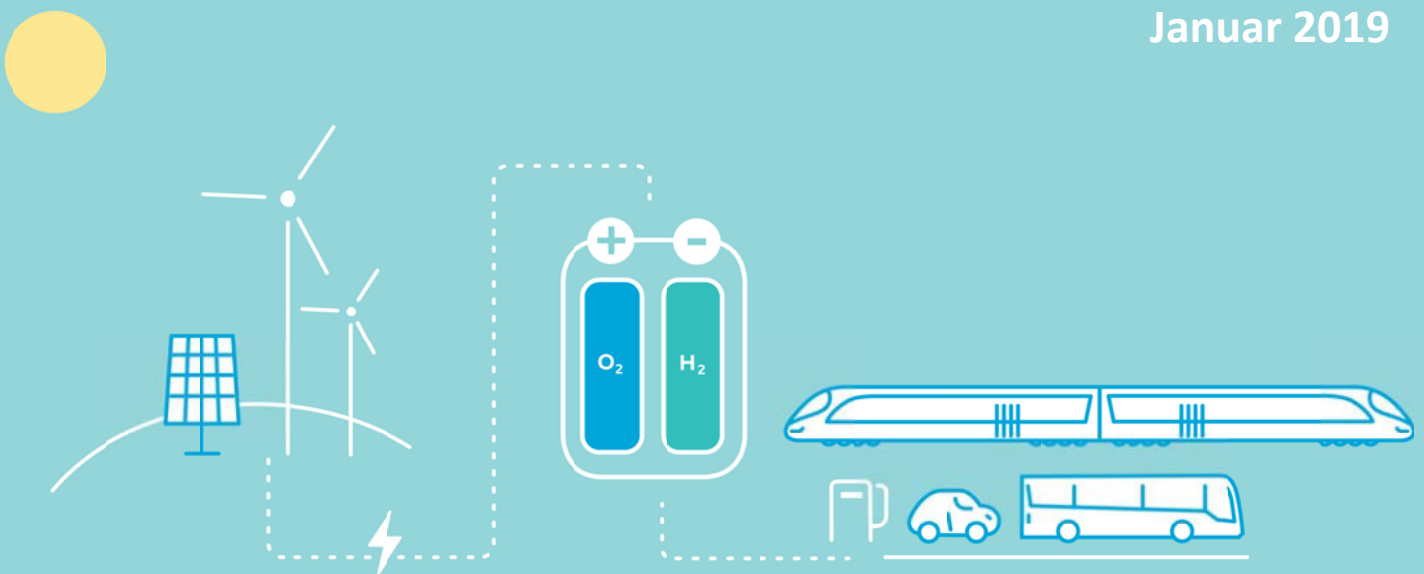


Schlussbericht Machbarkeitsstudie

Pilotprojekt Einsatz von H₂BZ-Triebwagen in Thüringen

Uwe Plank-Wiedenbeck, Mark Jentsch, Frank Lademann,
Sebastian Büttner, Nicole Meyer, Anton Ivanov

Januar 2019



Schlussbericht Machbarkeitsstudie

Pilotprojekt Einsatz von H₂BZ-Triebwagen in Thüringen

Auftraggeber:

Freistaat Thüringen
Ministerium für Umwelt, Energie und Naturschutz (TMUEN)
Beethovenstraße 3
99096 Erfurt

Auftragnehmer:

Prof. Dr. Uwe Plank-Wiedenbeck
Verkehrssystemplanung
(Vertretungsberechtigter der Bietergemeinschaft)

Jun.-Prof. Dr. Mark Jentsch
Urban Energy Systems

Prof. Dr. Frank Lademann
Eisenbahnwesen

Bauhaus-Universität Weimar
Bauhaus-Institut für zukunftsweisende
Infrastruktursysteme (b.is)
Marienstraße 13D
99423 Weimar

Oberhöchstädter Straße 2
61476 Kronberg (Ts.)

Bearbeitung:

Uwe Plank-Wiedenbeck, Mark Jentsch, Frank Lademann,
Sebastian Büttner, Nicole Meyer, Anton Ivanov

Inhalt

1.	Einleitung	1
1.1	Einordnung	1
1.2	Zielstellung	2
1.3	Vorgehensweise bei der Bearbeitung	3
2.	Hintergrundanalyse H₂BZ-Antriebe im Eisenbahnverkehr	4
2.1	Stand der Technik	4
2.1.1	H ₂ BZ-Antriebe im Eisenbahnverkehr in Europa	4
2.1.2	H ₂ BZ-Antriebe im Eisenbahnverkehr, international	5
2.1.3	Fazit zur Marktverfügbarkeit von H ₂ BZ-Triebwagen	6
2.1.4	Optionen für die Wasserstoffbereitstellung	6
2.1.5	H ₂ -Betankungstechnik	8
2.1.6	Praxiserfahrungen beim Betrieb von Wasserstofftankstellen	10
2.1.7	Fazit zur Bereitstellung der Wasserstoffinfrastruktur für ein Pilotprojekt	11
2.2	Bestandsaufnahme und Anforderungen an Wasserstofftankstellen	11
2.2.1	Bestandsaufnahme des Thüringer Eisenbahnnetzes und der eingesetzten Fahrzeuge	11
2.2.2	Grundlegende technische Anforderungen an Wasserstofftankstellen im Eisenbahnbetrieb	16
2.2.3	Genehmigung von Wasserstofftankstellen im Eisenbahnbetrieb	16
2.2.4	Technische Regeln und Normen für die Errichtung und den Betrieb von Wasserstofftankstellen im Eisenbahnbetrieb	19
2.2.5	Regeln für den Transport von Wasserstoff	26
3.	Potentiale für den Eisenbahnbetrieb mit H₂BZ-Triebwagen in Thüringen	29
3.1	Auswahl von geeigneten Eisenbahnstrecken	29
3.1.1	Kriterien zur Bewertung und Auswahl von Eisenbahnstrecken und Eisenbahnlinien	29
3.1.2	Für den H ₂ BZ-Triebwagenbetrieb geeignete Eisenbahnstrecken	31
3.1.3	Fazit für die Umsetzung eines Pilotprojektes in Thüringen	35
3.2	Standortauswahl für Wasserstofftankstellen	36
3.2.1	Kriterienkatalog zur Standortbewertung von Wasserstofftankstellen im Eisenbahnbetrieb	36
3.2.2	Wasserstofftankstellen für den Eisenbahnbetrieb mit On- und Off-Site-Elektrolyse mit Verknüpfungsmöglichkeiten zum Individualverkehr	38
3.2.3	Umsetzung einer Wasserstofflogistik für Off-Site-Elektrolyselösungen	41
3.2.4	Fazit für die Planung von Wasserstofftankstellen für ein Pilotprojekt	43
3.3	Grundlegende Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen	43
3.3.1	Ermittlung von H ₂ -Zielpreisen für den Eisenbahnbetrieb	43
3.3.2	Investitions- und Betriebskosten für ein Pilotprojekt mit H ₂ BZ-Triebwagen	45

3.4	Grundlegende Dimensionierung von mit erneuerbaren Energien versorgten Wasserstofftankstellen für den Eisenbahnbetrieb	46
3.4.1	Ermittlung der erforderlichen Wasserstoffspeicher- und Elektrolyseurgröße	46
3.4.2	Bilanzielle Betrachtung der Wasserstoffbereitstellung über Photovoltaikanlagen	48
3.4.3	Direkte Wasserstoffbereitstellung über Windkraftanlagen	51
3.4.4	Wasserstoffbereitstellung über sonstige Erneuerbare-Energien-Anlagen	57
3.4.5	Möglichkeiten der Elektrolysesauerstoffnutzung auf Kläranlagen	59
3.4.6	Fazit und resultierende Methodik der Anlagendimensionierung für ein Pilotprojekt	60
4.	Konzeption für den Einsatz von H₂BZ-Triebwagen in einem Pilotprojekt in Thüringen	63
4.1	Bahnlinie Rottenbach – Katzhütte	63
4.1.1	Ermittlung der betrieblichen Rahmenbedingungen	63
4.1.2	Möglichkeiten zur H ₂ -Bereitstellung aus bestehenden Windkraftanlagen	64
4.1.3	Ermittlung der Elektrolyseurgröße und der H ₂ -Gestehungskosten	65
4.1.4	Abschätzung der Investitionskosten und Förderung	71
4.1.5	Standortanalyse Wasserstofftankstellen	74
4.2	Ausblick Bahnlinie Erfurt – Nordhausen	77
4.2.1	Ermittlung der betrieblichen Rahmenbedingungen	77
4.2.2	Abschätzung der H ₂ -Gestehungskosten und der Investitionskosten	78
5.	Empfehlungen zur Umsetzung eines Pilotprojektes	80
5.1	Allgemeines	80
5.2	Vergabeverfahren	81
5.3	Empfehlungen für eine Förderrichtlinie	83
	Quellenverzeichnis	85

Anhänge

A	Begleitendes Material und Schaubilder zu den Eisenbahnstrecken in Thüringen
B	Anforderungen an Wasserstofftankstellen entsprechend den relevanten technischen Regeln und Normen
C	Grundlegende Dimensionierung eines Trailers mit 300 bar Stahlflaschenbündeln zur Sicherstellung der Wasserstofflogistik
D	Detailliertes Ablaufschema für die Ermittlung der Gestehungskosten pro kg Wasserstoff für ein Pilotprojekt zum Einsatz von H ₂ BZ-Triebwagen in Thüringen
E	Rahmenparameter für die Tabellenkalkulation zur iterativen Ermittlung der Wasserstoffgestehungskosten für die Bahnlinie Rottenbach – Katzhütte

Disclaimer

Die in diesem Bericht gemachten Angaben beruhen auf dem aktuellen Stand von Technik und Wissenschaft, auf bei den Auftragnehmern vorliegenden Dokumenten aus der Industrie sowie auf mündlichen Aussagen aus Expertengesprächen. Insbesondere die Angaben zu den Kosten der verschiedenen Anlagen und Komponenten für die Umsetzung eines Pilotprojektes zum Einsatz von H₂BZ-Triebwagen stammen aus solchen Gesprächen. Gleiches gilt für sämtliche für die Wasserstoffbereitstellung und -logistik notwendigen Anlagen und Einrichtungen. Da der Markt erst im Hochlauf begriffen ist, sind diese Angaben mit hohen Unsicherheiten versehen, so dass die tatsächlichen Kosten bei einer Umsetzung des Projektes von den hier gemachten Angaben divergieren können.

Zu Teilaspekten der Studie sind Vertraulichkeitserklärungen unterzeichnet worden, sofern es sich bei den von Dritten zu Verfügung gestellten Informationen um wettbewerbsrechtliche Aspekte handelt. Diese Angaben sind dementsprechend nicht im Bericht dokumentiert, sind jedoch in die Projektergebnisse und die Empfehlungen der Gutachter eingeflossen.

Diese Machbarkeitsstudie basiert auf dem Informationsstand der Auftragnehmer zum Zeitpunkt ihrer Abgabe beim Auftraggeber. Deshalb ist die Machbarkeitsstudie, insbesondere dort wo sie einzelne Produkte, Produktgruppen oder betriebliche Rahmenbedingungen im Thüringer Eisenbahnverkehr betrifft, als Momentaufnahme zu verstehen, da der Markt sich derzeit in einer schnellen Entwicklungsphase befindet.

1. Einleitung

1.1 Einordnung

In Deutschland entfiel 2017 auf den Verkehrssektor entsprechend den jährlich von der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. bereitgestellten Informationen ein Endenergieverbrauch von 765 TWh (AGEB, 2018a). Dies stellte mit 29,5 % am gesamten deutschen Endenergieverbrauch noch vor dem Industriesektor den größten sektoralen Anteil dar. Da bundesweit noch immer über 90 % dieses Energieverbrauchs auf Basis von mit Mineralölkraftstoffen versorgten Motoren erfolgt (AGEB, 2018a), sind daher gerade im Verkehrssektor große Anstrengungen erforderlich, wenn die nationalen Emissionsziele im Zusammenhang mit den internationalen Anstrengungen im Rahmen des Pariser Klimaabkommens erreicht werden sollen. Wie Abbildung 1-1 verdeutlicht, sind die Treibhausgasemissionen im deutschen Verkehrssektor zuletzt sogar gestiegen, mit Werten in 2016 leicht über denen von 1990 (UBA, 2018a). Das nationale Ziel einer Reduktion der Treibhausgasemissionen um 40 % gegenüber 1990 bis 2020 ist somit im Verkehrssektor grundlegend verfehlt worden (AGEB, 2018b). Dies gilt selbst dann, wenn man das im Aktionsprogramm der Bundesregierung dargestellte weniger ambitionierte Ziel für den Verkehrssektor ansetzt, das bis 2020 eine Reduktion von 10 bis 12 % der Treibhausgasemissionen gegenüber 1990 vorsieht (Die Bundesregierung, 2014).

Nach Berechnungen des Leipziger Instituts für Energie lagen die Treibhausgasemissionen in CO₂-Äquivalenten im Verkehrssektor in **Thüringen** 2014 sogar um 13 % höher als 1990 mit einem Anteil von 23 % an den Gesamtemissionen (Ebert M. et al., 2016), während der Anteil des Verkehrssektors bundesweit im gleichen Jahr bei 21 % lag (UBA, 2018b). Dies verdeutlicht, dass im Thüringer Verkehrssektor Maßnahmen zur Emissionsreduktion erforderlich sind, um zur Erreichung der nationalen Klimaschutzziele beizutragen. Hierauf hat die Thüringer Landesregierung unter anderem mit der Entwicklung des Masterplans Elektromobilität für Thüringen 2030 reagiert. Ferner sind die Unterstützung von Maßnahmen zur Standardisierung (Ladesäulenverordnung) oder zur Motivation von Institutionen zur aktiven Beteiligung an der Elektromobilität (Ladesäuleninfrastruktur) zu nennen.

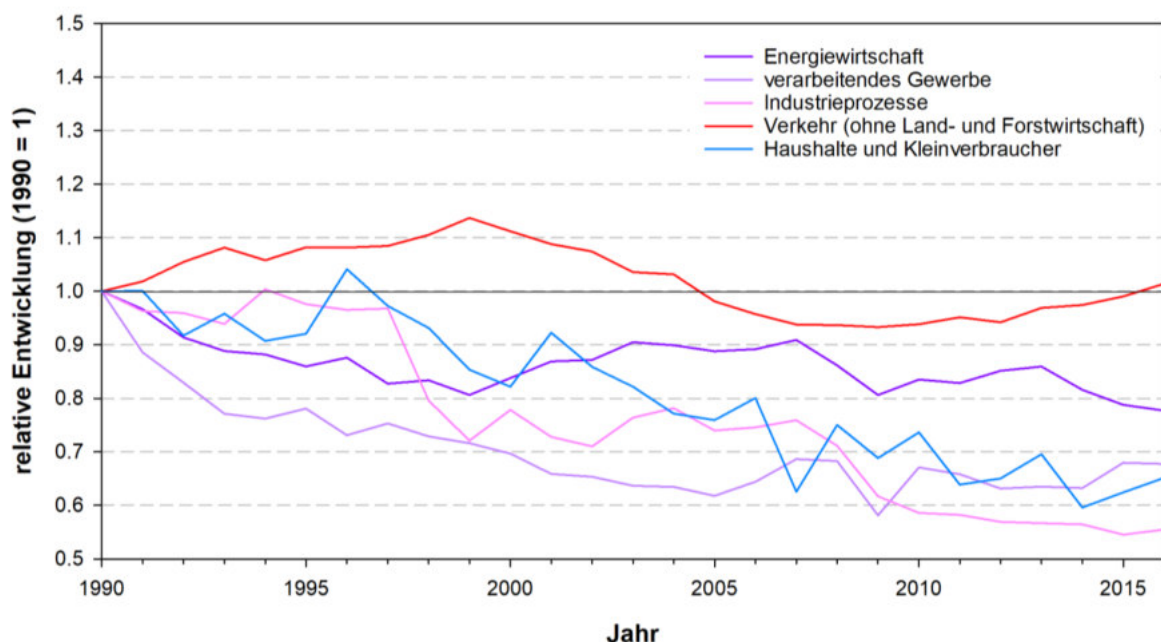


Abb. 1-1 – Auf 1990 normalisierte CO₂-Emissionen ausgewählter Emissionskategorien in CO₂-Äquivalenten in Deutschland (Datenquelle: UBA, 2018a).

Das am 14. Dezember 2018 verabschiedete **Thüringer Klimagesetz (ThürKlimaG)** liefert den Rahmen für die zukünftige Klima- und Energiepolitik des Landes Thüringen und ist die Grundlage für die Umsetzung von internationalen Vereinbarungen zum Klimaschutz (TMUEN, 2018; Thüringer Landtag, 2018). Mit dem ThürKlimaG geht die Thüringer Landesregierung in der Umsetzung von Klimaschutzmaßnahmen deutlich über die Anforderungen des Bundes hinaus, indem im Vergleich zu 1990 bis 2030 eine Minderung der Treibhausgasemissionen um mindestens 60 bis 70% angestrebt wird (Thüringer Landtag, 2018).

Um die ambitionierten **Emissionsziele Thüringens** erreichen zu können, wird im Zielszenario des Gutachtens zur Vorbereitung einer Energie- und Klimaschutzstrategie für Thüringen für den Verkehrssektor, in Ergänzung zu Effizienzgewinnen durch Veränderungen der Antriebssysteme im motorisierten Individual- und Straßengüterverkehr, insbesondere eine Verlagerung des Verkehrs auf die Schiene angestrebt (Ebert M. et al., 2016). Dies erfordert entweder, wie im Gutachten angenommen, eine flächendeckende Elektrifizierung des Schienennetzes und dessen Versorgung mit regenerativ erzeugter Elektrizität oder die Entwicklung neuer Konzepte für einen klimaneutralen Antrieb von Schienenfahrzeugen, um die weithin gebräuchlichen Dieseltriebwagen und Diesellokomotiven zu ersetzen.

Von den in Thüringen vorhandenen rund 1.700 km Schienennetz sind gegenwärtig weniger als ein Drittel elektrifiziert, während dieser Wert bundesweit nahezu 60% beträgt (NOW, 2016). Da viele der nicht elektrifizierten Eisenbahnstrecken in Thüringen den ländlichen Raum versorgen, ist eine Elektrifizierung in absehbarer Zeit allein aus Gründen der Investitionskosten im Verhältnis zur Streckenauslastung als unwahrscheinlich einzustufen. Insbesondere Wasserstoffbrennstoffzellen-Triebwagen (H₂BZ-Triebwagen) bieten daher im Rahmen einer **Sektorenkopplung** zwischen einer dezentralen Erzeugung von Elektrizität aus regenerativen Energiequellen, regional installierten Wasserelektrolyseanlagen zur Wasserstofferzeugung und der Brennstoffzellentechnologie eine Möglichkeit, zur Erreichung der Klimaschutzziele des ThürKlimaG im Verkehrssektor beizutragen. Diese Studie liefert die **Grundlagen für ein Pilotprojekt zum Einsatz von H₂BZ-Triebwagen in Thüringen**.

1.2 Zielstellung

Im Juli 2018 hat mit dem Coradia iLint der Firma Alstom der weltweit erste serienreife H₂BZ-Triebwagen vom Eisenbahn-Bundesamt eine Zulassung für den Fahrgastbetrieb auf dem deutschen Schienennetz erhalten (EBA, 2018a). Hiermit sind die Voraussetzungen für die Umsetzung von Verkehrsverträgen mit emissionsfreien Personenzügen auf nicht elektrifizierten Eisenbahnstrecken des Regionalverkehrs gegeben. Dies ist insbesondere für Thüringen attraktiv als Bundesland mit einem sehr hohen Anteil an nicht elektrifizierten Eisenbahnstrecken. Neben der Auswahl geeigneter Bahnlinien ist aber auch die Logistik der Wasserstoffbereitstellung für die Betankung der Fahrzeuge eine wichtige Aufgabe, da bisher keine fertigen dauerhaften Tankstellen- und Versorgungskonzepte für H₂BZ-Triebwagen marktverfügbar sind.

Diese Machbarkeitsstudie liefert die **Grundlage für eine Umsetzung der Wasserstoffmobilität im Schienenverkehr in Thüringen**, zunächst als Pilotprojekt aber auch darüber hinaus in der weitergehenden Implementierung. Die übergeordnete Zielstellung ist:

- Die Untersuchung der Machbarkeit einer über die gesamte Logistikkette komplett klimaneutralen schienengebundenen Mobilität auf Wasserstoffbasis in Thüringen.

Folgende Zielstellungen werden mit dieser Studie verfolgt:

- Die Erfassung und Einordnung des Stands der Technik von H₂BZ-Antrieben im Schienenverkehr sowie der H₂-Betankungs- und Tankstellentechnik.

- Die Erfassung der Anforderungen an die Implementierung des Systems: Eisenbahnstrecken, Eisenbahnlinien, Wasserstoffbetankung und Wasserstoffbeschaffung.
- Die Identifizierung und Bewertung von geeigneten Eisenbahnstrecken und Eisenbahnlinien sowie von Wasserstofftankstellenstandorten.
- Die Entwicklung von Konzepten zur Wasserstoffversorgung über Wasserelektrolyse auf Basis von erneuerbaren Energien.
- Die Untersuchung von Optionen für eine multimodale Nutzung von Wasserstoffinfrastrukturen im Verkehrssektor (Bahn, Busse, Lkw, Pkw).
- Die grundlegende Konzeption für eine technische Umsetzung in Thüringen inklusive einer Vorprüfung von Fördermöglichkeiten, einer Kostenschätzung und Empfehlungen für Fördermaßnahmen.

1.3 Vorgehensweise bei der Bearbeitung

Die vorliegende Machbarkeitsstudie ist in enger Abstimmung mit dem Thüringer Ministerium für Umwelt, Energie und Naturschutz im Zeitraum von April 2018 bis Januar 2019 erarbeitet worden. Die Vorgehensweise ist entsprechend der oben beschriebenen Ziele in drei inhaltlich eng vernetzten Arbeitspaketen untergliedert worden:

- Arbeitspaket 1 zum Stand der Technik und zu den infrastrukturellen Anforderungen,
- Arbeitspaket 2 zur Identifizierung von Umsetzungspotentialen in Thüringen und
- Arbeitspaket 3 zur Konzeption eines Pilotprojektes mit Kostenschätzung und Empfehlungen für eine Förderrichtlinie.

Die Arbeitspakete sind im Kern einer einheitlichen Methodik gefolgt. Grundlage war jeweils eine Bestandsaufnahme und Analyse, die in der Regel auf einer Recherche der relevanten Literatur, der Auswertung von Forschungsprojekten oder sonstiger Quellen sowie Expertengesprächen basierte.

Die daraus abgeleiteten Schlussfolgerungen und die erarbeiteten Ergebnisse sind in einer projektbegleiteten Arbeitsgruppe vorgestellt und diskutiert worden. Die Mitglieder der Arbeitsgruppe haben sich aus Vertretern von Thüringer Ministerien und nachgeordneter Behörden, Industrie, Verkehrsunternehmen und sonstiger Experten zusammengesetzt.

Die finale Ausarbeitung des Berichts und der darin enthaltenen Empfehlungen ist eigenverantwortlich und unabhängig durch die Gutachter erfolgt.

2. Hintergrundanalyse H₂BZ-Antriebe im Eisenbahnverkehr

2.1 Stand der Technik

2.1.1 H₂BZ-Antriebe im Eisenbahnverkehr in Europa

Verschiedene europäische Hersteller von Eisenbahnfahrzeugen haben in den letzten Jahren damit begonnen, die technologische Entwicklung schienenengebundener H₂BZ-Triebwagen für den Einsatz im europäischen Markt zu forcieren. In der Folge ist im letzten Quartal 2018 in Niedersachsen bereits ein erstes Pilotprojekt im Regelbetrieb realisiert worden. Die folgenden Ausführungen stellen kurz die bisherigen Technologieentwicklungen für H₂BZ-Antriebe im Schienenverkehr in Deutschland, der Schweiz und Frankreich dar.

Deutschland: Als weltweit erster Brennstoffzellenzug im regulären Linienbetrieb wird seit dem 17.09.2018 der Coradia iLint des Herstellers Alstom auf der Bahnlinie Buxtehude-Bremerhaven eingesetzt. Der momentane Fuhrpark besteht aus zwei H₂BZ-Triebwagen und soll in den nächsten Jahren für den Einsatz in Niedersachsen um 14 weitere durch das Land Niedersachsen geförderte Züge ergänzt werden. (Kreib, 2018) Weitere Absichtserklärungen zu Bestellungen liegen aus Baden-Württemberg, Hessen und Nordrhein-Westfalen vor (Hörstel, 2017). Mit Ausnahme der Brennstoffart und der Motorisierung entspricht die Zug-Plattform dem etablierten Dieseltriebwagen Coradia Lint 54 von Alstom. Mit einem H₂-Tankvolumen von etwa 180 kg bei einem Betriebsdruck von 35 MPa (350 bar), einer Brennstoffzellen-Motorleistung von 2x 200 kW und einer zusätzlichen Batteriekapazität von 2x 225 kW sind damit Reichweiten von bis zu ca. 1000 km realisierbar. Es können bis zu 327 Passagiere (138 Sitz- und 189 Stehplätze) mit einer Höchstgeschwindigkeit von bis zu 140 km/h befördert werden. Die Betankungsgeschwindigkeit entspricht mit ca. 7,2 kg H₂ pro Minute dem bereits etablierten Standard bei H₂-Bussen im ÖPNV-Bereich (Bünger et al., 2018; NOW, 2016). Ein verbesserter energetischer Gesamtwirkungsgrad wird durch eine batteriezeitige Speicherung von elektrischer Bremsenergie sowie ggf. vorübergehend überschüssiger Brennstoffzellenenergie erreicht (Alstom, 2016). Während die Wasserstofftanks und die Brennstoffzellen auf dem Zugdach angebracht sind, befinden sich die Batterien unter dem Zug. Die Produktionsstätte des Zuges befindet sich in Salzgitter (NOW, 2016).

Ein weiterer H₂BZ-Triebwagen befindet sich aktuell bei Siemens Mobility auf der Grundlage der Mireo Zugplattform in der Entwicklung. Als Forschungs- und Kooperationspartner sind die Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (RWTH) Aachen und Ballard Power Systems Inc. aus Kanada beteiligt. Ein Forschungsschwerpunkt betrifft hierbei die Entwicklung möglichst langlebiger Brennstoffzellen mit hohen Energiedichten (Siemens, 2018).

Schweiz: In der Schweiz befindet sich seitens der Firma Stadler Rail derzeit ein H₂BZ-Triebwagen in der Entwicklung, der ab 2020 in Österreich auf der Schmalspurbahn der Tiroler Zillertalbahn im Probebetrieb zum Einsatz kommen soll. Dieser Triebwagen soll bei einer Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h 250 Fahrgästen Platz bieten. Bis 2022 ist dann der Einsatz von insgesamt 5 dieser Triebwagen auf der Zillertalbahn geplant, die die Fahrtdauer auf der 32 km langen Strecke von 55 auf 45 Minuten verkürzen sollen (Kym, 2018). Weiterhin ist von Stadler Rail für den 2017 vorgestellten Regionalzug WINK auch eine brennstoffzellenbasierte Ausführung als Option angedacht (Stadler Rail, 2019). Bei einer Kapazität von bis zu 275 Passagieren mit insgesamt 150 Sitzplätzen entspricht dieser Triebwagen für Nebenlinien von der Größe in etwa dem oben beschriebenen Alstom Coradia iLint.

Frankreich: Im November 2018 wurde von Alstom in Frankreich ein H₂BZ-Triebwagen vorgestellt, der ab dem 1. Quartal 2019 bestellt werden kann. Bei diesem Zug handelt es sich um eine Zweisystem-Version (Elektro- und Wasserstoffantrieb) des Regiolis-Modells, das baugleich mit der Coradia-Modellreihe ist, die derzeit in Frankreich als reines Elektro- sowie Zweisystem-Triebfahrzeug (Diesel- und Elektroantrieb) eingesetzt wird. Das Fahrzeug ist eine Anpassung des in Deutschland zum Einsatz kommenden iLint an die französischen Gegebenheiten (ID, 2018). Da derzeit noch keine technischen Daten bekannt sind, können auch noch keine Aussagen bezüglich fahrdynamischer Kennwerte getroffen werden. Da der Zug jedoch eine Abwandlung des Coradia iLint darstellt, sind voraussichtlich keine wesentlichen Änderungen zu diesem Modell zu erwarten.

2.1.2 H₂BZ-Antriebe im Eisenbahnverkehr, international

Neben den europäischen Entwicklungen zu H₂BZ-Antrieben im Schienenverkehr gibt es auch internationale Technologieentwicklungen in diesem Bereich und zwar in Japan, China und Indien. Diese werden im Folgenden kurz dargestellt.

Japan: 2006 testete die East Japan Railway Company (JR-East) mit einem umgebauten Triebwagen das weltweit erste Brennstoffzellenfahrzeug im Bahnbetrieb auf einer 300 Meter langen Testschiene in Yokohama. Hierbei wurden zwei Protonenaustauschmembran-Brennstoffzellen (PEMFC) zu je 65 kW eingesetzt. Im Unterschied zu den in Abschnitt 2.1.1 beschriebenen Triebwagenkonzepten waren bei diesem Triebwagen die Wasserstofftanks mit einem Volumen von 270 Litern bei einem Druck von 35 MPa (350 bar) unter dem Zug sowie die Batterie mit 19 kWh auf dem Zugdach angebracht. Die Reichweite des Triebwagens betrug ca. 50 – 100 km bei einer Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h (JR-East, 2006; Fintoni, 2006). Weiterhin sind seitens des japanischen Railway Technical Research Institute (RTRI), das seit 2001 an der Entwicklung von H₂BZ-Triebwagen arbeitet, ebenfalls seit 2006 Testfahrten mit einem entsprechenden Fahrzeug vorgenommen worden (Ogawa, Yamamoto & Yoneyama, 2007; Ogawa et al., 2011). Bei einer 2017 in Kokubunji in West-Tokio durchgeführten Testfahrt waren die Wasserstofftanks unter dem Zug und die Brennstoffzelle als Forschungsdemonstrator direkt im Zug montiert. Langfristiges Ziel ist neben dem Ersatz von Dieseltriebwagen auch das Abschaffen von Strom-Oberleitungen auf Nebenstrecken. Durch den Einsatz von H₂BZ-Triebwagen wird in Japan langfristig von einer Betriebskosteneinsparung von 20 bis 30 % ausgegangen (Iwamoto, 2017). Eine konkrete Umsetzung von H₂BZ-Triebwagenkonzepten im Fahrgastbetrieb ist in Japan bis Ende 2018 noch nicht erfolgt.

China: Im März 2016 wurde in Qingdao eine Straßenbahnlinie mit Fahrzeugen, die Brennstoffzellen verwenden, in Betrieb genommen. Diese wurden von der CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd. in Lizenz von Škoda Transportation gebaut. Die Personenkapazität der Fahrzeuge beträgt 380 Passagiere mit 60 Sitzplätzen und die H₂-Betankungsdauer liegt bei etwa 3 Minuten. Die Strecke mit einer Gesamtlänge von 8,8 km und 12 Haltestellen weist in Teilen Strom-Oberleitungen auf, so dass der Brennstoffzellenbetrieb der Bahnen nur in Teilabschnitten erfolgt. Ein Teil der Schienenstrecke ist von der übrigen Straßen- und Fußwegeninfrastruktur räumlich getrennt, wodurch Geschwindigkeiten bis zu 70 km/h erreicht werden können (CRI, 2015; Railway Gazette, 2016). Im Oktober 2017 wurde in Tangshan in der Provinz Hebei eine weitere H₂BZ-Straßenbahn mit einem in China von der CRRC Tangshan Co., Ltd. entwickelten und gebauten Fahrzeugmodell für 336 Passagiere und 66 Sitzplätzen in Dienst gestellt. Die Straßenbahn kommt ohne Strom-Oberleitung auf einer 13,8 km langen über 130 Jahre alten Strecke zum Einsatz und hat bei Betrieb unter der Höchstgeschwindigkeit von 70 km/h eine Reichweite von 40 km, womit ein Wasserstoffverbrauch von 12 kg verbunden ist. Die Betankungsdauer wird mit 15 Minuten

angegeben. Lieferungen des Herstellers, der im Jahr etwa 50 Fahrzeuge dieser Bauart herstellen kann, sind für weitere chinesische Städte sowie für Toronto geplant (Yu, 2017; Metro Report, 2017). Bisher haben sich die Entwicklung und der Einsatz von H₂BZ-Schienenfahrzeugen in China somit allein auf Straßenbahnfahrzeuge mit vergleichsweise kurzen Reichweiten konzentriert.

Indien: In Indien wurde im Februar 2018 eine Absichtserklärung zwischen zwei Universitäten, einem Forschungsinstitut und der Integral Coach Factory, die von den Indian Railways betrieben wird, unterschrieben, um einen zweiteiligen H₂BZ-Triebwagen Prototypen auf PEMFC-Basis und einer Höchstgeschwindigkeit von 75 km/h zu entwickeln. Als Zeithorizont für die Fertigstellung des Prototyps wurde Dezember 2018 angegeben, mit dem Ziel, ein Jahr später den öffentlichen Betrieb aufzunehmen (The New Indian Express, 2018; The Economic Times, 2018). Aktuelle Informationen zum Projekt sind nicht öffentlich verfügbar, so dass der tatsächliche Entwicklungsstand Ende 2018 unklar ist.

2.1.3 Fazit zur Marktverfügbarkeit von H₂BZ-Triebwagen

Aus den in den Abschnitten 2.1.1 und 2.1.2 gegebenen Informationen wird ersichtlich, dass derzeit lediglich der H₂BZ-Triebwagen Coradia iLint der Firma Alstom als fertig entwickeltes Produkt mit entsprechenden Zulassungen für den Betrieb im deutschen Schienennetz am Markt verfügbar ist. Weitere Triebwagen der Firmen Alstom, Siemens und Stadler sind in der Entwicklung und werden voraussichtlich innerhalb der nächsten 3 Jahre in den Probetrieb gehen. Außerhalb Europas befinden sich weitere H₂BZ-Schienenfahrzeuge in der Entwicklung, sind aber entweder noch nicht als Produkt am Markt verfügbar oder aber mit relativ kurzen Reichweiten für den Straßenbahnbetrieb ausgelegt.

Insgesamt ist davon auszugehen, dass für ein Pilotprojekt zur Umsetzung von H₂BZ-Triebwagen in Thüringen Fahrzeuge am Markt verfügbar sein werden und damit die **grundsätzliche bahnseitige Machbarkeit** gegeben ist.

2.1.4 Optionen für die Wasserstoffbereitstellung

Mit der Umsetzung eines Pilotprojektes zum Einsatz von H₂BZ-Triebwagen in Thüringen stellt sich auch die Frage nach der Versorgung der Triebfahrzeuge mit Wasserstoff. Technischer Wasserstoff wird in Deutschland derzeit vor allem nach der Methode der Dampfreformierung aus Erdgas und Wasser bei 800°C hergestellt und, zu kleineren Teilen, durch die partielle Oxidation von Schweröl im Raffinerieprozess, in der Petrochemie sowie der Kohlevergasung (Koksgas im Kokereiprozess) (DWV, 2015). Bei all diesen Verfahren entsteht das Treibhausgas CO₂, das in der Regel keiner weiteren Verwendung zugeführt wird. Außerdem würden für die H₂-Versorgung von H₂BZ-Triebwagen in Thüringen je nach Bahnlinie zum Teil substantielle Transportketten anfallen, da der Wasserstoff zum Beispiel aus Leuna beschafft werden müsste. Daher ist es, auch im Sinne des ThürKlimaG, geboten, Möglichkeiten für die Erzeugung von Wasserstoff über die **Wasserelektrolyse mit regenerativer elektrischer Energie** zu untersuchen. Grundsätzlich bestehen hierbei zwei Optionen, zum einen die Wasserstoffbereitstellung durch eine On-Site-Elektrolyse direkt auf dem Gelände der Wasserstofftankstelle für die H₂BZ-Triebwagen und zum anderen die Wasserstoffbereitstellung mittels Off-Site-Elektrolyse und Anlieferung des Wasserstoffs zur Tankstelle.

Abbildung 2-1 zeigt die grundsätzlichen Möglichkeiten für die Versorgung einer Tankstelle für H₂BZ-Triebwagen mit regenerativ erzeugtem Wasserstoff auf. Die denkbaren Varianten sind wie folgt:

- eine On-Site-Elektrolyse mit einer Stromversorgung aus Erneuerbaren-Energien-Anlagen direkt auf dem Tankstellengelände,
- eine On-Site-Elektrolyse mit einer Stromversorgung aus dem Elektrizitätsnetz unter Verwendung eines Grünstromtarifs,
- eine Off-Site-Elektrolyse an Erneuerbaren-Energien-Anlagen mit Straßentransport des Wasserstoffs zur Tankstelle,
- Mischformen der oben aufgezeigten Varianten.

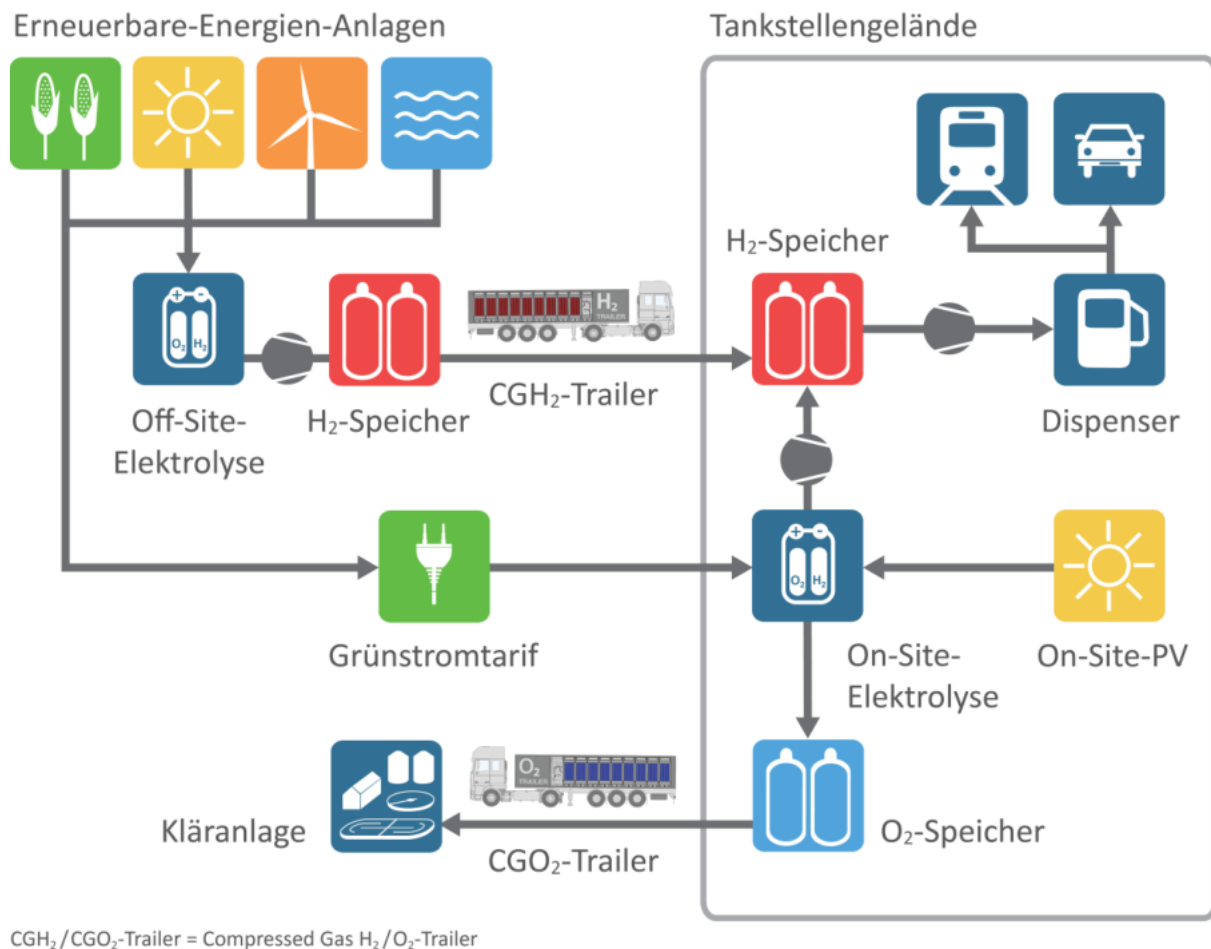


Abb. 2-1 – Mögliche Prozessketten zur H₂-Bereitstellung für die Betankung von H₂BZ-Triebwagen.

Die **Wasserstoffbereitstellung** über eine On-Site-Elektrolyse auf der Tankstelle ist von der Wasserstofflogistik her betrachtet die einfachste Versorgungsmöglichkeit, da aufwändige Transportketten entfallen. Für eine Versorgung des Elektrolyseurs mit Strom aus direkt auf dem Tankstellengelände installierten Erneuerbaren-Energien-Anlagen (Variante a) sind große Flächen vor Ort erforderlich, da hierfür im Prinzip nur Photovoltaik in Frage kommt. Diese Flächen werden in der Praxis jedoch nur eingeschränkt verfügbar sein (siehe auch Abschnitt 3.4.2), so dass eine Versorgung mit Strom aus einem Grünstromtarif (Variante b) die wahrscheinlichere Option für die On-Site-Elektrolyse zur Versorgung mit Wasserstoff darstellt. Allerdings ist durch die hiermit verbundenen Netzentgelte, Steuern, Abgaben und Umlagen ein vergleichsweise hoher Gestehungspreis für den Wasserstoff zu veranschlagen. Die Stromversorgung einer On-Site-Elektrolyse über eine Biogasanlage sicherzustellen, ist aufgrund

der dann erforderlichen Zusammenlagerung verschiedener Gase auf dem Tankstellengelände als problematisch einzustufen (siehe auch Abschnitt 2.2.4), während die On-Site-Stromerzeugung aus Windkraft oder Laufwasserkraft aufgrund genehmigungsrechtlicher Hürden (Windvorranggebiet) und der Ressourcenverfügbarkeit auf dem Tankstellengelände (Winddargebot, Flusslauf mit ausreichendem Wasserdargebot) in der Praxis kaum realisierbar sein dürfte. Die Wasserstoffbereitstellung über die Off-Site-Elektrolyse an Erneuerbaren-Energien-Anlagen mit anschließendem Transport zur Wasserstofftankstelle (Variante c) bietet hingegen vielfältige Versorgungsoptionen und ist prinzipiell mit neuen und mit Bestandsanlagen denkbar (siehe auch Abschnitte 3.2.3 & 3.4.3). Darüber hinaus sind, bei Vorliegen geeigneter Marktbedingungen, auch Mischvarianten der vorgenannten drei Varianten denkbar (Variante d).

Der bei der Wasserelektrolyse neben Wasserstoff ebenfalls entstehende **Sauerstoff** kann prinzipiell auch einer Nutzung zugeführt werden. Hierzu bietet sich unter anderem, wie in Abbildung 2-1 dargestellt, die **biologische Reinigungsstufe auf Kläranlagen** an (Büttner et al., 2018). Allerdings ist unter den derzeitigen Marktbedingungen ein Transport von Sauerstoff vom Elektrolyseur zu einer Kläranlage, um die in die biologische Reinigungsstufe normalerweise eingebrachte Luft zu substituieren, als nicht wirtschaftlich einzustufen. Dies könnte sich mit der verpflichtenden Einführung der vierten Abwasserreinigungsstufe (UBA, 2014) unter Nutzung von Ozon jedoch ändern, zumal Eisenbahnanlagen und Kläranlagen häufig in unmittelbarer räumlicher Nähe zueinander in einem Flusstal liegen, so dass insbesondere bei Wasserstofftankstellen mit On-Site-Elektrolyse Synergiepotentiale entstehen. So liegen beispielsweise die Bahnhöfe in Weimar, Saalfeld und Meiningen keine 2 km Luftlinie von der jeweiligen kommunalen Kläranlage entfernt, so dass bei einem Ersatz der in diesen Städten derzeit vorhandenen Bahndieseltankstellen durch Wasserstofftankstellen mit On-Site-Elektrolyse kurze Transportwege für den Sauerstoff entstehen würden. Alternativ wäre in solchen Fällen auch die Installation eines Elektrolyseurs auf der Kläranlage denkbar mit anschließendem Transport des Wasserstoffs an die jeweilige Tankstelle. Vorteile einer solchen Lösung wären die auf Kläranlagen in der Regel vorhandene hohe elektrische Anschlussleistung sowie die Präsenz von geschultem Personal (siehe auch Abschnitt 3.4.5).

2.1.5 H₂-Betankungstechnik

Für H₂BZ-Fahrzeuge haben sich Speicher zur gasförmigen Speicherung des Wasserstoffs in den Druckstufen 35 und 70 MPa (350 und 700 bar) am Markt etabliert, wobei für Pkw ausschließlich 70 MPa Speicher zur Anwendung kommen. Bei Bussen, Lkw und Schienenfahrzeugen sind derzeit Drucktanks mit 35 MPa Standard, wobei für Lkw auch 70 MPa Systeme in Planung sind. Dementsprechend sind Tankstellensysteme mit H₂-Betankungssäulen (H₂-Dispensern) für diese beiden Druckstufen am Markt verfügbar. Abbildung 2-2 zeigt schematisch wesentliche Komponenten einer Wasserstofftankstelle ohne On-Site-Elektrolyse mit Anlieferung des Wasserstoffs per Lkw mit Trailer.

Ende 2018 waren insgesamt 60 öffentliche Wasserstofftankstellen in Deutschland eröffnet, mit dem Ziel diese Zahl bis Ende 2019 auf 100 zu erhöhen (H2 MOBILITY, 2019). Zudem gibt es weitere nichtöffentliche Betriebstankstellen in Deutschland. Auf dem deutschen Markt existiert dementsprechend bereits eine nennenswerte Zahl an Anbietern von Einzelkomponenten oder Komplettlösungen für Wasserstofftankstellen. Aufgrund der gerade stattfindenden Einführung von Wasserstofftechnologien für den Fahrzeugbereich ist zudem in Zukunft von einer weiteren Zunahme ihrer Anzahl und somit einem erhöhten Wettbewerb auszugehen. Tabelle 2-1 gibt einen Überblick über derzeit in Deutschland aktive Anbieter von Wasserstofftankstellen-Komponenten.

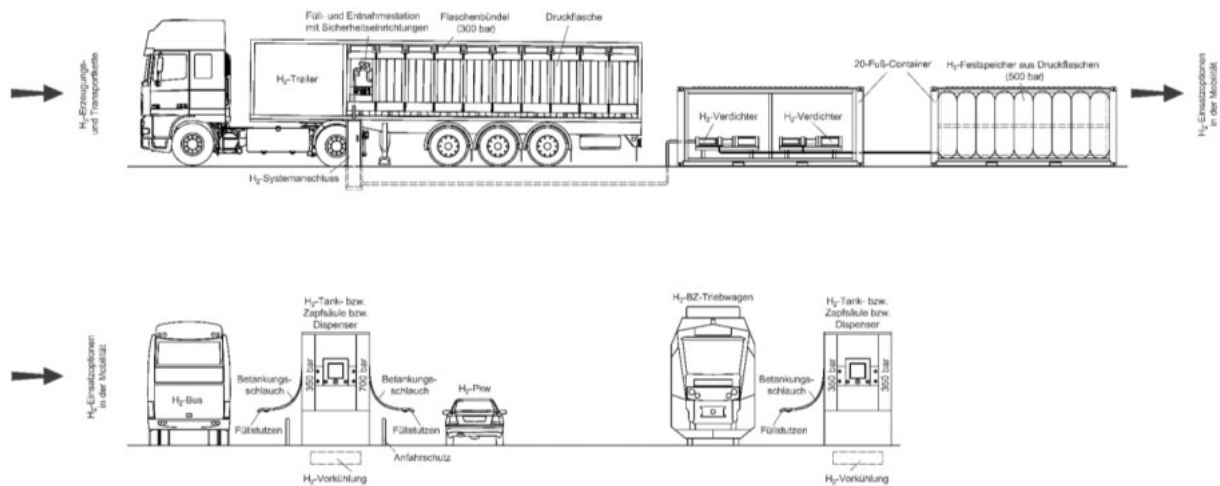


Abb. 2-2 – Schematische Darstellung wesentlicher Komponenten einer Wasserstofftankstelle ohne On-Site-Elektrolyse (Zeichnung nicht maßstäblich).

Tabelle 2-1 – Zusammenstellung von ausgewählten Anbietern von H₂-Tankstellenkomponenten auf dem deutschen Markt (Datenquellen: Datenblätter und Internetinformationen der genannten Firmen).

Anbieter	Produktpalette
Andreas Hofer Hochdruck-technik GmbH	Verdichter
AVX/Kumatec Hydrogen GmbH & Co. KG	Elektrolyseure
eurocylinder systems AG	Druckgasflaschen
h-tec Systems GmbH	Elektrolyseure
Hydrogenics GmbH	Elektrolyseure, Verdichter, H ₂ -Behälter, H ₂ -Vorkühler, H ₂ -Betankungssäulen
ITM Power	Elektrolyseure
Linde plc	Verdichter, Krypumpen, H ₂ -Behälter, Elektrolyseure, mobile H ₂ -Tankstellen
MAXIMATOR GmbH	Ventiltechnik, Verdichter, H ₂ -Kompakttankstellen
McPhy Energy S.A.	Elektrolyseure, H ₂ -Speicher, H ₂ -Tankstellen
NEL ASA	Elektrolyseure, Verdichter, H ₂ -Behälter, H ₂ -Betankungssäulen, H ₂ -Kompakttankstellen
Resato International BV	Verdichter, H ₂ -Betankungssäulen, H ₂ -Kompakttankstellen
Sera ComPress GmbH	Verdichter, H ₂ -Kompakttankstellen
Siemens AG	Elektrolyseure
Sunfire GmbH	Elektrolyseure
Wystrach GmbH	Druckgasflaschenbündel, Gastransportmodule
WEH GmbH	Füllkupplungen, Abreissicherungen, Tanknippel, Rückschlagventile, Filter und Schläuche

Spezifische auf die Anforderungen an den **Eisenbahnbetrieb** abgestimmte Wasserstofftankstellen sind bisher noch nicht gebaut worden. Für die Betankung von schienengebundenen Wasserstofffahrzeugen im Bahnbereich sind dementsprechend bisher ausschließlich mobile Lösungen zur Anwendung gekommen. Dies gilt auch für die seit dem 17. September 2018 weltweit ersten im öffentlichen Linienverkehr zum Einsatz kommenden H₂BZ-Triebwagen auf der Bahnlinie zwischen Cuxhaven, Bremerhaven, Bremervörde und Buxtehude (Alstom, 2018). Bei der derzeitigen Betankungsinfrastruktur für die zwei

H₂BZ-Triebwagen vom Typ Coradia iLint der Firma Alstom handelt es sich um eine mobile Betankungseinheit der Firma Linde, die am Bahnhof Bremervörde aufgestellt wurde und mit Wasserstoff aus den Niederlanden beliefert wird (Alstom, 2018; NDR, 2018). Ein Neubau für eine fest installierte Wasserstofftankstelle zur Versorgung der H₂BZ-Triebwagen auf dieser Bahnlinie befindet sich derzeit im Planfeststellungsverfahren und soll an einem neu zu errichtenden Tankstellengleis in Bremervörde entstehen. Die Tankstelle ist als Liefer-Tankstelle mit einer Anlieferung des erforderlichen Wasserstoffs per Lkw konzipiert, wobei eine spätere Erweiterung um eine On-Site-Elektrolyse angedacht ist (Niedersächsische Landesbehörde für Straßenbau und Verkehr, 2018).

2.1.6 Praxiserfahrungen beim Betrieb von Wasserstofftankstellen

Wasserstofftankstellen besitzen in Deutschland noch immer einen Pilotcharakter. Daher sollten Praxiserfahrungen beim Betrieb von öffentlichen Wasserstofftankstellen bei der im Pilotprojekt zu planenden Tankstelle berücksichtigt werden, insbesondere auch im Hinblick auf die in Abschnitt 1.2 genannte Zielstellung einer multimodalen Nutzung für die Betankung von H₂BZ-Triebwagen und H₂BZ-Straßenfahrzeugen. Die bisher umfangreichste Zusammenstellung von Praxisergebnissen zum Betrieb von H₂-Tankstellen beziehungsweise tankstellenintegrierten Elektrolyseanlagen wurde vom Clean Energy Partnership (CEP) veröffentlicht (CEP, 2018). Der Bericht umfasst den Zeitraum 2008 bis 2016 und betrifft, bis auf wenige Ausnahmen zur Betankung von H₂BZ-Bussen, nahezu ausschließlich Pkw-Betankungen mit Wasserstoff. Dennoch lassen sich hieraus Problemfelder für den Betrieb von Wasserstofftankstellen ableiten, die auch für H₂-Bahntankstellen von Relevanz sind, insbesondere wenn eine gleichzeitige Vorhaltung der Tankstelle für Straßenfahrzeuge angestrebt wird. **Mögliche Probleme im Tankstellenbetrieb und Lösungsansätze** für das Pilotprojekt sind wie folgt:

- Eine fehlerhafte tankstelleninterne Sensorik kann Betankungsunterbrechungen sowie die automatische Stilllegung der Tankstelle verursachen. Neben hohen Wartungskosten ist dies insbesondere ein Risiko für den reibungslosen Bahnbetrieb, so dass Betankungsvorgänge von H₂BZ-Triebwagen betrieblich so zu planen sind, dass der Betankungsprozess am Ende des regulären Betriebs stattfindet, so dass auftretende Ausfälle innerhalb von Standzeiten der Triebwagen behoben werden können (nachts). Weiterhin ist eine Einbindung in bestehende Fernfreigabe- / Fernfreischaltungssysteme für Bahntankstellen vorzusehen.
- Ein Ausfall von H₂-Verdichtern kann den Betankungsvorgang beeinträchtigen bzw. die Tankstelle außer Funktion setzen. Deshalb sind grundsätzlich redundante Verdichter vorzuhalten.
- Von der Soll-Vorgabe nach SAE J 2601 (3 Minuten) abweichende Betankungszeiten können bei der Pkw-Betankung zum automatischen Abbruch des Betankungsvorgangs führen. Daher sind H₂-Zwischenspeicher mit einem größeren als zur Kfz-Betankung erforderlichen Lagerungsdruck vorzusehen, um Beeinträchtigungen bei einer gleichzeitigen H₂BZ-Triebwagenbetankung auszuschließen.
- Eine zu geringe Auslastung bzw. zu hohe Stand-by-Zeiten einer Wasserstofftankstelle sowie eine unzureichende Verdichter-Technik können die Wartungskosten erheblich erhöhen. Durch den einsetzenden Markthochlauf mit ausgereifterer Technologie und die regelmäßige Betankung von H₂BZ-Triebwagen lassen sich diese Risiken minimieren.
- Inkompatibilitäten in der Software (Datenübertragungsprotokolle) und Hardware (nicht-zertifizierte Füllstutzen) sind ursächlich für nicht mögliche oder unvollständige Betankungen. Dies ist nur für den straßenseitigen Betrieb relevant, dürfte jedoch aufgrund der zunehmenden Harmonisierung in Zukunft kaum noch eine Rolle spielen.

- Es bestehen Risiken einer Falschabrechnung der abgegebenen Wasserstoffmenge durch das Fehlen eines Verfahrens zur eichfähigen Mengenmessung von Wasserstoff. Dies ist ein generelles, bisher noch nicht gelöstes technisches Problem.
- Eine fehlende Einhaltung der Reinheitskriterien des Wasserstoffs entsprechend EN 17124 und SAE J 2719 während seiner Erzeugung, Lieferung, Lagerung und Filterung vor der Befüllung gefährdet den kontinuierlichen Anlagenbetrieb. Dieses Risiko ist durch geeignete Komponenten und Materialien zu minimieren.

Entsprechend den Projektergebnissen des CEP lassen sich grundsätzliche Praxisempfehlungen für die Errichtung von Wasserstofftankstellen ableiten (CEP, 2018). So sollten beispielsweise bereits etablierte, erprobte und standardisierte Einzelkomponenten zur Verwendung kommen, da hochspezialisierte Komponenten gegebenenfalls alternativlos und somit mit langen Warte- und Nachlieferzeiten bei Störungen oder Ausfällen verbunden sind. Dies ist gerade für den Bahnbetrieb durch die fehlenden Ausweichmöglichkeiten auf andere Betankungsanlagen von zentraler Bedeutung. Um den Bauprozess effektiv zu gestalten und eine gut aufeinander abgestimmte Planung und Ausführung der einzelnen Tankstellenkomponenten zu gewährleisten, ist zudem eine sorgfältige Vorabauswahl aller am Projekt beteiligten Personen unter Beachtung ihrer Kompetenzen geboten.

2.1.7 Fazit zur Bereitstellung der Wasserstoffinfrastruktur für ein Pilotprojekt

Aus den in den Abschnitten 2.1.4 bis 2.1.6 gegebenen Informationen wird deutlich, dass es eine Reihe von Optionen für Versorgung von Bahntankstellen für H₂BZ-Triebwagen mit Wasserstoff gibt, die jedoch noch nicht im Realbetrieb in einer entsprechenden Infrastruktur umgesetzt und erprobt worden sind. Nichtsdestotrotz gibt es in Deutschland bereits nennenswerte Erfahrungen mit Wasserstofftankstellen für Straßenfahrzeuge, die in der Regel mit großtechnisch auf Basis fossiler Energieträger erzeugtem Wasserstoff versorgt werden. Dementsprechend sind auch zunehmend etablierte, erprobte und standardisierte Einzelkomponenten und Verfahren der H₂-Betankungstechnik am Markt verfügbar. Der **Stand der Technik für Wasserstofftankstellen ist als grundsätzlich ausgereift einzustufen**, wenngleich in den nächsten Jahren weitere Entwicklungen und Optimierungen zu erwarten sind.

Es ist davon auszugehen, dass die technischen Voraussetzungen für eine pilothafte Umsetzung einer Wasserstofftankstelle für H₂BZ-Triebwagen in Thüringen sowie für die Wasserstoffherstellung aus erneuerbarer Elektrizität mittels Wasserelektrolyse gegeben sind. Eine **grundsätzliche technische Machbarkeit** ist somit vorhanden.

2.2 Bestandsaufnahme und Anforderungen an Wasserstofftankstellen

2.2.1 Bestandsaufnahme des Thüringer Eisenbahnnetzes und der eingesetzten Fahrzeuge

Wie bereits in Abschnitt 1.1 deutlich wurde und in den Schaubildern in Anhang A zu sehen ist, sind gegenwärtig weniger als ein Drittel des Thüringer Schienennetzes elektrifiziert (NOW, 2016). Auf dem überwiegenden Teil des Thüringer Bahnnetzes gilt ein Stunden- oder Zweistundentakt. Auf Streckenabschnitten, die von mehreren Linien befahren werden, ergeben sich durch diese Überlagerung auch engere Takte. Nur auf wenigen Eisenbahnlinien wird ohne Takt gefahren oder es besteht ausschließlich Wochenendverkehr (TMIL, 2018). Abbildung 2-3 zeigt das Fahrtenangebot im Schienenpersonennahverkehr (SPNV) in Thüringen im Fahrplanjahr 2017. Insbesondere das Südthüringen-Netz ist von kurzen

Übergangs- und Wendezeiten sowie von knappen Fahrzeiten geprägt. Außerdem sind die nicht-elektrifizierten Eisenbahnstrecken überwiegend eingleisig, wodurch, wie in Abbildung 2-4 gezeigt wird, häufige Zugkreuzungen erforderlich werden. Darüber hinaus finden in Arnstadt und Weida Zugteilungen statt, in Tagesrandlagen auch in Plaue und Bad Langensalza.

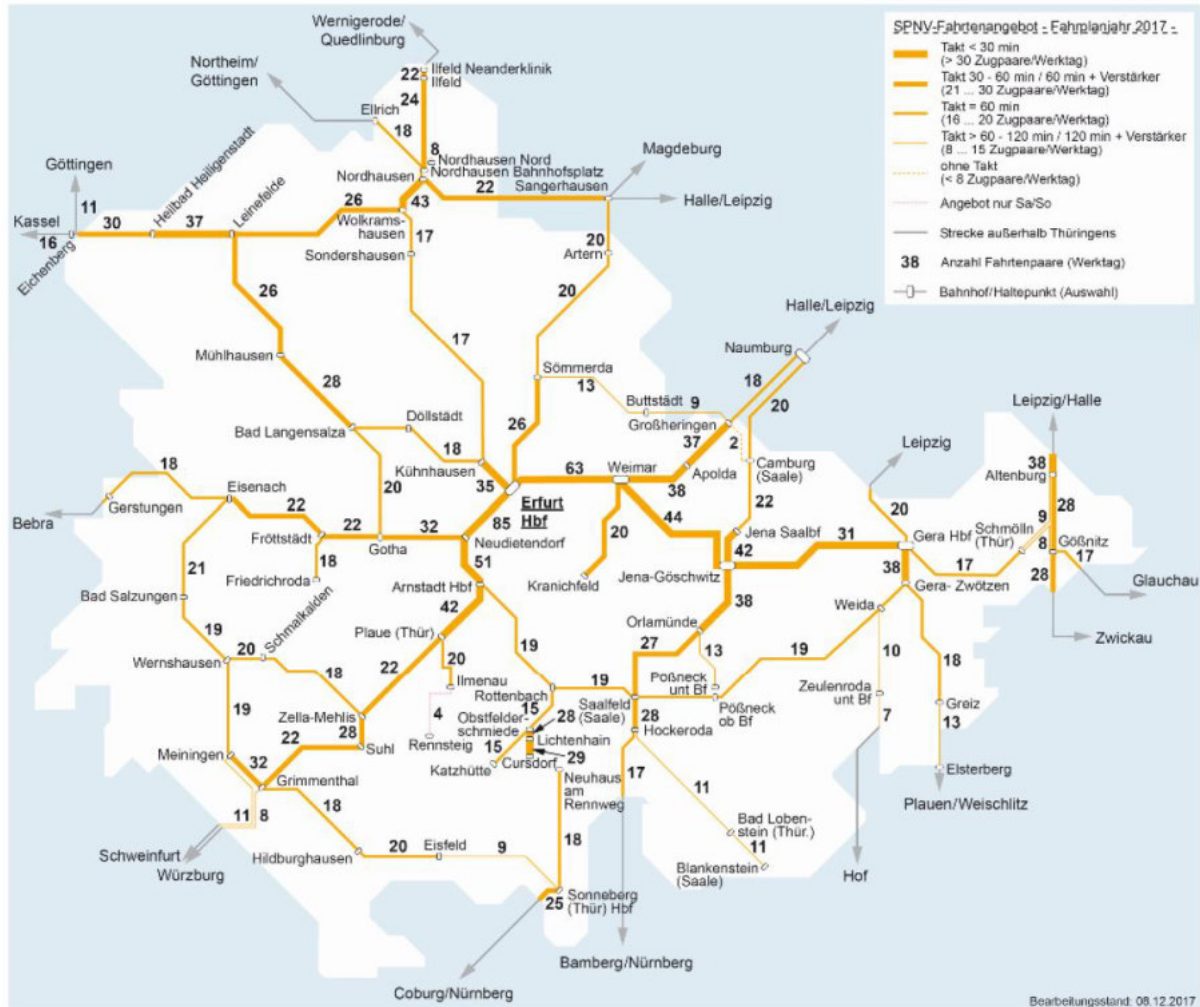


Abb. 2-3 – SPNV-Angebot Zugpaare und Takt je Eisenbahnstrecke in Thüringen (Bildquelle: Abb. 5 im 5. Nahverkehrsplan Thüringen 2018 – 2022, S. 23 (TMIL, 2018)).



Abb. 2-4 - Zugkreuzung in Elgersburg (links) und Zugteilung in Arnstadt (rechts).

Im November 2018 wurde eine Bewertung der Schienenwegeausbauvorhaben des Potenziellen Bedarfs durchgeführt (BMVI, 2018). Beide oben aufgeführten Projekte, die bisher lediglich Vorhaben des Potenziellen Bedarfs waren, sind in der Folge in den Vordringlichen Bedarf aufgestiegen. Aufgrund der vorgesehenen Elektrifizierungen zwischen Gotha und Leinefelde sowie zwischen Weimar, Gera und Gößnitz, für die jeweils Gesamtkosten von 148 bzw. 238 Mio. € sowie Erweiterungsinvestitionen von 104 bzw. 199 Mio. € vorgesehen sind, wurden diese Bahnstrecken nicht für ein H₂BZ-Triebwagen-Pilotprojekt in Betracht gezogen. Dies wird in den Schaubildern zum Thüringer Streckennetz in Anhang A durch eine graue Darstellung für „zur Elektrifizierung vorgesehen“ hervorgehoben, so dass nur die rot dargestellten nicht elektrifizierten Eisenbahnstrecken in Frage kommen.

Tabelle 2-2 – Übersicht über die für diese Machbarkeitsstudie relevanten Infrastrukturprojekte im Bundesverkehrswegeplan 2030 (Datenquelle: BMVI, 2016).

Lfd. Nr.	Projekt-Nr.	Maßnahmentitel	Vorläufige Beschreibung der Maßnahme	Planungsstand
a) relevante laufende und fest disponierte Projekte in Thüringen				
12	L12 u. W09	ABS Paderborn – Bebra – Erfurt – Weimar – Jena – Glauchau – Chemnitz (1. u. 2. Baustufe)	Bezugsfall: 1. Baustufe u. teilweise 2. Baustufe: 2. Gleis Weimar – Großschwabhausen, Neue Schneke – Stadtroda; nicht Bezugsfall: 2. Gleis Papiermühle – Hermsdorf - Klosterlausitz, Töppeln – Gera, Elektrifizierung Weimar – Gera – Gößnitz / Lehdorf (siehe Pr-Nr. 2-038-V01)	weitgehend fertig
b) relevante Vorhaben des Potenziellen Bedarfs in Thüringen, die in den VB aufsteigen können				
13	2-030-V01	ABS Gotha – Leinefelde	Projektdefinition noch nicht abgeschlossen, umfasst vsl. Elektrifizierung Gotha – Bad Langensalza – Leinefelde	-
20	2-038-V01	ABS Weimar – Gera – Gößnitz	Projektdefinition noch nicht abgeschlossen, umfasst vsl. 2. Gleis Papiermühle – Hermsdorf-Klosterlausitz, Töppeln – Gera, Elektrifizierung Weimar – Gera – Gößnitz / Lehdorf	Grundlagen-ermittlung

Neben den Eisenbahnstrecken ist für die Umsetzung eines H₂BZ-Triebwagen-Pilotprojektes die Fahrdynamik des im Augenblick einzigen marktverfügbaren H₂BZ-Triebwagens, des Alstom Coradia iLint, im Vergleich zu den derzeit eingesetzten Schienenfahrzeugen von Belang, da durch einen Fahrzeugwechsel möglichst keine Veränderungen in den Umläufen entstehen sollten. Weiterhin spielen die im 5. Nahverkehrsplan Thüringen 2018 – 2022 (TMIL, 2018) angegebenen Vergabernetze für den Schienenpersonennahverkehr eine Rolle sowie die noch verbleibende Laufzeit der Ausschreibungen (siehe auch Anhang A, Tabelle A-1).

Der Personennahverkehr in Thüringen wird heute ausschließlich mit Triebwagen abgewickelt. Dabei kommen sowohl Elektro- als auch Dieseltriebwagen zum Einsatz. Tabelle 2-3 listet die in Thüringen verkehrenden Dieseltriebwagen auf, die je nach gewählter Eisenbahnlinie in einem Pilotprojekt zu ersetzen wären. Die in Tabelle 2-3 angegebene Leistungskennziffer wird, wie allgemein üblich, auf die Dienstmasse, also die Masse ohne Fahrgäste, bezogen. Die Angabe für die Anzahl der Sitz- und Stehplätze ist je nach Quelle unterschiedlich und ist daher nur als ungefähre Wert zu verstehen.

Tabelle 2-3 – In Thüringen eingesetzte Dieseltriebwagen.

Bild Triebwagen	Grundlegende Kenndaten
	Baureihe 612 – RegioSwinger Hersteller: Bombardier EVU: DB Regio AG V _{max} : 160 km/h Achsfolge: 2'B' + B'2' Fahrzeuglänge: 51,75 m Leistung: 1.118 kW Dienstmasse: 116 t Leistungskennz.: 9,64 kW/t Sitzplätze: 146 (incl. Klappsitze) Stehplätze: 142 (bei 4 Pers./qm) Besonderheit: Neigetechnik
	Baureihe 641 – Coradia A TER Hersteller: DeDietrich / Alstom EVU: Oberweißbacher Berg- und Schwarzatalbahn (DB) V _{max} : 120 km/h Fahrzeuglänge: 28,90 m (LüK) Achsfolge: (A1)(A1) Leistung: 514 kW Dienstmasse: 55 t Leistungskennz.: 9,35 kW/t Sitzplätze: 80 (incl. Klappsitze)
	Baureihe 642 – Desiro Hersteller: Siemens EVU: DB Regio AG V _{max} : 120 km/h Achsfolge: B'2'B' Fahrzeuglänge: 41,7 m Leistung: 550 / 630 kW Dienstmasse: 68 t Leistungskennz.: 8,09 / 9,26 kW/t Sitzplätze: 110 (incl. Klappsitze) Stehplätze: 110
	Baureihe 650 – RegioShuttle RS 1 Hersteller: Stadler Pankow GmbH EVU: Erfurter Bahn GmbH V _{max} : 120 km/h Achsfolge: B'B' Fahrzeuglänge: 25,5 m Leistung: 514 kW Dienstmasse: 43,4 t Leistungskennz.: 11,84 kW/t Sitzplätze: 71 Stehplätze: 94

2.2.2 Grundlegende technische Anforderungen an Wasserstofftankstellen im Eisenbahnbetrieb

Analog zu anderen Betankungsanlagen bedarf der Betrieb von Wasserstofftankstellen der Einhaltung des Brand- und Explosionsschutzes sowie der Anlagen- und Personensicherheit. Eine besondere Herausforderung bei der Einführung der Wasserstofftechnologie ist hierbei die noch fehlende Praxiserfahrung beim langjährigen Dauerbetrieb vieler Anlagenkomponenten. Für die Planung und den Betrieb von Wasserstofftankstellen im Eisenbahnsektor kommt hinzu, dass eine **starke Standortabhängigkeit** gegeben ist, um einen optimalen Eisenbahnbetrieb sicherzustellen (siehe auch Abschnitt 3.2.1). Örtlich spezifische Platzverhältnisse, Geländebeschaffenheiten, vorhandene Gebäude und Infrastrukturen sowie ggf. mechanische Belastungen aus dem Zugverkehr können die Planung erschweren. Die mögliche kombinierte Nutzung von Wasserstofftankstellen für H₂BZ-Triebwagen zur Betankung von Pkw, Bussen oder Lkw stellt weitere Anforderungen an die Tankstelle und deren Erschließung. Zum **technisch sicheren Betrieb** sind die folgenden grundsätzlichen technischen Anforderungen an Wasserstofftankstellen im Bahnbetrieb zu beachten:

- Einhaltung von Mindeststandards zum Brand- und Explosionsschutz der Anlagenkomponenten,
- Vermeidung von Schwingungen und Stoßwellen im Erdreich durch den Bahnbetrieb,
- keine Gefährdung der Anlage durch den Bahnbetrieb oder abgerissene stromführende Bahngleis-Oberleitungen,
- Schutz der Gesamtanlage vor Beschädigungen menschlichen Ursprungs wie z.B. Schutz der Wasserstoffinfrastruktur gegen Zutritt Unbefugter sowie gegen Schäden an Anlagenteilen durch den straßenseitigen Betriebsverkehr auf dem Gelände,
- Einhaltung von Mindestsicherheitsabständen zu bereits vorhandenen Treibstoff- bzw. Gefahrgutbehältern und Gebäuden sowie der tankstelleninternen Komponenten untereinander,
- Bereitstellung ausreichend großer Wirkbereiche um Zapfsäulen sowie Vorhalten ausreichend großer Flächen für Instandsetzungs- / Instandhaltungsmaßnahmen (z.B. Kranstandflächen),
- Sicherstellen von Betankungsvorgängen innerhalb der technisch zulässigen Umgebungsbedingungen sowie der vorgegebenen anlageninternen Temperatur- und Druckspanne,
- Gewährleistung eines Blitzschutzes aufgrund elektrostatischer Auf- bzw. Entladungen,
- konstantes Vorhalten einer adäquaten H₂-Gasreinheit,
- Verwendung von standardisierten Komponenten für z.B. Zapfsäulen und Anschlussvorrichtungen,
- Durchführung der Betankungsvorgänge mithilfe standardisierter Überwachungssoftware und Kommunikationsprotokolle zwischen Fahrzeug und Tankstelle.

2.2.3 Genehmigung von Wasserstofftankstellen im Eisenbahnbetrieb

Die zur Errichtung einer Wasserstofftankstelle relevanten Zuständigkeiten hängen von den Eigentumsverhältnissen der Eisenbahninfrastruktur ab, während die Genehmigungsprozesse durch die auf der Tankstelle gelagerte Wasserstoffmenge und das Vorhandensein von Anlagen zur Wasserstofferzeugung bestimmt werden. Tabelle 2-4 gibt einen Überblick über die rechtlichen Rahmenbedingungen für die Genehmigung und Prüfung der Inbetriebnahme von Wasserstofftankstellen im Bahnbetrieb sowie für die Betankung von Straßenfahrzeugen.

Tabelle 2-4 – Genehmigung und Prüfung der Inbetriebnahme von Wasserstofftankstellen im Bahnbetrieb (Informationsquellen: AEG; VwVfG; BImSchG; 9. BImSchV; BetrSichV; ThürBO; NOW, 2016).

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

Für die Errichtung bzw. Änderung von **Betriebsanlagen an Eisenbahnen** gilt grundsätzlich das Allgemeine Eisenbahngesetz (AEG). Wasserstofftankstellen stellen nach § 2, Absatz 9 AEG zusammen mit dem dazugehörigen Grundstück und der gesamten darauf befindlichen Infrastruktur Serviceeinrichtungen dar. Somit ist für den Bau einer Wasserstofftankstelle ein Planfeststellungsverfahren nach § 18 AEG erforderlich, wobei das Verfahren entsprechend §§ 72 – 78 Verwaltungsverfahrensgesetz (VwVfG) erfolgt. Darüber hinaus kann eine wasserrechtliche Erlaubnis im Sinne des Gewässerschutzes nach § 19, Absatz 3 Wasserhaushaltsgesetz (WHG) erforderlich sein. Zudem sind gemäß VwVfG Abschnitt 2 sämtliche bundes- und landesrechtlichen Genehmigungsvoraussetzungen zu beachten. Da der Planfeststellung nach § 18 AEG eine formelle aber keine materielle Konzentrationswirkung zukommt, sind die materiell rechtlichen Regelungen der verdrängten Genehmigungsverfahren maßgebliche Entscheidungsgrundlage. Die Genehmigungsbehörde hat somit auch alle bundes- und landesrechtlichen Genehmigungsvoraussetzungen nach BetrSichV, Landes-BauO (hier ThürBO) und BImSchG zu prüfen (NOW, 2016). Wie aus Tabelle 2-4 ersichtlich wird, bedeutet dies, dass wie bei Anlagen zur Betankung von H₂BZ-Fahrzeugen im Straßenverkehr auch die Bereitstellungsoption (Liefer-Tankstelle oder Komplett-Tankstelle mit On-Site-Elektrolyse) und die H₂-Lagerungsmenge an der Anlage für die Genehmigung von Bedeutung sind.

Je nachdem, ob es sich bei den Betriebsanlagen um eine **bundeseigene oder nichtbundeseigene Eisenbahninfrastruktur** handelt, ist für die Planfeststellung und Genehmigung einer Wasserstofftankstelle entweder das Eisenbahnbundesamt oder die jeweilige Landesbehörde zuständig (EBA, 2018b). In Thüringen liegt die Zuständigkeit für nichtbundeseigene Eisenbahninfrastrukturen beim Thüringer Landesamt für Bau und Verkehr.

H₂-Betankungsanlagen sind grundsätzlich nach § 18, Satz 1, Nummer 3 der Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) erlaubnispflichtig. Dazu ist nach § 18, Satz 3 BetrSichV ein Prüfbericht einer zugelassenen Überwachungsstelle einzureichen, der die grundsätzliche Gewährleistung der Anforderungen gemäß BetrSichV zur Betriebssicherheit bescheinigt. Für die Erstellung des Prüfberichtes sind der zugelassenen Überwachungsstelle Unterlagen gemäß den Vorgaben des Länderausschusses für Arbeitsschutz und Sicherheitstechnik LASI LV 49/2017, Anhang 3 vorzulegen (NOW, 2016). Ergänzend dazu sind nach § 15 bzw. § 16 BetrSichV eine Erstprüfung vor Inbetriebnahme bzw. spätere wiederkehrende Prüfungen der Anlage durchzuführen. Zusätzlich zum Antrag nach § 18 BetrSichV ist eine Baugenehmigung zu beantragen. In Thüringen ist die Rechtsgrundlage hierfür § 60, Satz 1, Absatz 6 a der Thüringer Bauordnung, da ortsfeste Behälter für nicht verflüssigte Gase mit einem Bruttorauminhalt größer 6 m³ genehmigungspflichtig sind.

Sowie die an der H₂-Betankungsanlage gelagerte Wasserstoffmenge 3 Tonnen übersteigt oder eine Wasserstoffherstellung an der Betankungsanlage erfolgt, richtet sich das Zulassungsverfahren, wie in Tabelle 2-4 gezeigt, nicht mehr nach BetrSichV sondern nach § 4 des Bundesemissionsschutzgesetzes (BImSchG). Für Liefer-Tankstellen mit einer bereitgestellten Wasserstoffmasse größer 3 bis maximal 30 Tonnen bzw. für Komplett-Tankstellen mit On-Site-Elektrolyse und einer H₂-Lagermenge von weniger als 30 Tonnen ist das vereinfachte Verfahren ohne Öffentlichkeitsbeteiligung nach § 19 BImSchG durchzuführen. Für Anlagen mit einer Wasserstoffherstellung und -lagerung von 30 Tonnen oder mehr ist hingegen ein Genehmigungsverfahren nach § 10 BImSchG mit Beteiligung der Öffentlichkeit zu eröffnen (NOW, 2016).

Sofern eine Anlieferung mit Tankwagen als mobile Tankstelle erfolgt oder vorübergehend Container für die Betankung von H₂BZ-Triebwagen aufgestellt werden, ist keine Genehmigungspflicht nach § 18 AEG gegeben (EBA, 2018b). Für Anlagen, die weniger als 12 Monate an einem Ort betrieben werden, ist gemäß § 1 Satz 1 der 4. BImSchV auch keine Genehmigungspflicht nach BImSchG gegeben. Mobile Betankungslösungen, wie sie derzeit in Bremervörde genutzt werden (siehe Abschnitt 2.1.5) sind dementsprechend eine geeignete Möglichkeit, um die Zeit bis zur Fertigstellung einer ortsfesten Betankungsanlage zu überbrücken.

Ein möglicher **Verfahrensablauf zur Genehmigung einer bahnseitigen Wasserstofftankstelle** könnte, wie in ähnlicher Form bereits im Ergebnisbericht der Studie der NOW GmbH (NOW, 2016) dargestellt wird, wie folgt gestaltet werden:

- Antrag auf Planfeststellung nach § 18 AEG bei der zuständigen Planfeststellungsbehörde, das heißt entweder beim Eisenbahnbundesamt (EBA) bei bundeseigenen oder bei der jeweiligen Landesbehörde bei nichtbundeseigenen Eisenbahninfrastrukturen.
- Mit dem Antrag Einreichung der erforderlichen Unterlagen nach der Planfeststellungsrichtlinie (03/2017) des Eisenbahn-Bundesamtes (EBA), dem Umweltleitfaden zur Umweltverträglichkeitsprüfung des EBA und dem Leitfaden Antragsunterlagen (08/2015) des EBA sowie eines Prüfberichts der zugelassenen Überwachungsstelle nach LASI LV 49/2017.

- Durchführung eines Planfeststellungsverfahrens durch die zuständige Planfeststellungsbehörde gemäß §§ 18-18e des AEG und §§ 72-78 VwVfG, bei Liefer-Tankstellen mit H₂-Lagerungsmengen < 3 Tonnen unter Berücksichtigung der Belange nach BetrSichV und der TRBS/TRGS, insbesondere TRBS 3151/ TRGS 751 sowie bei Liefer-Tankstellen mit H₂-Lagerungsmengen > 3 Tonnen und bei Komplett-Tankstellen unter Berücksichtigung der Belange nach BImSchG, insbesondere der 9. BImSchV zur Umweltverträglichkeitsprüfung.
- Weiterleitung des Plans durch die Planfeststellungsbehörde an die Anhörungsbehörde, die das Anhörungsverfahren unter Beteiligung der Öffentlichkeit nach § 18a AEG durchführt und eine Stellungnahme zum Ergebnis an die Planfeststellungsbehörde übermittelt.
- Erlass des Planfeststellungsbeschlusses durch die Planfeststellungsbehörde.

Weiterführende Informationen zu den rechtlichen Rahmenbedingungen für Wasserstofftankstellen zur Betankung von Schienenfahrzeugen können dem Ergebnisbericht der Studie zur Wasserstoff-Infrastruktur für die Schiene der NOW GmbH entnommen werden (NOW, 2016). Der Genehmigungsprozess für Wasserstofftankstellen für Straßenfahrzeuge wird darüber hinaus im Genehmigungsleitfaden für Wasserstoff-Stationen der NOW GmbH detailliert dargestellt (NOW, 2018).

2.2.4 Technische Regeln und Normen für die Errichtung und den Betrieb von Wasserstofftankstellen im Eisenbahnbetrieb

Die für die Standardisierung der Komponenten der H₂-Betankungstechnik sowie insbesondere auch die Betankungsprotokolle und den Betankungsprozess angewendeten technischen Regelwerke entsprechen zurzeit in großen Teilen US-amerikanischen Standards, insbesondere den Festlegungen in den SAE International Standards für landgebundene Fahrzeuge. Dies liegt zum einen darin begründet, dass die Hersteller solcher Komponenten ihre Produkte global vertreiben und zum anderen daran, dass einige der SAE Normen bereits seit mehr als einem Jahrzehnt existieren und damit schon länger verfügbar sind als vergleichbare europäische Standards. Zudem sind die SAE Standards laufend verbessert worden, am Markt etabliert und können somit als erprobt gelten.

Spezifische europäische bzw. deutsche Normen und Regelwerke zur Planung, Errichtung, Betrieb und Wartung von Wasserstofftankstellen sind ebenfalls vorhanden. Diese lehnen sich zum Teil an die US-amerikanischen Regelwerke bzw. die europäischen Anforderungen an Erdgas-Tankstellen an, sind jedoch bisher noch nicht vollständig harmonisiert. Weiterhin sind grundsätzliche regulatorische Anforderungen an Wasserstofftankstellen oftmals über bestehende Regelwerke wie die Technischen Regeln für Betriebssicherheit (TRBS) / Gefahrstoffe (TRGS) mit abgedeckt. Abbildung 2-6 zeigt die Geltungsbereiche relevanter technischer Regelwerke für Wasserstofftankstellen für die kombinierte Betankung von H₂BZ-Triebwagen und Straßenfahrzeugen anhand einer idealisierten Wasserstofftankstelle. Die Abbildung ersetzt jedoch keine Einzelfallprüfung entsprechend den konkreten Standortgegebenheiten und Randbedingungen einer zu errichtenden Wasserstofftankstelle. Weiterhin ist anzumerken, dass sich zwischen manchen der aufgeführten Regelwerke zum Teil identische bzw. sich gegenseitig ergänzende Angaben bzw. Anforderungen ergeben. Zudem ist mit dem Fortschreiten der Wasserstofftechnologie von der Schaffung weiterer Regelwerke auszugehen.

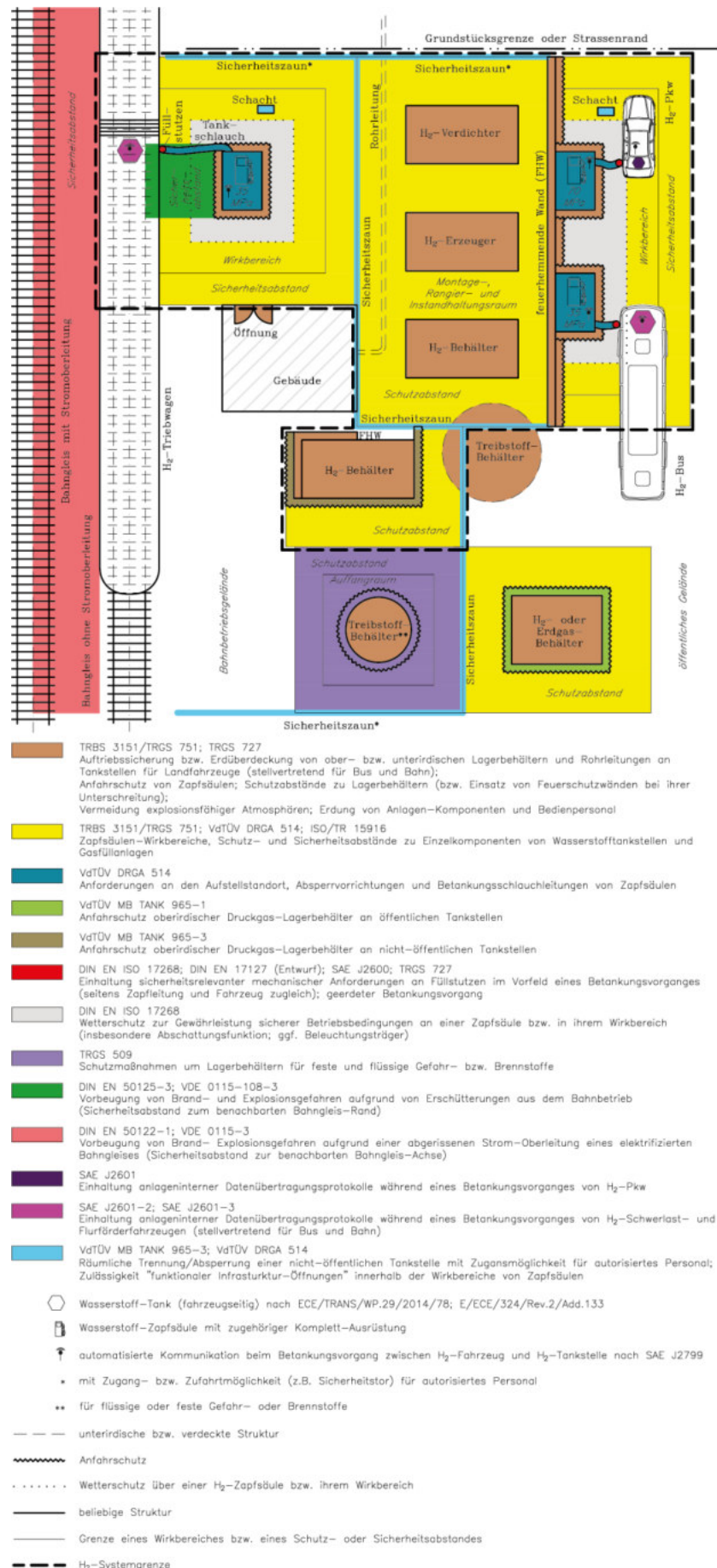


Abb. 2-6 – Geltungsbereiche relevanter technischer Regelwerke für Wasserstofftankstellen.

Im Folgenden werden die für die Planung, Errichtung, Betrieb und Wartung von Wasserstofftankstellen im Eisenbahnbetrieb relevanten, in Abbildung 2-6 gezeigten technischen Regeln und Normen in ihren grundlegenden Inhalten kurz beschrieben. Die konkreten Anforderungen aus dem Regelwerk an Wasserstofftankstellen können Anhang B entnommen werden.

- **TRBS 3151 / TRGS 751 – Vermeidung von Brand-, Explosions- und Druckgefährdungen an Tankstellen und Gasfüllanlagen zur Befüllung von Landfahrzeugen:** Diese Regelung beinhaltet konkrete Angaben zur Umsetzung der Betriebssicherheits- und der Gefahrstoffverordnungen bei ortsfesten Anlagen zur Lagerung und Abfüllung von Gasen (Erd- und Flüssiggas; sinngemäße Anwendung für Wasserstoff), Diesel und Heizöl an Tankstellen nach § 18 Abs. 1 Nr. 3, 6 und 8 BetrSichV. Die Norm definiert die räumlichen Grenzen einer öffentlichen oder privaten Betankungsanlage, den Aufbau und Einsatzzweck ihrer Einzelkomponenten und die zur Anlagen- und Lagernutzung notwendigen Verkehrsflächen. Berücksichtigt werden Wirkbereiche, Schutzabstände und Schutzmaßnahmen zur Gewährleistung sowohl der Personensicherheit als auch der Sicherheit der Anlagen-Komponenten (inkl. Verbindungsrohrleitungen) beim Anlagenbetrieb. Besonders hervorzuheben sind dabei die Gefahren einer spontanen (Auffahrunfall, Wasserdruck bei Unwetterereignissen) oder vorsätzlichen (Zugang Unbefugter) mechanischen Beschädigung von ober- oder unterirdisch aufgestellten Treibstofflagerbehältern und Abgabevorrichtungen, eine personenbezogene Gesundheitsgefährdung durch austretende Gase an sensiblen Stellen (Abgabe- oder Befüllvorrichtungen) sowie die Vermeidung von bzw. der sichere Umgang mit explosionsgefährdeten Bereichen. Die Regel betrifft direkt und indirekt den Betrieb von Wasserstofftankstellen, da Wasserstoff ein Treibstoff ist und in der Praxis ein gemeinsamer oder zumindest benachbarter Betrieb zusammen mit Betankungsanlagen für fossile Treibstoffe möglich ist.
- **VdTÜV MB DRGA 514 – Anforderungen an Wasserstofftankstellen:** Dieses Merkblatt betrifft den Brand- und Explosionsschutz aller Wasserstofftankstellenkomponenten auf dem Tankstellengelände nach § 2 Abs. 12 Nr. 3 BetrSichV: Vorratsbehälter, Pufferbehälter, Rohrleitungen, Schlauchleitungen, Armaturen, Vorkühlung, Pumpen, Verdichter, Messeinrichtungen, Abgabeeinrichtungen und Füllkupplungen. Unabhängig der Fahrzeugart werden allgemein zulässige Betankungsdrücke mit entsprechenden Temperaturen beim H₂-Betankungsvorgang definiert, welche herstellereitig einzuhalten sind.
- **VdTÜV MB TANK 965-1 – Anfahrerschutz oberirdischer Lagerbehälter an Tankstellen sowie Füllanlagen von Landfahrzeugen mit Druckgasen zur Abgabe an Dritte, Teil 1: Anforderungen:** Das Merkblatt bezieht sich auf alle Anlagen nach TRBS 3151 / TRGS 751 und der BetrSichV im Allgemeinen. Das Merkblatt findet Anwendung bei einer kombinierten Wasserstofftankstelle für eine eisenbahn- und zugleich straßenverkehrsseitige (Pkw-, Lkw-, Bus-) Betankung. In Abhängigkeit des Aufstellungsortes der Wasserstofftankstelle in Relation zu benachbarten Straßen mit ihren jeweils zulässigen Höchstgeschwindigkeiten und Fahrzeugtypen mit entsprechender Fahrzeugmasse werden fallspezifische Belastungen angegeben, welche vom erforderlichen Anprallschutz aufzunehmen sind.
- **VdTÜV MB TANK 965-3 – Anfahrerschutz oberirdischer Lagerbehälter an Tankstellen und Füllanlagen zum Befüllen von Landfahrzeugen mit Druckgasen, Teil 3: Anforderungen an nicht öffentlich zugängliche Tankstellen und Füllanlagen mit ausschließlichem Fahrzeugverkehr durch eingewiesene Personen:** Dieses Merkblatt gilt für nicht öffentlich zugängliche Betankungsanlagen, auf denen Höchstgeschwindigkeiten von 30 km/h zulässig sind. Bei deren Überschreitung findet VdTÜV MB TANK 965-1 Anwendung. Es werden Tankstellenanlagen nach TRBS 3151 / TRGS 751 und der

BetrSichV im Allgemeinen betrachtet. Per Definition dieses Merkblattes muss eine nicht öffentlich zugängliche Betankungsanlage, also z.B. eine H₂-Liefer-Tankstelle ohne öffentliche Betankungsvorrichtungen, auf einem von ihrer Umgebung abgetrennten Betriebsgelände mit kontrollierten Zugängen für Fahrzeuge bzw. Personen errichtet sein. Die einzuhaltenden mechanischen Anforderungen an den Anfahrerschutz ergeben sich aus der Aufstellung eines oberirdischen Lagerbehälters in Bezug zu den Außengrenzen des Betriebsgeländes, zu den Fahrgeschwindigkeiten auf dem Betriebsgelände und zum Gefährdungsgrad durch innerbetriebliche Fahrzeuge.

- **DIN EN ISO 17268 – Gasförmiger Wasserstoff – Anschlussvorrichtungen für die Betankung von Landfahrzeugen:** In dieser Norm werden der Aufbau, die mechanischen Eigenschaften sowie erforderliche Funktionsprüfungen von Füllstutzen an Abgabevorrichtungen von Wasserstofftankstellen festgelegt. Die Druck- und Temperaturreichweitenbedingungen des Betankungsvorganges sind dabei konform zu anderen Normen zu Wasserstoffsystemen. Der Geltungsbereich erstreckt sich auf ein breites Betriebsdruckspektrum von 11, 25, 35 und 70 MPa bei 15 °C Umgebungstemperatur. Als wichtigste Prüfungen sind zu nennen: temperaturabhängige Dichtheitsprüfungen, Prüfung auf anwenderseitige Bedienerfreundlichkeit und Eindeutigkeit der Handhabung, Belastbarkeits- und Dauerhaftigkeitsprüfung, Prüfung auf Materialalterungsbeständigkeit, Prüfung auf Korrosionsbeständigkeit, Prüfung auf Auf- bzw. Abwärtskompatibilität des Füllstutzens (zur Vermeidung von Falschbetankungen).
- **DIN EN 17127 (Entwurf) – Gasförmiger Wasserstoff – Betankungsanlagen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen:** In dieser Norm werden grundsätzliche Mindestanforderungen zur ordnungsgemäßen Funktion einer Wasserstofftankstelle einschließlich Betankungsprotokolle bei Straßenfahrzeugen, auch im Sinne von ISO 19880-1, erörtert. Es werden Nenn- sowie Maximaldruck- und Temperaturbereiche definiert, welche im Einklang mit VdTÜV MB DRGA 514 stehen. Zur Verhinderung einer Fehlbetankung wird die Anwendung geeigneter Zapfventile nach EN ISO 17268 empfohlen. Als Betankungsprotokoll-Anforderungen wird auf bereits etablierte technische Regelwerke zu diesem Thema hingewiesen (SAE J2601 wird explizit als Informationsquelle genannt). Die Verantwortung für das Anwenden eines geeigneten Betankungsprotokolls wird beim Tankstellenbetreiber verortet. Als Umgebungs- und Betriebstemperaturen für die H₂-Betankung gelten die Grenzwerte analog DIN EN ISO 17268. Weiterhin werden geeignete Mindestabnahmeprüfungen der Tankstellenanlage hinsichtlich der Einhaltung der Mindeststandards der Betankungsprotokolle vorgeschrieben wie beispielsweise die Prüfung von Sensoren zur Messung von Umgebungs- und Betankungstemperatur sowie Betankungsdruck oder Kommunikationsprüfungen zwischen Fahrzeug und Zapfsäule beim Betankungsvorgang.
- **DIN EN 17124 (Entwurf) – Wasserstoff als Kraftstoff – Produktfestlegung und Qualitätssicherung – Protonenaustauschmembran (PEM) – Brennstoffzellenanwendungen für Straßenfahrzeuge:** Diese Norm beschreibt die Qualitätsanforderungen an Wasserstoff als Treibstoff mit der dazu erforderlichen Qualitätssicherung. Es werden maximal zulässige Werte für Verunreinigungen bei der Herstellung, Lieferung und Verteilung von Wasserstoff sowie Wahrscheinlichkeiten für ihr Auftreten definiert. Darüber hinaus werden mögliche Auswirkungen auf Komponenten des Gesamtsystems der Wasserstoffversorgung bei einer Überschreitung der Normwerte angegeben. Zur Qualitätssicherung ist eine Risikobewertung mithilfe von Bewertungstabellen unter Berücksichtigung von Verunreinigungs-Schweregraden durchzuführen.

- **DIN EN 50122-1 / VDE 0115-3: Bahnanwendungen - Ortsfeste Anlagen - Elektrische Sicherheit, Erdung und Rückleitung - Teil 1: Schutzmaßnahmen gegen elektrischen Schlag:** Diese Norm findet Anwendung ausschließlich auf elektrifizierten Eisenbahnstrecken mit einer Strom-Oberleitung oder schienenseitiger Stromversorgung. Es werden maximale Einflussbereiche stromführender Komponenten innerhalb der unmittelbar angrenzenden Schieneninfrastruktur definiert und daraus abgeleitete Personenschutzmaßnahmen mittels Fallbeispielen aufgeführt. Aufgrund der leichten Entzündbarkeit des Wasserstoffs ist jede damit beaufschlagte Tankstellenkomponente von elektrostatisch verursachten Zünd- und Entladungsquellen einschließlich abgerissenen Stromoberleitungen und Funkbildungen (z.B. von vorbeifahrenden Zügen) fernzuhalten. Dies kann auch relevant sein, wenn sich die Wasserstofftankstelle selbst auf einem nicht-elektrifizierten Bahngleis, jedoch gleichzeitig direkt neben einem elektrifizierten Bahngleis mit Stromoberleitung befindet.
- **DIN EN 50125-3 / VDE 0115-108-3 – Bahnanwendungen – Umweltbedingungen für Betriebsmittel - Teil 3: Umweltbedingungen für Signal- und Telekommunikationseinrichtungen:** In dieser Norm werden umweltbedingte sowie technische Lastfälle auf Einrichtungen im unmittelbaren bzw. nahegelegenen Bereich einer Eisenbahnschiene einschließlich Einflüssen aus vorbeifahrenden Zügen mit den daraus resultierenden Auswirkungen auf die schienenbegleitende Infrastruktur aufgeführt und geeignete Maßnahmen zur damit verbundenen Gefahrenvermeidung aufgezeigt. Die Kommunikationseinrichtungen z.B. für die Fernfreigabe / Fernfreischaltung von Wasserstofftankstellen zur Betankung von Zügen liegen im Einfluss- bzw. Geltungsbereich dieser Norm. Als wichtige Gefahrenquellen sind dabei insbesondere von vorbeifahrenden Zugbewegungen verursachte Vibrationen, Schwingungen und Stoßwellen im Erdreich und in der Luft anzusehen.
- **TRGS 509 – Lagern von flüssigen und festen Gefahrstoffen in ortsfesten Behältern sowie Füll- und Entleerstellen für ortsbewegliche Behälter:** Die Gültigkeit dieser Technischen Regel betrifft nicht die Lagerung von gasförmigen bzw. Flüssiggas-Brennstoffen, d.h. sie ist nur anzuwenden, wenn sich auf bzw. nahe dem Gelände der Wasserstofftankstelle Lagerbehälter mit flüssigen oder festen Gefahrstoffen / Brennstoffen befinden, welche dann ihrerseits aus brand- und explosionstechnischer Sicht als kritisch einzustufen und durch geeignete Schutzmaßnahmen abzusichern sind.
- **TRGS 727 – Vermeidung von Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladungen:** Diese Technische Regel betrifft vor allem mögliche Funktionsbereiche, in denen es zur Bildung einer explosionsgefährlichen Atmosphäre unter atmosphärischen Normaldruck-Bedingungen kommen kann (z.B. geschlossene Räume). Sie findet darüber hinaus eine sinngemäße Anwendung auch unter anderen Druckbedingungen und bei beliebigen Reaktionspartnern bzw. Reaktionssystemen. Die Normangaben beziehen sich auf die Regelwerke BGR 132 (BGR: Berufsgenossenschaftliche Regeln für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit) und DIN EN 60079-0 (Explosionsgefährdete Bereiche – Teil 0: Betriebsmittel - Allgemeine Anforderungen).
- **ISO/TR 15916 – Basic considerations for the safety of hydrogen systems: (Grundlegende Anforderungen an die Sicherheit von Wasserstoffsystemen)** Von dieser Norm sind alle Anlagenkomponenten betroffen, welche die Produktion, die Lagerung, den Transport und die Nutzung von Wasserstoff beinhalten. Die Norm beschreibt die generellen chemisch-physikalischen Eigenschaften, Lagerungs- und Transportmöglichkeiten sowie Einsatzgebiete von Wasserstoff und mögliche daraus resultierende Unfälle bzw. Gefahren.

- **Surface Vehicle Standard SAE J2600 – Compressed Hydrogen Surface Vehicle Fueling Connection Devices:** (Verbindungseinrichtungen für die Betankung von mit verdichtetem Wasserstoff betriebenen Landfahrzeugen) Diese Norm dient vorrangig der Vermeidung einer Falschbetankung mit zu hohen Betriebsdrücken bzw. falschen Treibstoffgasen und bezieht sich auf alle Betriebsdruckstufen zwischen 11 und 70 MPa. Als Qualitätskontrolle für den Füllstutzen wird auf ISO 9001 bzw. ISO TS 16949 hingewiesen. Die Umgebungs- und Betriebstemperaturrandbedingungen entsprechen den der DIN EN ISO 17268. Die Norm schreibt diverse Tests der Eigenschaften von Einzelbestandteilen eines Füllstutzens unter verschiedenen Druck- und Temperaturbedingungen vor und macht Angaben zu mechanischen Abmessungen und Verbindungsoptionen.
- **Surface Vehicle Standard SAE J2601 – Fueling Protocols for Light Duty Gaseous Hydrogen Surface Vehicles:** (Betankungsprotokolle für mit gasförmigem Wasserstoff betriebene leichte Landfahrzeuge) Diese Norm hat als primäres Ziel die Vermeidung von Brand- und Explosionsgefahren während des Betankungsvorgangs wasserstoffbetriebener Pkw. Es werden die grundlegenden technischen, umwelt- und systemtemperaturbezogenen Randbedingungen mit den daraus resultierenden maximalen Durchflussraten festgelegt, unter denen eine Betankung erfolgen darf. Die zulässigen Betriebsdruck- und Betriebstemperaturgrenzwerte entsprechen hierbei DIN EN ISO 17268. Zur Vermeidung einer „Überbetankung“ wird auch das Druckgefälle zwischen der Zapfsäule und dem zu betankenden Fahrzeug berücksichtigt. Das technische Verhalten einer vorgekühlten oder nicht-vorgekühlten Zapfvorrichtung (inkl. Selbsttests) wird sowohl während des Tankvorganges (hier zusätzlich in Abhängigkeit der H₂-Behälter-Temperatur des zu betankenden Fahrzeuges) als auch im Standby-Modus geregelt. Die Verantwortung für das Einhalten der optimalen Umweltrandbedingungen (z. B. Abschattung der Zapfsäule) wird beim Tankstellenhersteller und -betreiber gesehen.
- **Surface Vehicle Standard SAE J2601-2 – Fueling Protocols for Gaseous Hydrogen Powered Heavy Duty Vehicles:** (Betankungsprotokolle für mit gasförmigem Wasserstoff betriebene schwere Landfahrzeuge) Die Kernaussagen und die wesentlichen Randbedingungen dieser Norm entsprechen SAE J2601 und DIN EN ISO 17268. Ergänzend dazu werden H₂-Betankungsvorgänge in drei Geschwindigkeitsstufen unterteilt: bis maximal 120 g/s, bis maximal 60 g/s und bis maximal 30 g/s.
- **Surface Vehicle Standard SAE J2601-3 – Fueling Protocols for Gaseous Hydrogen Powered Industrial Trucks:** (Betankungsprotokolle für mit gasförmigem Wasserstoff betriebene Flurförderfahrzeuge) Diese Norm legt den Betriebs- und Sicherheitsfunktionsbereich von Abgabevorrichtungen zur Betankung von Flurförderfahrzeugen für Betriebsdruckstufen von 25 und 35 MPa und einem Fahrzeugtankvolumen größer 18 Liter fest. Die Temperatur- und Druckrandbedingungen beim Befüllen und Speichern von Wasserstoff sind analog DIN EN ISO 17268. Es werden zwei Betankungsgeschwindigkeiten definiert: schnell (mehr als 1,5 g/s) und langsam (weniger als 1,5 g/s). Die Norm gilt bis zu einer maximalen Betankungsgeschwindigkeit von 10 g/s. Es werden verschiedene Methoden zur Funktions- und Qualitätskontrolle einer Abgabevorrichtung aufgeführt.
- **Surface Vehicle Standard SAE J2799 – Hydrogen Surface Vehicle to Station Communications Hardware and Software:** (Hard- und Software für die Kommunikation zwischen wasserstoffbetriebenen Landfahrzeugen und Wasserstofftankstellen) Diese Norm bezieht sich auf sämtliche wasserstoffbetriebenen Landfahrzeuge inklusive Busse, Lkw und Flurförderfahrzeuge. Somit ist auch ein Bezug zur Betankung von H₂BZ-Triebwagen gegeben. In der Norm werden die Einzelbestandteile einer fahrzeug- und tankstellenseitigen H₂-Füllkupplung mit den dazugehörigen Datenübertragungsprotokollen, -formaten und -reaktionszeiten definiert sowie verschiedene Funktionstest hin-

sichtlich einer korrekten Infrarotdatenübertragung unter ungünstigen Umweltbedingungen (Lichtquellen / Beleuchtungsstärken) oder Infrarotsensorpositionierungen während des Kuppelvorganges vorgeschrieben. Weiterhin werden Angaben zur genauen Positionierung der Infrarot-Elemente am H₂-Füll- bzw. Empfängerstutzen gemacht.

- **ECE/TRANS/WP.29/2014/78 – Proposal for a new Regulation on hydrogen and fuel cell vehicles (HFCV) & E/ECE/324/Rev.2/Add.133–E/ECE/TRANS/505/Rev.2/Add.133 – Uniform provisions concerning the approval of motor vehicles and their components with regard to the safety-related performance of Hydrogen-Fuelled Vehicles (HFCV):** In diesen Normen werden die Mindestprüfanforderungen an die Wasserstoffbehälter innerhalb wasserstoffbetriebenen Brennstoffzellenfahrzeugen geregelt. Dies betrifft auch die Leckagefreiheit während eines Betankungsvorganges.

Abbildung 2-7 fasst die in den oben aufgeführten technischen Regeln und Normen genannten relevanten Sicherheitsabstände in einer Prinzipskizze für eine Wasserstofftankstelle für H₂BZ-Triebwagen mit On-Site-Elektrolyse zusammen.

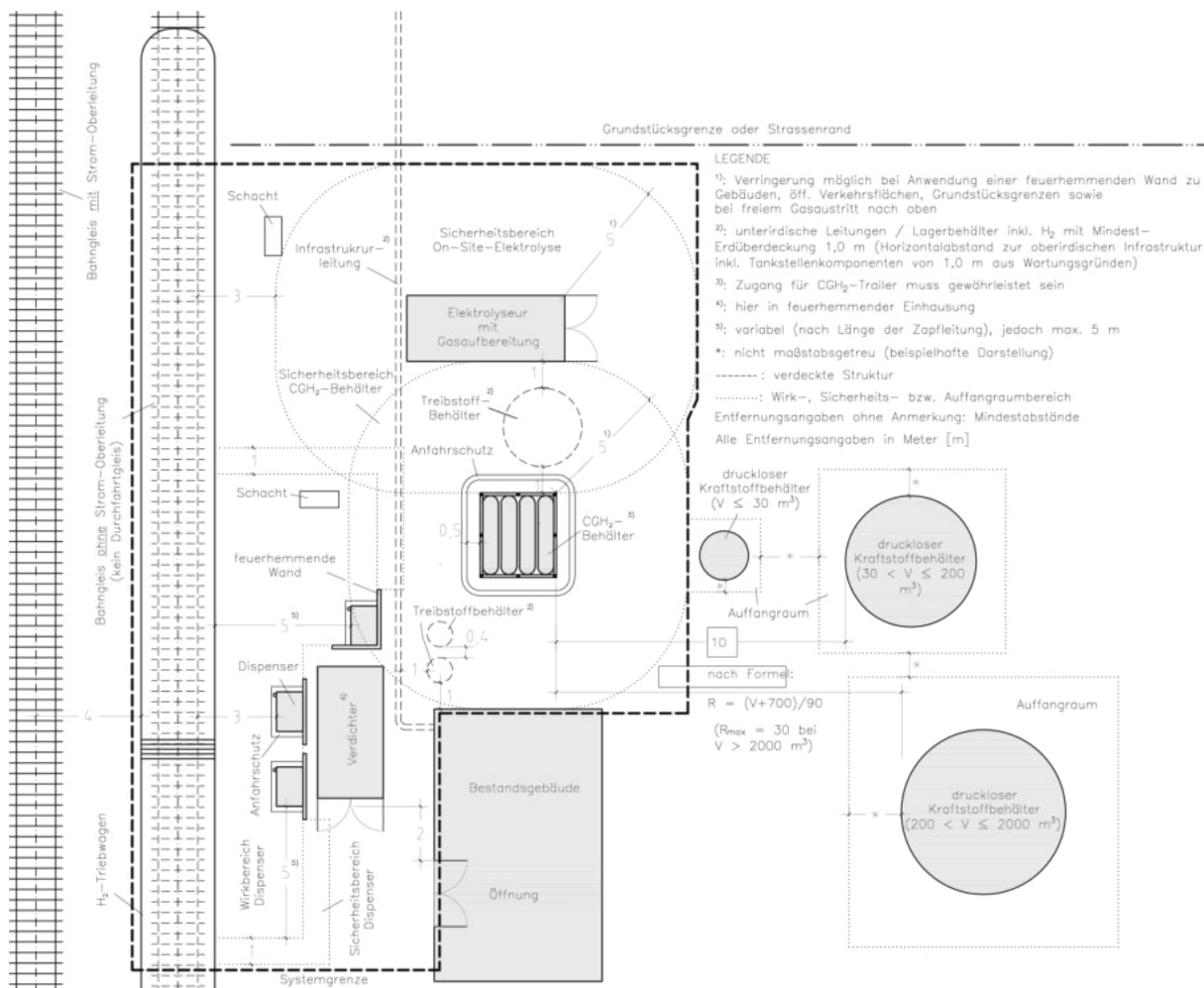


Abb. 2-7 – Prinzipskizze zu den einzuhaltenden Sicherheitsabständen einer Wasserstofftankstelle mit Onsite-Elektrolyse im Eisenbahnbetrieb entsprechend den analysierten technischen Regelwerken.

Ergänzend zu den in Abbildung 2-6 genannten Normen werden die folgenden beiden US-Standards häufig im Zusammenhang mit der Planung, Errichtung, Betrieb und Wartung von Wasserstofftankstellen genannt. Die konkreten Anforderungen aus den Normen sind wieder in Anhang B aufgeführt.

- **Surface Vehicle Standard SAE J2719 – Hydrogen Fuel Quality for Fuel Cell Vehicles:** (*Wasserstoffqualität für Brennstoffzellenfahrzeugen*) Diese Norm definiert den Reinheitsgrad des Wasserstoffs für die Betankung von Brennstoffzellenfahrzeugen, die maximal zulässigen Konzentrationen an Verunreinigungen und die Labortestmethoden für ihre Bestimmung. Weiterhin wird das Gefährdungspotential bestimmter Verunreinigungen auf die Protonenaustauschmembran der Brennstoffzellen, den Blow-Out-Preventer und den Wasserstofftank des Fahrzeuges angegeben.
- **National Fire Protection Association (NFPA) 2 – Hydrogen Technologies Code:** Im Vergleich zu den oben aufgeführten Vorgaben nach DIN EN, ISO und VdTÜV beinhaltet dieser US-Standard eine größere Anzahl an Randbedingungen und Definitionen mit z.T. feineren Zwischenabstufungen bei der Komponentendimensionierung von Wasserstofftankstellen. Der Standard versteht sich als ein Sammelwerk verschiedener anderer NFPA-Normen (z.B. NFPA 52, 55 & 853) mit Fokus auf Wasserstoffanwendungen.

Neben den oben aufgeführten technischen Regeln und Normen gibt es weitere Normen und Richtlinien mit Relevanz für Planung, Errichtung, Betrieb und Wartung von Wasserstofftankstellen, deren Inhalte im Wesentlichen in den oben aufgeführten Normen bereits berücksichtigt sind oder aber eine indirekte Rolle spielen. Diese sind im Folgenden kurz aufgeführt.

- Weltweite Harmonisierung von Mindestsicherheitsanforderungen von Wasserstoffsystemen bezüglich Produktion, Verdichtung, Lagerung, Vorkühlung und Betankung:
 - *ISO/DIS 19880-1 (Entwurf): Gasförmiger Wasserstoff - Betankungsanlagen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen*
 - *ISO/FDIS 19880-3: Gasförmiger Wasserstoff - Tankstellen - Teil 3: Absperrvorrichtungen*
 - *ISO/DIS 19880-8: Gasförmiger Wasserstoff - Tankstellen - Teil 8: Treibstoff-Qualitätskontrolle*
- Anforderungen an die Wasserstoffqualität:
 - *ISO/TS 14687-2: Wasserstoff als Kraftstoff – Produktspezifikationen – Protonenaustauschmembranbrennstoffzellen - Anwendung für Straßenfahrzeuge*
- Anforderungen der Tankstellen und ihrer Komponenten an den Brand- und Explosionsschutz:
 - *Richtlinie 2014/34/EU zur Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten für Geräte und Schutzsysteme zur bestimmungsgemäßen Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen (ATEX-Richtlinie)*
 - *TRBS 2152 Teil 2 / TRGS 722: Vermeidung oder Einschränkung gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre*
- Allgemeine Anforderungen im öffentlichen bzw. bahnseitigen Bereich einer Wasserstofftankstelle:
 - *DIN EN 12464-2: Licht und Beleuchtung – Beleuchtung von Arbeitsstätten – Teil 2: Arbeitsplätze im Freien*

2.2.4 Regeln für den Transport von Wasserstoff

Wie in Abschnitt 2.1.4 beschrieben, ist für das Pilotprojekt eine Versorgung der H₂BZ-Triebwagen mit aus erneuerbarer Elektrizität über Wasserelektrolyse hergestelltem Wasserstoff anzustreben. Dies wird in der Regel einen **Transport vom Ort der Wasserstofferzeugung zur Tankstelle** erfordern, da eine räumliche Verbindung von Erneuerbaren-Energien-Anlagen, Wasserelektrolyse und Wasserstofftankstelle in der Praxis kaum realisierbar sein dürfte und sich ein Grünstromtarif für die On-Site-Elektrolyse auf der Tankstelle als sehr kostenintensiv erweist (siehe auch Abschnitte 2.1.4, 3.4.2, 3.4.3).

Wasserstoff gehört zur Gefahrgutklasse 2 – Gase und gasförmige Stoffe (ADR 2017), hat den Klassifizierungscode 1F (leicht entzündbar) und ist weder giftig noch umweltschädlich. Somit besteht die größte Herausforderung beim Transport zu einer Liefer-Tankstelle in der Vermeidung von Brand- und Explosionsgefahren, da die zum Entzünden von Wasserstoff benötigte Energiemenge lediglich 0,016 mJ beträgt und somit im Vergleich zum Propan- oder Methan-Gas um etwa das 15-Fache geringer ist (TRGS 727). Zudem kann es bereits ab einer Wasserstoffkonzentration von 4 % in der Luft zu einer Entzündung kommen, so dass ein Transport von z.B. H₂-Stahlflaschen in geschlossenen Containern nur mithilfe geeigneter Belüftungsmaßnahmen vorzunehmen ist. ISO/TR 15916 schreibt daher in geschlossenen Räumen eine H₂-Konzentrationsüberwachung vor, wozu auch geschlossene Transportkonstruktionen zählen. Der zulässige Grenzwert liegt hierbei bei einer H₂-Konzentration von 1 %. Aufgrund des sich daraus ergebenden erhöhten Ausrüstungs- und Handhabungsaufwandes wird der **Transport von H₂-Behältern in offenen Trägerkonstruktionen** bevorzugt.

Für den Transport von Gefahrgütern sind nur Transportmittel bzw. Transportfahrzeuge unter Einhaltung vorgegebener Brand- und Explosionsschutz-Randbedingungen während des Transportvorganges zugelassen (ADR 2017). Zudem muss der Transport nach § 35 Gefahrgutverordnung Straße, Eisenbahn und Binnenschifffahrt (GGVSEB) auf dem Eisenbahn- oder Wasserweg erfolgen, sofern denn die technischen Voraussetzungen hierfür gegeben sind und die Beförderungsstrecke mehr als 200 km beträgt. Eine Beförderung im Straßenverkehr hat zudem nach § 35a GGVSEB vornehmlich auf Autobahnen stattzufinden, sofern die Entfernung bei der Nutzung der Autobahn nicht mehr das Doppelte der Entfernung der Benutzung anderer geeigneter Straßen beträgt. Für den Transport von Wasserstoff sind die folgenden Gesetze und Richtlinien maßgeblich:

- Verordnung über die innerstaatliche und grenzüberschreitende Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße, mit Eisenbahnen und auf Binnengewässern (Gefahrgutverordnung Straße, Eisenbahn und Binnenschifffahrt - GGVSEB) vom 30. März 2017
- Gesetz über die Beförderung gefährlicher Güter (Gefahrgutbeförderungsgesetz - GGBefG) vom 7. Juli 2009
- Richtlinien zur Durchführung der Gefahrgutverordnung Straße, Eisenbahn und Binnenschifffahrt (GGVSEB) und weiterer gefahrgutrechtlicher Verordnungen (Durchführungsrichtlinien-Gefahrgut - RESB) vom 28. April 2017
- Richtlinie 2014/68/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 15. Mai 2014 zur Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die Bereitstellung von Druckgeräten auf dem Markt
- Europäisches Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (Accord européen relatif au transport international des marchandises Dangereuses par Route) – ADR 2017

Insbesondere die ADR-Vereinbarungen und hier die aus der „Tabelle A: Verzeichnis der gefährlichen Güter“, Kapitel 3.2 ADR 2017, UN-Nummer 1049 abgeleiteten Angaben zum Transport von verdichtetem Wasserstoff sind bei der Versorgung einer Tankstelle für H₂BZ-Triebwagen mit über Off-Site-Elektrolyse gewonnenem Wasserstoff zu berücksichtigen.

Für ein **Pilotprojekt für H₂BZ-Triebwagen in Thüringen** ist zu beachten, dass die Transportentfernung vom Ort der Wasserstofferzeugung an Erneuerbaren-Energien-Anlagen zur Wasserstofftankstelle zu minimieren ist und unter 200 km gehalten werden sollte, da damit die Verlagerungspflicht auf den Eisenbahn- oder Wasserweg entfällt und die Logistik vereinfacht wird. Weiterhin sollte der Transport

vornehmlich auf Autobahnen erfolgen können. Dies ist bei der Wahl von Elektrolyse- und Tankstellenstandorten mit zu berücksichtigen. Für Fahrwege außerhalb der Autobahnen ist laut Zuständigkeitsverordnung des Freistaates Thüringen eine Fahrwegbestimmung von den jeweiligen Landkreisen und kreisfreien Städten einzuholen (TMIL, 2017).

3. Potentiale für den Eisenbahnbetrieb mit H₂BZ-Triebwagen in Thüringen

3.1 Auswahl von geeigneten Eisenbahnstrecken

3.1.1 Kriterien zur Bewertung und Auswahl von Eisenbahnstrecken und Eisenbahnlinien

Für die Auswahl geeigneter Eisenbahnstrecken und -linien wurde zunächst das in Abbildung 3-1 dargestellte dreistufige Verfahren aufgestellt, das unter Beachtung von für die Umsetzbarkeit eines Pilotprojektes relevanten Kriterien eine Beurteilung der grundsätzlichen Machbarkeit ermöglicht.

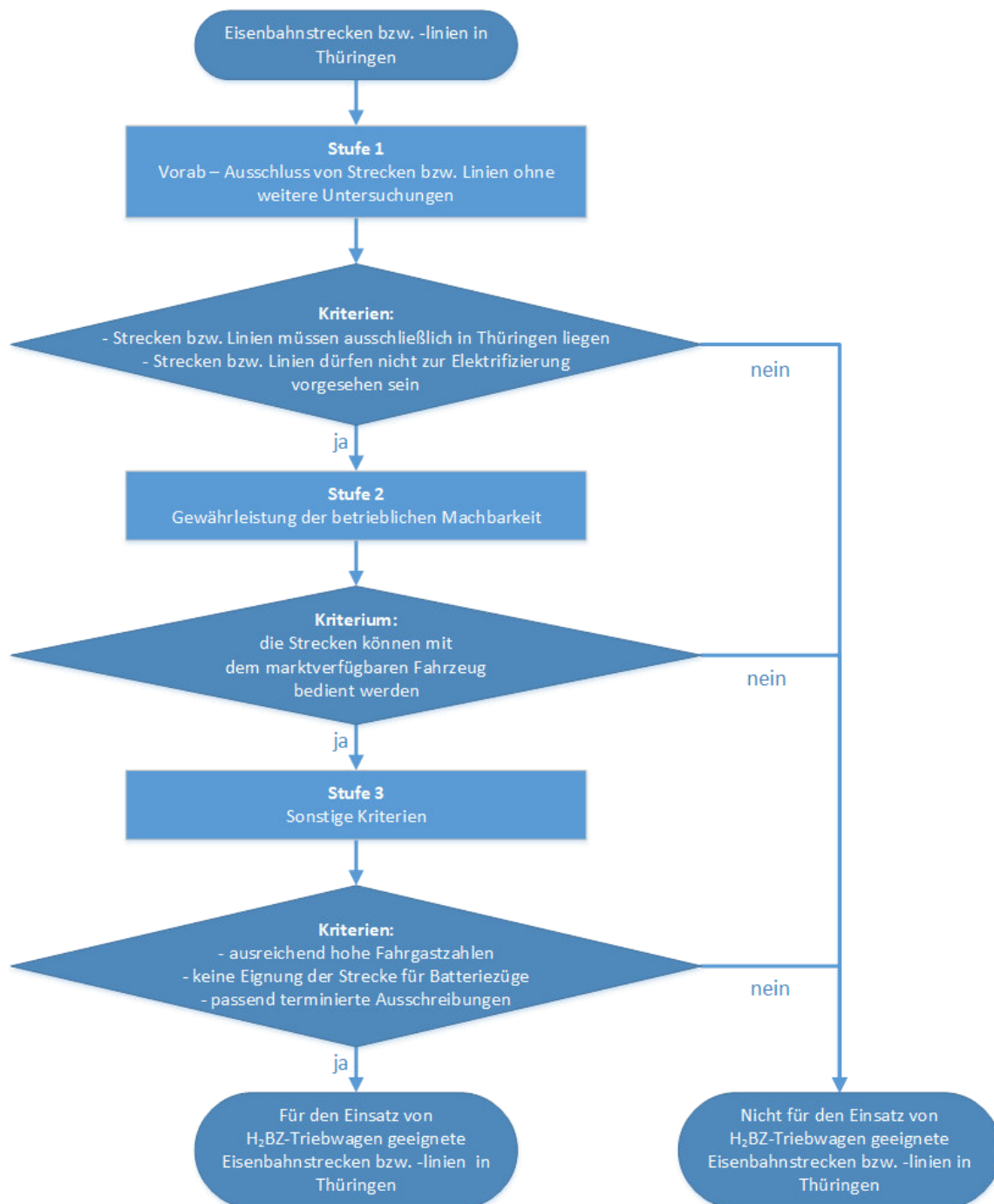


Abb. 3-1 – Dreistufiges Auswahlverfahren zur Ermittlung der für H₂BZ-Triebwagen geeigneten Eisenbahnstrecken bzw. -linien.

Im Rahmen des **Vorab-Ausschlusses in Stufe 1** des Auswahlverfahrens wurden zwei Kriterien definiert, die durch die Strecken bzw. Linien grundsätzlich erfüllt werden müssen. Zum einen sollte aufgrund des Hintergrundes als „Thüringer Projekt“ der überwiegende Anteil der Fahrt in Thüringen erfolgen. Da bei allen grenzüberschreitenden Eisenbahnlinien ein großer Teil der Fahrt in benachbarten Bundesländern stattfindet, wurde daher festgelegt, dass **nur Eisenbahnlinien** untersucht werden, **die ausschließlich in Thüringen verkehren**. Zum anderen wurden Eisenbahnlinien auf den Strecken **Gotha – Leinefelde** sowie **Weimar – Gera – Gößnitz**, die im Rahmen des Vordringlichen Bedarfes des BVWP 2030 elektrifiziert werden sollen (siehe Abschnitt 2.2.1), **nicht berücksichtigt**.

In der **2. Stufe** des Auswahlverfahrens wurde die **betriebliche Machbarkeit auf Grundlage des ausgewählten Fahrzeugs** beurteilt. Dies ist der Coradia iLint von Alstom, da dieses Fahrzeug den derzeit einzigen auf dem Markt verfügbaren Triebwagen mit Wasserstoffantrieb darstellt. Die technischen Daten des Coradia iLint werden in Tabelle 3-1 zusammengefasst.

Tabelle 3-1 – Technische Daten des Alstom Coradia iLint.

Bild Triebwagen	Grundlegende Kenndaten
	Baureihe 654, Coradia iLint
	Hersteller: Alstom
	v _{max} : 140 km/h
	Achsfolge: B'2+2'B'
	Fahrzeuglänge: 54,27 m
	Leistung: 734 kW
	Dienstmasse: 106,9 t
	Leistungskennz.: 6,87 kW/t
	Sitzplätze: 153 (davon 18 Klappsitze)

Ein Merkmal des Fahrzeuges ist die im Verhältnis zum Gewicht relativ geringe Leistung. Die Leistungskennziffer der in Thüringen überwiegend eingesetzten RegioShuttle beträgt beispielsweise 11,84 kW/t (siehe auch Tabelle 2-3), während diese Zahl beim Coradia iLint gemäß Tabelle 3-1 bei 6,87 kW/t liegt. Daraus resultiert eine erheblich geringere Beschleunigungsfähigkeit. Daher waren, um die Bedienbarkeit der Strecken mit diesem Fahrzeug zu überprüfen, umfangreiche Fahrzeitberechnungen erforderlich. Dazu wurde überwiegend das Programm RegioSim verwendet (RegioSim, n.d.). Für die Berechnungen wurde zunächst aus der Gesamtmasse des Fahrzeugs und dem Z/V-Diagramm, das den Zusammenhang zwischen Zugkraft und Geschwindigkeit beschreibt, die Beschleunigung in der Ebene berechnet. Anschließend wurde für ausgewählte typische Strecken eine Fahrzeitberechnung durchgeführt, die grundsätzliche Fahrzeitverlängerungen aufzeigt, die auf die in Stufe 1 selektierten Strecken übertragen werden können. Im Rahmen der Bestimmung der grundsätzlichen Fahrzeitverlängerungen konnten zwei unterschiedliche Streckentypen definiert werden:

1. Hauptstrecken mit Geschwindigkeiten ≥ 80 km/h, vielen Anschlussbeziehungen und teilweise auch Flügelungen. Maßgebend wird die Fahrzeit zwischen Knoten bzw. Kreuzungsbahnhöfen auf durchgehenden Strecken.

➔ **Fahrzeitverlängerung 3,5 - 5,5 % je nach zulässiger Höchstgeschwindigkeit.**

2. Stichstrecken mit Anschlussbeziehungen an der Hauptbahn, $v_{\max} \leq 60$ km/h. Maßgebend wird die Fahrzeit zwischen Kreuzungsbahnhöfen bzw. die verbleibende Wendezeit auf den Endbahnhöfen.
➔ Fahrzeitverlängerung 4 - 5 Sek. pro Halt, je nach zulässiger Höchstgeschwindigkeit.

Mit diesen Fahrzeitverlängerungen, die in Tabelle A-1 in Anhang A dargestellt werden, wurden neue Fahrzeiten für alle nach der Stufe 1 verbliebenen Eisenbahnstrecken bzw. -linien berechnet. In **Stufe 3** des Auswahlverfahrens wurden diese verbliebenen Strecken dann auf Grundlage folgender weiterer Kriterien einer abschließenden Bewertung unterzogen:

- **Fahrgastzahlen:** Der Coradia iLint weist ein deutlich größeres Fassungsvermögen auf als der in Thüringen überwiegend eingesetzte RegioShuttle, der ein einteiliges Fahrzeug mit 71 Sitzplätzen ist, während der Coordia iLint ein zweiteiliges Fahrzeug mit 153 Sitzplätzen darstellt. Aus wirtschaftlicher Sicht ist es daher nicht empfehlenswert, den iLint auf Eisenbahnlinien mit geringem Fahrgastaufkommen verkehren zu lassen. Es sollten möglichst Eisenbahnlinien ausgewählt werden, auf denen der RegioShuttle zumindest zeitweise auch in Doppeltraktion verkehrt oder auf denen zweiteilige Fahrzeuge (z.B. der Desiro) zum Einsatz kommen.
- **Eignung der Strecke für Batterie-Triebzüge:** Batterie-Triebzüge haben gegenüber wasserstoffangetriebenen Fahrzeugen den Nachteil einer deutlich geringeren Reichweite von 80 – 100 km. Ihr Einsatz kommt daher nur in Frage, wenn der Abschnitt ohne Fahrdrabt nicht länger ist und ein großer Teil der Fahrt unter Fahrdrabt zurückgelegt wird, da auf diesem Streckenabschnitt die Batterien wieder aufgeladen werden können. Wo dies jedoch der Fall ist, ist die Eisenbahnstrecke eher für einen Batterie-Triebzug als für ein wasserstoffangetriebenes Fahrzeug geeignet.
- **Termine Ausschreibungsverfahren:** Der Einsatz eines H₂BZ-Triebwagens sollte bereits in der Ausschreibung berücksichtigt werden, da hierbei diesbezüglich keine Verhandlungen mit dem aktuellen Betreiber erforderlich wären. Daher sind Linien mit terminlich passenden Ausschreibungsverfahren zu bevorzugen.

3.1.2 Für den H₂BZ-Triebwagenbetrieb geeignete Eisenbahnstrecken

Als Eisenbahnlinien, die auf Grundlage des in Abschnitt 3.1.1 beschriebenen Auswahlverfahrens in Stufe 2 selektiert wurden und damit **kurz- oder mittelfristig für den Einsatz eines H₂BZ-Triebwagens geeignet** sind, verbleiben für ein Pilotprojekt:

- RE 55/56 Erfurt – Nordhausen
- EB 48 Fröttstädt – Friedrichroda
- EB 32 Saalfeld – Blankenstein
- EB 28 Jena Saalbf. – Pößneck u. Bf.
- OBS Rottenbach – Katzhütte

Diese Eisenbahnlinien werden in Abbildung 3-2 im Überblick gezeigt und anschließend in Tabelle 3-2 mit einer Bewertung ihrer grundsätzlichen Eignung detailliert, aus der sich dann eine Empfehlung für ein H₂BZ-Triebwagen-Pilotprojekt ableitet.

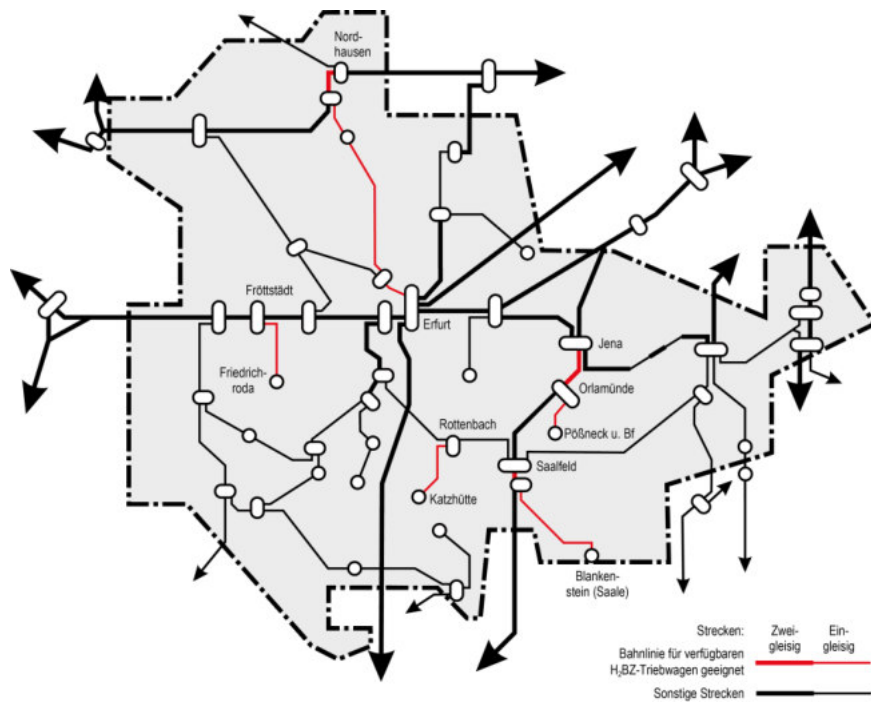


Abb. 3-2 – Thüringer Eisenbahnlinien, die grundsätzlich kurz- oder mittelfristig für den Einsatz eines H₂BZ-Triebwagens geeignet sind.

Tabelle 3-2 – Beschreibung der für den Einsatz eines H₂BZ-Fahrzeuges geeigneten Strecken / Linien.

Strecke; Linie	Fahrzeug; Fahrgäste*	Nächste Aus- schreibung	Anmerkungen und Bewertung
Erfurt – Nordhausen; RE 55/56	Baureihe 642, Siemens Desiro; 800 – 1250	12 / 2025	Im aktuellen Betriebskonzept könnte der Coradia iLint eingesetzt werden. Ab 2023/24 ist jedoch ein neues Betriebskonzept geplant, das den Einsatz erschweren würde. Empfehlung: die Entwicklung leistungsstärkerer wasserstoffbetriebener Fahrzeuge abwarten
Fröttstadt – Friedrichroda; EB 48	Baureihe 650, Stadler Regio Shuttle RS 1; 250 – 500	12 / 2028	Von einer Hauptbahn abzweigende Stichstrecke mit ausreichenden Wendezeiten an den Endbahnhöfen. Empfehlung: grundsätzlich geeignete Strecke bzw. Linie aber geringe Nachfrage
Saalfeld – Blankenstein; EB 32	Baureihe 650, Stadler Regio Shuttle RS 1; 50 – 250	12 / 2024	Von einer Hauptbahn abzweigende Stichstrecke mit ausreichenden Wendezeiten an den Endbahnhöfen. Empfehlung: grundsätzlich geeignete Strecke bzw. Linie aber sehr geringe Nachfrage
Jena Saalb. – Pößneck u. Bf.; EB 28	Baureihe 650, Stadler Regio Shuttle RS 1; 350	12 / 2024	Aus betrieblichen Gründen gut geeignete Strecke mit relativ geringer Nachfrage, die auf dem Abschnitt Jena – Orlamünde elektrifiziert ist. Empfehlung: Einsatz eines Batterie-Triebzugs ist sinnvoller
Rottenbach – Katzhütte; OBS	Baureihe 641, DeDietrich / Alstom Coradia A TER; 350	12 / 2021	Von einer Hauptbahn abzweigende Stichstrecke mit ausreichenden Wendezeiten an den Endbahnhöfen. Aus betrieblichen und organisatorischen Gründen gut geeignete Strecke mit relativ geringer und zyklischer Nachfrage, die eine übergeordnete touristische Bedeutung aufweist. Empfehlung: gut geeignete Strecke bzw. Linie mit großer Öffentlichkeitswirksamkeit

* Die Anzahl der Fahrgäste bezieht sich auf Schultage, Prognose 2022 (TMIL, 2018).

Über die in Tabelle 3-2 dargestellte zusammenfassende Auswertung hinaus sind für die Strecken Erfurt – Nordhausen, Jena – Pößneck unterer Bahnhof sowie Rottenbach – Katzhütte die im Folgenden dargestellten Aspekte von Bedeutung.

Im Rahmen des in Abbildung 2-5 dargestellten Streckenausbaus zur Geschwindigkeitsanhebung ist für die **Eisenbahnstrecke Erfurt – Nordhausen** ab 2023/24 ein neues Betriebskonzept geplant, das eine erhebliche Beschleunigung der Züge und eine Unterscheidung in RB und RE vorsieht. Zukünftig sollen die zweistündig verkehrenden RE aus Nordhausen in Erfurt Anschluss an den ICE Richtung Süden erhalten. Als Fahrzeug soll die Baureihe 622 (Alstom Coradia Lint 54) zum Einsatz kommen, deren technische Daten in Tabelle 3-3 zusammengefasst sind.

Tabelle 3-3 – Technische Daten des Alstom Coradia Lint 54.

Bild Triebwagen	Grundlegende Kenndaten
	Baureihe 622, Coradia Lint 54
	Hersteller: Alstom $v_{\max}$: 140 km/h Achsfolge: B'B+2'B' Fahrzeuglänge: 54,27 m Leistung: 1170 kW Dienstmasse: 100,3 t Leistungskennz.: 11,67 kW/t Sitzplätze: 152 (incl. Klappsitze) Bildquelle: Wikimedia Commons, Autor: Valentin Brueckel, Lizenz: Creative-Commons-Lizenz CC BY-NC-SA 3.0

Unter Inkaufnahme einer schlechteren Betriebsqualität als mit dem Coradia Lint 54 könnte der RE auch mit dem Coradia iLint betrieben werden. Dies hätte aber den großen Nachteil, dass dafür ein weiterer Umlauf erforderlich ist. Das geplante Betriebskonzept sieht vor, dass die jeweilige Zuggattung in Erfurt auf sich selbst wendet, so dass für den RE ausreichend Umsteigezeit auf den ICE Richtung Süden besteht. In Nordhausen hingegen ist eine Wende auf die andere Zuggattung erforderlich. Dadurch kommt das geplante Betriebskonzept mit lediglich drei Umläufen aus. Bei reinen RE/RB-Konzepten hingegen wären, wie mit der roten Linie in Abbildung 3-3 verdeutlicht wird, vier Umläufe erforderlich. Zudem würde sich eine Standzeit in Nordhausen von über einer Stunde ergeben. Aus wirtschaftlichen Gründen muss diese Lösung mit dem derzeit verfügbaren Fahrzeug Coradia iLint daher ausgeschlossen werden.

Auf der Eisenbahnstrecke **Jena Saalbahnhof – Pößneck unterer Bahnhof** ist der Streckenteil zwischen Jena Saalbahnhof und Orlamünde elektrifiziert (22 km) und nur zwischen Orlamünde und Pößneck unterer Bahnhof ist kein Fahrdrabt installiert (12 km) (siehe Karten Anhang A). Damit würde sich die Strecke für einen Batterie-Triebzug eignen, der lediglich auf der Teilstrecke Orlamünde – Pößneck unterer Bahnhof über eine Gesamtstrecke von 24 km im Batteriebetrieb fahren müsste. Auf der übrigen Teilstrecke könnten die Batterien unter Fahrdrabt wieder aufgeladen werden. Der Aufbau einer Wasserstofflogistik ist für diese Eisenbahnlinie daher nicht gerechtfertigt, da die hierfür erforderlichen Investitions- und Betriebskosten die eines Batterie-Triebzugs erheblich übersteigen. Da sich geeignete Batterie-Triebzüge wie der Talent 3 der Firma Bombardier, der ab 2019 in die Erprobung gehen soll, in der Entwicklung befinden (Schwenn & Schubert, 2018), sollte diese Option **im Rahmen einer separaten Untersuchung** näher betrachtet werden.

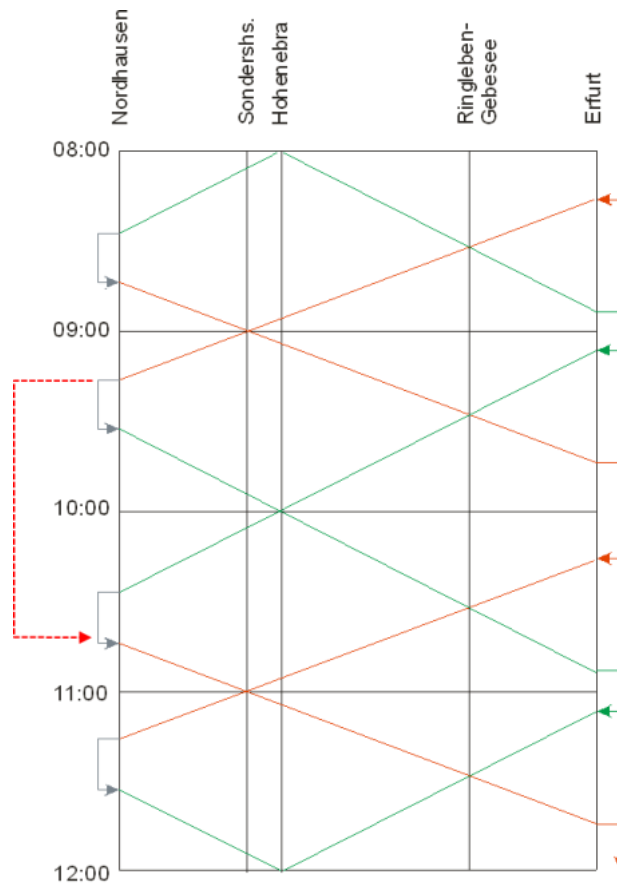


Abb. 3-3 – Schematische Darstellung des geplanten Betriebskonzepts für die Strecke Erfurt – Nordhausen.

Die **Eisenbahnstrecke Rottenbach – Katzhütte** weist eine geringe, aber schwankende Nachfrage mit deutlichen Schwerpunkten an Wochenenden und Feiertagen sowie, wie in Abbildung 3-4 zu sehen ist, in den Monaten Mai bis Oktober auf und ist eine Eisenbahnstrecke mit großer Bedeutung für den Tourismus. Insbesondere die mögliche touristische Verknüpfung mit der in Abbildung 3-5 gezeigten Standseilbahn Obsthofersmiede – Lichtenhain und der elektrisch betriebenen Flachstrecke nach Cursdorf wäre für ein H₂BZ-Triebwagen-Pilotprojekt attraktiv, um für die neue Technologie zu sensibilisieren.

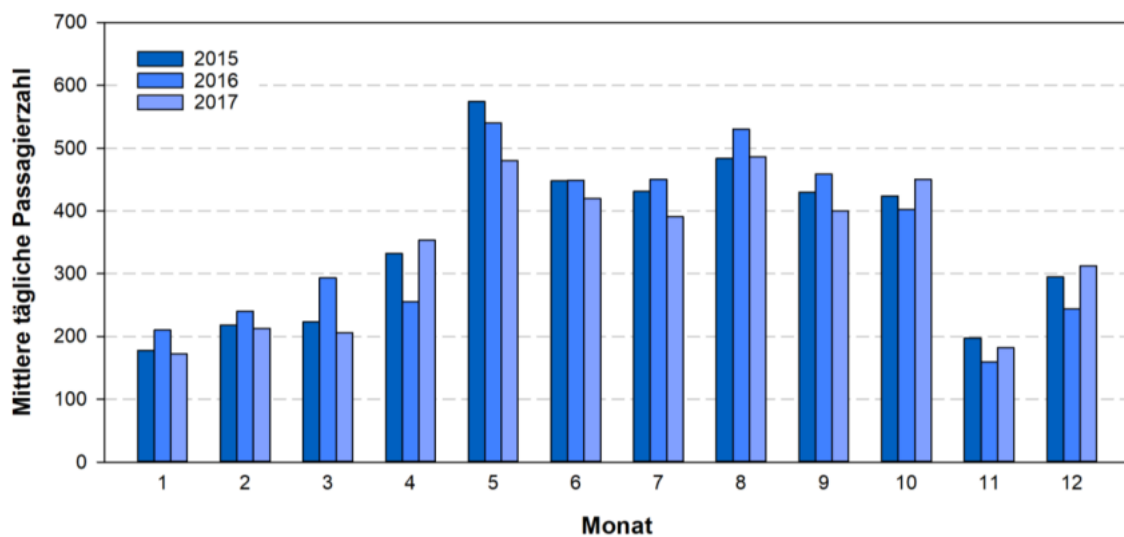


Abb. 3-4 – Mittlere tägliche Fahrgastzahlen der Schwarzatalbahn (Rottenbach – Katzhütte) 2015 – 2017 (Datenquelle: Oberweißbacher Berg- und Schwarzatalbahn).



Abb. 3-5 – Standseilbahn Obstfelderschmiede – Lichtenhain (links), Historisches Fahrzeug auf der Flachstrecke nach Cursdorf (rechts).

3.1.3 Fazit für die Umsetzung eines Pilotprojektes in Thüringen

Aus den Ausführungen in den Abschnitten 3.1.1 und 3.1.2 geht hervor, dass derzeit **insgesamt 5 Eisenbahnlinien in Thüringen eine grundsätzlich gute Eignung** für den Betrieb mit dem Coradia iLint haben, wobei jedoch für die Bahnstrecke Erfurt – Nordhausen durch den projektierten Ausbau zur Geschwindigkeitserhöhung und der damit verbundenen Änderung des Betriebsregimes unter den gegebenen Bedingungen mittelfristig weniger geeignet ist. Weiterhin scheidet die Eisenbahnstrecke Jena Saalbahnhof – Pößneck aus, da sie zu fast 2/3 mit Fahrdrabt ausgestattet ist und damit für Batterie-Triebwagen besser geeignet ist. Von den verbleibenden drei Eisenbahnstrecken Fröttstädt – Friedrichroda, Saalfeld – Blankenstein sowie Rottenbach – Katzhütte, die alle ein relativ geringes Fahrgastaufkommen aufweisen, ist Rottenbach – Katzhütte am besten für ein H₂BZ-Triebwagen-Pilotprojekt geeignet. Zum einen endet die derzeitige Ausschreibung relativ zeitnah Ende 2021, während für die anderen beiden Eisenbahnlinien neue Vergaben erst zum Beginn 2029 bzw. 2025 anstehen und zum anderen hat die Bahnlinie Rottenbach – Katzhütte eine hohe touristische und damit öffentliche Sichtbarkeit, was in den beiden anderen Fällen weniger stark gegeben ist. Daher wird **empfohlen, die Eisenbahnstrecke Rottenbach – Katzhütte für ein H₂BZ-Triebwagen-Pilotprojekt in Thüringen vorzusehen**.

Die erfolgreiche Umsetzung eines Pilotprojektes auf der Eisenbahnstrecke Rottenbach – Katzhütte sollte weiterhin dazu genutzt werden, **Erfahrungen aus dem Betrieb einer vollständig klimaneutral mit Wasserstoff aus erneuerbaren Energien umgesetzten Infrastruktur zu sammeln**, um diese weiteren Projekten zu Gute kommen zu lassen. Auf Basis dieser Erfahrungen wird **empfohlen, in der Folge die Umsetzung auf einer Eisenbahnstrecke mit einem hohen Fahrgastaufkommen zu forcieren**. Hierzu bietet sich vor allem die **Eisenbahnstrecke Erfurt – Nordhausen** an. Dies ist jedoch an die Voraussetzung gebunden, dass leistungstärkere H₂BZ-Triebwagen verfügbar werden, wovon jedoch bei einem einsetzenden Markthochlauf auszugehen ist.

3.2 Standortauswahl für Wasserstofftankstellen

3.2.1 Kriterienkatalog zur Standortbewertung von Wasserstofftankstellen im Eisenbahnbetrieb

In Thüringen gibt es zum Stand Dezember 2018 weder eine öffentliche Wasserstofftankstelle noch eine eisenbahnseitige Betankungsanlage für Wasserstoff. Die weltweit erste ortsfeste Wasserstofftankstelle für H₂BZ-Triebwagen befindet sich derzeit, wie in Abschnitt 2.1.5 dargestellt, in Bremervörde, Niedersachsen in der Planfeststellung (Niedersächsische Landesbehörde für Straßenbau und Verkehr, 2018). Somit sind noch keine allgemeingültigen Kriterien für die Standortbewertung für Wasserstofftankstellen im Eisenbahnbetrieb verfügbar. Daher sind für ein Pilotprojekt auf Basis der in Abschnitt 3.1 aufgeführten, für den H₂BZ-Triebwagenbetrieb geeigneten Bahnlinien in Thüringen und einem definierten Kriterienkatalog geeignete Mikrostandorte für Wasserstofftankstellen zu identifizieren.

Bei der **Standortbewertung für eine in Thüringen neu zu errichtende Wasserstofftankstelle im Eisenbahnbetrieb** muss zunächst, wie bereits in Abschnitt 2.1.4 beschrieben wurde, grundsätzlich zwischen den Varianten der On- und Off-Site-Elektrolyse unterschieden werden. Die Wasserstofftankstelle mit On-Site-Elektrolyse ist dadurch definiert, dass die elektrolytische Erzeugung des Wasserstoffs unmittelbar an der Tankstelle erfolgt, wodurch die Notwendigkeit besteht, entweder die erneuerbare Elektrizität für den Betrieb des Elektrolyseurs direkt vor Ort zu erzeugen oder diese über das öffentliche Verteilnetz vom Ort der Erzeugung zur Tankstelle zu transportieren. Bei Wasserstofftankstellen mit Off-Site-Elektrolyse erfolgt die Erzeugung des Wasserstoffs an Erneuerbaren-Energien-Anlagen, und der Wasserstoff muss über eine straßengebundene Logistikkette zur Tankstelle transportiert werden (siehe auch Abschnitt 2.2.5).

Wie in Abbildung 3-6 zu sehen ist, gibt es für die Planung einer Wasserstofftankstelle Anforderungen aus dem Eisenbahnbetrieb und der On-Site-Elektrolyse. Dies wird ergänzt um Anforderungen an das Tankstellengelände und die Straßenanbindung sowie sonstige äußere Kriterien, die die Planung beeinflussen. Bei einer Off-Site-Elektrolyse entstehen weitere Anforderungen an den dann externen Standort der Elektrolyseanlage sowie die Logistik des Wasserstofftransports. Tabelle 3-4 fasst die Kriterien zur Standortbewertung von Wasserstofftankstellen im Eisenbahnbetrieb für diese sechs Anforderungsbereiche zusammen.

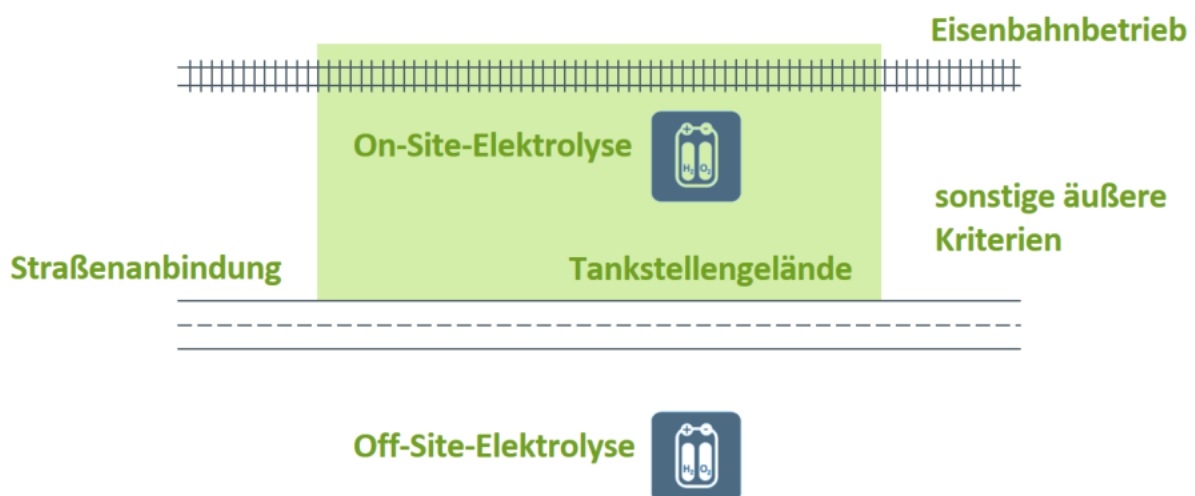


Abb. 3-6 – Anforderungsbereiche an eine Wasserstofftankstelle für die Betankung von H₂BZ-Triebwagen und Straßenfahrzeugen.

Tabelle 3-4 – Grundlegende Kriterien zur Bewertung der Eignung eines Standortes für die Errichtung einer Wasserstofftankstelle im Eisenbahnbetrieb.

Anforderungsbereich	Kriterien zur Standortbewertung
Eisenbahnbetrieb	▪ möglichst kurze Wege zwischen Betankungs- und Einsatzstandorten / bevorzugt Nähe zum Endbahnhof der Bahnlinie und Reinigungsort der Triebwagen (Optimierung von Personalaufwand, Treibstoffverbrauch und Netznutzungsgebühren der Schieneninfrastruktur) ▪ Erreichbarkeit ohne aufwändiges Rangieren
Tankstellengelände	▪ Gelände ohne wesentliches Gefälle in einer geeigneten Geometrie ▪ idealerweise Gelände mit vorhandenem Gleis ohne Anforderungen an eine Gleisertüchtigung / alternativ Gelände, das mit vertretbarem Aufwand an ein bestehendes Bahngleis angeschlossen werden kann ▪ kein Gleis für den allgemeinen Betrieb (bevorzugt Stumpfgleis) ▪ Gleis ohne Stromoberleitung / kein benachbartes Gleis mit Stromoberleitung im Abstand < 4 m vom H₂BZ-Triebwagen ▪ keine Flüssigkraftstoffbehälter oder deren Auffangräume auf dem Tankstellengelände ▪ idealerweise keine Erdgasinfrastruktur auf dem Tankstellengelände ▪ bahnseitig gesicherter Bereich (Zutritt nur für Bedienpersonal, Umzäunung) ▪ ausreichend Platz für alle H₂-Tankstellenkomponenten, insbesondere H₂-Speicher, Mindestgröße ca. 3.000 m² (abhängig von der Geländegeometrie und der vor Ort zu speichernden Wasserstoffmenge) ▪ ausreichend Platz für LKW-Rangierfahrten bei einer H₂-Belieferung (gilt sowohl für Tankstellen mit und ohne On-Site-Elektrolyse) ▪ Lage nicht innerhalb eines reinen Wohngebietes nach BauNVO (Tankstellen nicht zulässig)
Straßenanbindung	▪ H₂-Anlieferung per Lkw muss zwingend möglich sein (Straßenbreite, Kurvenradien) ▪ gute Anbindungsmöglichkeit an eine viel frequentierte, öffentliche Straße wünschenswert (Parallelbetankung H₂-Busse/-Lkw/-Pkw) ▪ geringe Beeinträchtigung von Wohngebieten durch eine H₂-Belieferung mit Lkw und Betankungsfahrten von Straßenfahrzeugen
On-Site-Elektrolyse	▪ Ausreichend Anschlussleistung für Elektrolyseurmodule muss verfügbar / einfach herstellbar sein (Mittelspannungsebene) ▪ Schaffung eines Trinkwasseranschlusses muss möglich sein ▪ idealerweise Nutzung von Vor-Ort-Möglichkeiten zur regenerativen Stromerzeugung zur zumindest teilweisen Reduktion von Netzentgelten und Stromnebenkosten
Off-Site-Elektrolyse	▪ Erneuerbare-Energien-Anlagen einer ausreichend großen installierten Leistung, um eine hohe Elektrolyseauslastung und damit kleine Elektrolyseurgrößen zu erreichen (Volllaststunden) ▪ möglichst kurze Entfernung zum Tankstellenstandort ▪ Lieferkette muss organisiert und abgesichert sein ▪ Schaffung eines Trinkwasseranschlusses muss möglich sein
sonstige Kriterien	▪ repräsentative, öffentlichkeitswirksame Lage / attraktives Umfeld ▪ Ort mit (potentiell) H₂-Bedarf für Mobilität ▪ klare Eigentumsverhältnisse / gute Verfügbarkeit des Geländes

3.2.2 Wasserstofftankstellen für den Eisenbahnbetrieb mit On- und Off-Site-Elektrolyse mit Verknüpfungsmöglichkeiten zum Individualverkehr

Wie bereits in Abschnitt 2.1.5 erwähnt wurde, gibt es bisher keine speziell auf H₂BZ-Schienenfahrzeuge zugeschnittene Wasserstofftankstellenkonzepte als Serienprodukt. Die Wasserstoffherstellung erfolgt zudem derzeit in Deutschland nahezu ausschließlich aus Kohlenwasserstoffen bzw. im Rahmen der Chlor-Alkali-Elektrolyse in Raffinerien und der chemischen Industrie. Hierbei kann der erzeugte Wasserstoff wie folgt kategorisiert werden (NOW, 2016):

- Wasserstoff als Nebenprodukt, der im Wesentlichen im Rahmen der Chlor-Alkali-Elektrolyse anfällt und zum Großteil vor Ort in nachfolgenden Prozessen stofflich oder energetisch genutzt wird.
- Handelswasserstoff, der in der Regel mittels Erdgas-Dampfreformierung oftmals beim Kunden vor Ort erzeugt wird. Ein weiterer Teil wird in Wasserstoff-Druckflaschen per Trailer an Kunden ausgeliefert. Geringere Anteile werden über Rohrleitungen oder als Flüssigwasserstoff zum Kunden gebracht.
- Industrie- bzw. Chemiewasserstoff, der unmittelbar am Standort von Raffinerien, Industrie- bzw. Chemieanlagen erzeugt und genutzt wird. Die Verteilung erfolgt dabei über Rohrleitungen.

Die täglich erzeugte Wasserstoffmenge in Deutschland liegt bei ca. 41 Mio. Nm³/d, wovon der Industrie- bzw. Chemiewasserstoff mit 74 % den weitaus größten Anteil darstellt (NOW, 2016). Die Wasserelektrolyse spielt mit unter 1% der Gesamterzeugungsmenge hingegen eine untergeordnete Rolle (NOW, 2016). Dies bedeutet, dass für die in Abschnitt 1.2 genannte **Zielstellung einer klimaneutralen H₂-Versorgung** eines H₂BZ-Triebwagen-Pilotprojektes in Thüringen im Einklang mit dem ThürKlimaG voraussichtlich kein Wasserstoff marktverfügbar sein wird. Daher ist es zur Bewertung der Machbarkeit eines solchen Projektes erforderlich, auch die **Wasserstoffbereitstellung** über On-Site-Elektrolyse auf dem Tankstellengelände sowie Off-Site-Elektrolyse an Erneuerbaren-Energien-Anlagen zu untersuchen und geeignete Tankstellen- und Logistikkonzepte hierfür zu entwickeln (siehe auch Abschnitte 2.1.4, 3.2.1). Um den Zielstellungen zu genügen, ist zudem eine multimodale Nutzung der Wasserstoffinfrastruktur für Bahn- und Straßenfahrzeuge zu untersuchen.

Abbildungen 3-7 und 3-8 stellen unter Berücksichtigung der in Abschnitt 3.2.1 genannten grundlegenden Kriterien für geeignete Wasserstofftankstellenstandorte idealisierte Pläne von Wasserstofftankstellen für den Eisenbahnbetrieb als Komplett-Tankstelle mit On-Site-Elektrolyse bzw. Liefer-Tankstelle mit Off-Site-Elektrolyse jeweils mit Verknüpfungsmöglichkeiten zum Individualverkehr dar. Die Tankstellenpläne wurden hierbei aus den in den Abschnitten 2.1.5 und 2.1.6 dargestellten Analysen zum Stand der H₂-Bedankungstechnik heraus entwickelt. Sowohl für die Umsetzung von Komponenten und Systemen einer Wasserstofftankstelle als auch den Bau von H₂-Transportsystemen und die Errichtung von Wasserelektrolysesystemen sind hierbei **bei Thüringer Firmen Kompetenzen vorhanden**.

Aus den Abbildungen 3-7 und 3-8 wird ersichtlich, dass eine klare Trennung zwischen Eisenbahn- und Straßenverkehr notwendig ist. Die Betankung von H₂BZ-Triebwagen erfolgt, entsprechend den technischen Vorgaben des einzigen marktverfügbaren Fahrzeugs, dem Coradia iLint von Alstom, über zwei H₂-Dispenser, mit denen die zwei Tankstränge des Fahrzeuges bei einem Druck von 350 bar befüllt werden. Auf der Straßenverkehrsseite muss der Wasserstoff für Pkw zusätzlich mit einem Druck von 700 bar bereitgestellt werden, wodurch eine leistungsfähigere Verdichtungstechnologie als für den Eisenbahnbetrieb erforderlich wird.

LEGENDE

- Alle Contingent- oder 20-Fuß-Storchenaufbauten (L x B = 6,0 x 2,5 m)
- Alle Entfernungsangaben in Meter [m], bei einer Rundungstoleranz von ± 5 cm
- a) Vorzeichen-Abstand
- b) Größe, hier als Maßstabwert
- c) unter Contingentzone
- d) zwei LKW-Anhänger gleichzeitig vor O1 und O2 Einpark
- e) W-K-Belegung bzw. Sicherheitsbereich
- f) Verkehrs- oder Contingent-Struktur
- g) Spaltbreite

Station Components and Layout:

- Central Building:** CO₂-Behälter (300 bar), CO₂-Behälter (500 bar), Verdichter, Service-Fahrzeug, Feuerhemmende Wand, Sattelkupplung, Standfüße, H₂-Systemanschluss, Füllstutzen 300 bar, Füllstutzen 500 bar, W-K-Schutz, W-K-Schutz.
- Delivery Options:** CO₂-Anlieferung: Optionen 1 und 2, CO₂-Anlieferung: Option 1, CO₂-Anlieferung: Option 2.
- Other Vehicles:** H₂-Bus, H₂-Pkw, W-K-Bus, W-K-Bus.
- Safety and Infrastructure:** Sicherheitszone, Bahngleis ohne Strom-Überleitung, Bahngleis-Ende, Bahnbetriebsgebäude, Sicherheitsschleuse, Strasse, W-K-Bus nach Strassenverkehrsregelung (max. 11,5 m), W-K-Bus nach Strassenverkehrsregelung (max. 11,5 m).

39

Wasserstofftankstellen für H₂BZ-Triebwagen sollten, wie in Abbildungen 3-7 und 3-8 dargestellt, grundsätzlich mit einem Hochdruckspeicher (500 bar) ausgestattet sein, um durch Überströmen die Betankungszeiten zu minimieren. Zudem muss entsprechend der zu versorgenden Eisenbahnlinie eine ausreichende Menge Wasserstoff inklusive einer Reserve zur Aufrechterhaltung des Eisenbahnbetriebes über mehrere Tage vorgehalten werden, um Ausfallzeiten oder Lieferengpässe kompensieren zu können. Diese Menge sollte bei einem Druck von 300 bar gelagert werden, da sich dies aufgrund der etablierten Technik für diese Druckstufe als kostengünstiger erweist als für höhere Druckstufen. Entsprechend der Grundkonfiguration der Komplett-Tankstelle mit On-Site-Elektrolyse gemäß Abbildung 3-7 ist zudem der Platz für die Wasserelektrolyse inklusive Peripherie zu berücksichtigen, wobei deren elektrische Leistung und Baugröße von der benötigten Wasserstoffmenge abhängig ist. Für die Liefer-Tankstelle mit Off-Site-Elektrolyse ist hingegen, wie in Abbildung 3-8 zu sehen ist, an der Tankstelle kein Raum für die Elektrolyse vorzusehen, was in einem entsprechend geringeren Platzbedarf resultiert.

Die 300 bar Wasserstoffspeicher einer Liefer-Tankstelle mit Off-Site-Elektrolyse sollten als **Trailer** (Sattelaufleger) ausgeführt werden, die eine Doppelfunktion für Transport und Vor-Ort-Speicherung erfüllen, da dies den logistischen Aufwand der sonst notwendigen Befüllung und Entleerung von Transportbehältern bei fest installierten Wasserstoffspeichern minimiert und zudem die hierfür notwendige zusätzliche Verdichtungsenergie einspart (siehe auch Abschnitt 3.2.3). Für eine vereinfachte Betriebsführung mit möglichst geringem Rangier- und Kopplungsaufwand ist bei dieser Variante an der Tankstelle grundsätzlich ein freier Stellplatz erforderlich, da immer ein Austausch eines leeren gegen einen vollen Trailer stattfindet. Alternativ zu einer Ausführung mit Trailern ist auch ein Transportsystem mit Wechselbrücken denkbar, was jedoch das Unfallrisiko durch die notwendigen Kupplungsprozesse erhöht.

Die einzelnen Komponenten (500 bar Hochdruckspeicher, 300 bar Speicher der On-Site-Elektrolyse, Verdichter, Elektrolyseur) sind in der vorgeschlagenen Tankstellenkonfiguration jeweils in 20 Fuß ISO-Containern untergebracht, da dies eine hohe Flexibilität bei Vorfertigung, Austausch und Transport zum Einsatzort bedeutet. Darüber hinaus sind entsprechende Verkehrsflächen für die Rangier- und Wendevorgänge im Rahmen der Anlieferung des Wasserstoffs sowie die von den Regelwerken vorgegebenen Sicherheits- und Mindestabstände vorzusehen. Demzufolge ist eine Mindestgröße von ca. 3.000 m² für die Tankstelle zu berücksichtigen (siehe auch Tabelle 3-4).

Für eine angemessene Darstellung des Pilotprojektes in der Öffentlichkeit sollte auch die Gestaltung der Tankstelleninfrastruktur eine ausreichende Beachtung erfahren. Abbildung 3-9 zeigt dementsprechend beispielhaft Visualisierungen für die mögliche Ausführung einer Wasserstofftankstelle für den Eisenbahnbetrieb mit Verknüpfungsmöglichkeiten zum Individualverkehr.



Abb. 3-9 – Visualisierung einer Wasserstofftankstelle für den Eisenbahnbetrieb mit Verknüpfungsmöglichkeiten zum Individualverkehr.

3.2.3 Umsetzung einer Wasserstofflogistik für Off-Site-Elektrolyselösungen

Wie bereits im vorherigen Abschnitt angeführt, muss die Versorgung einer Liefer-Tankstelle mit Wasserstoff aus der Off-Site-Elektrolyse an Erneuerbaren-Energie-Anlagen über eine Logistikkette sichergestellt werden. Dabei stellt sich für ein Pilotprojekt in Thüringen der **Straßentransport von verdichtetem, gasförmigem Wasserstoff (CGH₂) per Lkw** als am wirtschaftlichsten dar, da mit eher kurzen Transportwegen von unter 100 km zu rechnen ist (BMBF, 2018; Dieterle, 2009).

Die Trailer, welche entsprechend Abbildung 3-8 gleichzeitig als Wasserstoffspeicher an der Liefer-Tankstelle dienen, können gemäß dem spezifischen Wasserstoffbedarf der zu versorgenden Eisenbahnlinie konfiguriert werden. Dabei können nach Tabelle 3-5 unterschiedliche Speicherbehälter zur Anwendung kommen. Die erforderliche Anzahl der Trailer zur Sicherstellung der Versorgung richtet sich hierbei neben Speicherdruck und Wasserstoffbedarf für die H₂BZ-Triebwagen auch nach der erforderlichen Wasserstoffreserve an der Tankstelle und dem Ressourcendargebot aus erneuerbaren Energien für die Off-Site Elektrolyse, da zum Beispiel saisonale Schwankungen im Ressourcendargebot durch entsprechende Speicher ausgeglichen werden müssen.

Wird ein Trailer mit standardisierten Flaschenbündeln, also mit Behältern des Typs 1 nach Tabelle 3-5, bestückt, die einen Transport- und Speicherdruck von 300 bar gewährleisten, ist, wie Anhang C entnommen werden kann, die Kapazität aufgrund des sehr hohen Leergewichts der Stahlflaschenbündel auf ca. 15 bis maximal 18 Stahlflaschenbündel mit insgesamt ca. 225 bis 270 kg Wasserstoff pro Trailer limitiert, um das maximal zulässige Gesamtgewicht eines Sattelzuges von 40 t nicht zu überschreiten. Bei einer Konfiguration mit Typ 4 Behältern aus Verbundwerkstoffen ist pro Trailer eine H₂-Kapazität

von über 1.000 kg möglich. Den entscheidenden Faktor für die Machbarkeitsstudie stellen jedoch die Investitionskosten für die unterschiedlichen Konfigurationen dar. Für einen Trailer mit einer Bestückung durch Typ 1 – Behälter kann auf Grundlage von Aussagen von in der Branche tätigen Thüringer Unternehmen mit Investitionskosten von etwa 135.000 € netto gerechnet werden. Demgegenüber stehen laut Aussagen aus der Industrie in Abhängigkeit der Länge des Trailers Kosten von ca. 650.000 bis 1.200.000 € netto für einen Trailer mit Typ 4 – Behältern und einem Speicherdruck von 500 bar.

Tabelle 3-5 – Behältertypen für Speicherung und Transport von verdichtetem, gasförmigem Wasserstoff (CGH₂) (Datenquellen: Jahn, 2013; Thon, 2016).

Behälterklasse	Werkstoffe	Speicherdruck	Volumen – Gewichts – Verhältnis
Typ 1	Stahlbehälter	200 – 300 bar	1
Typ 2	Innenliner aus Metall mit teilweisem Netz aus Kohlenstofffasern	300 bar	1,3
Typ 3	Innenliner aus Metall mit vollständigem Netz aus Kohlenstofffasern	500 – 700 bar	2
Typ 4	Innenliner aus Kunststoff mit Netz aus Kohlenstofffasern	500 – 700 bar	4

Die Notwendigkeit einer Vorhaltung von mehreren Trailern als Speicher an der Tankstelle sowie an der Off-Site-Elektrolyseanlage verlangt nach einer möglichst kostengünstigen Lösung. Zudem erlauben die in Thüringen vorliegenden kurzen Transportwege und die für ein Pilotprojekt eher geringen Wasserstoffbedarfe den Transport bei einer Druckstufe von 300 bar, so dass für ein Pilotprojekt in Thüringen eine **Sattelzuglösung auf Basis von Typ 1 – Behältern mit einem Speicherdruck von 300 bar** vorzusehen ist (siehe auch Abschnitt 4). Zudem ließe sich die **Herstellung** solcher Trailer mit vorhandenen Produkten und Kompetenzen Thüringer Firmen technisch in Thüringen umsetzen. In Abbildung 3-10 ist ein Lkw mit einem mit 18 Flaschenbündeln bestückten Wasserstoff-Trailer exemplarisch abgebildet.

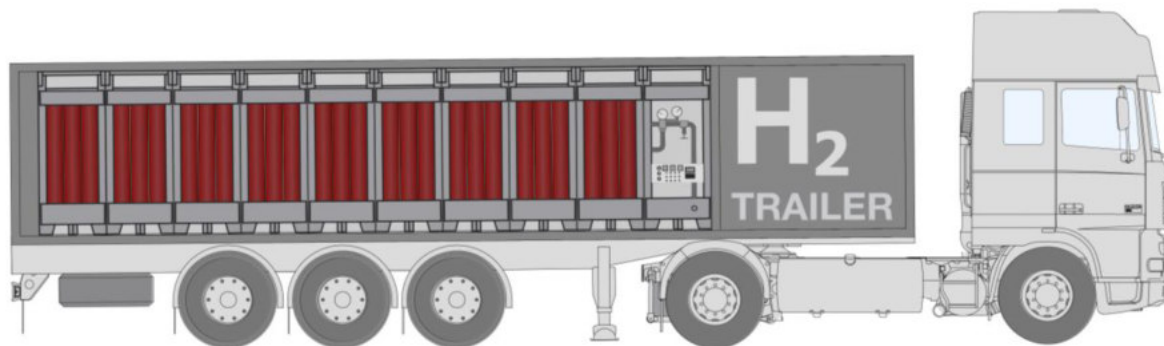


Abbildung 3-10 – Prinzipzeichnung Lkw mit Trailer für Transport und Speicherung von Wasserstoff in standardisierten Flaschenbündeln.

Um die gesamte Wasserstoffversorgungskette klimaneutral zu gestalten, besteht die Notwendigkeit, auch die **Zugmaschine für den Transport des Wasserstoffs** vom Elektrolyseur zur Tankstelle auf Grundlage alternativer, nicht-fossiler Antriebssysteme zu realisieren. Der Einsatz einer Zugmaschine auf Brennstoffzellenbasis ist hierbei die attraktivste Variante, da die Treibstoffversorgung über die gleiche Logistikkette wie für die Tankstelle abgesichert werden kann. An der TU Ilmenau wurden in diesem Zusammenhang im Rahmen einer Machbarkeitsstudie Möglichkeiten untersucht, ein Fahrzeug mit

Brennstoffzellenantrieb für die Wasserstofflogistik bereitzustellen (Augsburg et. al, 2018). Im Ergebnis wurde festgestellt, dass die Verfügbarkeit eines Fahrzeuges des Herstellers Hyundai für Europa in näherer Zukunft am wahrscheinlichsten erscheint, da in der Schweiz bereits entsprechende Planungen laufen (Schmidt, 2018). Daher sollte bei einer Umsetzung des Pilotprojektes ein weiterer Austausch mit Hyundai bezüglich der potentiellen Verfügbarkeit angestrengt werden. Dabei ist jedoch festzuhalten, dass dieses Fahrzeug ähnlich wie der von der Schweizer Firma Esoro umgebaute, 2016 vorgestellte Brennstoffzellen-Lkw (Schmidt, 2016) als Lkw mit Kofferaufbau geplant ist und nicht als Sattelzugmaschine. Brennstoffzellen-Sattelzugmaschinen für den europäischen Markt sind derzeit bei der Nikola Corporation in der Planung und Entwicklung und sollen gemäß entsprechenden Pressemeldungen ab 2022/23 produziert werden (Conrad, 2018). Für ein H₂BZ-Triebwagen-Pilotprojekt in Thüringen ist daher davon auszugehen, dass geeignete Brennstoffzellen-Lkw bis Mitte der 2020er Jahre marktverfügbar sein werden.

Grundsätzlich ist beim Transport von Wasserstoff zu beachten, dass aufgrund der allgemeinen Kennzeichnung als Gefahrgut nach ADR 2017 (siehe auch Abschnitt 2.2.4) ausschließlich **Tunnel** der Kategorie A (ohne Einschränkung) im Rahmen des Transportes genutzt werden dürfen. Dadurch stellt sich die Wasserstoffbereitstellung für Eisenbahnstrecken im Südthüringer Raum unter Umständen als sehr aufwändig dar, da die Tunnel auf der A71 nicht dieser Kategorie entsprechen. Der dadurch in der Folge ggf. erforderliche Transport von Wasserstoff über den Thüringer Wald könnte insbesondere in den Wintermonaten zu Unterbrechungen in der Lieferkette führen.

3.2.4 Fazit für die Planung von Wasserstofftankstellen für ein Pilotprojekt

Die in Abschnitt 3.2.1 genannten Kriterien für die Auswahl eines geeigneten Tankstellenstandortes sind im Rahmen eines Pilotprojektes für den Einsatz von H₂BZ-Triebwagen in Thüringen zu berücksichtigen. Hierbei ist insbesondere auch auf eine repräsentative, öffentlichkeitswirksame Lage der Tankstelle zu achten, um den Zielen eines Pilotprojektes zur **Information der Öffentlichkeit über die neue Technologie** gerecht zu werden. Dies sollte, wie in Abschnitt 3.2.2 gezeigt wird, auch in der gestalterischen Umsetzung der zu planenden Wasserstofftankstelle deutlich werden. Eine **multimodale Nutzung für Bahn- und Straßenfahrzeuge ist anzustreben**.

Sofern die Wasserstoffanlieferung aus der Off-Site-Elektrolyse erforderlich wird, ist eine LogistikkLösung auf Basis von **Trailern mit 300 bar Stahlflaschenbündeln**, gezogen von einer **H₂BZ-Zugmaschine** die favorisierte Lösung, um eine komplett klimaneutrale Logistikkette zu gewährleisten. Hierbei ist jedoch darauf zu achten, dass **keine Fahrstrecken mit Tunneln ohne Zulassung für Gefahrgüter** gewählt werden können. Dies dient unter Umständen als Ausschlusskriterium für bestimmte Kombinationen von Eisenbahnlinien und Erneuerbaren-Energien-Anlagen für die Off-Site-Elektrolyse.

3.3 Grundlegende Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen

3.3.1 Ermittlung von H₂-Zielpreisen für den Eisenbahnbetrieb

Auf lange Sicht muss das Ziel des Einsatzes von H₂BZ-Triebwagen sein, Dieseltriebwagen auf nicht elektrifizierten Eisenbahnstrecken zu ersetzen. Unter Annahme vergleichbarer Wartungskosten für Diesel- und H₂BZ-Triebwagen sollte der Wasserstoffpreis daher nicht höher als der Dieselpreis für Eisenbahnanwendungen sein, um eine wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit zu gewährleisten.

Abbildung 3-11 zeigt die Entwicklung der Nettopreise für Dieselkraftstoff für Lokomotiven und Triebwagen im Jahresdurchschnitt von 2008 bis November 2018 entsprechend der Notierung des Oil Market Report (O.M.R.) für den Bereich Süd-Osten nach DIN EN 590 (inklusive 5,6 ct/l BP DB Energie). Die Region Süd-Osten entspricht hierbei dem Markttort Leuna (O.M.R., 2018) und deckt auch Thüringen mit ab. Wie aus Abbildung 3-11 ersichtlich wird, ist der Dieselpreis in der letzten Dekade Veränderungen in einem Preiskorridor von nahezu 35 ct/l unterlegen gewesen, was die Planbarkeit eines H₂-Zielpreises erschwert.

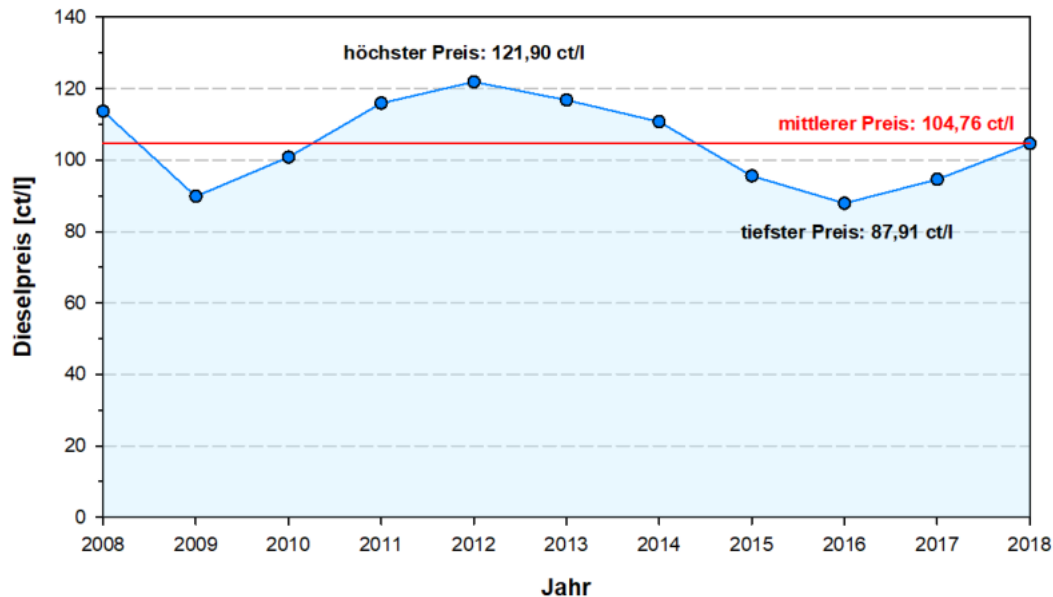


Abbildung 3-11 – Preisentwicklung der Nettopreise für Dieselkraftstoff für Eisenbahnanwendungen im O.M.R.-Bereich Südost von 2008 bis 2018 (2018 nur bis November inklusive) (Datenquellen: O.M.R., DB Energie).

Im Mittel betrug der Nettopreis für Eisenbahndiesel im O.M.R.-Bereich Süd-Osten zwischen 2008 und 2018 entsprechend Abbildung 3-11 rund 105 ct/l. Dieser Preis ist zugleich der Vergleichswert für den H₂-Zielpreis für ein H₂BZ-Triebwagen-Pilotprojekt in Thüringen, wobei jedoch zu bedenken ist, dass dieser Preis einer gewissen Schwankungsbreite unterworfen ist. Der H₂-Zielpreis errechnet sich hierbei aus dem Dieselpreis nach Formel 3-1.

$$Pr_{H_2} \left[\frac{\text{€}}{\text{kg}} \right] = \frac{Verbr_{DiTr} \left[\frac{\text{l}}{\text{km}} \right] \cdot Pr_{Di} \left[\frac{\text{€}}{\text{l}} \right]}{Verbr_{H_2BZ} \left[\frac{\text{kg}}{\text{km}} \right]} \quad [\text{Formel 3-1}]$$

Mit:

$$Pr_{H_2} \left[\frac{\text{€}}{\text{kg}} \right] = \text{H}_2\text{-Zielpreis}$$

$$Verbr_{DiTr} \left[\frac{\text{l}}{\text{km}} \right] = \text{mittlerer Dieselvebrauch Dieseltriebwagen}$$

$$Pr_{Di} \left[\frac{\text{€}}{\text{l}} \right] = \text{Dieselpreis}$$

$$Verbr_{H_2BZ} \left[\frac{\text{kg}}{\text{km}} \right] = \text{mittlerer Wasserstoffverbrauch H}_2\text{BZ-Triebwagen}$$

Der Wasserstoffverbrauch für den H₂BZ-Triebwagen Alstom Coradia iLint wird bei einer Reichweite von bis zu 1.000 km und dem gegebenen Tankvolumen (Alstom, 2018; Bünger et al., 2018; NOW, 2016) mit 0,18 – 0,25 kg/km angenommen, während der Verbrauch für einen von der Größe und Gewicht her

vergleichbaren Dieseltriebwagen mit 1,0 – 1,8 l/km angenommen wird. Mit dem oben genannten durchschnittlichen Dieselpreis von 1,05 €/l netto sowie den Durchschnittswerten von 0,22 kg/km und 1,4 l/km ergibt sich hieraus ein **H₂-Zielpreis von 6,70 €/kg netto**, den es von den H₂-Gestehungskosten her einzuhalten gilt. Hieraus ergeben sich paritätische Energiekosten von 1,47 €/km Zug. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass entsprechend den Dieselpreisen der vergangenen 10 Jahre H₂-Vergleichspreise zwischen 5,60 €/kg und 7,75 €/kg netto denkbar sind.

3.3.2 Investitions- und Betriebskosten für ein Pilotprojekt mit H₂BZ-Triebwagen

Da es sich bei dem avisierten Pilotprojekt um die Umsetzung einer neuen Technologie handelt, sind die **Investitionskosten** nur schwer abzuschätzen, da keine verlässlichen Richtwerte zu Marktpreisen verfügbar sind. Tabelle 3-6 gibt einen Überblick über die grundlegenden Investitionskosten für ein Pilotprojekt mit H₂BZ-Triebwagen. Hierbei ist anzumerken, dass es sich bei den genannten Preisen um Abschätzungen auf Basis von Gesprächen mit Unternehmen und Branchenvertretern handelt und dass diese Preise aufgrund von zum Teil noch fehlenden marktverfügbaren Produkten wie z.B. H₂BZ-Zugmaschinen für den Straßentransport der Speichertrailer oder aber den noch geringen Erfahrungen im dauerhaften Betrieb mit hohen Unsicherheiten verbunden sind.

Eine genaue Abschätzung der **Wartungs- und Betriebskosten** stellt sich ebenfalls als schwierig dar, da auch hier Erfahrungswerte fehlen. Im Rahmen der Machbarkeitsstudie wurde daher angenommen, dass sich die Betriebs- und Wartungskosten für H₂BZ-Triebwagen weitgehend analog zu vergleichbaren Dieseltriebwagen gestalten. Neben den in Tabelle 3-6 aufgeführten Kosten für die Umrüstung einer bestehenden Werkstatt für Bahnfahrzeuge sind jedoch zusätzlich Kosten für Schulungs- und Ausbildungsmaßnahmen für das Wartungspersonal zu veranschlagen. Für die in Tabelle 3-6 genannten Elektrolyse- und Tankstellenkomponenten sowie die Speichertrailer wurden jährliche Wartungskosten von 1 % der jeweiligen Gesamtinvestition angenommen, wobei dieser Wert jedoch als optimistisch einzustufen ist. Für die unter Umständen bis zur Verfügbarkeit von emissionsfreien Transportfahrzeugen notwendige Diesel-Zugmaschine wurden 2 % und die H₂BZ-Zugmaschine 5 % der Gesamtinvestition als jährliche Wartungskosten angenommen. Die Kosten für Betriebsmittel wie Strom wurden analog zu marktüblichen Preisen angenommen (siehe auch Abschnitt 4.1.4 und Anhang E).

Tabelle 3-6 – Annahmen im Rahmen der Machbarkeitsstudie für die grundlegenden Netto-Investitionskosten eines H₂BZ-Triebwagen-Pilotprojekts in Thüringen (Datenquellen: Unternehmen und Branchenvertreter).

Bereich	Investition	Kosten [€]	Bezugsebene
a) Fahrzeug	H ₂ BZ-Triebwagen	5.000.000	Stück
	Umrüstung Werkstatt	450.000	pauschal
b) Off-Site-Elektrolyse	Elektrolyse (100 bar) mit Peripherie	3.000	kW installierte Leistung
	Verdichtung (auf Speicherdruck 300 bar)	500.000	pauschal
c) Transportlogistik	Speichertrailer mit 300 bar Stahlflaschen	135.000	Stück
	H ₂ BZ-Zugmaschine	385.000	Stück
	Diesel-Zugmaschine (Alternativlösung)	110.000	Stück
d) H₂-Tankstelle	Tankstelleninfrastruktur	1.000.000	pauschal pro Tankstelle
	Verdichtung (Hochdruckspeicher, Betankung)	600.000	pauschal

3.4 Grundlegende Dimensionierung von mit erneuerbaren Energien versorgten Wasserstofftankstellen für den Eisenbahnbetrieb

3.4.1 Ermittlung der erforderlichen Wasserstoffspeicher- und Elektrolyseurgröße

Entsprechend dem in Abschnitt 3.3.1 genannten mittleren Wasserstoffverbrauch eines H₂BZ-Triebwagens von 0,22 kg/km sowie typischen täglichen Laufleistungen auf nicht elektrifizierten Thüringer Eisenbahnstrecken wird im Folgenden der Berechnungsablauf zur Dimensionierung der erforderlichen Komponenten für die Wasserstoffherstellung und -speicherung dargestellt. In Abbildung 3-12 wird neben einer grundsätzlichen schematischen Dimensionierung eine **Beispielrechnung für eine Bahnlinie mit zwei Umläufen und einer Fahrleistung von insgesamt 1.000 km/d** aufgezeigt. Mit einer solchen Fahrleistung erzeugen Dieseltriebwagen in vergleichbarer Größe zum Alstom Coradia iLint bei einem durchschnittlichen Dieserverbrauch von 1,4 l/km (siehe Abschnitt 3.3.1) und einem CO₂-Ausstoß von 2,65 kg/l (DHZ, 2018) CO₂-Emissionen von 3,71 t/d. Somit lassen sich allein durch den Ersatz der Dieseltriebwagen mit H₂BZ-Triebwagen mit der Beispielbahnlinie **pro Jahr über 1.350 t CO₂ einsparen**, sofern denn, wie im Folgenden angenommen, der Wasserstoff über Wasserelektrolyse mit Strom aus erneuerbaren Energiequellen bereitgestellt wird. Dabei ist jedoch festzuhalten, dass die in Abbildung 3-12 gezeigte beispielhafte Ermittlung der Elektrolyseurleistung lediglich für die **bilanziell erneuerbare Wasserstoffherzeugung** beispielsweise über einen Grünstromtarif anwendbar ist. Für eine vollständig erneuerbare Wasserstoffherzeugung, d.h. Sicherstellung des notwendigen Wasserstoffbedarfes auch bei nicht verfügbarer erneuerbarer Elektrizität über zuvor gespeicherte Wasserstoffmengen, muss die notwendige Speicher- und Elektrolyseurgröße, wie in Abschnitt 3.4.6 dargestellt wird, über einen iterativen softwaregestützten Berechnungsansatz bestimmt werden. Die dafür notwendigen Eingangsparameter sind dabei vor allem durch die zugrunde gelegten Erneuerbaren-Energien-Anlagen definiert. Für die bilanziell erneuerbare Wasserstoffherzeugung bleibt das tatsächliche Dargebot der erneuerbaren Energiequellen für den Elektrolyseurbetrieb hingegen unberücksichtigt.

Gemäß Abbildung 3-12 wird bei der Dimensionierung zuerst das Lagervolumen für Wasserstoff an der Tankstelle und damit auch die Speicherkonfiguration bestimmt. Dies erfolgt ausgehend von der Beispielbahnlinie mit einer Fahrleistung von 1.000 km pro Tag, die sich auf 2 Wasserstoff-Brennstoffzellenzüge verteilt, welche einen spezifischen H₂-Verbrauch von durchschnittlich 0,22 kg/km aufweisen (siehe Abschnitt 3.3.1). Damit ergibt sich für den Betrieb ein täglicher Wasserstoffbedarf von 220 kg. Aus betrieblichen Gründen wird eine Reserve von 5 Tagen vorgesehen, was zu einer insgesamt zu lagernden Menge von 1.100 kg Wasserstoff führt. Diese Wasserstoffmenge nimmt unter Normbedingungen (273,15 K; 101,3 kPa) ein Volumen von ca. 12.200 Nm³ ein, was bei einem H₂-Speicherdruck von 300 bar bei 15°C Umgebungstemperatur einem Lagervolumen von 43,6 m³ entspricht. Auf Grundlage dieses Lagervolumens können in der Folge Speichermodule konfiguriert werden. Dabei sollte, wie in Abschnitt 3.2.2 dargestellt wurde, neben 300 bar Speichermodulen auch ein Hochdruckspeicher in der Druckstufe 500 bar vorgesehen werden, aus dem ein schnelles Betanken durch Überströmen in den 350 bar Tank des Brennstoffzellenzuges möglich ist. In Abhängigkeit davon, ob der Wasserstoff über eine Off-Site-Elektrolyse erzeugt wird, sollten die 300 bar Speichermodule zudem so gestaltet sein, dass Sie bezüglich Ihres Fassungsvermögens in einem sinnvollen Belieferungszyklus getauscht werden können. Wie aus Abschnitt 3.2.3 im Zusammenhang mit Anhang C deutlich wird, ist bei einer Konfiguration mit z.B. 16 Stahlflaschenbündeln von einer Speichermenge pro Speichermodul von 240 kg bei 300 bar Speicherdruck und 15°C auszugehen. Im Zusammenwirken mit dem 500 bar Hochdruckspeicher sind daher 4 Speichermodule zu 300 bar als ausreichend für die Sicherstellung einer Reserve von 5 Tagen einzustufen.

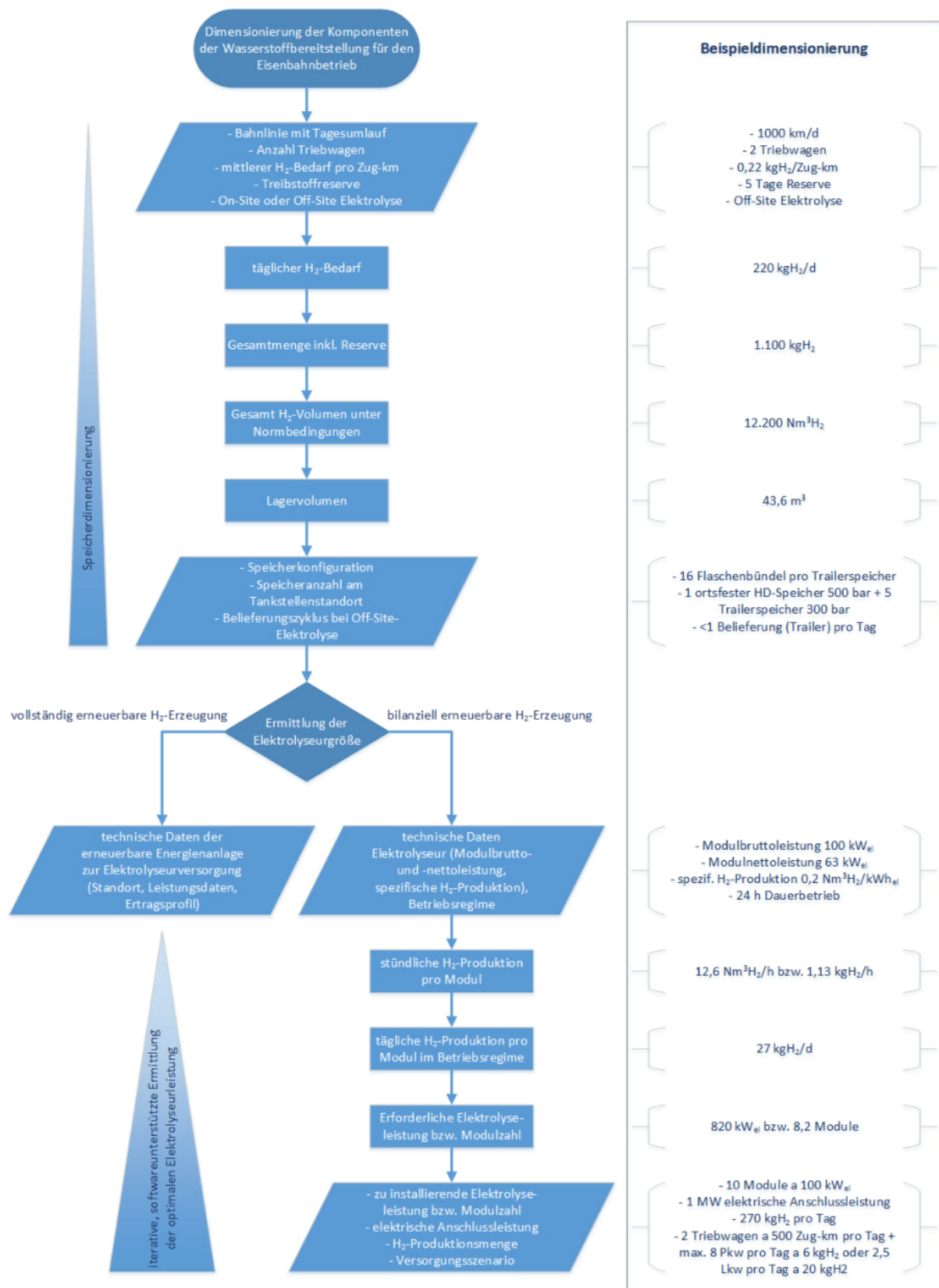


Abb. 3-12 – Berechnungsablauf für die Dimensionierung der erforderlichen Komponenten zur H₂-Versorgung von H₂BZ-Triebwagen inklusive Beispielrechnung für die Speicher- und Elektrolyseurauslegung für die bilanziell erneuerbare H₂-Erzeugung für eine Bahnlinie mit 1.000 km Fahrleistung pro Tag.

Auf Basis des täglichen Wasserstoffbedarfs kann die Elektrolyseurgröße ermittelt werden. Die dafür notwendigen Eingabeparameter sind das angestrebte Betriebsregime sowie die technischen Daten der Elektrolyseurmodule, die hier als Module mit einer Bruttoleistung von 100 kW mit einem Betriebsdruck von 100 bar angenommen werden. Um die elektrische Gesamtleistung so gering wie möglich zu halten, ist im Rahmen der bilanziell erneuerbaren H₂-Erzeugung über einen Grünstromtarif ein 24 h-Dauerbetrieb anzustreben. Anhand der elektrischen Modulnettoleistung, die hier mit 63 kW_{el} angenommen wird, und der spezifischen Wasserstoffproduktion von 0,2 Nm³/kWh_{el} kann die im 24 h Dauerbetrieb erzeugbare Wasserstoffmenge pro Elektrolyseurmodul berechnet werden. Aus der hieraus resultierenden täglichen Wasserstoffproduktion pro Elektrolyseurmodul von 27 kg/d und dem täglichen Wasserstoffbedarf der H₂BZ-Triebwagen von 220 kg/d errechnet sich dann die notwendige Modulzahl von ca. 8,2 Modulen. Anhand der elektrischen Modulbruttoleistung von 100 kW_{el} ergibt sich hieraus die erforderliche elektrische Elektrolyseleistung zu 820 kW_{el}. Da über die H₂BZ-Triebwagen hinaus auch Straßenfahrzeuge betankt werden sollen und auch Wartungs- und Ausfallzeiten zu berücksichtigen sind, ist eine Modulzahl von 10 und damit eine Gesamtelektrolyseurleistung von 1.000 kW_{el} anzusetzen, über die eine maximale Tagesmenge von 270 kg Wasserstoff erzeugt werden kann. Auf Grundlage der Verdichterleistung und Elektrolyseurgröße kann schließlich in einem letzten Schritt die notwendige Elektrizitätsversorgung für die bilanziell erneuerbare H₂-Erzeugung dimensioniert werden.

Die Versorgung eines On-Site-Elektrolyseurs mit bilanziell erneuerbarer Elektrizität über einen Grünstromtarif stellt die prinzipiell einfachste Versorgungsvariante dar. Da jedoch keine Verknüpfung mit konkreten neuen oder bestehenden Anlagen zur Stromerzeugung stattfindet, ist die Wirkung als Demonstrator insgesamt geringer einzustufen als bei vergleichbaren Lösungen, die Erneuerbare-Energien-Anlagen beinhalten. Weiterhin ist bei einer Grünstromtariflösung von einem Strompreis von ca. 0,125 bis 0,25 €/kWh auszugehen. Hieraus resultieren allein für den Betrieb des Elektrolyseurs Kosten von ca. 11 bis 22 €/kg Wasserstoff, so dass der H₂-Zielpreis bereits um ein Vielfaches überschritten wird, ohne dass Abschreibungen etc. berücksichtigt worden wären. Ohne Änderungen in der Strompreisstruktur für Power-to-Gas-Anlagen (Netzentgelte, Steuern, Abgaben und Umlagen) sind bei Netzstrombezug wirtschaftliche H₂-Gestehungspreise nicht zu erreichen. Solche Änderungen sind jedoch in naher Zukunft nicht zu erwarten. Daher ist ein **Grünstromtarif für ein Pilotprojekt mit H₂BZ-Triebwagen in Thüringen nur bedingt zu empfehlen**.

Für die Eigenerzeugung erneuerbarer Elektrizität zum bilanziellen Ausgleich des für die Wasserstoffherstellung über Wasserelektrolyse benötigten Stroms bieten sich, wie in Abschnitt 2.1.4 bereits dargestellt wurde, für eine On-Site-Elektrolyse grundsätzlich Photovoltaikanlagen an. Für eine Off-Site-Elektrolyse-Lösung kommen hingegen in Thüringen insbesondere Windkraftanlagen in Betracht. Im Folgenden werden diese beiden Möglichkeiten für die Beispielbahnlinie näher untersucht.

3.4.2 Bilanzielle Betrachtung der Wasserstoffbereitstellung über Photovoltaikanlagen

Die für einen bilanziellen Ausgleich notwendige Photovoltaikanlagengröße richtet sich nach der erforderlichen Elektrizitätsmenge für die Elektrolyseanlage zur Versorgung der Beispielbahnlinie mit Wasserstoff. Unter der Annahme eines Nutzungsgrades N des Elektrolyseurs von 0,9, was einer Jahresbetriebsstundenzahl von 7.884 h entspricht, sind im Jahr 7,884 GWh Elektrizität für den Betrieb des im Abschnitt 3.4.1 dimensionierten Elektrolyseurs von 1 MW_{el} erforderlich. Hieraus würde eine durchschnittliche tägliche Wasserstoffherzeugung von 243 kg resultieren, genug um die erforderlichen 220 kg Wasserstoff für den Bahnbetrieb zur Verfügung zu stellen und pro Tag einen Lkw (20 kg H₂) oder knapp

4 Pkw (je 6 kg H₂) komplett zu betanken. Für die auf diese Werte aufbauende Auslegung der Photovoltaikanlage wurde auf das Berechnungstool eines Wechselrichterherstellers zurückgegriffen (SMA, 2018). Die grundlegenden Annahmen waren hierbei wie folgt:

- Standort: Erfurt, Globalstrahlungssumme $\approx 1.050 \text{ kWh/m}^2\text{a}$
- Anlagentyp: Freifläche, Südausrichtung (Azimut = 0°), Modulneigung = 30°
- Modultyp: 300 Wp monokristalline PV-Module, Modulfläche = 1,68 m²
- Wechselrichter: Zentralwechselrichter auf der Mittelspannungsebene

Entsprechend dem Ergebnis der Analyse mit dem Berechnungstool Sunny Design Web (SMA, 2018) ist zur bilanziellen Versorgung des Elektrolyseurs mit Strom eine Photovoltaikanlage mit einer installierten Leistung von 7,2 MWp vorzusehen, was einer Anzahl von 24.000 Photovoltaikmodulen zu je 300 Wp entspricht. Daraus ergibt sich ein mittlerer Ertrag von ca. 7,906 GWh Elektrizität im Jahr, wodurch eine Deckung des Bedarfes grundsätzlich gegeben wäre. Bei einem angenommenen Freiflächenbedarf von ca. 3 bis 4 m² pro Modul inklusive Verkehrsflächen weist die Anlage einen Freiflächenbedarf von insgesamt 7,2 bis 9,6 ha auf. Hieraus wird ersichtlich, dass eine On-Site-Lösung mit Elektrolyse und Photovoltaikanlage direkt an der Wasserstofftankstelle aus Platzgründen als schwer realisierbar einzustufen ist (siehe auch Abschnitt 2.1.4). Die Gesamtinvestitionen für eine solche Photovoltaikanlage belaufen sich bei spezifischen Investitionskosten von ca. 1.000 bis 1.200 €/kWp auf ca. 7,2 bis 8,6 Mio. € und stellen im Vergleich zu den in Abschnitt 3.3.2 in Tabelle 3-6 aufgeführten Investitionskosten für die Kernkomponenten der Versorgung der H₂BZ-Triebwagen mit Wasserstoff eine signifikante Größenordnung dar.

Weiterhin ist grundsätzlich zu beachten, dass eine **bilanzielle Betrachtung Einschränkungen aufweist**. Aus Abbildung 3-13 wird ersichtlich, dass die täglichen Globalstrahlungssummen in Thüringen starken jahreszeitlichen Unterschieden unterliegen. In den Wintermonaten kann nur ein kleiner Teil des Ertrages erzielt werden, der für den Betrieb des Elektrolyseurs notwendig ist, während in den Sommermonaten mit einem Überangebot an Solarstrom zu rechnen ist, das der Elektrolyseur nicht aufnehmen kann. Dies wird in Abbildung 3-14 deutlich, die den monatlichen Ertrag der Photovoltaikanlage (7,2 MWp) dem Strombedarf des Elektrolyseurs (1 MW_{el}, N = 0,9) gegenüberstellt. Während von März bis September teilweise deutliche Ertragsüberschüsse zu verzeichnen sind, tritt von Oktober bis Februar ein Defizit auf. In der bilanziellen Betrachtung gleichen die Überschüsse die Defizite zwar aus, allerdings wäre für eine tatsächliche Verschiebung des Überangebotes in die Monate der Bedarfsunterschreitung der Einsatz eines deutlich größeren Elektrolyseurs und auch Speichers notwendig, was das System unter ökonomischen Gesichtspunkten deutlich schlechter darstellen würde als die hier diskutierte rein bilanzielle Variante.

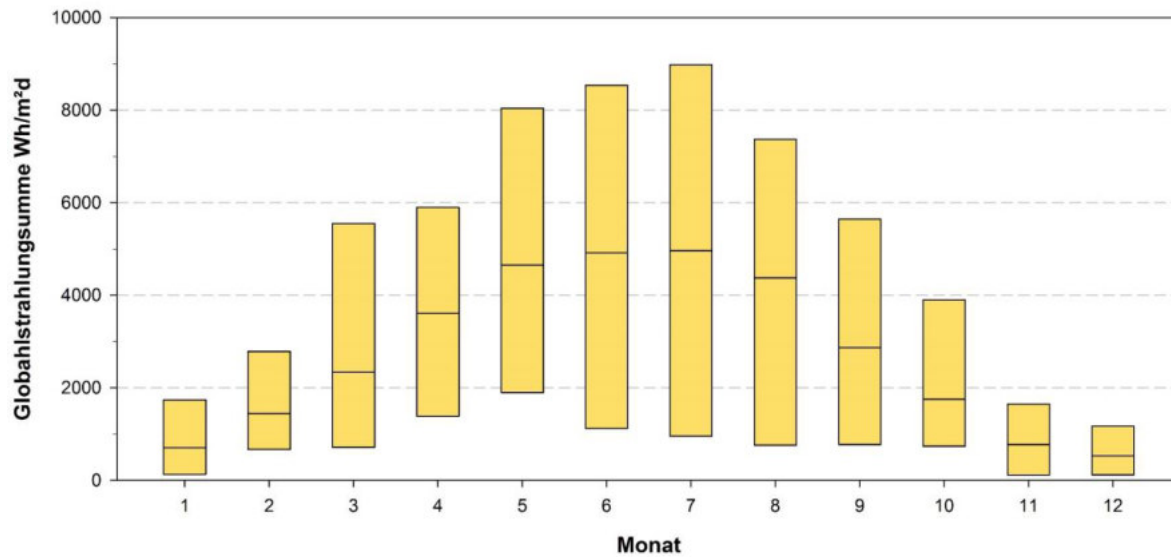


Abb. 3-13 – Tägliche Globalstrahlungssummen für Erfurt-Bindersleben (Datenbasis: Klimadaten (Meteonorm, 2015))

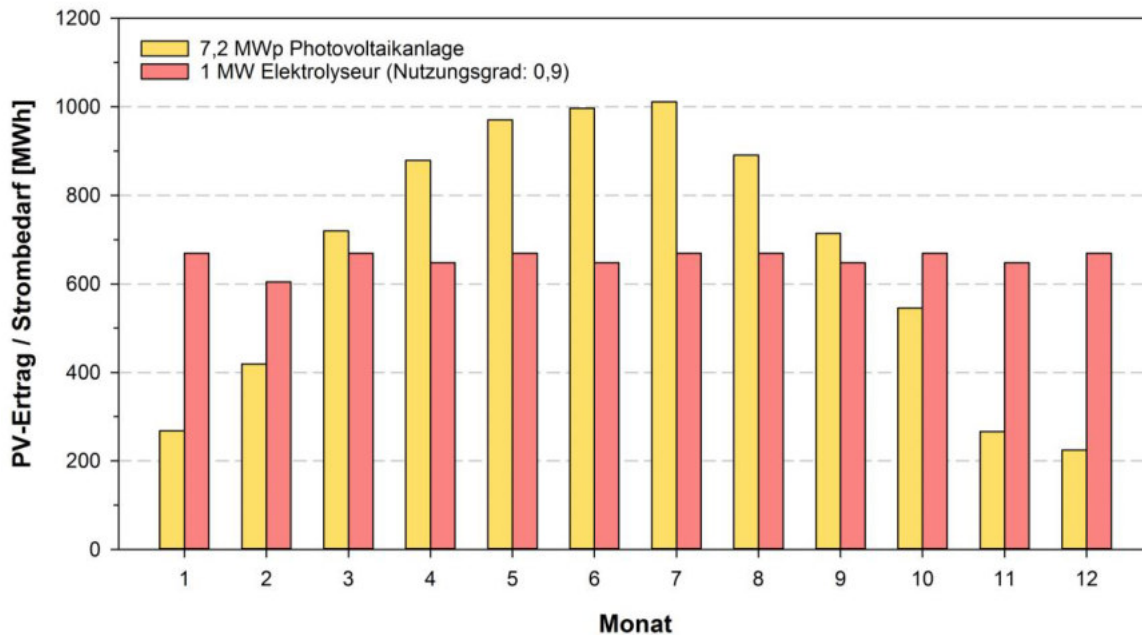


Abb. 3-14 – Monatlicher Ertrag der 7,2 MWp Photovoltaikanlage im Vergleich zum Strombedarf des 1 MW Elektrolyseurs (Datenbasis: Sunny Design Web (SMA, 2018))

Abbildung 3-15 zeigt die beiden extremsten täglichen Erzeugungssituationen im Jahresverlauf, aus denen deutlich wird, in welchem beträchtlichen Umfang Energie zeitlich verschoben werden müsste und welche technischen Einrichtungen erforderlich wären, wenn nicht eine bilanzielle, sondern eine tatsächliche Nutzung der erneuerbaren Elektrizität für die Wasserstoffherzeugung forciert würde. So müsste am sonnigsten Tag im Juli ein Elektrolyseur mit einer maximalen elektrischen Leistung von ca. 6,2 MW genutzt werden, um den gesamten solaren Ertrag in Wasserstoff umzusetzen. Dies wäre notwendig, um den zunächst als Überschuss entstehenden Wasserstoff z.B. am dunkelsten Tag im November, an dem nahezu kein solarer Ertrag erzielt werden kann, nutzen zu können. Als Referenz ist in Abbildung 3-15 weiterhin der projektierte Elektrolyseur mit 1 MW elektrischer Leistung eingezeichnet, der im 24 h Dauerbetrieb mehr als die für den Eisenbahnbetrieb notwendige Wasserstoffmenge erzeugen kann (270 kg).

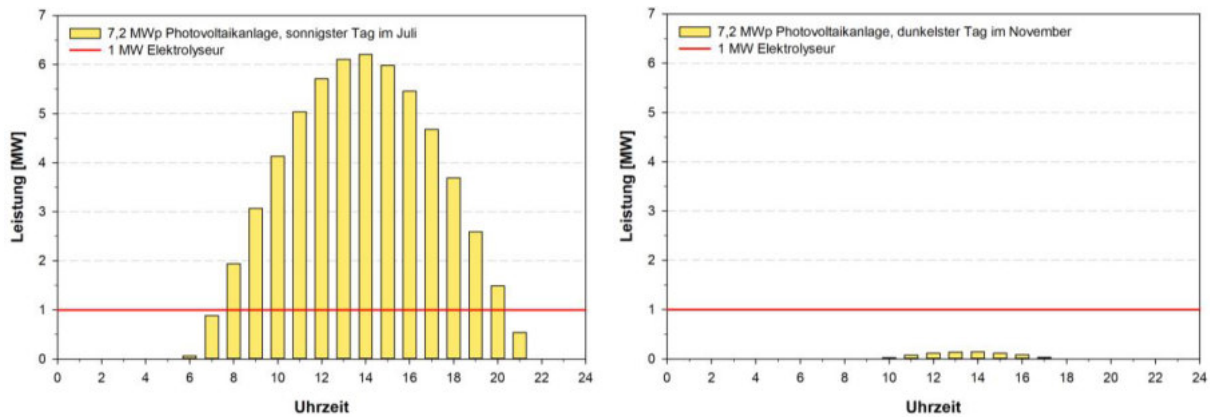


Abb. 3-15 – Leistung der 7,2 MWp Photovoltaikanlage am sonnigsten Tag im Juli sowie am dunkelsten Tag im November, verglichen mit der Elektrolyseurleistung (Datenbasis für die Berechnung: Klimadaten (Meteonorm, 2015); Photovoltaikanlage (SMA, 2018))

Insgesamt ist ein rein bilanzieller Ausgleich des Elektrizitätsbedarfs für die Elektrolyse über Photovoltaik als fragwürdig einzustufen, da damit zum einen keine wirkliche Klimaneutralität geschaffen werden kann und zum anderen ein sehr großer Flächenbedarf für die Photovoltaikanlage besteht. Um die Vorteile einer On-Site-Elektrolyse mit Stromerzeugung vor Ort zur teilweisen Vermeidung von Netzentgelten, Steuern, Abgaben und Umlagen umsetzen zu können, müssten diese Flächen zudem direkt an der Wasserstofftankstelle verfügbar sein, was in der Regel nicht der Fall sein wird. Die Verwendung einer erneuerbaren Energiequelle, die mit geringeren Fluktuationen den elektrischen Grundlastbedarf der Elektrolyse decken kann, wäre zu bevorzugen, da insgesamt eine Versorgung mit einer möglichst hohen Vollaststundenzahl für die Elektrolyse angestrebt werden sollte.

Aus den oben gemachten Ausführungen wird ersichtlich, dass für ein Pilotprojekt zum Einsatz von H₂BZ-Triebwagen in Thüringen die Realisierung einer **Wasserstoffbereitstellung über Photovoltaik nicht zu empfehlen** ist. Da somit sowohl die Wasserstoffbereitstellung über Photovoltaik als auch ein Grünstromtarif, wie in Abschnitt 3.4.1 dargestellt, für ein Pilotprojekt wenig geeignet sind, ist unter den gegebenen Bedingungen die **On-Site-Elektrolyse auf einer Wasserstofftankstelle als nicht sinnvoll zu bewerten**.

3.4.3 Direkte Wasserstoffbereitstellung über Windkraftanlagen

Der Nutzungsgrad für Strom aus Windkraft in Thüringen ist im Vergleich zur Photovoltaik höher. So erreichten Photovoltaikanlagen in Thüringen im Mittel der Jahre 2011 bis 2015 eine Vollaststundenzahl von 912 h/a, während in der Windkraft im gleichen Zeitraum durchschnittlich 1.581 h/a erzielt wurden (Agentur für Erneuerbare Energien, 2018). Zudem ist die Verfügbarkeit hoher installierter Leistungen an einem Standort bei Windkraftanlagen in der Regel deutlich größer als bei Photovoltaikanlagen. Wie aus Abbildung 3-16 ersichtlich wird, ist **in Thüringen vor allem nördlich der Autobahn A4 eine hohe Windparkdichte** zu verzeichnen, so dass die Entfernung für eine Off-Site-Elektrolyse mit Trailertransport des Wasserstoffs zur Tankstelle selbst für einen Südthüringer Standort in der Regel unter 100-150 km liegen sollte. Eine Versorgung von Eisenbahnstrecken südlich des Thüringer Waldes ist allerdings aufwändig, da, wie in Abschnitt 3.2.3 dargestellt wurde, nur Tunnel der Kategorie A mit Wasserstofftransporten befahren werden dürfen. Die Tunnelkette durch den Thüringer Wald ist jedoch nicht in diese Kategorie eingeordnet. Weiterhin ist davon auszugehen, dass die Standorte von Wasserstofftankstellen für den Bahnbetrieb aus logistischen Gründen des Triebwageneinsatzes grundsätzlich den in Abbildung 3-16 gezeigten Standorten der heutigen Bahndieseltankstellen entsprechen sollten (siehe auch Abschnitt 3.2.1).

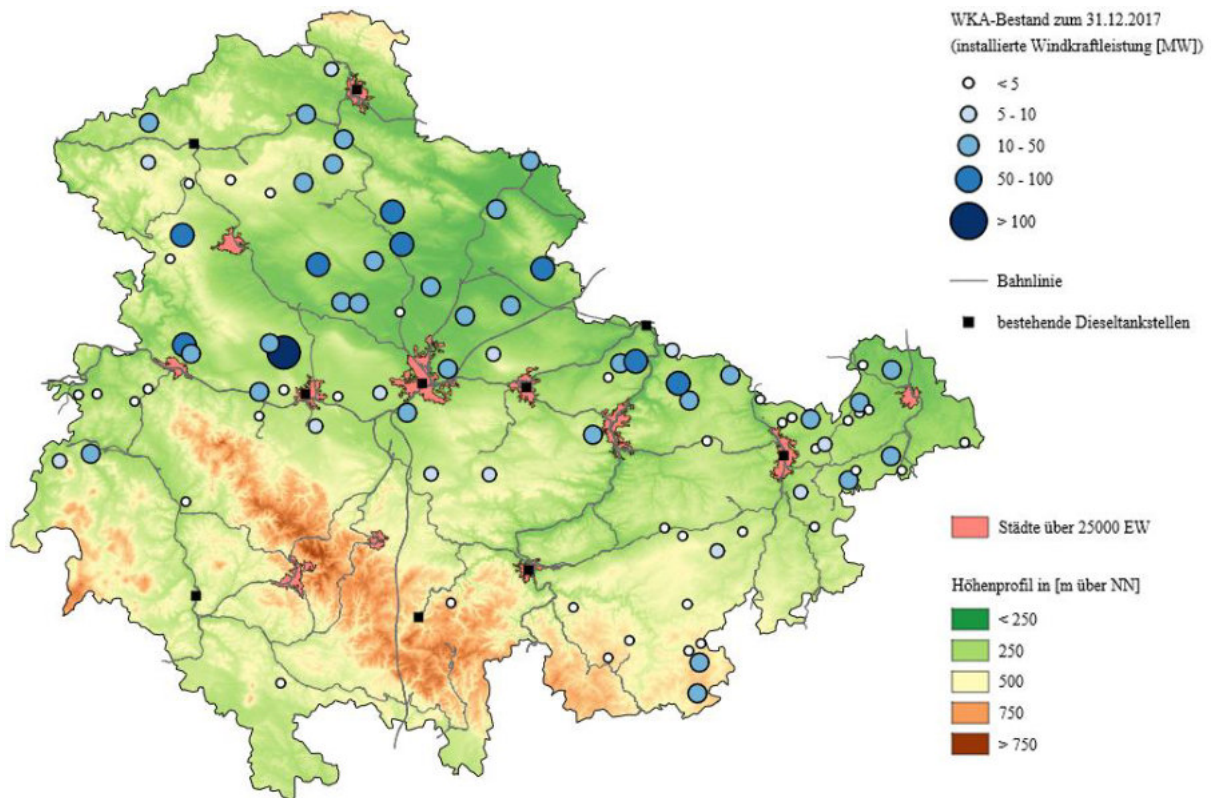


Abb. 3-16 – Lage und installierte Leistung der Windparks in Thüringen zum 31.12.2017 (Datenquellen: Eurostat, 2018; Geofabrik GmbH, 2018; BKG, 2012; NASA, 2018; TLVwA, 2018)

Die in Abbildung 3-16 gezeigten Windparkstandorte mit der jeweiligen installierten Leistung des gesamten Windparks wurden aus Daten des Thüringer Landesverwaltungsamtes (TLVwA, 2018) zu den in Thüringen vorhandenen, sich zum 31.12.2017 in Betrieb befindenden Windturbinen abgeleitet. Neben den Standortdaten umfasst diese Datenbasis auch Informationen zur installierten Leistung, zur Nabenhöhe, zum Turbinentyp und zum Jahr der Inbetriebnahme, so dass genaue Informationen dazu vorliegen, wann und wo welche installierten Leistungen aus der auf 20 Jahre festgelegten Vergütung für den eingespeisten Strom gemäß dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) ausscheiden. Dies betrifft erstmals Anlagen mit dem Ablauf des Jahres 2020. Da Altanlagen in der Regel noch Reserven bezüglich der technischen Restlaufzeit haben, stellen sich Fragen der Weiternutzung zur optimalen Ausnutzung der Lebensdauer sowie zu geeigneten Marktmodellen, sofern denn die Bewertung und Prüfung für den Weiterbetrieb von Windkraftanlagen nach Ende der typischerweise auf 20 Jahre ausgelegten Typenprüfung positiv ausfällt (Remmersmann, 2016).

Wie aus Tabelle 3-7 ersichtlich wird, werden in Thüringen in den Jahren 2020 bis 2022 Windkraftanlagen in einem nennenswerten Leistungsumfang aus der Einspeisevergütung nach EEG ausscheiden. **Diese Altanlagen sind eine Option zur Wasserstoffversorgung eines H₂BZ-Triebwagen-Pilotprojektes.** Dies liegt daran, dass eine Direktvermarktung des in diesen Altanlagen erzeugten Stroms für die Betreiber unter Umständen wenig attraktiv ist wegen der voraussichtlich geringen Vergütungen aus der Stromeinspeisung und möglichen Vorgaben des Netzbetreibers zur Abregelung bei geringem Elektrizitätsbedarf.

Tabelle 3-7 – Windkraftanlagen in Thüringen zum Jahresende 2000, 2001 und 2002, die von Ende 2020 bis Ende 2022 aus der Einspeisevergütung nach EEG ausscheiden.

Lage und installierte Leistung	Verfügbarkeit, Gesamtleistung, Cluster >10 MW
	Verfügbar ab 31.12.2020 ■ Installierte Gesamtleistung: 140,4 MW ■ Hiervon in Clustern > 10 MW: 49,1 MW (35,0 %) ■ 3 Cluster > 10 MW: Neukirchen, Wangenheim, Eckolstädt
	Verfügbar bis 31.12.2021 ■ Installierte Gesamtleistung: 186,1 MW ■ Hiervon in Clustern > 10 MW: 86,2 MW (46,3 %) ■ 4 Cluster > 10 MW: Neukirchen, Wangenheim, Großvargula, Eckolstädt
	Verfügbar bis 31.12.2022 ■ Installierte Gesamtleistung: 242,6 MW ■ Hiervon in Clustern > 10 MW: 121,8 MW (50,2 %) ■ 7 Cluster > 10 MW: Neukirchen, Wangenheim, Großvargula, Coppanz, Eckolstädt, Wetzdorf, Tanna

Gemäß einer Studie für die Naturstrom AG, die den Weiterbetrieb von Windkraftanlagen nach 2020 untersucht, kann im Basisfall einer Anlagenweiternutzung nach 20 Jahren Betrieb von einer Erlösanforderung inklusive wirtschaftlichem Anreiz von 3,57 bis 4,07 ct/kWh ausgegangen werden. Dies liegt über den zu erwartenden Marktpreisen für Elektrizität aus Windkraft von ca. 2,0 bis 3,5 ct/kWh, die sich aus der Marktpreisentwicklung für Windenergie an der Strombörse EEX ableiten (Wallasch et al., 2016). Da Kostensenkungsmöglichkeiten wenig ausgeprägt sind, kommt die Studie von Wallasch et al. (2016) daher zum Schluss, dass für die Mehrzahl von Altanlagen nach 2020 kein rentabler Weiterbetrieb mehr gegeben ist. Hieraus leiten sich **Potentiale für die Wasserelektrolyse** ab, und zwar insbe-

sondere dort, wo Windkraft-Altanlagen in Clustern von über 10 MW installierter Gesamtleistung vorhanden sind, da, wie bereits in Abschnitt 3.4.2 deutlich wurde, die installierte Leistung der Erneuerbaren-Energien-Anlagen die Elektrolyseurleistung um ein Vielfaches übersteigen sollte. Dies gilt insbesondere dann, wenn nicht nur eine bilanzielle, sondern eine tatsächliche Nutzung der erneuerbaren Elektrizität angestrebt wird, da so die Elektrolyseanlage häufiger unter Volllast betrieben werden kann, selbst wenn der Windpark nur unter Teillast Strom erzeugt. Tabelle 3-7 zeigt, dass in Thüringen bereits Ende 2020 drei Cluster von Windkraftanlagen mit mehr als 10 MW installierter Leistung aus der Einspeisevergütung nach EEG ausscheiden. Bis Ende 2022 erhöht sich dies auf insgesamt 7 Cluster mit zusammen mehr als 120 MW installierter Leistung. **Für eine Nutzung von Windkraft-Altanlagen in einem Pilotprojekt zum Einsatz von H₂BZ-Triebwagen ist in Thüringen somit grundsätzlich sowohl die technische als auch die wirtschaftliche Machbarkeit gegeben.**

Die Versorgung der Elektrolyse mit Strom aus Windkraft kann aufgrund der in Tabelle 3-7 verdeutlichten hohen verfügbaren Leistungen von Altanlagen in Thüringen über einen bilanziellen Ausgleich hinausgehen. Bei entsprechender Speicherplanung ist die vollständige Verwendung regional erzeugter erneuerbarer Elektrizität möglich, was der in Abschnitt 1.2 genannten Zielstellung einer klimaneutralen Versorgung entsprechen würde.

Im Folgenden wird für die beispielhafte Eisenbahnlinie mit 1.000 km/d Fahrleistung **die Elektrizitätsbereitstellung auf Grundlage von Windkraft-Altanlagen** aufgezeigt. Dafür wurde zunächst ein repräsentativer Referenzstandort für einen fiktiven Windpark festgelegt. Dieser befindet sich auf einer Anhöhe von 360 m zwischen Gotha und Erfurt und kann als typische Lage für Windkraftanlagen in Thüringen klassifiziert werden. Er ist als Kammlage gekennzeichnet und weist eine Geländerauigkeit von 0,03 auf, was einem offenen Gelände wie Weidelandschaften entspricht. Die Winddaten für den Referenzstandort wurden mit der meteorologischen Datenbank Meteororm (Meteororm, 2015) generiert und weisen auf 10 m Höhe eine mittlere Windgeschwindigkeit von 4,27 m/s auf. Der an diesem Standort angenommene fiktive Windpark ist mit acht Windkraftanlagen vom Typ AN Bonus 1300/62 bestückt, die eine Nabenhöhe von 68 m und eine maximale Turbinenleistung von 1.300 kW aufweisen, so dass die **Gesamtleistung des Windparks 10,4 MW** beträgt. Dieser Turbinentyp, der in Abbildung 3-17 dargestellt ist, wurde deswegen ausgewählt, weil er einen Anfang der 2000er Jahre häufig installierten Windturbinentypen repräsentiert und insofern als typisch für diesen Installationszeitraum und damit für in naher Zukunft verfügbar werdende Windkraftanlagen angenommen werden kann. Abbildung 3-17 zeigt weiterhin online verfügbare Informationen zu den Leistungsbeiwerten (cp-Wert) und der Turbinenleistung der Windkraftanlage AN Bonus 1300/62 in Abhängigkeit verschiedener Windgeschwindigkeiten (wind-turbine-models.com, 2015). Für die Berechnung des Ertrags des Windparks am oben genannten Referenzstandort wurden diese Leistungsbeiwertdaten in eine Funktion überführt (Regression 8. Ordnung). Hieraus ergibt sich die in Abbildung 3-17 blau dargestellte Windturbinenleistung bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten. Die Abweichungen von der im Datenblatt angegebenen Turbinenleistung bei hohen Windgeschwindigkeiten > 15 m/s fällt hierbei nicht nennenswert ins Gewicht, da nur wenige Betriebsstunden in diesem Bereich anfallen. Dies wird in Abbildung 3-18 verdeutlicht, die auf Nabenhöhe des Rotors eine Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeiten am Referenzstandort zeigt.

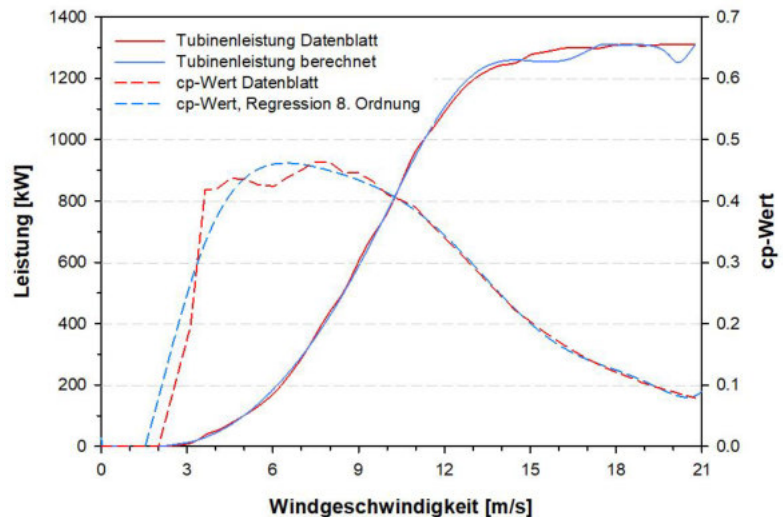


Abb. 3-17 – Windkraftanlage AN Bonus 1300/62 mit Darstellung der Leistungsbeiwerte und der Turbinenleistung bei gegebenen Windgeschwindigkeiten (Datenquelle Leistungskennzahlen: wind-turbine-models.com, 2015).

Abbildung 3-19 zeigt auf Basis der Windgeschwindigkeitsdaten für den Referenzstandort die berechnete stündliche Windparkleistung in einem typischen meteorologischen Jahr entsprechend der Meteoronorm-Datenbank (Meteonorm, 2015). Es wird deutlich, dass sich hohe Leistungen gut über das Jahr verteilen und dass sich Perioden mit gutem und schlechtem Windangebot abwechseln. Die berechnete Jahresarbeit des angenommenen Windparks beträgt 18,498 GWh bei insgesamt 1.779 h/a Volllaststunden, was einem Nutzungsgrad von 20,3 % entspricht. Der ermittelte Nutzungsgrad und die Volllaststunden erscheinen möglich für einen guten Standort, wenn man berücksichtigt, dass 1.800 h/a als typisch für Onshore-Anlagen im Binnenland gelten (Statista, 2018). Allerdings ist hierbei anzumerken, dass dieser Wert über der eingangs genannten mittleren Volllaststundenzahl von 1.581 h/a für Windkraftanlagen in Thüringen liegt (Agentur für Erneuerbare Energien, 2018). Damit werden die Windparkerträge perspektivisch etwas zu positiv bewertet.

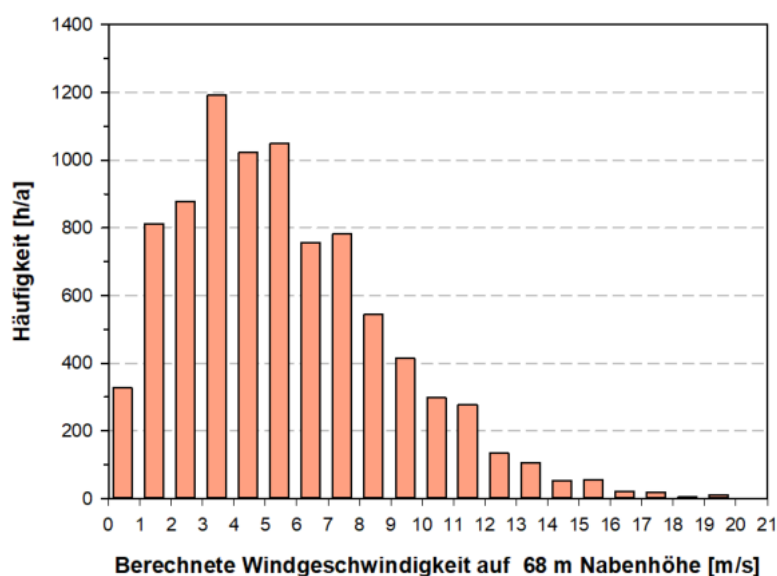


Abb. 3-18 – Häufigkeitsverteilung der berechneten Windgeschwindigkeiten am Referenzstandort auf Nabenhöhe des Rotors von 68 m (Datenquelle Windgeschwindigkeiten: Meteonorm, 2015)

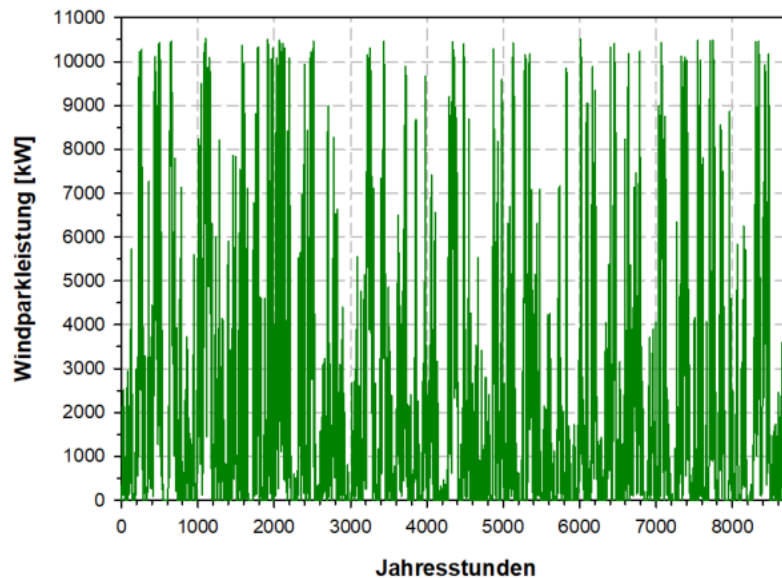


Abb. 3-19 – Leistung des fiktiven Windparks über ein typisches meteorologisches Jahr.

Anders als in den Abschnitten 3.4.1 und 3.4.2, in denen ein bilanzieller Ansatz verfolgt wurde, wurde bei der Untersuchung des fiktiven Windparks die Wasserstoffherzeugung mit der Strombereitstellung aus Windenergie verknüpft. Hierzu wurden die in Abbildung 3-19 dargestellten Leistungsdaten des Windparks für jede Stunde des Jahres in einer Tabellenkalkulation aufbereitet, um die **Elektrolyseurzielgröße und die stündliche Wasserstoffherzeugung** aus Windenergie zu ermitteln, wobei in diesem Fall etwaige Ausfallzeiten von Windturbinen und Elektrolyseuren sowie Wirkungsgradverluste der Elektrolyse im Teillastverhalten vernachlässigt wurden.

Bei einem täglichen Wasserstoffbedarf von 220 kg für die Beispielbahnlinie (siehe Abschnitt 3.4.1) und einem aus den Rahmenparametern der angenommenen Elektrolyseurmodule abgeleiteten spezifischen Energiebedarf für die Wasserstoffherzeugung von 88,5 kWh/kg ergibt sich eine erforderliche Elektrolysearbeit von 7,11 GWh/a. Um diese Jahresarbeit zu bedienen, sind, wie in Tabelle 3-8 dargestellt wird, 15 Elektrolyseurmodule zu je 100 kW erforderlich. Wenn zusätzlich täglich noch 10 Pkw-Betankungen zu je 5,5 kg oder aber 2 Lkw-Betankungen zu je 20 kg und 3 Pkw-Betankungen zu je 5 kg angenommen werden, dann wären bereits 20 Module, d.h. 2 MW installierte Elektrolyseurleistung erforderlich (Tabelle 3-8). Der Nutzungsgrad der Elektrolyseure ist in beiden Fällen über 50 %.

Wie in Abbildung 3-20 anhand einer geordneten Jahresdauerlinie der Windparkleistung zu sehen ist, kann ein 1,5 MW Elektrolyseur mit dem gegebenen 10,4 MW Windpark etwa 3.450 h/a im Jahr unter Volllast betrieben werden. Dies reduziert sich auf ca. 3.050 h/a bei dem größeren 2 MW Elektrolyseur. Dies verdeutlicht vor dem Hintergrund der derzeit noch hohen Kosten für die Wasserelektrolyse, dass die Windparkleistung prinzipiell möglichst groß sein sollte, um eine kleine Elektrolyseurzielgröße realisieren zu können. Weiterhin wird deutlich, dass eine **modulare Bauweise der Elektrolyseanlage** in 100 kW Schritten sehr gut geeignet ist, um in Perioden, in denen keine Vollbenutzung möglich ist, Wirkungsgradverluste im Teillastbetrieb zu vermeiden, da eine dynamische Schaltung der Einzelmodule entsprechend des Winddargebots ermöglicht wird.

Tabelle 3-8 – Erforderliche Elektrolyseurleistung in Abhängigkeit des H₂-Bedarfs und der Stromerzeugung des 10,4 MW Windparks am Referenzstandort.

	Variante 1 – 1.000 km H ₂ BZ-Triebwagen	Variante 2 – 1.000 km + ca. 10 Pkw-Betankungen
erforderliche Elektrolyseurleistung [kW]	1.500	2.000
H ₂ -Jahresertrag [kg/a]	≈ 82.150	≈ 100.500
H ₂ -Tagesdurchschnittsertrag [kg/d]	≈ 225	≈ 275
Elektrolysearbeit [GWh/a]	7,272	8,897
Nutzungsgrad Elektrolyseur [%]	55,3	50,8

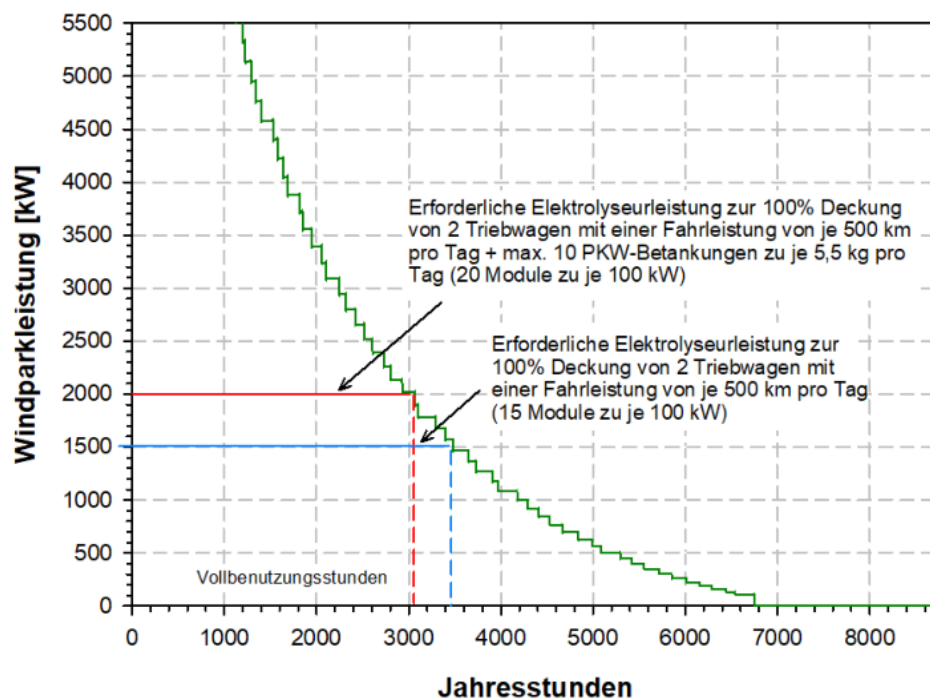


Abb. 3-20 – Geordnete Jahresdauerlinie der Leistung des 10,4 MW Windparks inklusive Darstellung der Vollbenutzungsstunden der in Tabelle 3-8 detaillierten Elektrolyseurgrößen.

Aus den oben gemachten Ausführungen wird deutlich, dass ein H₂BZ-Triebwagen-Pilotprojekt in Thüringen über Wasserelektrolyse an Windparks mit mehr als 10 MW installierter Leistung **vollständig mit regenerativ hergestelltem Wasserstoff** versorgt werden könnte. Da ab Ende 2020 nennenswerte Windparkkapazitäten in Thüringen aus der Einspeisevergütung nach EEG ausscheiden, **entsteht derzeit ein Zeitfenster, das es jetzt zu nutzen gilt, um neue Wasserstoffinfrastruktursysteme zu erproben**. Um die technisch und ökonomisch sinnvollste Konstellation für das Gesamtsystem inklusive Transportlogistik zu ermitteln, ist allerdings, wie in Abschnitt 3.4.6 dargestellt wird, der Einsatz eines genaueren, iterativen Analyseverfahrens notwendig.

3.4.4 Wasserstoffbereitstellung über sonstige Erneuerbare-Energien-Anlagen

Als weitere erneuerbare Energiequellen für die Versorgung der Elektrolyse können, wie in Abschnitt 2.1.4 angeführt wurde, Biogas- und Wasserkraftanlagen in Betracht kommen.

Der Einsatz von **Biogasanlagen** zur Wasserstoffherstellung ist, wie bereits in Abschnitt 2.1.4 erwähnt wurde, mit hohen technischen Anforderungen verbunden, da eine Zusammenlagerung verschiedener Gase (Methan und Wasserstoff) Einschränkungen unterliegt. Zudem ist die Umwandlung von Biogas über einen Gasmotor in Elektrizität und anschließend über Wasserelektrolyse wieder in ein Gas (Wasserstoff) in technischer Hinsicht als ausgesprochen ineffizient zu beurteilen. Weiterhin sollten Gasmotoren auf Biogasanlagen aufgrund ihrer Grundlastfähigkeit besser für die Einspeisung ins Elektrizitätsnetz vorgehalten werden. Da sich jedoch Altanlagen, ähnlich wie in Abschnitt 3.4.3 für die Windkraft beschrieben, mit einem Ausscheiden aus der Einspeisevergütung nach EEG unter Umständen nicht mehr wirtschaftlich weiterbetreiben lassen, sind neue Geschäftsmodelle zu eruieren. Allerdings erscheint es hier **energetisch sinnvoller, aufbereitetes Biogas in das bestehende Erdgasnetz einzuspeisen** als mit hohen Wirkungsgradverlusten Wasserstoff herzustellen.

Wasserkraftanlagen können bei entsprechender Verfügbarkeit einer ausreichenden installierten Leistung hingegen eine sehr interessante Option zur Versorgung der Elektrolyse mit erneuerbarer Elektrizität darstellen. In Thüringen bietet die Saale-Kaskade die einzigen bezüglich der verfügbaren installierten Leistung relevanten Wasserkraftanlagen für die Versorgung der Elektrolyseure für ein H₂BZ-Triebwagen-Pilotprojekt. In Tabelle 3-9 sind die wesentlichen Parameter der vier relevanten Wasserkraftanlagen der Saale-Kaskade zusammengefasst.

Tabelle 3-9 – Wasserkraftanlagen der Saalekaskade ohne Pumpspeicherkraftwerke (Datenquelle: Vattenfall, n.d.)

	Leistung [MW]	mittlere Fall- höhe [m]	mittlerer Durch- fluss [m ³ /s]	Turbinentyp
Talsperre Burgkhammer	2,16	14	11	Kaplan
Talsperre Walsburg	2,5	10,5	15	Kaplan
Talsperre Eichicht	3,4	9	15	Kaplan
Talsperre Wisenta	1,26	59	0,75	Francis

Bei Überlegungen zur Nutzung der in Tabelle 3-9 genannten Wasserkraftanlagen für die Wasserelektrolyse muss jedoch festgehalten werden, dass der mittlere Durchfluss in den niederschlagsarmen Zeiten des Jahres im langjährigen Mittel auf ca. 47 % zurückgeht (TLUBN, 2019). Damit einher geht auch die Leistung der Wasserkraftanlagen zurück. In extrem trockenen Jahren wie 2018 ist mit einem noch deutlicheren Leistungsrückgang zu rechnen, wodurch die Versorgung der Elektrolyse grundsätzlich in Frage gestellt wäre. Zudem sind die Talsperren Burgkhammer, Walsburg und Eichicht als Niederdruck- oder Laufwasserkraftwerke typische Grundlastanlagen, die beispielsweise emissionsfreien Strom für das elektrifizierte Eisenbahnnetz bereitstellen können. Die unmittelbare Nutzung der erneuerbaren Elektrizität stellt hier eine energieeffizientere Nutzungsoption im Vergleich zur Elektrolyse dar. Darüber hinaus übernehmen die Talsperren Aufgaben im Rahmen des Hochwasserschutzes (Menkens, n.d.), was die kontinuierliche Nutzbarkeit durch die Elektrolyse deutlich einschränken kann.

Aufgrund der oben genannten Aspekte ist ein **Einsatz von Biogasanlagen sowie der Wasserkraftanlagen der Saale-Kaskade zur Versorgung der Elektrolyse für ein H₂BZ-Triebwagen-Pilotprojekt mit erneuerbarer Elektrizität nicht zu empfehlen.**

3.4.5 Möglichkeiten der Elektrolysesauerstoffnutzung auf Kläranlagen

Bei der Elektrolyse von Wasser entsteht neben Wasserstoff zwangsläufig auch Sauerstoff, der üblicherweise keiner weiteren Nutzung zugeführt und in die Umwelt abgegeben wird. Die spezifische O₂-Produktion der Wasserelektrolyse beläuft sich auf 0,1 Nm³/kWh. Für die in Abschnitt 3.4.1 genannte Elektrolyseanlage mit 10 Modulen und einer Modulnettoleistung von 63 kW_e ergibt sich somit eine Sauerstoffproduktion von 6,3 Nm³/h. Daraus resultiert bei einer Sauerstoff-Normdichte von 1,429 kg/m³ im 24 h Dauerbetrieb eine Tagesproduktion von 2.160 kg. Da der Sauerstoff analog zum Wasserstoff bei einem Druck von 100 bar vorliegt und keine weitere Verdichtung erfolgen soll, ist ein Speichervolumen von 16,2 m³ pro Tag notwendig, was über ca. 1,7 der im Abschnitt 3.2.3 beschriebenen Trailer abgebildet werden kann.

Der erforderliche Aufwand für die Sauerstoffspeicherung und insbesondere einer nachfolgenden Logistik ist nur bei einer ökonomisch sinnvollen Nutzung des Sauerstoffs gerechtfertigt. Eine Option stellt der Einsatz auf Kläranlagen dar, da diese in der biologischen Reinigungsstufe einen sehr hohen Sauerstoffbedarf aufweisen. Mit dem täglich anfallenden Sauerstoff für die Beispielbahnlinie könnte so z.B. das Abwasser von ca. 10.000 Einwohnern behandelt werden. Untersuchungen auf der in Abbildung 3-21 gezeigten Versuchskläranlage auf der Kläranlage Sonneberg-Heubisch, die gemeinsam von den Wasserwerken im Landkreis Sonneberg und der Bauhaus-Universität Weimar betreut wird, zeigen, dass sich in konventionell gebauten Kläranlagen mit Reinsauerstoff höhere Reinigungsleistungen erzielen lassen als mit über Gebläse eingebrachter Luft (Büttner et al., 2018). Allerdings sind die entstehenden Mehrkosten für den Sauerstofftransport vom Ort der Entstehung zur Kläranlage nicht vertretbar, da diese auf die Gebührenzahler umgelegt werden müssten. Daher kommt eine Nutzung von Sauerstoff aus der Wasserelektrolyse nur in Frage, wenn die Elektrolyse direkt auf der Kläranlage erfolgt. Im Rahmen eines Pilotprojektes mit H₂BZ-Triebwagen **mit Off-Site-Elektrolyse an einem Windpark ist daher die Nutzung des Elektrolysesauerstoffs für die biologische Reinigungsstufe von Kläranlagen ökonomisch nicht sinnvoll.**

Es zeichnet sich jedoch ein weiterer maßgeblicher Sauerstoffbedarf auf Kläranlagen ab, der perspektivisch ein großes Potential besitzt, und zwar für die sich in der Diskussion befindende sogenannte **vierte Reinigungsstufe zur Entfernung von Mikroschadstoffen** (Arzneimittelrückstände, Haushaltschemikalien, Biozide). Diese können in Kombination mehrerer Verfahren unter anderem durch die Oxidation mit Ozon, welches aus Sauerstoff energieeffizienter und ökonomischer erzeugt werden kann als aus Luft, umgesetzt werden. Nach derzeitigem Kenntnisstand kann mit der täglich entstehenden Sauerstoffmenge für die Beispielbahnlinie das Abwasser von ca. 250.000 Einwohnern in der vierten Reinigungsstufe behandelt werden.

Das Einsatzpotential des Sauerstoffs auf Kläranlagen ist, wie oben bereits deutlich wurde, durch die Entfernung zwischen Elektrolyseur und Kläranlage limitiert. Bei einer On-Site Elektrolyse an der Wasserstofftankstelle, die in räumlicher Nähe zum jeweiligen Bahnhof platziert ist, kann ein rohrleitungsgebundener Transport des Sauerstoffs sinnvoll sein, da sich Bahnlinien häufig an Flussläufen befinden und oftmals nur geringe Distanzen zu einer Kläranlage zu überwinden sind (siehe auch Abschnitt 2.1.4). Im Fall einer Off-Site-Elektrolyse wäre eine straßengebundene Logistik erforderlich, wie sie unter Abschnitt 3.2.3 dargestellt ist. Die Nutzung des Sauerstoffs im Rahmen der vierten Reinigungsstufe ist dabei als wirtschaftlich interessanter einzustufen als in der biologischen Behandlungsstufe, da das Ozon üblicherweise aus Sauerstoff erzeugt wird, der per Luftzerlegung gewonnen und als Flüssigsauerstoff angeliefert wird. Der als „Abfallprodukt“ bei der Wasserelektrolyse entstehende Sauerstoff

muss lediglich unter dem durch die Elektrolyse erzeugten Druck von 100 bar gespeichert und zur Kläranlage transportiert werden. Sofern sie verpflichtend eingeführt wird, bieten sich daher durch den Absatz des Sauerstoffs **für die vierte Reinigungsstufe große Potentiale, die Gestehekosten des Wasserstoffs für ein H₂BZ-Triebwagen-Pilotprojekt zu reduzieren** und die Wirtschaftlichkeit des Gesamtsystems zu erhöhen.



Abb. 3-21 – Versuchskläranlage zur vergleichenden Untersuchung der Sauerstoffversorgung biologischer Behandlungsstufen von Kläranlagen mit Luft- und Elektrolysesauerstoff am Standort Sonneberg-Heubisch der Wasserwerke im Landkreis Sonneberg.

3.4.6 Fazit und resultierende Methodik der Anlagendimensionierung für ein Pilotprojekt

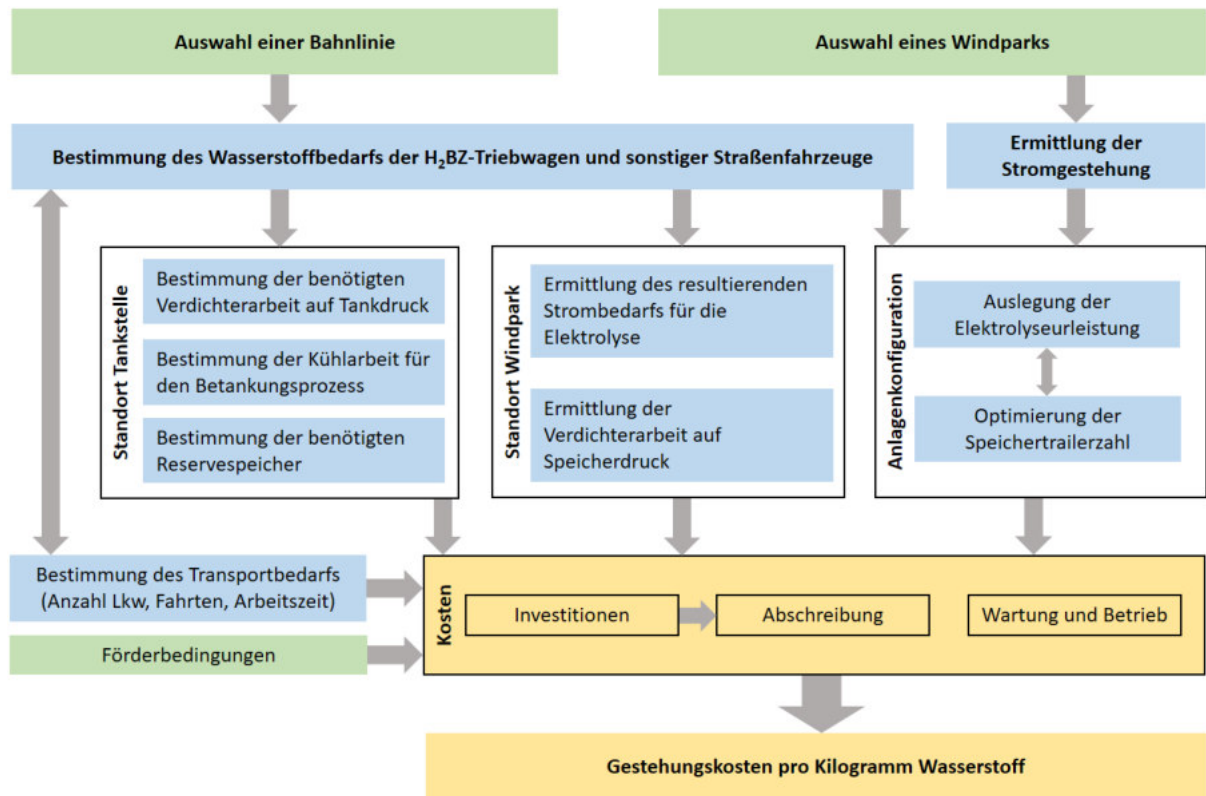
Aus den in den Abschnitten 3.4.1 bis 3.4.5 gemachten Angaben lässt sich ableiten, dass die **Voraussetzungen für die Versorgung einer Wasserstofftankstelle für H₂BZ-Triebwagen auf Basis von mit erneuerbaren Energien erzeugtem Wasserstoff in Thüringen grundsätzlich gegeben** sind. Weiterhin wird deutlich, dass erneuerbar erzeugter Strom direkt für die Wasserelektrolyse verwendet werden sollte, um den Zielen des Klimaschutzes in Thüringen vollumfänglich gerecht zu werden. Eine lediglich **bilanziell ausgeglichene Erzeugung der für die Wasserelektrolyse benötigten Elektrizität ist nicht zu empfehlen**.

Für die Versorgung eines Pilotprojektes mit Wasserstoff bieten sich in Thüringen insbesondere bestehende Windkraftanlagen an. Es wird daher **empfohlen, die Wasserstoffbereitstellung für ein H₂BZ-Triebwagen-Pilotprojekt in Thüringen über Wasserelektrolyse an bestehenden Windparks zu realisieren**. Mit in Thüringen vorhandenen Windparks, die ab 2020 keine garantierte Einspeisevergütung gemäß EEG mehr erhalten, ist, wie in Abschnitt 3.4.3 deutlich wird, eine vollständige Versorgung einer typischen Thüringer Bahnlinie mit etwa 1.000 km Fahrleistung am Tag mit regenerativ hergestelltem Wasserstoff möglich. Da eine räumliche Verbindung zwischen bestehenden Windparks und geeigneten Eisenbahntankstellenstandorten prinzipiell nicht gegeben ist, ist für ein Pilotprojekt die **Projektierung einer Liefer-Tankstelle mit Off-Site-Elektrolyse an einem Windpark vorzusehen**. Die zu projektierende Tankstelle sollte hierbei **nördlich des Thüringer Waldes** liegen, da eine Transportlogistik über den Thüringer Wald, wie in Abschnitt 3.2.3 dargestellt wurde, schwer zu realisieren ist. Um eine möglichst gute Ausnutzung des Winddargebots zu erreichen, ist zudem ein **modularer Aufbau der Elektrolyseanlage zu empfehlen**.

Sofern möglich, sollte auch eine Nutzung des bei der Wasserelektrolyse neben Wasserstoff entstehenden Sauerstoffs erfolgen. Sollte die sogenannte **vierte Reinigungsstufe auf Kläranlagen** zur Umsetzung kommen, entstehen hier zudem **Synergiepotentiale, die seitens der Landespolitik Unterstützung erfahren könnten**.

Wie bereits in Abschnitt 3.4.1 aufgezeigt wurde, erfordert eine vollständige, direkte Deckung des H₂-Bedarfs aus erneuerbaren Energien eine **iterative, softwaregestützte Ermittlung** der idealen Elektrolyseurgröße und der Anzahl der für die Aufrechterhaltung der Logistik notwendigen Speichertrailer. Dies ist erforderlich, da in Abhängigkeit des Erneuerbaren-Energien-Dargebots und der Anlagengröße ermittelt werden muss, welche Variante die günstigsten Gestehungskosten pro kg an der Tankstelle abgegebenen Wasserstoff verursacht. Um eine langfristige Wirtschaftlichkeit gegenüber Dieseltriebwagen zu gewährleisten, muss der ermittelte Gestehungspreis hierbei dem in Abschnitt 3.3.1 genannten H₂-Zielpreis von 6,70 €/kg netto entsprechen. Auf Basis der Kernaussagen der Abschnitte 3.4.1 bis 3.4.3 wurde daher im Rahmen der Machbarkeitsstudie eine **Tabellenkalkulation** erstellt, die es ermöglicht, die H₂-Gestehungskosten unter Berücksichtigung einer **Investitionsförderquote von bis zu 80 %** zu ermitteln, was einer typischen maximalen öffentlichen Förderquote entspricht.

Abbildung 3-22 zeigt das grundsätzliche Ablaufschema der entwickelten Tabellenkalkulation. Ein detailliertes Schema befindet sich in Anhang D. Entsprechend den in den vorhergehenden Abschnitten getroffenen Aussagen eignen sich vor allem bestehende Windparks für die Versorgung einer Wasserstofftankstelle für ein H₂BZ-Triebwagen-Pilotprojekt. Daher sind neben den grundlegenden Betriebsparametern der Bahnlinie, Daten für einen Windpark mit seinen Turbinentypen und stündlichen Windgeschwindigkeitsdaten anzugeben. Da im Rahmen der Machbarkeitsstudie kein konkreter Windpark zur Verfügung stand, wurde für die in Abschnitt 4 folgende Konzeption der bereits in Abschnitt 3.4.3 erwähnte Referenzstandort bei Erfurt verwendet. Genutzt wurden hierbei mit der meteorologischen Datenbank Meteonorm (Meteonorm, 2015) generierte Winddaten sowie Leistungskurven des Windturbinentyps AN Bonus 1300/62 (siehe Abschnitt 3.4.3). Wie in Abbildung 3-22 gezeigt wird, lassen sich hieraus in einem iterativen Prozess die wesentlichen Kosten für Investition, Wartung und Betrieb ermitteln, um schlussendlich einen H₂-Gestehungspreis anzugeben. Die in Abschnitt 4 gezeigten Ergebnisse für die in Abschnitt 3.1 als für ein Pilotprojekt am geeignetsten identifizierten Bahnlinien beruhen auf der hier gezeigten Methodik.



Legende: Rahmenbedingungen technische Auslegung Kosten

Abb. 3-22 – Ablaufschema für die Ermittlung der Gestehungskosten pro kg Wasserstoff für ein Pilotprojekt zum Einsatz von H₂BZ-Triebwagen in Thüringen auf Basis von Elektrizität aus Windkraft.

4. Konzeption für den Einsatz von H₂BZ-Triebwagen in einem Pilotprojekt in Thüringen

4.1 Bahnlinie Rottenbach – Katzhütte

4.1.1 Ermittlung der betrieblichen Rahmenbedingungen

Wie in Abschnitt 3.1.3 dargestellt wurde, ist die Bahnlinie von **Rottenbach nach Katzhütte** im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie als geeignetste Bahnlinie für ein Pilotprojekt zum Einsatz von H₂BZ-Triebwagen in Thüringen identifiziert worden. Die einfache Fahrstrecke zwischen Rottenbach und Katzhütte beträgt 24,9 km. Wie in Abbildung 4-1 zu sehen ist, werden derzeit von Montag bis Donnerstag von zwei Dieseltriebwagen je 15 Fahrten durchgeführt. Am Freitag steigt die Zahl auf 16 Fahrten, am Samstag beträgt sie 14 Fahrten und am Sonntag wieder 15 Fahrten je Triebwagen. Damit liegt die resultierende tägliche Fahrleistung je Triebwagen im Schnitt bei 15 Fahrten und insgesamt etwa 374 km/d und damit weit unter der maximalen Reichweite des Alstom Coradia iLint. Hieraus ergeben sich die **folgenden betrieblichen Rahmenbedingungen** für die Planung der Wasserstoffversorgung der Bahnlinie:

- Gesamtfahrleistung zwei H₂BZ-Triebwagen: 748 km/d
- Mittlerer Wasserstoffbedarf H₂BZ-Triebwagen gemäß Abschnitt 3.3.1: 0,22 kg/km
- H₂-Tagesbedarf der H₂BZ-Triebwagen: 165 kg/d
- H₂-Speicherbedarf für 5 Tage Reserve gemäß Abschnitt 3.4.1: 825 kg
- Erforderliche Speichertrailer zu 300 bar und 240 kg H₂ gemäß Abschnitt 3.2.3: 4 Stück
(Bei Berücksichtigung des 500 bar Zwischenspeichers sind 3 Trailer ausreichend.)

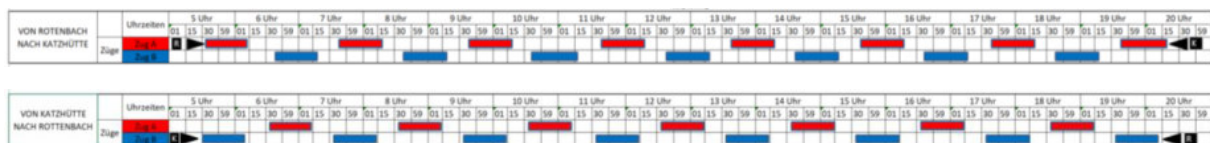


Abb. 4-1 – Fahrplan Rottenbach – Katzhütte (oben) und Katzhütte – Rottenbach (unten) von Montag bis Donnerstag mit Angabe des jeweiligen Start- und Endbahnhofs (schwarze Pfeile).

Die Bahnlinie Rottenbach - Katzhütte wird derzeit mit zwei Dieseltriebwagen der Baureihe 641, Alstom Coradia A TER bedient, die nur aus einem Wagenteil bestehen, während der einzige marktverfügbare H₂BZ-Triebwagen, der Alstom Coradia iLint aus zwei Wagenteilen besteht. Hierdurch entsteht eine Kapazitätserhöhung, die für die in Abschnitt 3.1.2 dargestellten Fahrgastzahlen nicht notwendig wäre. Dennoch sind die **Voraussetzungen dieser Bahnlinie aus folgenden Gründen als sehr gut geeignet für ein Pilotprojekt einzustufen:**

- Die Bahnstrecke passt sehr gut zu den Fahreigenschaften des Alstom Coradia iLint. Es entstehen keine Fahrzeitverlängerungen, so dass die bestehenden Fahrpläne und Anschlüsse beibehalten werden können (siehe Tabelle A-1 in Anhang A).
- Die Laufzeit der Ausschreibung endet im Dezember 2021, so dass ein Wechsel der Antriebsart des Fahrzeugs mit einem neuen Verkehrsvertrag gut möglich ist. Die Bahnlinie ist außerdem die nächste der Thüringer Dieseltriebwagen-Bahnlinien, deren Ausschreibung endet und somit die am schnellsten verfügbare (siehe Tabelle A-1 in Anhang A).
- Es handelt sich um eine Stichstrecke ohne Betrieb mit anderen Fahrzeugen.

- In Rottenbach ist in Bahnhofsnähe eine Bahnfläche verfügbar, die sich für die Einrichtung einer Wasserstofftankstelle eignet (siehe Abschnitt 4.1.5).
- In Verbindung mit der Oberweißbacher Bergbahn besteht ein sehr hohes touristisches Potential.
- Das Personal der Oberweißbacher Berg- und Schwarzatalbahn ist geschult in der Betreuung von Touristen und der Vermittlung von Informationen, so dass auch der Öffentlichkeitsarbeit Rechnung getragen werden kann.
- Es bestehen Synergiepotentiale mit den Projekten der Internationalen Bauausstellung Thüringen (IBA Thüringen) im Schwarzatal, insbesondere dem IBA Projekt Bahnhof Rottenbach.

4.1.2 Möglichkeiten zur H₂-Bereitstellung aus bestehenden Windkraftanlagen

Wie bereits in Abschnitt 3.4.3 detailliert beschrieben wurde, sind für die Versorgung eines H₂BZ-Triebwagen-Pilotprojektes mit Wasserstoff aus Windparks möglichst große installierte Windkraftanlagenleistungen notwendig, um die Größe des Elektrolyseurs am Windpark und damit die Investitionskosten möglichst gering zu halten. Weiterhin ist für einen wirtschaftlichen Betrieb auf Altanlagen zurückzugreifen, die ab Ende 2020 aus der Einspeisevergütung nach EEG ausscheiden (siehe Abschnitt 3.4.3). Daher kommen für die Wasserstoffversorgung vor allem Windparks mit Altanlagen einer installierten Gesamtleistung größer 10 MW in Frage, die ab Ende 2020 verfügbar werden. Dies umfasst in Thüringen die in Tabelle 4-1 zusammengefassten Windparks, in denen prinzipiell jeweils zum Jahresende 2020, 2021 und 2022 Altanlagen-Gesamtleistungen in der angegebenen Größe für neue Geschäftsmodelle zur Verfügung stehen sollten, sofern denn von den Betreibern kein Rückbau oder Repowering mit neuen Windturbinen geplant ist. Zudem befinden sich sämtliche der in Tabelle 4-1 genannten Windparks zwischen etwa 70 und 100 km einfache Wegstrecke entfernt von Rottenbach und somit in einer für den Trailertransport gut geeigneten Distanz. Weiterhin kann zur Erreichung vieler der Windparks prinzipiell zumindest in Teilstrecken auf Autobahnen zurückgegriffen werden (siehe auch Abschnitt 2.2.5). Die genaue Streckenführung ist jedoch im Einzelfall zu prüfen. Grundsätzlich sind folglich **Möglichkeiten zur H₂-Bereitstellung aus bestehenden Windkraftanlagen für die Bahnlinie Rottenbach – Katzhütte vorhanden.**

Tabelle 4-1 – Installierte Turbinenleistung jeweils zum Jahresende 2000 bis 2002 in Thüringer Windparks, die bis Ende 2002 eine Gesamtleistung größer 10 MW aufwiesen (Datenquelle: TLVwA, 2018).

Windpark	Installierte Turbinenleistung [MW] bis Ende		
	2000	2001	2002
Coppanz	0,00	0,00	12,00
Eckolstädt	14,70	17,30	17,30
Großvargula	0,00	24,00	24,00
Neukirchen	13,40	13,40	14,90
Tanna	0,50	0,50	11,30
Wangenheim	21,00	31,50	31,50
Wetzdorf	0,25	3,60	10,75

4.1.3 Ermittlung der Elektrolyseurgröße und der H₂-Gestehungskosten

Da im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie keine Festlegung auf einen spezifischen Windpark erfolgen kann, wurde zur Ermittlung der Elektrolyseurgröße und der H₂-Gestehungskosten auf den in Abschnitt 3.4.3 beschriebenen **Referenzstandort** auf einer Anhöhe zwischen Gotha und Erfurt zurückgegriffen, wobei wiederum eine Bestückung mit Windkraftanlagen vom Typ AN Bonus 1300/62 angenommen wurde. Für die Analyse wurden Windparkgrößen von 3 Turbinen (3,9 MW installierte Leistung) bis 24 Turbinen (31,2 MW installierte Leistung) untersucht, mit einem besonderen Augenmerk auf Größen mit 8, 16 und 24 Turbinen, da die daraus resultierenden installierten Leistungen mit 10,4 MW, 20,8 MW und 31,2 MW gut den in Tabelle 4-1 gezeigten Windparkgrößen entsprechen. Weniger als 3 Turbinen wurden nicht betrachtet, da die am Referenzstandort erzeugte Menge Strom dann nicht mehr ausreichend ist, um für den Betrieb der Bahnlinie genügend Wasserstoff über Wasserelektrolyse herzustellen. Die Distanz zwischen Windpark und der Tankstelle in Rottenbach wurde mit 85 km Fahrstrecke angenommen.

Durchgeführt wurden die Analysen mit der in Abschnitt 3.4.6 beschriebenen **Tabellenkalkulation** entsprechend dem in Anhang D dargestellten detaillierten Ablaufschema. Die für die Berechnung verwendeten Rahmenparameter zur Bahnlinie Rottenbach – Katzhütte, Förderung, Off-Site-Elektrolyse am Windpark, Liefer-Tankstelle und Wasserstofflogistik sowie zu den Elektrizitätspreisen sind in Anhang E im Detail aufgeführt. Im Rahmen der Berechnungen wurden folgende Parameter ermittelt, die für die Investitionskosten, Förderung und den Betrieb des Systems wesentlich sind:

- die erforderliche Elektrolyseurgröße in Abhängigkeit des Wasserstoffbedarfs, des Winddargebots und der Windparkgröße,
- die erforderliche Anzahl an Speichertrailern in Abhängigkeit der Verteilung des Winddargebots sowie zur Sicherstellung der Reserve an der Tankstelle,
- die erforderliche Anzahl an Transport-Lkw in Abhängigkeit des Wasserstoffbedarfs und der Fahrdistanz zwischen Windpark und Tankstelle,
- die resultierenden Investitions- und Betriebskosten für die Wasserstofferzeugung, die Logistik und die Wasserstoffbereitstellung an der Tankstelle und
- die Gestehungskosten pro Kilogramm Wasserstoff als Vergleichswert zum Dieselpreis.

Als **Abschreibungszeitraum** für die Investitionen wurden 15 Jahre angenommen. Für den Windpark wurde analog der in Abschnitt 3.4.3 erwähnten Studie von Wallasch et al. (2016) angenommen, dass sich in einem **Direktvermarktungsmodell** nach Auslaufen der EEG-Einspeisevergütung ein Ertrag von 3 ct/kWh realisieren lässt. Bei ebenfalls aus dieser Studie abgeleiteten Stromgestehungskosten zum Weiterbetrieb von Windkraftanlagen von 3 ct/kWh, bedeutet dies, dass die Einnahmen aus dem Stromverkauf lediglich die Kosten decken, Gewinne also allein aus dem Verkauf von Wasserstoff erzielt werden müssten. Weiterhin fallen gemäß § 61b EEG 40 % der EEG-Umlage für Strom an, „*der zur Eigenversorgung genutzt wird, wenn in dem Kalenderjahr in der Anlage ausschließlich erneuerbare Energien oder Grubengas eingesetzt worden sind*“. Dies ist bei der vorgeschlagenen Wasserelektrolyse am Windpark der Fall, so dass bei einer in der Analyse entsprechend Referenzszenario der Agora Energiewende für 2019 angenommenen EEG-Umlage von 6,78 ct/kWh (Agora Energiewende, 2018) insgesamt 2,71 ct/kWh für eigengenutzten Strom anfallen würden, die die Wasserstoffgestehungskosten beeinflussen. Daher ist unter Umständen auch ein Betreibermodell nach § 61a Nummer 3 EEG zu überlegen, da hiernach die EEG-Umlage für Eigenversorgungen entfällt, „*wenn sich der Eigenversorger selbst vollständig mit Strom aus erneuerbaren Energien versorgt und für den Strom aus seiner Anlage, den er nicht selbst verbraucht, keine Zahlung nach Teil 3 in Anspruch nimmt*“. Diese Variante ohne Direktvermarktung

hat in der Folge Auswirkungen auf die Kombination der Windpark- und Elektrolyseurzielgröße. Weiterhin ist für die Logistik vom Windpark zur Tankstelle eine H₂BZ-Zugmaschine vorgesehen, was neben der angenommenen einen Pkw-Betankung pro Tag (siehe Anhang E) Auswirkungen auf die bereitzustellende Wasserstoffmenge hat. Da jedoch die zukünftige Verfügbarkeit eines solchen Fahrzeuges noch nicht geklärt ist, wurde parallel auch eine Versorgung mit einer Diesel-Zugmaschine betrachtet. Die **in der Analyse betrachteten grundsätzlichen Anwendungsfälle** sind also wie folgt:

- 1) Windparknutzung mit Direktvermarktung, Logistik mit H₂BZ-Zugmaschine,
- 2) Windparknutzung ohne Direktvermarktung, Logistik mit H₂BZ-Zugmaschine,
- 3) Windparknutzung mit Direktvermarktung, Logistik mit Diesel-Zugmaschine,
- 4) Windparknutzung ohne Direktvermarktung, Logistik mit Diesel-Zugmaschine,

Für alle vier untersuchten Anwendungsfälle wurden Förderquoten von 0 bis 80 % der Investitionskosten angenommen. Abbildungen 4.2 und 4.3 zeigen für die Anwendungsfälle 1 und 2 bzw. 3 und 4 jeweils die Wasserstoffgestehungskosten pro Kilogramm an der Tankstelle abgegebenen Wasserstoff für H₂BZ-Triebwagen / Pkw in Abhängigkeit von der Förderquote auf die Investitionskosten für die erforderliche Wasserstoffinfrastruktur gemäß Tabelle 3-6 in Abschnitt 3.3.2. Gezeigt wird hierbei die bei der gegebenen Windparkgröße jeweils günstigste Anlagenkonfiguration. In den Abbildungen 4.2 und 4.3 wird deutlich, dass mit keinem der gezeigten Anwendungsfälle der in Abschnitt 3.3.1 ermittelte H₂-Zielpreis von 6,70 €/kg unterschritten wird. Bei der für eine Wasserstofflogistik mit H₂BZ-Zugmaschine günstigsten Windparkoption von 3,9 MW installierter Leistung ohne Direktvermarktung beträgt die Differenz, wie in Abbildung 4.2 gezeigt wird, insgesamt 3,61 €/kg. Dies reduziert sich auf 2,78 €/kg für eine Logistikvariante mit Diesel-Zugmaschine bei der gleichen Windparkgröße ohne Direktvermarktung, wie in Abbildung 4.3 zu sehen ist. Die Gründe für den Preisunterschied zwischen den beiden Anwendungsfällen H₂BZ- und Diesel-Zugmaschine liegen vor allem darin, dass der Wasserstoffbedarf für den H₂BZ-Lkw als Teil der Gestehungskosten auf den an der Tankstelle abgegebenen Wasserstoff umgelegt wird. Zudem fallen, wie in Anhang E dargestellt wird, gleichzeitig höhere Abschreibungskosten für den H₂BZ-Lkw an, da dieser als neue Technologie komplett auf das Pilotprojekt umgelegt wird, während beim Diesel-Lkw lediglich eine Abschreibungsumlage pro gefahrenen Kilometer anfällt. Weiterhin werden für einen H₂BZ-Lkw höhere Wartungskosten erwartet als für einen Diesel-Lkw.

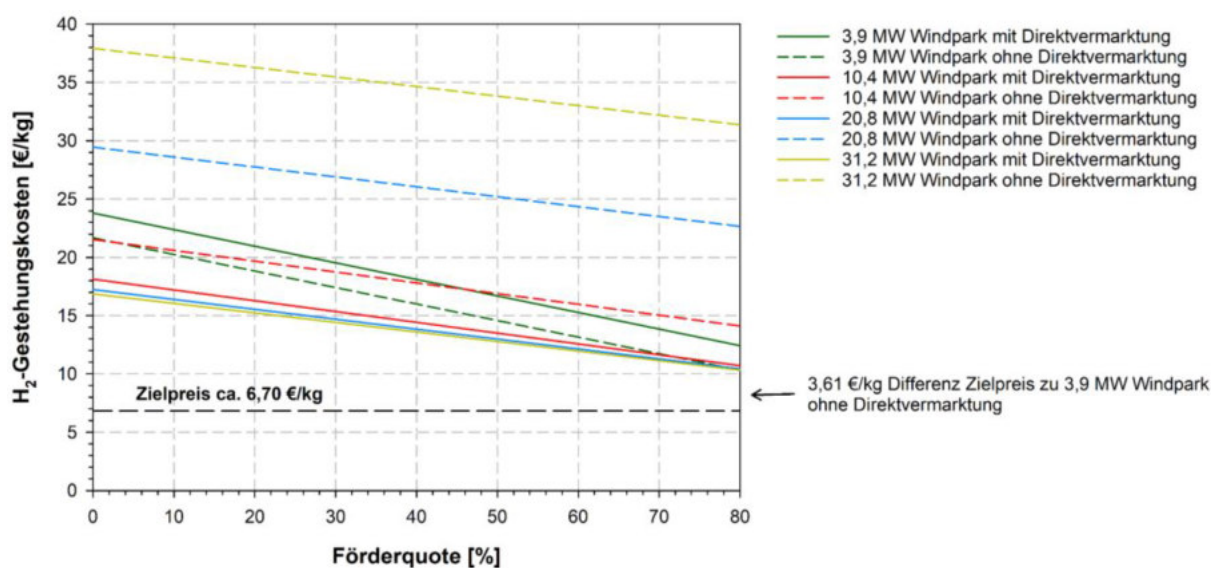


Abb. 4-2 - Wasserstoffgestehungskosten an der Tankstelle in Abhängigkeit von der Förderquote auf Investitionen, dem Vermarktungsmodell und der Windparkgröße bei einer Logistik mit H₂BZ-Zugmaschine.

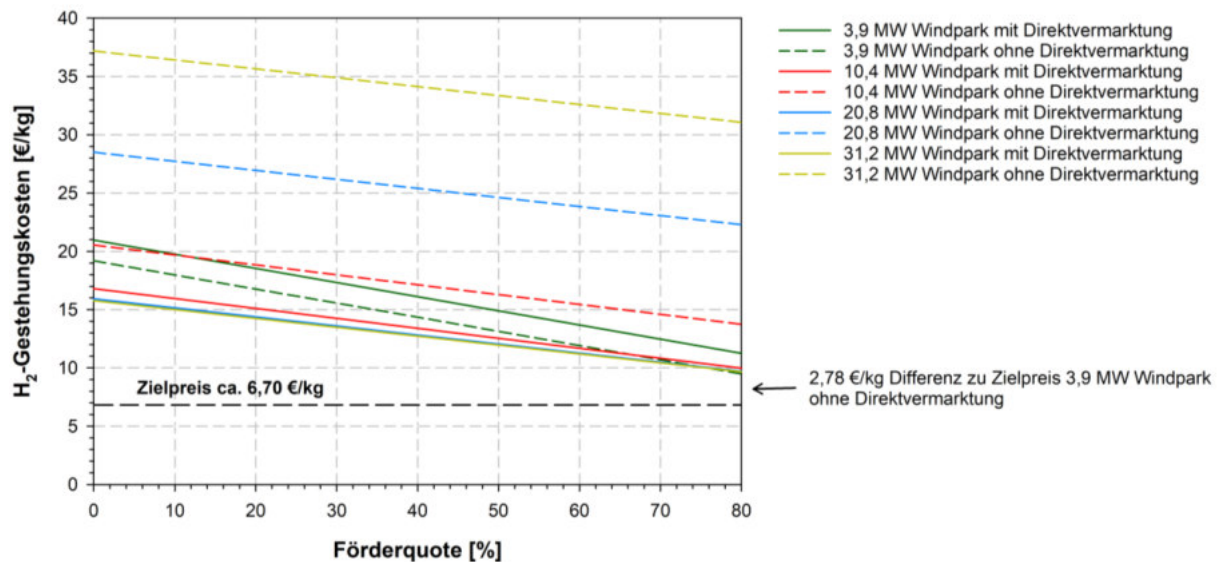


Abb. 4-3 - Wasserstoffgestehungskosten an der Tankstelle in Abhängigkeit von der Förderquote auf Investitionen, dem Vermarktungsmodell und der Windparkgröße bei einer Logistik mit Diesel-Zugmaschine.

Weiterhin wird aus Abbildungen 4-2 und 4-3 deutlich, dass sich bei der Annahme einer Direktvermarktung entsprechend den Anwendungsfällen 1 und 3 ein größerer Windpark positiv auf die H₂-Gestehungskosten auswirkt, da diese mit der installierten Windkraftleistung sinken. Dies liegt darin begründet, dass die erforderliche Elektrolyseurgröße und die Anzahl der Speichertrailer bei einer höheren Windparkleistung abnehmen. Bei der gegebenen Bahnlinie Rottenbach-Katzhütte sind allerdings, wie Abbildung 4-4 zeigt, ab etwa einer Windparkgröße > 15 MW installierter Leistung im Direktvermarktungsmodell nur noch geringe Veränderungen in den H₂-Gestehungskosten zu verzeichnen.

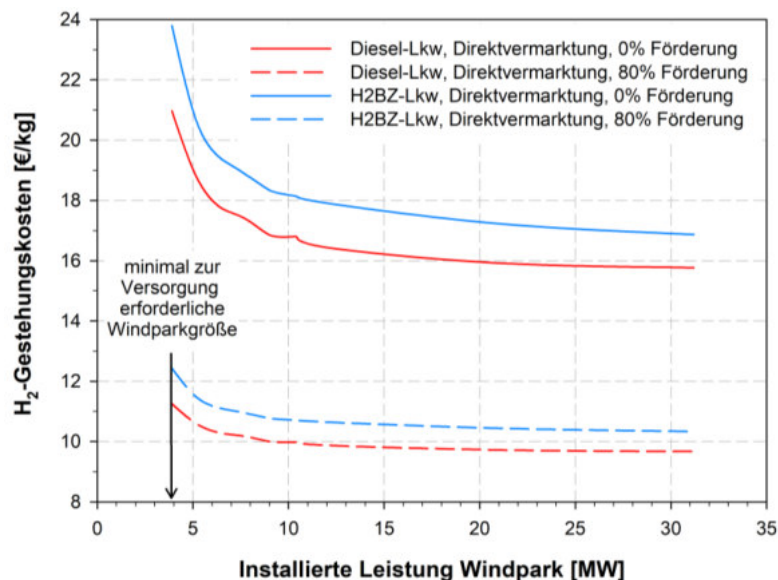


Abb. 4-4 – H₂-Gestehungskosten bei Direktvermarktung des für die Elektrolyse nicht benötigten Stroms in Abhängigkeit der Windparkgröße und Förderquote.

Bei einem Modell ohne Direktvermarktung gemäß den Anwendungsfällen 2 und 4, bei dem für die Elektrolyse nicht benötigter Strom ohne Vergütung ins öffentliche Netz abgegeben wird, kehrt sich das Verhältnis von H₂-Gestehungspreis und Windparkgröße um, so dass in diesem Fall der kleinstmögliche

Windpark die günstigste Variante darstellt. Dies liegt darin begründet, dass in diesem Modell sämtliche Kosten für den Weiterbetrieb der bestehenden Windkraftanlagen auf den Wasserstoff umgelegt werden müssen, während sich dies bei einem Direktvermarktungsmodell auf den eingespeisten Strom und den erzeugten Wasserstoff verteilt. Tabelle 4-2 fasst wesentliche Parameter für die jeweils günstigste Anlagenkonfiguration der vier Anwendungsfälle zusammen.

Tabelle 4-2 – Entsprechend den Wasserstoffgestehungskosten günstigste Anlagenkonfiguration für die vier grundlegenden Anwendungsfälle der Wasserstoffversorgung der Bahnlinie Rottenbach-Katzhütte.

Anwendungsfall	1	2	3	4
Logistik	H₂BZ-Zugmaschine (1 Lkw)		Diesel-Zugmaschine (1 Lkw)	
Direktvermarktung Elektrizität	0,03 €/kWh	ohne	0,03 €/kWh	ohne
Förderquote auf Investitionen	80 %	80 %	80 %	80 %
Windparkleistung	31,2 MW	3,9 MW	31,2MW	3,9 MW
Elektrolyseurleistung	1,0 MW	2,3 MW	1,0 MW	2,1 MW
Erforderliche Speichertrailer	8	21	7	14
H₂-Gestehungskosten	10,33 €/kg	10,31 €/kg	9,67 €/kg	9,48 €/kg
Energiekosten Alstom Coradia iLint	2,27 €/km Zug	2,27 €/km Zug	2,13 €/km Zug	2,09 €/km Zug

In Tabelle 4-2 wird deutlich, dass sich bei den günstigsten Anwendungsfällen ohne Direktvermarktung der für die Elektrolyse nicht benötigten Elektrizität jeweils leicht niedrigere H₂-Gestehungspreise erzielen lassen als mit einer Direktvermarktung. Allerdings werden diese Werte erst durch die angenommene hohe Förderquote von 80 % auf Investitionen erreicht, wie auch in Abbildungen 4-2 und 4-3 deutlich wird. Da die Gesamtinvestitionen jedoch durch die weit größere erforderliche Elektrolyseurleistung und die große Zahl der erforderlichen Speichertrailer weit höher als die Investitionskosten bei einer Lösung mit Direktvermarktung liegen, ist eine **Lösung ohne Direktvermarktung der nicht benötigten Elektrizität im Sinne eines sorgsamsten Umgangs mit öffentlichen Fördermitteln nicht gerechtfertigt**.

Bei den Anwendungsfällen 1 und 3 mit einer Direktvermarktung des Stromes ist weiterhin anzumerken, dass zum einen höhere Erträge als die angenommenen 3 ct/kWh eingespeiste Elektrizität erzielt werden können und zum anderen, dass die EEG-Umlage, die anteilig zu entrichten ist, Änderungen unterworfen ist. Entgegen den in Abbildung 4-5 gezeigten Prognosen liegt die EEG-Umlage 2019 nämlich nicht bei 6,78 ct/kWh (Agora Energiewende, 2018), sondern ist auf 6,405 ct/kWh gesunken (Bundesnetzagentur, 2018). Dies hat niedrigere H₂-Gestehungskosten zur Folge als in den oben gezeigten Berechnungsergebnissen angegeben wird. Diese **Unsicherheiten zur Entwicklung der EEG-Umlage und den Erträgen aus der Direktvermarktung** haben einen dynamischen Einfluss auf die H₂-Gestehungskosten bzw. die Wirtschaftlichkeit der Weiternutzung eines Windparks und lassen sich nur schwer vorhersagen. Eine Änderung der EEG-Umlage um - 20 % bzw. + 20 % hätte für den Anwendungsfall 1 in Tabelle 4-2 H₂-Gestehungskosten von 9,81 €/kg bzw. 10,85 €/kg zur Folge und für Anwendungsfall 3 9,19 €/kg bzw. 10,15 €/kg. Wie in Abbildungen 4-6 und 4-7 zu sehen ist, haben die bei den Anwendungsfällen 1 und 3 zu entrichtenden **40 % der EEG-Umlage für eigengenutzten Strom mit jeweils 25 % der Gesamtkosten einen insgesamt erheblichen Einfluss auf die H₂-Gestehungskosten**. Würde die EEG-Umlageverpflichtung wegfallen, wären H₂-Gestehungspreise von 7,75 €/kg bzw. 7,26 €/kg realisierbar, was die Kosten näher an den H₂-Zielpreis von 6,70 €/kg bringen würde, zumal der Zielpreis in einer Preisspanne zwischen 5,60 €/kg bis 7,75 €/kg liegt (siehe Abschnitt 3.3.1). **Auf Bundesebene sollte daher auf einen Wegfall der EEG-Umlage für zur Wasserelektrolyse eigengenutzten Strom hingewirkt werden.**

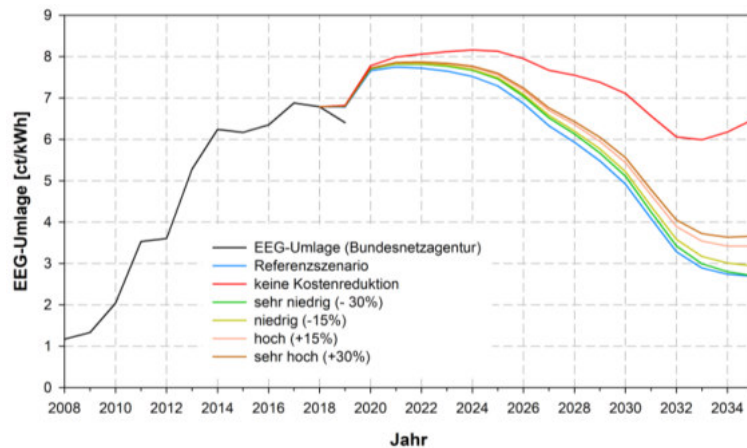


Abb. 4-5 – Verschiedene Szenarien zur Prognose der Entwicklung der EEG-Umlage (Datenquelle: Agora Energiewende, 2018)

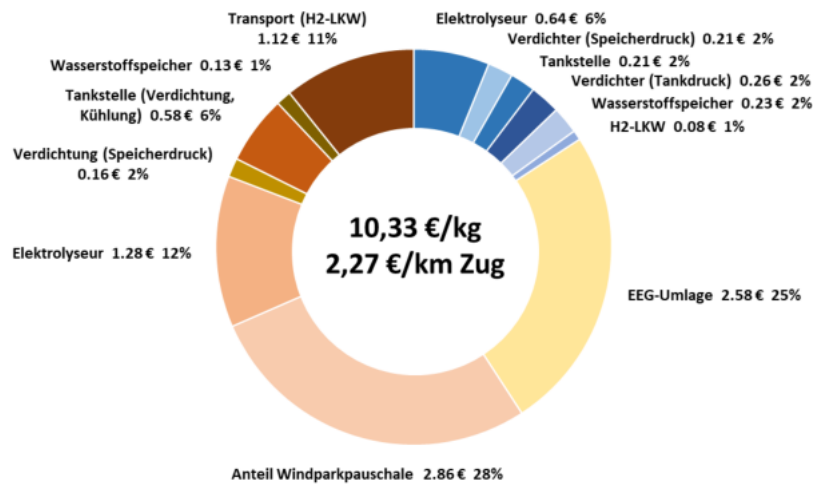


Abb. 4-6 – Verteilung der H₂-Gestehungskosten für Anwendungsfall 1, d.h. mit Direktvermarktung und Logistik mit H₂BZ-Zugmaschine bei einer Förderquote von 80 % auf Investitionen (Blautöne: Abschreibung Investitionen, Erdtöne: Betrieb und Wartung).

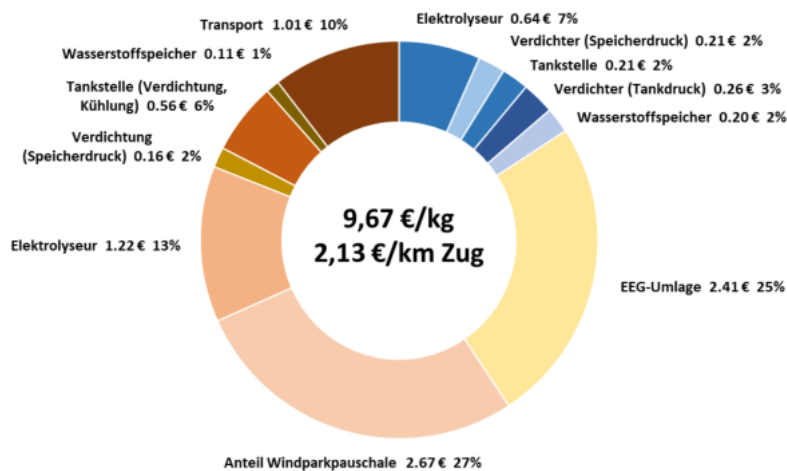


Abb. 4-7 – Verteilung der H₂-Gestehungskosten für Anwendungsfall 3, d.h. mit Direktvermarktung und Logistik mit Diesel-Zugmaschine bei einer Förderquote von 80 % auf Investitionen (Blautöne: Abschreibung Investitionen, Erdtöne: Betrieb und Wartung).

In Abbildungen 4-6 und 4-7 wird deutlich, dass bei einer Förderquote von 80 % auf Investitionen für die H₂-Infrastruktur neben der EEG-Umlage auch der Anteil der Windparkpauschale relativ hoch ausfällt. In diesem Zusammenhang wird daher **empfohlen, zu untersuchen, inwieweit die Prüfung für den Weiterbetrieb von Windkraftanlagen und notwendige Investitionen zur Ertüchtigung bestehender Windkraftanlagen für eine weitere Laufzeitperiode nach 20 Jahren Betrieb im Rahmen eines H₂BZ-Triebwagen-Pilotprojektes förderfähig wären**. Hierdurch könnte eine kleine Reduktion des Anteils der Windparkpauschale an den H₂-Gestehungskosten um etwa 10 % erzielt werden. Nichtsdestotrotz bleibt festzuhalten, dass die Analysen mit den im Rahmen der Machbarkeitsstudie vorliegenden Informationen ergeben haben, dass sich unter den derzeitigen Marktbedingungen **selbst mit einer Förderquote von 80 % auf die Investitionen zur Errichtung der Wasserstoffinfrastruktur keine mit Dieseltriebwagen wettbewerbsfähige Treibstoffversorgung für H₂BZ-Triebwagen auf Basis von Wasserelektrolyse an Windkraft-Altanlagen realisieren lässt**. Dies wird noch einmal in Abbildung 4-8 in zusammengefassten Kostenblöcken für die in Tabelle 4-2 detaillierten Anwendungsfälle 1 und 3 verdeutlicht.

Wie in Abschnitt 3.3.1 dargestellt wurde, liegen die spezifischen Energiekosten bei einem mit dem Alstom Coradia iLint vergleichbaren Dieseltriebwagen mit einem Dieserverbrauch von 1,4 l/km bei 1,47 €/km Zug. Die spezifischen Energiekosten für die H₂-Logistik mit H₂BZ-Lkw liegen hingegen, wie in Abbildung 4-6 gezeigt wird, mit 2,27 €/km Zug um 54 % höher als dieser Wert, während bei der Nutzung eines Diesel-Lkw mit 2,13 €/km Zug ein 45 % höherer Wert zu verzeichnen ist (Abbildung 4-7). Hierbei ist anzumerken, dass diese Energiekosten sich auf die reinen Gestehungskosten beziehen, also noch keinen Gewinn für die Betreiber beinhalten. Die **Wirtschaftlichkeit kann folglich nicht der alleinige Faktor in der Entscheidung zur Umsetzung eines H₂BZ-Triebwagen-Pilotprojektes in Thüringen sein**. Wenn der in Abbildung 4-8 gezeigte Kostenanteil der H₂-Infrastruktur an den gesamten Gestehungskosten betrachtet wird und eine Versorgung mit über Dampfreformierung aus Erdgas gewonnenem Wasserstoff zu ca. 1,50 €/kg (Pregger et al., 2008) angesetzt wird, wäre eine Wirtschaftlichkeit jedoch bereits gegeben. Allerdings sollten auch die mit der angestrebten vollständig klimaneutralen Logistikkette einhergehenden **Emissionsreduktionen** betrachtet werden. Auf der **Bahnlinie Rottenbach – Katzhütte** lassen sich hierdurch allein für den Eisenbahnbetrieb jährlich im Vergleich zur heute eingesetzten Baureihe 641, die einen Dieserverbrauch von 0,87 l/km aufweist, insgesamt etwa **630 t/a an CO₂-Emissionen einsparen**. Dies entspricht in CO₂-Äquivalenten einer Reduktion in der Größenordnung der jährlichen Emissionen von 57 Bundesbürgern im Bezugsjahr 2016 (UBA, 2018a).

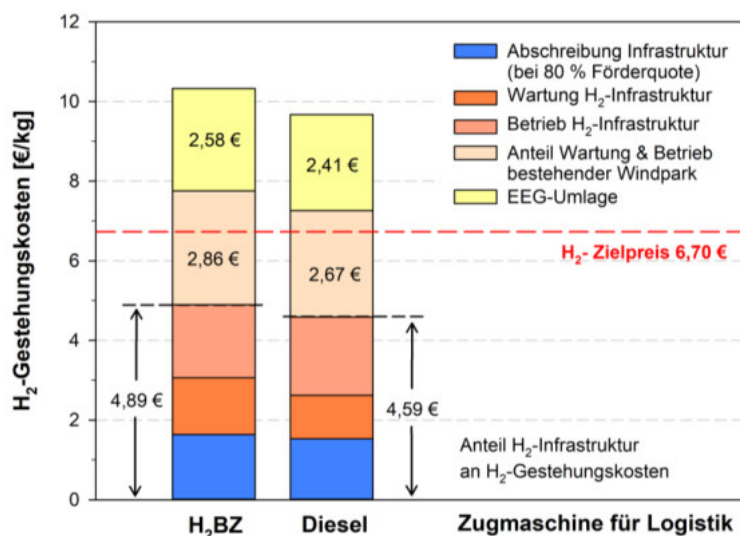


Abb. 4-8 – Kostenanteile an den H₂-Gestehungskosten bei einem Betreibermodell mit Direktvermarktung.

Abschließend ist anzumerken, dass die Vergleichsrechnungen zur Ermittlung des H₂-Zielpreises in Abschnitt 3.3.1 auf Basis von zweiteiligen Triebwagen wie dem Alstom Coradia iLint (BR 654) durchgeführt wurden, um ähnliche Fahrzeuge miteinander zu vergleichen. Da jedoch derzeit mit dem Alstom Coradia A TER (BR 641) einteilige Triebwagen auf der Bahnlinie Rottenbach – Katzhütte eingesetzt werden, deren Dieselverbrauch wie oben angeführt laut Angaben der Oberweißbacher Berg- und Schwarzatalbahn lediglich 0,87 l/km beträgt anstatt der in Abschnitt 3.3.1 angenommenen 1,4 l/km für einen zweiteiligen Vergleichstriebwagen, stellt sich der Vergleich der Treibstoffkosten im konkreten Fall ungünstiger dar als angenommen. Dies bedeutet, dass im direkten Vergleich der beiden Fahrzeuge der H₂-Zielpreis sogar noch unter dem Wert von 6,70 €/kg bei 4,15 €/kg liegen müsste. Dies ist jedoch kein gangbarer Vergleich, da verschiedene Triebwagengrößen miteinander verglichen würden. Allerdings **sind im Rahmen einer Ausschreibung der Bahnlinie mit alternativen Antrieben die aus dem größeren Fahrzeug resultierenden Treibstoffmehrkosten für den Betreiber zu berücksichtigen**. Solange kein kleinerer H₂BZ-Triebwagen marktverfügbar ist, hat der Betreiber nämlich durch das größere Fahrzeug einen betrieblichen Nachteil, auf den er keinen Einfluss nehmen kann.

4.1.4 Abschätzung der Investitionskosten und Förderung

Für eine öffentliche Förderung eines Pilotprojektes zum Einsatz von H₂BZ-Triebwagen in Thüringen sind die Investitionskosten maßgeblich, da ausschließlich vorhabenbezogene Investitionen förderfähig sind (siehe auch Abschnitt 5.3). Tabelle 4-3 gibt daher auf Basis der Angaben aus Tabelle 3-6 in Abschnitt 3.3.2 sowie den Berechnungen zur Elektrolyseurzielgröße in Abschnitt 4.1.3 eine **erste Abschätzung der Investitionskosten** für die Umsetzung eines H₂BZ-Triebwagen-Pilotprojektes auf der Bahnlinie Rottenbach – Katzhütte. Diese sind im Rahmen einer Vorplanung entsprechend den zum Zeitpunkt der Planung vorliegenden Marktbedingungen zu verifizieren und weiter ausdifferenzieren.

Für die Förderung wurde **grundsätzlich eine Förderquote von 80 % angenommen**, da für das Pilotprojekt, wie in Abschnitt 4.1.3 dargestellt wurde, nach der derzeitigen Kostenstruktur selbst mit dieser Förderquote ein wettbewerbsfähiger Wasserstoffgestehungspreis zu Dieseltreibstoff nicht zu erreichen ist. Dies liegt in den Investitionskosten aber insbesondere auch in den höheren Betriebskosten für die Wasserstoffbereitstellung aus Erneuerbaren-Energien-Anlagen gegenüber einer Versorgung mit Diesel begründet.

Die Kosten für einen H₂BZ-Triebwagen liegen derzeit um etwa 1.000.000 € höher als für einen vergleichbaren Diesel-Triebwagen, so dass bei einer Förderquote von 80 % der entstehenden Mehrkosten gegenüber einem Standardfahrzeug 800.000 € an Fördermitteln ausgezahlt werden könnten. Um die insgesamt entstehenden Mehrkosten für das Pilotprojekt über die gesamte Betriebszeit zumindest in Teilen zu kompensieren, erscheint in diesem Fall jedoch die Verwendung einer alternativen Berechnungsgrundlage gerechtfertigt. Wie in Tabelle 4-3 dargestellt, wird daher **empfohlen, für die Anschaffung von H₂BZ-Triebwagen eine Förderquote von 25 % der Gesamtinvestition anzusetzen**. Aufgrund der höheren Betriebskosten für die angestrebte Wasserstoffbereitstellung aus erneuerbarer Elektrizität gegenüber einer großtechnischen Wasserstofferzeugung auf Basis fossiler Brennstoffe ist hierdurch über den Ausschreibungszeitraum hinweg keine Beeinflussung des Wettbewerbs zu erwarten.

Wie Tabelle 4-3 zu entnehmen ist, belaufen sich die ermittelten **Netto-Investitionskosten auf rund 18,5 Mio. € bei einer Gesamtfördersumme von knapp 9,3 Mio. €**. Wenn alternativ zur H₂BZ-Zugmaschine eine Dieselizeugmaschine für den Transport des Wasserstoffs vom Windpark zur Tankstelle angesetzt wird, dann reduzieren sich die Netto-Gesamtinvestitionen durch den Wegfall der H₂BZ-Zugmaschine sowie

die dann nur noch erforderlichen 7 Speichertrailer auf etwa 18 Mio. € und die Fördermittelhöhe auf 8,9 Mio. €. Die **Investitionskosten können im Einzelfall jedoch noch steigen**, da zum Beispiel bei Vorliegen von Altlasten zusätzliche Kosten für die Vorbereitung des Tankstellenareals entstehen können, was bei bestehenden Bahnanlagen nicht auszuschließen ist. Auch ist es möglich, dass sich bei der Betrachtung eines konkreten Windparks das Winddargebot anders darstellt als angenommen, wodurch sich die Anzahl der erforderlichen Speichertrailer erhöhen könnte. Weitere, bisher nicht berücksichtigte Kosten können zum Beispiel auch dadurch entstehen, wenn die Tankstelle über ihre reine Funktionalität hinaus eine architektonische Gestaltung erfahren soll. Zudem sind die Tabelle 4-3 zugrundeliegenden Preise, wie bereits in Abschnitt 3.3.2 dargestellt wurde, zum Teil mit großen Unsicherheiten versehen, so dass **Mehrkosten von bis zu 30 % möglich** sind. Diese werden als Budgetpuffer berücksichtigt.

Tabelle 4-3 – Netto-Investitionskosten und Fördermittelhöhe entsprechend den genannten maximalen Förderquoten für ein H₂BZ-Triebwagen-Pilotprojekt auf der Eisenbahnstrecke Rottenbach – Katzhütte auf Basis der in Tabelle 3-6 in Abschnitt 3.3.2 dargestellten grundlegenden Annahmen für den Anwendungsfall 1 aus Abschnitt 4.1.3 ohne Gleis- und Straßenanbindungskosten. (Die Alternativlösung 1 mit Diesel-Zugmaschine entspricht Anwendungsfall 3 in Abschnitt 4.1.3.)

Bereich	Investition	Stückkosten [€]	Größe	Investitionskosten [€]	Förderquote	Fördermittelhöhe [€]
a) Fahrzeug	H ₂ BZ-Triebwagen	5.000.000	2 Stück	10.000.000	0,25	2.500.000
	Umrüstung Werkstatt	450.000	1 Stück	450.000	0,80	360.000
b) Off-Site-Elektrolyse	Elektrolyse (100 bar) mit Peripherie pro kW	3.000	1,0 MW	3.000.000	0,80	2.400.000
	Verdichtung (auf Speicherdruck 300 bar)	500.000	2 Stück	1.000.000	0,80	800.000
c) Transportlogistik	Speichertrailer mit 300 bar Stahlflaschen	135.000	8 Stück**	1.080.000	0,80	864.000
	H ₂ BZ-Zugmaschine (Basislösung)*	385.000	1 Stück	385.000	0,80	308.000
	Diesel-Zugmaschine (Alternativlösung 1)**	(110.000)	(1 Stück)	(0)	(0,00)	(0)
	H ₂ BZ-Zugmaschine (Alternativlösung 2)***	(820.000)	(1 Stück)	(820.000)	(0,80)	(656.000)
d) H₂-Tankstelle	Tankstelleninfrastruktur	1.000.000	1 Stück	1.000.000	0,80	800.000
	Verdichtung (Hochdruckspeicher, Betankung)	600.000	2 Stück	1.200.000	0,80	960.000
	Geländevorbereitung und Befestigung pro m ²	120	3.000 m ²	360.000	0,80	288.000
Summen (netto)	Basislösung			18.475.000	0,50	9.280.000
	Alternativlösung 1			17.955.000	0,49	8.864.000
	Alternativlösung 2			18.910.000	0,51	9.628.000
	Basislösung + 30 % Budgetpuffer			24.017.500	0,50	12.064.000

* Basislösung: Angenommener Preis für ein Serienfahrzeug auf Basis von Expertenaussagen.

** Alternativlösung 1: Bei einer Lösung mit Diesel-LKW sind nur 7 Speichertrailer erforderlich. Es erfolgt keine Umlage der Investitionskosten auf das Pilotprojekt, sondern eine Abschreibungsumlage pro gefahrenem Kilometer (siehe Anhang E).

*** Alternativlösung 2: Kosten einer Einzelanfertigung gemäß Machbarkeitsstudie, TU Ilmenau (Augsburg et. al, 2018).

Insbesondere der in Tabelle 4-3 als Basislösung angegebene Preis für eine **H₂BZ-Zugmaschine** ist mit einer hohen Unsicherheit behaftet, da noch keine entsprechenden Fahrzeuge als Serienprodukt verfügbar sind. Der Preis reflektiert in Anlehnung an die Investitionskosten für Diesel-Zugmaschinen eine von Experten eingeholte Schätzung für zu erwartende Marktpreise. Da, wie in Abschnitt 3.2.3 erwähnt wurde, mit der **Markteinführung solcher Zugmaschinen erst bis Mitte der 2020er Jahre zu rechnen** ist, käme dies voraussichtlich für ein H₂BZ-Triebwagen-Pilotprojekt in Thüringen nicht rechtzeitig. Eine Alternative hierzu, die gegenüber der sonst notwendigen Lösung mit Diesel-Lkw eine vollständig klimaneutrale Logistikkette gewährleisten würde, bietet der **Umbau einer Diesel-Zugmaschine als Einzelanfertigung**. Gemäß der Machbarkeitsstudie der TU Ilmenau zur Adaption eines Diesel-Lkw mit einem H₂BZ-Antrieb, die die grundsätzliche Machbarkeit eines solchen Fahrzeugumbaus konstatiert, ist für einen umgebauten Lkw von **Netto-Investitionskosten von etwa 820.000 €** auszugehen (Augsburg et. al, 2018). Dieser in Tabelle 4-3 als Alternativlösung 2 dargestellte Fall resultiert in der Folge in Netto-Investitionskosten von ca. 18,9 Mio. € für das Pilotprojekt bei einer Fördersumme von 9,6 Mio. €.

Zusätzlich zu den in Tabelle 4-3 aufgeführten Kosten **entstehen entsprechend den Gegebenheiten am Tankstellenstandort unter Umständen noch weitere Kosten** für zum Beispiel Gleisertüchtigungen, einen Gleisneubau oder aber die Schaffung einer geeigneten Straßenanbindung zur Belieferung der Tankstelle mit Wasserstoff. Auch am Windpark sind solche Zusatzkosten zur straßenseitigen Erschließung des Elektrolyseurstandortes möglich. Da im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie kein spezifischer Windpark untersucht wurde, ist der mögliche Bedarf hierfür schwer abzuschätzen. Tabelle 4-4 fasst ausgehend von der Basislösung die **Gesamtkosten des Pilotprojektes für die Eisenbahnstrecke Rottenbach – Katzhütte** zusammen, unter der Annahme, dass der in Abschnitt 4.1.5 empfohlene Standort für die Wasserstofftankstelle gewählt wird. Hierfür sind ein Gleisneubau von etwa 250 m mit Weiche sowie eine Ertüchtigung der Zufahrt für den Schwerlastverkehr auf einer Länge von 1,1 km erforderlich. Für die Erschließung am Windpark wurde der Neubau einer Zuwegung von 1 km Länge angenommen.

Tabelle 4-4 – Gesamtkosten für ein H₂BZ-Triebwagen-Pilotprojekt auf der Eisenbahnstrecke Rottenbach – Katzhütte inklusive Erschließungskosten für die Verkehrsinfrastruktur am gemäß Abschnitt 4.1.5 gewählten Tankstellenstandort sowie am Windpark (Neubaubedarf am Windpark: Annahmen).

Bereich	Investition	Stückkosten [€]	Größe	Investitionskosten [€]	Förderquote	Fördermittelhöhe [€]
a) Grundinvestition	Basislösung entsprechend Tabelle 4-3	--	--	18.475.000	0,50	9.280.000
b) Erschließung Tankstelle	Befestigung existierende Schotterstraße auf 5 m Breite pro m ²	100	1,1 km	550.000	0,80	440.000
	Gleisneubau 250 m mit Weiche und Einbindung in Leittechnik	--	pauschal	1.000.000	0,80	800.000
c) Erschließung Windpark	Neubau Zuwegung zur Elektrolyseanlage auf 5 m Breite pro m ²	120	1,0 km	600.000	0,80	480.000
	Neubau Wasserleitung, Einziehverfahren pro m	175	2,0 km	350.000	0,80	280.000
Summen	Investition (netto)			20.975.000	0,53	11.280.000
	Mehrwertsteuer (19 %)			3.985.250	0,53	2.143.200
	Investition (brutto)			24.960.250	0,53	13.423.200

Die in Tabelle 4-4 angegebenen Preise für Straßenbau, Wasserleitungen und Gleisanlagen wurden in Expertengesprächen mit Ingenieurbüros sowie Versorgungs- und Eisenbahnunternehmen ermittelt. Die resultierenden **Gesamtkosten für das Pilotprojekt in der Basislösung belaufen sich auf 21 Mio. € netto (25 Mio. € brutto)** bei einer Fördersumme von 11,3 Mio. € netto (13,4 Mio. € brutto). Unter Beachtung des in Tabelle 4-3 spezifizierten Budgetpuffers von bis zu etwa 5,5 Mio. € auf die Basislösung können die maximalen Kosten für das Pilotprojekt unter Berücksichtigung von möglichen Mehrkosten in einem Korridor von bis zu rund 26,5 Mio. € netto (31,5 Mio. € brutto) angenommen werden, wobei jedoch die genaue Marktentwicklung der nächsten Jahre nur schwer abzuschätzen ist. Im einsetzenden Markthochlauf der Wasserstofftechnologien sind für die technischen Komponenten der Wasserelektrolyse und Wasserstofftankstelle mittelfristig Preisreduktionen zu erwarten.

4.1.5 Standortanalyse Wasserstofftankstellen

Derzeit befindet sich die Tankstelle zur Betankung der Dieseltriebwagen der Bahnlinie Rottenbach – Katzhütte in Katzhütte. Dieser Standort ist aus Sicht der Wasserstofflogistik wenig günstig, da er nicht über Bundesstraßen erreicht werden kann und Höhenunterschiede zu überwinden sind. Dies ist insbesondere in den Wintermonaten von Nachteil. Daher wird **empfohlen, eine neu zu planende Wasserstofftankstelle im Rahmen eines H₂BZ-Triebwagen-Pilotprojektes nicht in Katzhütte vorzusehen, sondern in Rottenbach**, das über die B88 aus Ilmenau und Rudolstadt erreichbar ist. Für den Bahnbetrieb entstehen hierdurch keine Veränderungen, da wie bisher auch nach Betriebsschluss je ein Fahrzeug in Rottenbach und Katzhütte abgestellt wird (siehe Abbildung 4.1). Lediglich der Betankungsort würde sich ändern.

Die Auswahl eines geeigneten Standortes für die Wasserstofftankstelle in Rottenbach erfolgte entsprechend den in Abschnitt 3.2.1 aufgezeigten Kriterien und unter Berücksichtigung des in Abschnitt 3.2.2 in Abbildung 3-8 gezeigten grundsätzlichen Tankstellenplans für eine **Liefer-Tankstelle**. Hierzu wurde eine Begehung in Rottenbach durchgeführt, auf der die in Abbildung 4-9 gezeigten vier grundsätzlich denkbaren Standortoptionen einer näheren Betrachtung unterzogen wurden. Abbildung 4-10 zeigt Fotos dieser 4 Standorte.

Tabelle 4-5 fasst die Auswertung der in Abbildungen 4-9 und 4-10 gezeigten Standorte anhand der in Abschnitt 3.2.1 aufgestellten Kriterien zusammen (siehe auch Tabelle 3-4). Gemäß Tabelle 4-5 ist schlussendlich nur Standortoption 1 nördlich der Bahngleise unter allen Gesichtspunkten für die Einrichtung einer Wasserstofftankstelle geeignet, allerdings mit der Einschränkung, dass eine Anlieferung des Wasserstoffs aus Richtung Osten erfolgen müsste, da die Durchfahrtshöhe der Eisenbahnunterführung Storchsdorfer Weg westlich des Bahnhofes Rottenbach zu gering für Lkw ist. Dies hat zur Folge, dass der Zufahrtsweg, der nordöstlich der Eisenbahnbrücke über die B88 von der Bundesstraße abzweigt, ertüchtigt werden müsste, um für den Schwerlastverkehr zur Tankstelle befahrbar zu sein (siehe auch Tabelle 4-4).

Grundsätzlich **wird empfohlen, Standortoption 1 für den Bau einer Wasserstofftankstelle vorzusehen** und diesen Standort einer näheren Untersuchung zu unterziehen. Hierbei sind insbesondere die verkehrstechnische Eignung und der vorhandene Baugrund zu berücksichtigen.

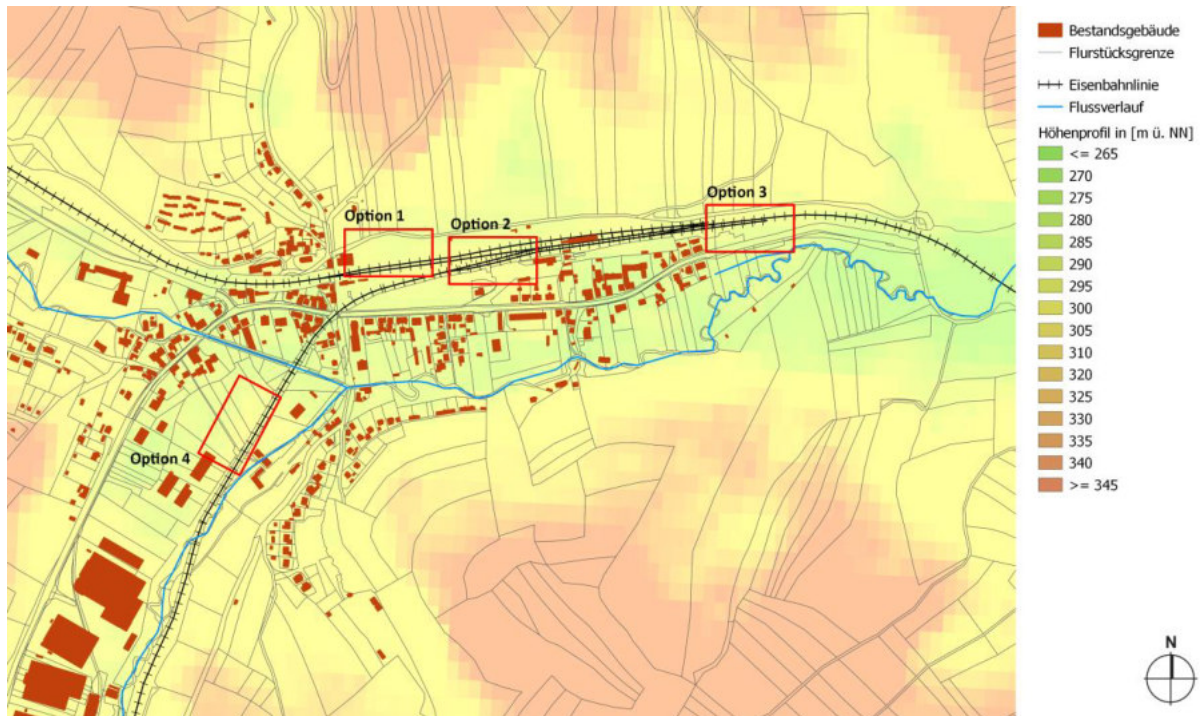


Abb. 4-9 – Untersuchte potentielle Standorte für eine Wasserstofftankstelle zur kombinierten Betankung von Schienen- und Straßenfahrzeugen in Rottenbach (Datenquellen: Geofabrik GmbH, 2018; NASA, 2018; TLGB, 2018).



Abb. 4-10 – Fotos der untersuchten potentiellen Standorte für eine Wasserstofftankstelle in Rottenbach (oben links: Option 1, oben rechts: Option 2, unten links: Option 3, unten rechts: Option 4).

Tabelle 4-5 – Auswertung der Standortoptionen anhand der Kriterien aus Abschnitt 3.2.1 zur Standortauswahl von Wasserstofftankstellen im Eisenbahnbetrieb mit Anbindung zum Straßenverkehr.

	Option 1	Option 2	Option 3	Option 4
Eisenbahnbetrieb	geeignet	geeignet	geeignet	geeignet
Tankstellengelände	geeignet	ungeeignet: beengte Platzverhältnisse	ungeeignet: starke Böschung, beengte Platzverhältnisse	geeignet
Straßenanbindung	geeignet*	geeignet	geeignet	bedingt geeignet: öffentliche Straßenanbindung schwer herstellbar
Sonstige Kriterien	geeignet	geeignet	ungeeignet: Randlage, nur Teilgelände in Bahneigentum	ungeeignet: Flächen kein Bahneigentum, wenig repräsentative Lage

* Einschränkung: Lkw-Anlieferung muss aus Richtung Osten erfolgen (Brückendurchfahrt im Westen nicht möglich wegen zu geringer Durchfahrthöhe)

Neben der grundsätzlichen Machbarkeit sind die **konkreten Vorteile der Standortoption 1** wie folgt:

- Der Standort ist sehr öffentlichkeitswirksam gelegen mit einer guten Sichtbarkeit vom Bahnhof Rottenbach, dessen Gebäude derzeit im Rahmen der IBA Thüringen ertüchtigt wird.
- Der Standort liegt in unmittelbarer Nähe zum bestehenden Stellwerk und kann von dort aus visuell überwacht werden.
- Das Gelände liegt abseits von bestehender Wohnbebauung.
- Das Gelände befindet sich in Bahneigentum und ist derzeit für keine andere Nutzung vorgesehen.
- Für die Pkw-Betankung ist eine leichte Zugänglichkeit von der B88 über den Storchsdorfer Weg gegeben.
- Bei dem Standort handelt es sich um ein historisches Bahngelände, auf dem früher Kohle umgeschlagen bzw. gelagert wurde. Damit lässt sich ein Bogen spannen von der Bahnhistorie bis hin zum emissionsfreien Bahnbetrieb des 21. Jahrhunderts.

Abbildungen 4-11 und 4-12 zeigen schematisch am vorgeschlagenen Standort die Einordnung einer Wasserstofftankstelle in die nähere Umgebung bzw. eine mögliche Konfiguration der Tankstelle mit Erweiterungsmöglichkeiten für zusätzliche Speichertrailer, für den Fall, dass in Zukunft weitere Schienenfahrzeuge in Rottenbach betankt werden sollen. Wie in Abbildung 4-11 zu sehen ist, erfordert der Bau einer Wasserstofftankstelle am vorgeschlagenen Standort die Errichtung eines neuen Stumpfgleises auf dem Gelände. Die Geländevoraussetzungen hierfür sollten gut sein, da an dieser Stelle bereits in der Vergangenheit Gleise gelegen haben. Abbildung 4-12 detailliert den Tankstellenbereich in einer näheren Ansicht, wobei jedoch anzumerken ist, dass es sich hierbei um eine rein schematische Einpassung in das Grundstück handelt und nicht bereits um eine konkrete Tankstellenplanung. Die Pkw-Zufahrt erfolgt von Westen während, wie bereits oben erwähnt wurde, die Wasserstoffanlieferung und Zufahrt zur Bus- bzw. Lkw-Betankung aus Richtung Osten erfolgen müssen. Abbildung 4-12 zeigt weiterhin den möglichen Ablauf der Anlieferung eines Wasserstofftrailers von der Zufahrt (Lkw 1) über das Rangieren (Lkw 2) bis zur Einpassung (Lkw 3). Dargestellt sind insgesamt 7 Stellplätze für Speichertrailer in einem erweiterten Ausbau der Liefer-Tankstelle, wobei für die Sicherstellung des Betriebs der

Bahnlinie Rottenbach-Katzhütte mit einer 5-Tage-Reserve entsprechend Abschnitt 4.1.1 lediglich Stellplätze für 4 bis 5 Speichertrailer erforderlich sind. (Es wird immer ein zusätzlicher freier Stellplatz zur erforderlichen Gesamtanzahl an Speichertrailern an der Tankstelle benötigt, um einen einfachen Austausch der Trailer zu ermöglichen.) Insgesamt wird deutlich, dass der **Standort von den räumlichen Gegebenheiten her gut für den Bau einer Wasserstofftankstelle geeignet** ist und bei Bedarf Erweiterungsmöglichkeiten vorhanden sind.

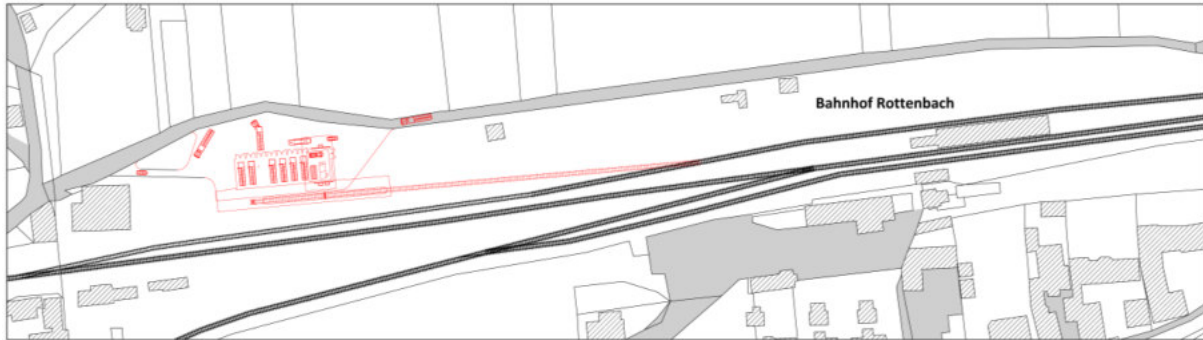


Abb. 4-11 – Lageplan mit schematischer Einpassung einer Wasserstofftankstelle am favorisierten Tankstellenstandort am Bahnhof Rottenbach.

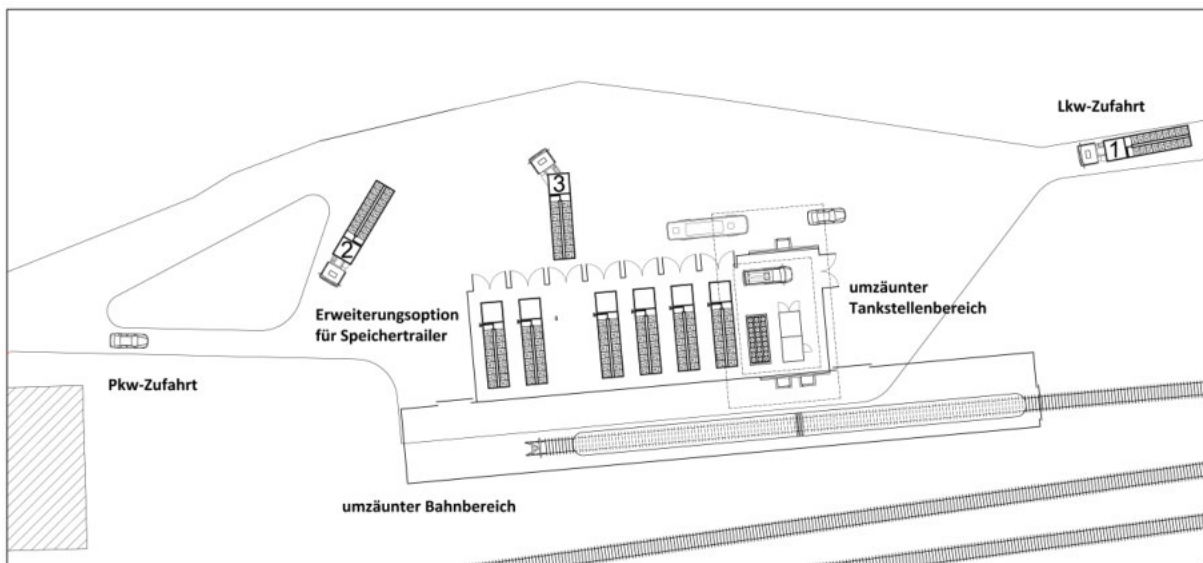


Abb. 4-12 – Schematische Darstellung einer H₂-Liefer-Tankstelle am Bahnhof Rottenbach.

4.2 Ausblick Bahnlinie Erfurt – Nordhausen

4.2.1 Ermittlung der betrieblichen Rahmenbedingungen

Die Bahnlinie Erfurt – Nordhausen wäre, wie Abschnitt 3.1.2 dargestellt wurde, mit ihrem derzeitigen Betriebskonzept gut für eine Nutzung mit dem Alstom Coradia iLint geeignet. Allerdings wird sich dies durch den geplanten Ausbau mit einem neuen Betriebskonzept ändern. Wie jedoch in Abschnitt 3.1.3 hervorgehoben wurde, ist in der Folge einer erfolgreichen Evaluation des Pilotbetriebs auf der Bahnlinie Rottenbach – Katzhütte eine Umsetzung auf einer Eisenbahnstrecke mit einem hohen Fahrgastaufkommen zu empfehlen, sofern dafür geeignete H₂BZ-Triebwagen marktverfügbar sind. Hierfür bietet sich in Thüringen insbesondere die Bahnlinie von Erfurt nach Nordhausen an.

Die einfache Fahrstrecke zwischen Erfurt und Nordhausen beträgt zurzeit im Mittel 77 km, d.h. je nach gefahrenem Streckenabschnitt 75 oder 79 km. Wie in Abbildung 4-13 zu sehen ist, werden derzeit von Montag bis Freitag von zwei Dieseltriebwagen je 12 Fahrten und von einem Dieseltriebwagen 10 Fahrten durchgeführt. Damit liegt die resultierende tägliche Fahrleistung je Triebwagen im Schnitt bei 11,3 Fahrten und insgesamt etwa 873 km/d. Ein Triebwagen mit 12 Fahrten absolviert hierbei maximal 924 km/d, was noch innerhalb der angegebenen Reichweite von bis zu 1.000 km des Alstom Coradia iLint liegt (siehe auch Abschnitt 3.3.1). Allerdings würde unter Umständen im Tagesverlauf ein zusätzlicher Betankungsprozess erforderlich. Aus dem derzeitigen Betriebsregime ergeben sich die **folgenden betrieblichen Rahmenbedingungen** für die Planung der Wasserstoffversorgung der Bahnlinie:

- Gesamtfahrleistung drei H₂BZ-Triebwagen: 2620 km/d
- Mittlerer Wasserstoffbedarf H₂BZ-Triebwagen gemäß Abschnitt 3.3.1: 0,22 kg/km
- H₂-Tagesbedarf der H₂BZ-Triebwagen: 576 kg/d
- Erforderliche Tankstellenzahl entsprechend Betriebsregime: 2 Stück
- H₂-Speicherbedarf für 5 Tage Reserve gemäß Abschnitt 3.4.1: 2.900 kg
- Erforderliche Speichertrailer zu 300 bar und 240 kg H₂ gemäß Abschnitt 3.2.3: 12 Stück



Abb. 4-13 – Fahrplan Erfurt – Nordhausen (oben) und Nordhausen – Erfurt (unten) von Montag bis Freitag mit Angabe des jeweiligen Start- und Endbahnhofs (schwarze Pfeile).

Entsprechend dem Betriebsregime wäre zwingend der Bau von zwei Wasserstofftankstellen erforderlich, mit je einer Tankstelle in Erfurt und in Nordhausen, da ansonsten täglich 4 zusätzliche Leerfahrten notwendig würden. Dies würde dem heutigen System an Dieseltankstellen entsprechen (siehe auch Kartenmaterial in Anhang A).

4.2.2 Abschätzung der H₂-Gestehungskosten und der Investitionskosten

Eine Analyse mit der in Abschnitt 3.4.6 beschriebenen Tabellenkalkulation zur Wasserstoffversorgung der Bahnlinie Erfurt – Nordhausen über einen Windpark mit einer installierten Windkraftleistung von 31,2 MW in einer Entfernung von etwa 40 km von Erfurt und etwa 75 km von Nordhausen resultiert in erforderlichen Elektrolyseurgrößen von 4,4 MW für eine Wasserstofflogistik mit H₂BZ-Zugmaschinen bzw. 4,0 MW mit Diesel-Zugmaschinen. Um die Versorgung zu gewährleisten sind jeweils zwei Zugmaschinen erforderlich. Bei einem Abschreibungszeitraum von 15 Jahren, einer Berücksichtigung von direkt vermarktetem Strom und einer Förderquote von 80 % auf Investitionen der H₂-Infrastruktur wurden hierbei **H₂-Gestehungskosten von 11,57 €/kg bzw. 10,59 €/kg** ermittelt. Dies resultiert in spezifischen Energiekosten von 2,55 €/km Zug bzw. 2,33 €/km Zug. Hiermit liegen die H₂-Gestehungskosten höher als in Abschnitt 4.1.3 für die Bahnlinie Rottenbach – Katzhütte beschrieben. Die Gründe hierfür sind die ungünstigere Zahl an Vollbenutzungsstunden der Elektrolyseurmodule bei der gleichen Windparkgröße, die größere Anzahl an erforderlichen Speichertrailern, der höhere logistische Aufwand mit zwei Zugmaschinen und Tankstellenstandorten sowie die höheren Kosten für den Bau und die Vorhaltung von zwei Wasserstofftankstellen. Tabelle 4-6 fasst die zu erwartenden Investitionskosten zusammen, wobei jedoch wiederum anzumerken ist, dass diese mit hohen Unsicherheiten behaftet sind, so dass es bei einer konkreten Umsetzung des Projektes zu Mehrkosten kommen kann.

Tabelle 4-6 – Netto-Investitionskosten und Fördermittelhöhe bei 80 % Förderquote für ein H₂BZ-Triebwagen-Projekt auf der Eisenbahnstrecke Erfurt – Nordhausen für den Anwendungsfall einer Transportlogistik mit H₂BZ-Zugmaschine auf Basis der in Tabelle 3-6 in Abschnitt 3.3.2 dargestellten grundlegenden Annahmen.

Bereich	Investition	Stückkosten [€]	Größe	Investitionskosten [€]	Förderquote	Fördermittelhöhe [€]
a) Fahrzeug	H ₂ BZ-Triebwagen	5.000.000	3 Stück	15.000.000	0,25	3.750.000
	Umrüstung Werkstatt	450.000	1 Stück	450.000	0,80	360.000
b) Off-Site-Elektrolyse	Elektrolyse (100 bar) mit Peripherie pro kW	3.000	4,4 MW	13.200.000	0,80	10.560.000
	Verdichtung (auf Speicherdruck 300 bar)	500.000	2 Stück	1.000.000	0,80	800.000
c) Transportlogistik	Speichertrailer mit 300 bar Stahlflaschen	135.000	34 Stück	4.590.000	0,80	3.672.000
	H ₂ BZ-Zugmaschine	385.000	2 Stück	770.000	0,80	616.000
d) H₂-Tankstelle	Tankstelleninfrastruktur	1.000.000	2 Stück	2.000.000	0,80	1.600.000
	Verdichtung (Hochdruckspeicher, Betankung)	600.000	4 Stück	2.400.000	0,80	1.920.000
	Geländevorbereitung und Befestigung pro m ²	120	6.000 m ²	720.000	0,80	576.000
Summe				40.130.000	0,59	23.854.000

5. Empfehlungen zur Umsetzung eines Pilotprojektes

5.1 Allgemeines

Die in den Abschnitten 2 bis 4 dargestellten Analysen und die daraus abgeleiteten Schlussfolgerungen führen zu der zusammenfassenden **Empfehlung der Gutachter, in Thüringen in einem Pilotprojekt die Wasserstoff-Technologie mit H₂BZ-Triebwagen im Regelbetrieb zu testen**. Ergänzend dazu sollte ein Pilotprojekt für Akkutriebwagen realisiert werden.

Die technologischen, rechtlichen und finanziellen Randbedingungen sind entweder bereits vorhanden bzw. können hierfür geschaffen werden. Mit dem Pilotprojekt soll überprüft werden, ob sich die derzeit vorliegenden positiven Einschätzungen und Erfahrungen im Regelbetrieb verifizieren lassen. Gleichzeitig müssen für einzelne Bausteine noch Lösungen entwickelt werden. Das Pilotprojekt hat somit teilweise einen experimentellen Charakter, wobei die Realisierbarkeit von den Gutachtern nicht in Frage gestellt wird. Sofern die Ergebnisse positiv evaluiert werden und sich der Markt für H₂BZ-Triebwagen mit weiteren Anbietern weiter ausdifferenziert, besteht dann die Möglichkeit, weitere Eisenbahnstrecken mit Brennstoffzellenfahrzeugen auszustatten.

Damit hat Thüringen eine **Strategie, den Bahnverkehr mittelfristig komplett elektrisch und in hohem Maße CO₂-neutral auszugestalten**. Empfohlen wird eine Umsetzung von drei Elementen:

- Ausbau der geplanten Elektrifizierung in den bereits vorgesehenen Eisenbahnstrecken,
- Einsatz von H₂BZ-Triebwagen auf der Mehrzahl der nicht-elektrifizierten Strecken und
- Einsatz von Batterie-elektrischen (hybriden) Fahrzeugen auf Strecken mit kurzen, nicht elektrifizierten Streckenabschnitten.

Es sollte angestrebt werden, die für die CO₂-neutrale Wasserstoffherstellung benötigte elektrische Energie in einem hohen Maße regional aus regenerativen Quellen zu erzeugen. Damit kann ein wichtiger und beispielgebender Beitrag zu den Klimaschutzzielen Thüringens geleistet werden. Dies entspricht auch den Empfehlungen, die im Abschlussbericht - Masterplan Elektromobilität für Thüringen 2030 hierzu getroffen und mit dem TMUEN abgestimmt wurden (Plank-Wiedenbeck & Gather, 2018).

Darüber hinaus lassen sich aber auch große Potentiale für Wirtschaft und Wissenschaft in Thüringen generieren. Der Einsatz der Wasserstoff-Technologie im Verkehrswesen auf Grundlage des hier dargestellten Konzepts ist hoch innovativ aber auch sehr komplex. Die angestrebten Ziele in Bezug auf Umwelt- und Klimaschutz sind nur mit einem vernetzten Ansatz, der Verkehr, Logistik und Energie umfasst, zu erreichen. Für Unternehmen und Forschungseinrichtungen aus Thüringen, die hier Lösungen entwickeln und umsetzen, bietet dies große Chancen in einem global hoch bedeutsamen Thema mit international sehr großen Vermarktungsmöglichkeiten.

Von daher wird **empfohlen, die Förderung des Pilotprojektes zum Einsatz von H₂BZ-Triebwagen aus Mitteln des Landes eng an eine Innovations- und Forschungsstrategie zu binden**. Mit der in Thüringen entstandenen Initiative H₂-Well (H₂-Well, 2019), die zahlreiche Partner aus Wirtschaft und Wissenschaft umfasst, ist ein geeigneter Rahmen dafür gegeben. Für das Pilotprojekt wird daher neben einer umfassenden technischen, wirtschaftlichen und verkehrlichen Evaluation auch eine kontinuierliche Vernetzung mit geeigneten Forschungsinitiativen empfohlen.

5.2 Vergabeverfahren

Die Vergabe von Verkehrsleistungen ist durch ein **geeignetes Wettbewerbsverfahren** zu realisieren. Damit soll insbesondere gewährleistet werden,

- dass die planerischen Ziele des Landes und der betroffenen Gebietskörperschaften mit hoher Qualität der angebotenen Verkehrsleistung erreicht werden,
- dass wettbewerbliche Chancengleichheit für alle potentiellen Bieter besteht und
- dass das wirtschaftlichste Angebot ausgewählt wird.

Es müssen die Grundregeln des europäischen Rechts der Gleichbehandlung, Transparenz und Nicht-diskriminierung zum Einsatz kommen.

In der Regel wird ein entsprechendes Verfahren gewählt, wenn ein bestehender Verkehrsvertrag ausläuft. Im Fall, dass eine Strecke zur Auswahl kommt, bei der ein bestehender Verkehrsvertrag noch eine lange Laufzeit hat, besteht die Möglichkeit, gesonderte Regelungen für diesen Pilotbetrieb im Rahmen dieses Vertrages zu treffen. Bei der Schwarzatalbahn ist dies nicht zwingend notwendig, da ohnehin ein neuer Vertrag für Januar 2022 zu schließen ist.

Im Rahmen des Wettbewerbsverfahrens für die Schwarzatalbahn ist nicht nur die Verkehrsleistung auszuschreiben, zusätzlich ist die Finanzierung

- der H₂BZ-Triebwagen,
- der Infrastruktur zur Betankung und Wartung der Fahrzeuge,
- der Infrastruktur zur Wasserstoffherzeugung sowie
- der Logistik für die Wasserstoffbereitstellung

zu klären und in die vertraglichen Regelungen aufzunehmen. Auf Grund des experimentellen Charakters des Pilotbetriebs, der mit erheblichen wirtschaftlichen Risiken verbunden ist und der Komplexität des Themas, ist eine Förderung des Landes als Anreiz für potentielle Verkehrsunternehmen und Betreiber der Anlagen erforderlich. Ansonsten würde sich nach einstimmiger Auffassung aller befragten Experten kein Bieter für die auszuschreibende Leistung finden. Darüber hinaus ist es erforderlich, dass das Land sich verpflichtet, über die Dauer des Pilotbetriebs hinaus die Strecke mit wasserstoffbetriebenen Schienenfahrzeugen betreiben zu lassen. Ansonsten müssten die infrastrukturellen Kosten auf den kurzen Zeitraum des Pilotbetriebs abgeschrieben werden.

Der vorliegende Sachverhalt begründet nicht nur eine Förderung durch die öffentliche Hand, sondern auch die Wahl eines besonderen Vergabeverfahrens. Prinzipiell kann ein Verkehrsvertrag auch direkt an einen Auftragnehmer vergeben werden, ohne dass vorher ein wettbewerbliches Vergabeverfahren durchgeführt wird. An eine solche Direktvergabe sind jedoch enge Vorgaben gebunden, die hier geprüft werden sollten. Besondere Gründe im Sinne des Vergaberechts und der Rechtsprechung liegen beispielsweise bei der Forderung nach speziellen Fahrzeugen vor, was hier in besonderem Maße gegeben ist.

Ein geeignetes Verfahren könnte beispielsweise die sogenannte Innovationspartnerschaft nach §19 Vergabeverordnung (VgV) sein. Sie stellt eine Partnerschaft zwischen öffentlicher Hand und Unternehmen dar, die als Ziel die „Entwicklung einer innovativen Liefer- oder Dienstleistung und deren anschließenden Erwerb“ hat. Sie ist anwendbar, wenn der Bedarf für die Liefer- oder Dienstleistung nicht durch am Markt verfügbare Angebote befriedigt werden kann und spezielle Lösungen erst im Rahmen des

Projektes entwickelt werden müssen. Dies ist hier gegeben. Entsprechend gliedert sich das Verfahren in zwei Phasen:

- Forschungs- und Entwicklungsphase und
- Leistungsphase.

Als Begründung für das Verfahren und eine entsprechende Förderung ist die Einführung einer innovativen neuen Technologie mit hoher Komplexität und großen Wechselwirkungen zwischen Fahrzeug, Betrieb, Logistik und Wasserstoffproduktion zu sehen. Ferner besteht ein hohes technisches und wirtschaftliches Risiko für das Unternehmen und im Gegenzug ein sehr großes Potential für Umwelt, Klimaschutz, Energiesicherheit und Industrieförderung, was im Interesse der öffentlichen Hand bzw. der ausschreibenden Stelle ist.

Die Umsetzung kann im sogenannten wettbewerblichen Dialog (§18 VgV) erfolgen. Er kann bei besonders komplexen Aufträgen gewählt werden. In diesem Fall erarbeitet der Auftraggeber die genauen Auftragsdetails in Zusammenarbeit mit den interessierten Unternehmen. Im Rahmen des Verfahrens sind auch die Details der Auslösung zu klären. Nach Ende des Verkehrsvertrags kann es im Wettbewerbsverfahren zu einem neuen Betreiber kommen. Er würde in diesem Fall die finanzierten Fahrzeuge und die Infrastruktur zu einem vorgegebenen Preis vom Vornutzer kaufen oder aus dem Leasing auslösen. Diese Regelungen sind im Rahmen des Verfahrens zu klären.

Im Rahmen der vorliegenden Machbarkeitsstudie können die formalen und juristischen Aspekte des Vergabeverfahrens nur angerissen werden. Die genaue Ausgestaltung des Verfahrens und ggf. eine weitergehende juristische Prüfung des Vergabeverfahrens obliegt der NVS – Nahverkehrsservicegesellschaft Thüringen. Mit der Festlegung der prinzipiell geeigneten Eisenbahnstrecke für den Probebetrieb und einem anschließenden Dauerbetrieb mit H₂BZ-Triebwagen kann der NVS die Verhandlung mit dem VU über den Pilotbetrieb im Rahmen des Wettbewerbsrechts (wettbewerblicher Dialog für Innovationspartnerschaft) führen. Das Verkehrsunternehmen sollte:

- seine Bereitschaft zur Mitwirkung an Thüringer Forschungsinitiativen erklären,
- vor dem Probebetrieb im Rahmen einer Förderung die Fahrzeugbeschaffung und die Herstellung der infrastrukturellen Voraussetzungen (Tankstelle, Werkstatt, Wasserstoffherzeugung etc.) und
- während des Probebetriebs die Überprüfung der technologischen, betrieblichen und wirtschaftlichen Aspekte ermöglichen.

Eine **wissenschaftliche Begleitung und eine umfassende Evaluation** in Bezug auf die definierten Ziele und die Übertragbarkeit ist zwingend notwendig. Nur damit kann gewährleistet werden, dass die hohen Fördermittel, die den Unternehmen gewährt werden, mittelfristig auch anderen Akteuren zu Gute kommen. Ziel muss sein, die Potentiale der Technologie der Thüringer Wirtschaft zu eröffnen. Die Evaluation sollte mindestens die ersten drei Jahre des Pilotbetriebs einschließlich des Projektvorlaufs umfassen und gleichermaßen die Aspekte Verkehr, Energie und Logistik umfassen. Die Kosten der unabhängig zu erstellenden Evaluation sind durch die beteiligten Unternehmen zu tragen.

Der Probebetrieb sollte ferner von einer offensiven Öffentlichkeitsarbeit (Bevölkerung, Fachöffentlichkeit, Politik als Adressaten) flankiert werden. Die Internationale Bauausstellung Thüringen (IBA Thüringen) mit ihren Projekten im Schwarzatal bietet hierfür einen geeigneten Rahmen. Das Pilotprojekt sollte ebenfalls als Ansatzpunkt für eine Initiative zur Änderung von derzeit noch ungünstigen Rahmenbedingungen, insbesondere bei der EEG-Umlage auf Strom zur Eigenversorgung, genutzt werden.

5.3 Empfehlungen für eine Förderrichtlinie

Im Abschnitt 4 ist bereits ausgeführt worden, dass ein Pilotprojekt zum Einsatz von H₂BZ-Triebwagen in Thüringen ohne öffentliche Fördermittel nicht realisiert werden kann. Die insgesamt bei Beschaffung und Betrieb auftretenden Mehrkosten sowie die wirtschaftlichen Risiken sind durch entsprechende Zuschüsse angemessen zu kompensieren. Hierfür ist eine entsprechende Förderrichtlinie des Landes zu verabschieden.

Förderrichtlinie und Verkehrsvertrag sind als Einheit zu verstehen. Das Prinzip der angemessenen Vergütung der Mehrkosten kann nur umgesetzt werden, wenn bei der Feinplanung des Projektes im Sinne des in Abschnitt 5.2 dargestellten Vergabeverfahrens Regelungen des Verkehrsvertrages und auszuweisende Förderungen gemeinsam verhandelt werden. Insofern sollte die Förderrichtlinie mit der Festlegung einer maximalen Förderquote (von 80 % für die Infrastruktur zur Wasserstoffbereitstellung und 25 % für die H₂BZ-Triebwagen) einen entsprechend flexiblen Rahmen bieten. Damit wird auch dem Fakt Rechnung getragen, dass die in dieser Studie angenommenen Kosten in den nächsten Jahren noch Veränderungen erfahren werden, die dann entsprechend berücksichtigt werden können.

Der Fördertatbestand besteht aus vier Teilprojekten, die im Kontext berücksichtigt werden müssen:

- Erzeugung des Wasserstoffs an einem Windpark,
- Transport des Wasserstoffs vom Windpark zu einer Tankstelle mit entsprechenden H₂-Brennstoffzellenfahrzeugen,
- Wasserstoff-Tankstelleninfrastruktur und
- H₂-Brennstoffzellentriebwagen.

Eine zentrale Frage, die im Rahmen der Verhandlungen geklärt werden muss, bezieht sich auf die Betreiberstruktur. Ideal wäre ein Antragsteller, der als Generalunternehmer die anderen Unternehmen beauftragt. Prinzipiell möglich wäre auch eine ARGE, die als Fördernehmer fungiert oder ein Konstrukt, bei dem für die jeweiligen Teilprojekte ein einzelner Förderbescheid an einzelne Unternehmen ergeht.

In der Förderrichtlinie ist zunächst die Zielsetzung des Fördermittelgebers mit der zu fördernden Maßnahme zu erläutern, woraus sich die Aufnahme in das Thüringer Operationelle Programm EFRE in der Förderperiode 2014 bis 2020 ableitet:

- Reduzierung der Emission von Treibhausgasen,
- Verringerung von Luftschadstoff- und Lärmbelastung,
- Einsparung fossiler Brennstoffe und
- Erprobung alternativer Treibstoffe aus erneuerbaren Energiequellen.

Die zugrundeliegenden Regelungen und Verordnungen sowie die beihilferechtlich relevanten Aspekte sind in der Richtlinie zu nennen.

Als Zuwendungszweck dienen Modellprojekte für Triebwagensysteme mit alternativen Antriebsarten in Thüringen (Wasserstoffbrennstoffzellen oder Akkus) einschließlich der erforderlichen Infrastruktur, wobei der genutzte Strom aus erneuerbaren Energiequellen stammen muss. Es sollen Zuwendungen in den SPNV für folgende Modellvorhaben gewährt werden:

- Vorhabenbezogene Ausgaben für Investitionen in alternativ angetriebene Triebwagen für den SPNV,

- Vorhabenbezogene Ausgaben für Investitionen in Tankstellen für alternative Treibstoffe einschließlich der erforderlichen Nebenflächen, vorzugsweise an Standorten, an denen sie auch zur Betankung von Straßenfahrzeugen nutzbar sind,
- Vorhabenbezogene Ausgaben für Investitionen in die Infrastruktur für den Betrieb alternativ angetriebener Triebwagen, insbesondere Elektrolyseure,
- Vorhabenbezogene Ausgaben für Investitionen in die für die Maßnahmen erforderliche Logistik (insbesondere Anschaffung von Lkw mit alternativen Antrieben, beispielsweise für Wasserstofftransporte),
- Vorhabenbezogene Ausgaben zum Erwerb und zur Ersatzbeschaffung von (wieder aufladbaren) Batterien zum Betrieb der alternativ angetriebenen Triebwagen,
- Vorhabenbezogene Ausgaben für Investitionen zur Absicherung von Wartung und Reparatur an Triebwagen mit alternativen Antrieben in Werkstätten.

Zuwendungsempfänger können Unternehmen, insbesondere Eisenbahnverkehrs- und -infrastrukturunternehmen, sein, die in Thüringen SPNV-Leistungen erbringen. Die Zuwendung, die für die Infrastruktur zur Wasserstoffbereitstellung bis zu 80 % und für die H₂BZ-Triebwagen bis zu 25 % der zuwendungsfähigen Ausgaben betragen kann, wird als Vorhabensförderung im Rahmen einer Anteilsfinanzierung als Zuschuss zu den zuwendungsfähigen Ausgaben gewährt. Die Zuwendungsempfänger sind verpflichtet, der Bewilligungsbehörde oder einer beauftragten Stelle, ein Monitoring bzw. eine Evaluation zu unterstützen.

Für die Umsetzung der Förderrichtlinie soll die Thüringer Aufbaubank als zuständige Behörde (Bewilligungsbehörde) fungieren.

Quellenverzeichnis

- AGEB, 2018a. Auswertungstabellen zur Energiebilanz für die Bundesrepublik Deutschland 1990 bis 2017 (Stand Juli 2018), Berlin: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V.
- AGEB, 2018b. Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2017, Berlin: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V.
- Agentur für Erneuerbare Energien, 2018. Föederal Erneuerbar – Bundesländer mit neuer Energie – Thüringen. Verfügbar unter: <https://www.foederal-erneuerbar.de/landesinfo/bundesland/TH> (letzter Zugriff: 18.12.2018)
- Agora Energiewende, 2018. EEG-Rechner für Excel - Berechnungs- und Szenarienmodell zur Ermittlung der EEG-Umlage bis 2035, Version 3.4.17, Berlin: Agora Energiewende. Verfügbar unter: <https://www.agora-energie-wende.de/veroeffentlichungen/eeg-rechner-fuer-excel/> (letzter Zugriff: 21.01.2019)
- Alstom, 2016. Coradia iLint - Ein emissionsfreier Zug (Informationsbroschüre). Saint-Ouen: Alstom SA.
- Alstom, 2018. Weltpremiere: Alstoms Wasserstoff-Züge starten im öffentlichen Linienverkehr in Niedersachsen, Pressemitteilung vom 16.09.2018, Potsdam: Alstom.
- Augsburg K., Büchner F., Hauschild P., Heydrich M., Schreiber V., 2018. Machbarkeitsstudie für ein Pilotprojekt „Konzeption und Design für die Adaption eines Wasserstoff-Brennstoffzellen-Antriebes in einen LKW“, Ilmenau: Technische Universität Ilmenau, Fakultät für Maschinenbau, Fachgebiet Kraftfahrzeugtechnik.
- BKG, 2012. CORINE Land Cover 10 ha. Frankfurt am Main: Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG). Verfügbar unter: http://www.geodatenzentrum.de/geodaten/gdz_rahmen.gdz_div?gdz_spr=deu&gdz_akt_zeile=5&gdz_anz_zeile=1&gdz_unt_zeile=22 (letzter Zugriff: 19.12.2018)
- BMBF, 2018. Kopernikus-Projekt P2X - Wie kann man Wasserstoff transportieren?, Berlin: Bundesministerium für Bildung und Forschung, Verfügbar unter: <https://www.kopernikus-projekte.de/projekte/power-to-x/wasserstoff-transportieren> (letzter Zugriff: 17.12.2018)
- BMVI, 2016. Bundesverkehrswegeplan 2030, Berlin: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur.
- BMVI, 2018. Bewertung der Schienenwegeausbauvorhaben des Potenziellen Bedarfs, Stand: 05.11.2018, Berlin: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur.
- Bürger U. et al., 2018. H₂-Schienenverkehr Mitteldeutschland Machbarkeitsstudie – Eine Expertise für ZVNL & Metropolregion Mitteldeutschland, Leipzig: HYPOS, Verfügbar unter: http://www.hypox-eastgermany.de/fileadmin/content/downloads/pdf/2018-03-01_H2-Schienenverkehr_in_Mitteldeutschland-oefentliche_Version.pdf (letzter Zugriff: 18.12.2018)
- Bundesnetzagentur, 2018. EEG-Umlage sinkt im Jahr 2019 auf 6,405 ct/kWh, Pressemitteilung vom: 15.10.2018, Bonn: Bundesnetzagentur.
- Büttner S., Jentsch MF., Hörnlein S. & Hubner B., 2018. Sektorenkopplung im Rahmen der Energiewende - Einsatz von Elektrolysesauerstoff auf kommunalen Kläranlagen, Tagungsband 25. Symposium Nutzung Regenerativer Energiequellen und Wasserstofftechnik, Stralsund: 07-10 November 2018, S. 22 – 41.
- CEP, 2018. Veröffentlichung der Projektergebnisse für bereits abgeschlossene Projektmodule gem. Abschn. 11.4 der „Nebenbestimmungen für Zuwendungen auf Kostenbasis des Bundesministeriums für Bildung und Forschung an Unternehmen der gewerblichen Wirtschaft für Forschungs- und Entwicklungsvorhaben“ (NKBF 98). Hamburg: Clean Energy Partnership.
- Conrad B., 2018. Nikola Tre Truck (2020) - Brennstoffzellen-Lkw für Europa, Stuttgart: auto motor und sport, 06.11.2018.
- CRI, 2015. Erste Wasserstoff-Bahn läuft in Qingdao vom Band, Peking: China Radio International. Verfügbar unter: <http://german.cri.cn/3131/2015/03/23/1s232361.htm> (letzter Zugriff: 06.12.2018)

- DHZ, 2018. Kraftstoffverbrauch: So viel CO₂ stößt Ihr Auto aus, Bad Wörishofen: Deutsche Handwerks Zeitung, 18.12.2018.
- Die Bundesregierung, 2014. Aktionsprogramm Klimaschutz 2020 der Bundesregierung, Drucksache 18/3484, Berlin: Bundesanzeiger Verlag GmbH.
- Dieterle S., 2009. Wasserstoff – Heute und Morgen. Stuttgart: The Linde Group. Verfügbar unter: http://www.bba-bw.de/files/h2_heute_und_morgen_dieterle.pdf_1.pdf (letzter Zugriff: 17.12.2018)
- DWV, 2015. Wasserstoff - Der neue Energieträger. Berlin: Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband e.V.
- EBA, 2018a. Erster Wasserstoffzug erhält Zulassung, Pressemitteilung 04 / 2018 vom: 11.07.2018, Thema: Fahrzeuge, Bonn: Eisenbahn-Bundesamt.
- EBA, 2018b. Anfrage zur Genehmigung von Wasserstofftankstellen im Eisenbahnbetrieb. Brief des Eisenbahnbundesamtes vom 06.07.2018.
- Ebert M. et al., 2016. Gutachten zur Vorbereitung einer Energie- und Klimaschutzstrategie für Thüringen, Leipzig: Leipziger Institut für Energie.
- EN 17124, September 2017. Entwurf, Wasserstoff als Kraftstoff – Produktfestlegung und Qualitätssicherung – Protonenaustauschmembran (PEM) – Brennstoffzellenanwendungen für Straßenfahrzeuge
- Eurostat, 2018. GISCO: Geographische Informationen und Karten, NUTS 2016, Luxemburg: Europäische Kommission, Eurostat. Verfügbar unter: <https://ec.europa.eu/eurostat/de/web/gisco/geodata/reference-data/administrative-units-statistical-units/nuts> (letzter Zugriff: 19.12.2018)
- Fintoni L., 2006. JR tests fuel cell hybrid train, Wakkanai-shi, Hokkaido: Pink Tentacle Blog, 19.10.2006. Verfügbar unter: <http://pinktentacle.com/2006/10/jr-tests-fuel-cell-hybrid-train> (letzter Zugriff: 06.12.2018)
- Geofabrik GmbH, 2018. OpenStreetMap Data Extracts, Karlsruhe: Geofabrik GmbH. Verfügbar unter <http://download.geofabrik.de> (letzter Zugriff: 19.12.2018)
- Hörstel, J., 2018. Alstom-Neuentwicklung iLINT - Auf dem Weg zur Null-Emission, eisenbahn magazin 55 (6/2017): 40-43.
- H2 MOBILITY, 2019. Netzausbau live - Der aktuelle Stand für Deutschland, Berlin: H2 MOBILITY Deutschland GmbH & Co. KG. Verfügbar unter: <https://h2.live/news/615> (letzter Zugriff: 25.01.2019)
- H2-Well, 2019. Wasserstoffquell- und Wertschöpfungsregion Main-Elbe-LINK. Verfügbar unter: <https://www.h2-well.de> (letzter Zugriff: 18.01.2019)
- ID, 2018. Un train à hydrogène proposé par Alstom aux régions françaises, Paris: ID – L'info Durable, 22.11.2018.
- Iwamoto K., 2017. Japan's fuel cell train rolls ahead under its own steam, Tokyo: Nikkei Asian Review. Verfügbar unter: <https://asia.nikkei.com/Tech-Science/Tech/Japan-s-fuel-cell-train-rolls-ahead-under-its-own-steam> (letzter Zugriff: 06.12.2018)
- Jahn M., 2013. Wasserstoff als Antrieb, Stuttgart: Regierungspräsidium Stuttgart. Verfügbar unter: https://www.dguv.de/medien/landesverbaende/de/veranstaltung/tda/2013/documents/21_jahn.pdf (letzter Zugriff: 17.12.2018)
- JR-East, 2006. Development of the World's First Fuel Cell Hybrid Railcar, Tokyo: East Japan Railway Company. Verfügbar unter: <http://www.jreast.co.jp/e/press/20060401> (letzter Zugriff: 06.12.2018)
- Kreib T., 2018. Weltpremiere: Der erste Wasserstoffzug ist ab Buxtehude unterwegs. Buchholz in der Nordheide: Kreiszeitung Nordheide Wochenblatt, 18.09.2018.

- Kym G., 2018. Weltpremiere im Zillertal: Stadler Rail liefert Wasserstoff-Züge nach Österreich, St Gallen: Tagblatt, 18.05.2018.
- Menkens T., n.d. Hochwasserschutz durch die Saalekaskaden - Möglichkeiten und Grenzen, Jena: Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie – Hochwassernachrichtenzentrale. Verfügbar unter: http://www.bwk-lsa.de/download/5_Timm_Menkens_Saalekaskade.pdf (letzter Zugriff: 14.01.2019).
- Meteonorm, 2015. Meteonorm 7: Globale meteorologische Datenbank für Ingenieure, Planer und Ausbildung. Bern: Meteotest Genossenschaft.
- Metro Report International, 2017. Fuel cell tram enters service in Tangshan, Sutton: Metro Report International. Verfügbar unter: <https://www.metro-report.com/news/news-by-region/china/single-view/view/fuel-cell-tram-enters-service-in-tangshan.html> (letzter Zugriff: 06.12.2018)
- NASA, 2018. ASTER Global Digital Elevation Map Announcement. La Cañada Flintridge: NASA Jet Propulsion Laboratory. Verfügbar unter: <https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp> (letzter Zugriff: 19.12.2018)
- NDR, 2018. Brennstoffzellenzug: Premiere mit hohen Erwartungen, Norddeutscher Rundfunk Niedersachsen vom 17.09.2018. Verfügbar unter: https://www.ndr.de/nachrichten/niedersachsen/oldenburg_ostfriesland/Brennstoffzellenzug-Premiere-mit-hohen-Erwartungen,brennstoffzellenzug124.html
- NOW, 2016. Ergebnisbericht: Studie Wasserstoff-Infrastruktur für die Schiene, Berlin: Nationale Organisation Wasserstoff und Brennstoffzellentechnologie.
- NOW, 2018. Genehmigungsleitfaden für Wasserstoff-Stationen, Berlin: Nationale Organisation Wasserstoff und Brennstoffzellentechnologie. Verfügbar unter: <https://www.h2-genehmigung.de/leitfaden> (letzter Zugriff: 10.12.2018)
- Ogawa K., Yamamoto T., Hasegawa T., Furuya T. & Nagaishi S., 2011. The evaluation of endurance running tests of the fuel cells and battery hybrid test railway train. 9th World Congress on Railway Research, Lille: 22-26 May 2011.
- Ogawa K., Yamamoto T. & Yoneyama T., 2008. Energy efficiency and fuel consumption of fuel cells powered test railway vehicle, 8th World Congress on Railway Research, Seoul: 18-22 May 2008.
- O.M.R., 2018. Oil Market Report, Kellinghusen: O.M.R. Oil Market Report e.K.
- Plank-Wiedenbeck U., Gather M., 2018. Abschlussbericht - Masterplan Elektromobilität für Thüringen 2030; Auftraggeber: Freistaat Thüringen, Ministerium für Umwelt, Energie und Naturschutz (TMUEN).
- Pregger T., Graf D., Krewitt W., Sattler C., Möller S., 2008. Perspektiven solarthermischer Verfahren zur Wasserstoffherzeugung, Stuttgart: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR).
- Railway Gazette, 2016. Qingdao opens fuel cell tram route, Sutton: Railway Gazette International, 07.03.2016. Verfügbar unter: <https://www.railwaygazette.com/news/urban/single-view/view/qingdao-opens-fuel-cell-tram-route.html> (letzter Zugriff: 06.12.2018)
- RegioSim, n.d. RegioSim Eisenbahn-Simulationsprogramm für ein- und zweigleisige Nahverkehrsstrecken. Verfügbar unter: <http://www.regiosim.de> (letzter Zugriff: 17.01.2019)
- Remmersmann, T., 2016. Windenergieanlagen: Weiterbetrieb nach 20 Jahren, Münster: Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen. Verfügbar unter: <https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/technik/energie/windkraft/nutzungsdauer-windenergie.htm> (letzter Zugriff: 20.12.2018)
- SAE J2601, December 2016: Fueling Protocols for Light Duty Gaseous Hydrogen Surface Vehicles.
- SAE J2719, September 2011: Hydrogen Fuel Quality for Fuel Cell Vehicles.
- Schmidt, H., 2016. Zukunft ist nun tankbar, Zürich: Neue Zürcher Zeitung, 11.11.2016.

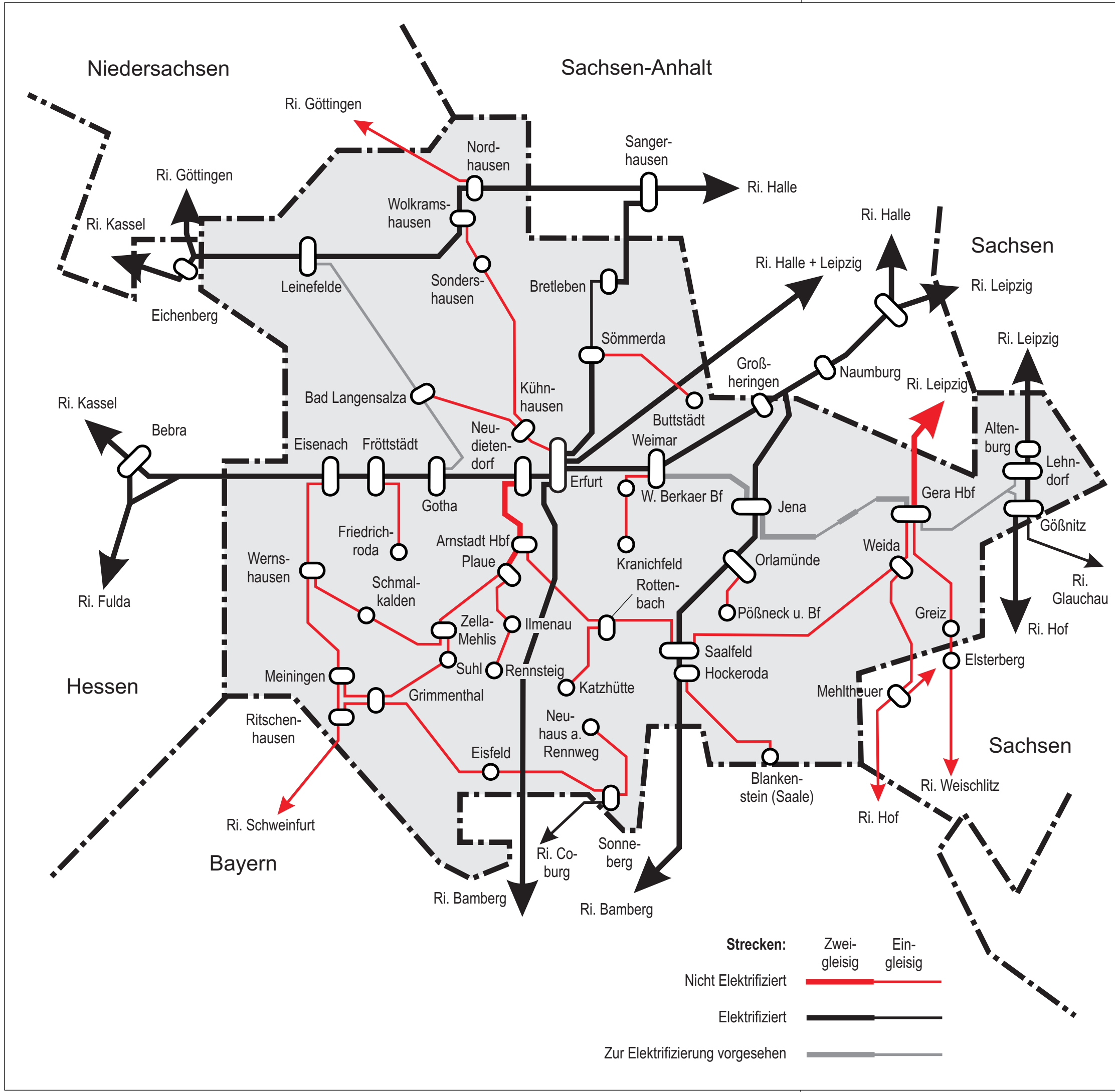
- Schmidt, H., 2018. Hyundai bringt 1000 Wasserstoff-Lkw in die Schweiz, Zürich: Neue Zürcher Zeitung, 20.09.2018.
- Schwenn K., Schubert C., 2018. Züge mit Batterie und ohne Lokführer. Frankfurt am Main: Frankfurter Allgemeine Zeitung: 13.09.2018.
- Siemens, 2018. Siemens erhält Förderzusage für Entwicklung von Brennstoffzellenantrieb für Züge, Presseinformation vom 26.02.2018, München: Siemens AG, Division Mobility.
- SMA, 2018. Sunny Design Web, Niestetal: SMA Solar Technology AG. Verfügbar unter: <https://www.sunnydesignweb.com> (letzter Zugriff: 26.06.2018)
- Stadler Rail, 2019. Produkte – WINK. Verfügbar unter: <https://www.stadlerrail.com/de/produkte/detail-all/wink/197/> (letzter Zugriff: 14.01.2019)
- Statista, 2018. Anzahl der Wind-Volllaststunden nach typischen Standorten für Windenergieanlagen in Deutschland im Jahr 2018 (in Stunden pro Jahr). Hamburg: Statista GmbH.
- The Economic Times, 2018. SRM Uni, ICF to develop fuel cell based train prototype. Mumbai: The Economic Times, 27.02.2018. Verfügbar unter: <https://economictimes.indiatimes.com/industry/transportation/railways/srm-uni-icf-to-develop-fuel-cell-based-train-prototype/articleshow/63097862.cms> (letzter Zugriff: 06.12.2018)
- The New Indian Express, 2018. SRM inks pact on hydrogen-powered train development, Chennai: The New Indian Express, 25.02.2018. Verfügbar unter: <http://www.newindianexpress.com/cities/vijayawada/2018/feb/25/srm-inks-pact-on-hydrogen-powered-train-development-1778677.html> (letzter Zugriff: 06.12.2018)
- Thüringer Landtag, 2018. Diskussionsforum des Thüringer Landtags - Thüringer Klimagesetz, Entwurf vom: 12. Januar 2018, Erfurt: Thüringer Landtag. Verfügbar unter: <https://forum-landtag.thueringen.de/dokument/thueringer-klimagesetz> (letzter Zugriff: 04.12.2018)
- Thon H.J., 2016. Wasserstoff-Technologie: Sicherheit von Hochdruck-Tanksystemen. Wiesbaden: H₂BZ-Kooperationsnetzwerk Rheinland-Pfalz. Verfügbar unter: https://www.h2bz-hessen.de/mm/mm001/04_Thon_H2BZ-Kooperationsnetzwerk_RLP.pdf (letzter Zugriff: 17.12.2018)
- TLUBN, 2019. Aktuelle Wasserstände und Durchflüsse: Saale, Jena: Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz. Verfügbar unter: <http://hnz.thueringen.de/hw2.0/saale.html> (letzter Zugriff: 14.01.2019).
- TLVwA, 2018. Bestandsliste aller zum 31.12.2017 in Thüringen registrierten Windkraftanlagen. Weimar: Thüringer Landesverwaltungsamt.
- TLBG, 2018. Download ALKIS (flurweise). Erfurt: Thüringer Landesamt für Bodenmanagement und Geoinformation. Verfügbar unter: <https://www.geoportal-th.de/de-de/Downloadbereiche/Download-Offene-Geodaten-Th%3%bcringen/Download-ALKIS-flurweise> (letzter Zugriff: 17.12.2018)
- TMIL, 2017. Gefahrgutbeförderung in Thüringen 2017, Erfurt: Thüringer Ministerium für Infrastruktur und Landwirtschaft.
- TMIL, 2018. Nahverkehrsplan für den Schienenpersonennahverkehr im Freistaat Thüringen 2018 – 2022, Erfurt: Thüringer Ministerium für Infrastruktur und Landwirtschaft.
- TMUEN, 2018. Thüringen verabschiedet erstes Klimagesetz in den neuen Ländern, Medieninformation vom 14.12.2018, Erfurt: Thüringer Ministerium für Umwelt, Energie und Naturschutz.
- TRBS 3151 / TRGS 751, September 2015: Vermeidung von Brand-, Explosions- und Druckgefährdungen an Tankstellen und Gasfüllanlagen zur Befüllung von Landfahrzeugen.

- UBA, 2014. Maßnahmen zur Verminderung des Eintrages von Mikroschadstoffen in die Gewässer, Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- UBA, 2018a. Treibhausgas-Emissionen in Deutschland, Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland> (letzter Zugriff: 23.01.2018)
- UBA, 2018b. Energiebedingte Emissionen, Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energiebedingte-emissionen> (letzter Zugriff: 04.12.2018)
- Vattenfall, n.d. Energie aus Wasserkraft – Strom erzeugen nach Bedarf, Cottbus: Vattenfall Europe Mining & Generation.
- Wallasch A.-K., Lüers S., Rehfeldt K., 2016. Weiterbetrieb von Windenergieanlagen nach 2020: Düsseldorf: Naturstrom AG.
- wind-turbine-models.com, 2015. AN Bonus 1300/62, Erkelenz: wind-turbine-models.com. Verfügbar unter: <https://www.wind-turbine-models.com/turbines/59-an-bonus-1300-62> (letzter Zugriff: 19.12.2018)
- Yu Z., 2017. World's first hydrogen hybrid tram put into operation. Beijing: China Daily, 27.10.2017. Verfügbar unter: http://www.chinadaily.com.cn/bizchina/motoring/2017-10/27/content_33781033.htm (letzter Zugriff: 06.12.2018)

Anhang A Begleitendes Material und Schaubilder zu den Eisenbahnstrecken in Thüringen

Tabelle A-1 – Zusammenstellung der mit Dieseltriebwagen betriebenen Eisenbahnlinien in Thüringen

Eingabewerte Bahnbetrieb													Berechnungen Bahnbetrieb					Sonstige Kriterien										
Zugart	Betreiber	Linie	KBS	Fahrzeuge	Von...	...nach	Wichtige Kreuzungs- / und Zwischenbahnhöfe	Kleinste Wendezeit am Endbf. [min]	Mittl. Fahrzeit [min]	Anzahl Zwischenhalte	Entfernung Gesamt [km]	Entfernung außerhalb Thüringens [km]	Grenzzort in Thüringen	Zugkm/a in Thüringen 5)	Takt 5)	Wertgtl. Fahrten pro Ri. 2	Fahrzeitverlängerung pro Richtung [min]	Verbleibende Wendezeit [min]	Mittlere Reisegeschwindigkeit [km/h]	Mittlerer Stationsabstand [km]	Überwiegende v _{max} [km/h]	Fahrgäste pro Schultag im Querschnitt, Prognose 2022	Laufzeit der Ausschreibung bis...					
																						min.	max. 1)					
1) Daten liegen nur streckenbezogen vor, daher tlw. mehrere Linien zusammengefasst, ohne Hauptstrecken, Werte nur in Thüringen																		4,0	[s] pro Halt	50 km/h								
2) Ca.-Werte, gerundet, ggf. Mittelwert													3) In Tagesrandlagen als RB mit zusätzlichen Halten										5,0	[s] pro Halt	60 km/h			
4) Je nach Betriebskonzept und Zugtyp, Fahrzeitrechnung durch die NVS													9) Überschlägig aus Fahrzeit, Wendezeit und Takt berechnet					Fahrzeitverlängerung:					3,5	[%]	80 - 100 km/h			
5) Quellen: NVP Thüringen 2018-2022, Anlage 4 und Fahrplan													10) Überschlägig aus Anzahl Umläufen, Entfern. und wertgtl. Fahrten berechn.										5,5	[%]	>100 km/h			
Mindestwendezeit: 5 [min]																												
Linien auf durchgehenden Strecken mit mehreren Anschlussbeziehungen																												
RE	DB Regio	RE 55 3) RE 56 3)	601	BR642	Nordhausen	Erfurt	Straußfurt, Sondershausen	75	9	79				463.625	120	8	4)		63	9	99	800	1250	12 / 2025				
RB	DB Regio	RB 52	604		Erfurt	Leinefelde	Bad Langensalza	79	14	79				494.279	120	9	4)		60	6	99							
RB	EB	EB 23	561	BR650	Erfurt	Saalfeld	Arnstadt, Rottenb.	65	11,5	71				772.879	6)	60	19	2,3	66	6	100	750	1100	12 / 2024				
RB	STB	STB 41	569, 575		Eisenach	Eisfeld	Meiningen	124	21	141				1.614.670		60	20	3,6	68	7	100	500	1400	12 / 2028				
			569		Eisfeld	Sonneberg		44	9	32				120	9			44	4	59	200	500	11 / 2028					
			564		Sonneberg	Neuhs. Rennw.	Lauscha	45	10	28				363.628		60	17	1,1										
RB	STB	STB 43	573		Wernshausen	Suhl	Steinb.-Hallenbg.	55	11	36				357.350	60	16	1,0		39	3	60	500	700	12 / 2028				
RB	STB	STB 44			Erfurt	Meiningen	Suhl	81	12	91				834.221	120	10	4,2		67	8	120	1100	1900	12 / 2028				
RE	STB	STx 50	570			Zella-Mehlis	-	52	7	58				-	720	5	1,8		67	8	100	1750	1900	12 / 2028				
RB	STB	STB 46			Erfurt	Ilmenau	Elgersburg, Arnstadt	59	13	46				508.160	60	20	2,1		47	4	100	1700	1850	12 / 2028				
RE	STB	STx 45	566					59	13	38				141.794	240	4	2,1		39	3	100	1650	1700	12 / 2028				
6) Zusammen mit EBx 47																												
7) Bis Großheringen																												
RB	EB	EB 26	579		BR650	Weimar	Kranichfeld	Holzdf. b. Weimar	5	47	11	26			368.290	60	21	0,7	3,6	33	2	50	300	700	12 / 2024			
RB	EB	EB 27	594	Sömmerda		Buttstädt	-	6	26	5	23			235.103	7)	120	9	0,9	4,2	53	5	80	150	250	12 / 2024			
RB	EB	EB 28	560	Jena Saalb.		Orlamünde	zweigleisig	21	4	23								1,2		66	6	120						
			559	Orlamünde		Pößneck u. Bf.	-	9	19	3	12			335.598	60	15		0,3	6,0	38	4	60	350	350	12 / 2024			
RB	EB	EB 32	557	Saalfeld		Hockeroda	zweigleisig	12	2	12				354.278	120	11		0,7		60	6	120						
				Hockeroda		Blankenstein	Lichtentanne	9	60	7	40						0,7	6,3	40	6	60	50	250	12 / 2024				
RB	STB	EB 48	606	BR641	Fröttstädt	Friedrichroda	-	6	19	4	11			127.158	60	18	0,4	5,2	35	3	50			12 / 2028				
RB	OBS		562		Rottenbach	Katzhütte	Sitzendf.-Unterw.	14	40	6	25			271.564	60	15	0,0	14,0	38	4	60	100	150	12 / 2021				
Blaue Schrift: Mit RegioSim berechnet																												
Linien auf durchgehenden Strecken mit mehreren Anschlussbeziehungen, grenzüberschreitend																												
8) Bis Zeulenroda (29 km)																												
RE	EB	EB 13	546	BR650	Gera	Hof	Mehltheuer		84	12	85	40	Zeulenroda, vor Mehl.	135.093	8)	120	11	2,9		61	7	80	400	450	12 / 2024, 12 / 2022			
RB	EB	EB 40	815		Meiningen	Schweinf. Stadt	Bad Neust., Plaue	83	14	79	65	Rentwerts.	139.968		120	11	4,6		57	6	160	700	750	12 / 2026				
RB	VL	VL 4	541		Gera	Weischlitz	Barthmühle	72	14	62	27	Greiz-Dölau	188.800		120	13	2,5		52	4	80	150	850	12 / 2027				
RB	EB	EB 22	555		Leipzig	Saalfeld	Gera	130	24	142	81	Crossen	668.023		120	11	7,2		66	6	120	450	650	12 / 2024				
RE	EB	EBx 12						125	18				426.532		120	8	6,9		68	8	120							
RB	DB Regio	RB 80	357	BR648	Nordhausen	Göttingen	Ellrich, Nörten-Hardenberg	88	12	90	74	Ellrich	192.580		60	14	-		61	8	100	550	800	12 / 2029				



Dieselbetriebene Linien

DB Regio (RegioSwinger, Neigetechnik):

- RE 1: Göttingen – Erfurt – Gera – Glauchau
- RE 3: Erfurt – Jena – Gera – Altenburg/Greiz
- RE 7: Erfurt – Grimmenthal – Würzburg

DB Regio (BR 641 Desiro):

- RE 2: Erfurt – Bad Langensalza – Leinef. – KS-W.-höhe
- RE 55/56: Nordhausen – Erfurt
- RB 52: Erfurt – Leinefelde
- RB 53: Gotha – Bad Langensalza
- RB 80: Nordhausen – Göttingen

Erfurter Bahn (Regio-Shuttle):

- EBx 12: Leipzig – Gera – Saalfeld (Saale)
- EBx 13: Gera – Mehltheuer – Hof
- EB 21: Erfurt – Weimar – Jena – Gera
- EB 22: Leipzig – Gera – Saalfeld (Saale)
- EB 23: Erfurt – Arnstadt – Saalfeld (Saale)
- EB 26: Weimar – Kranichfeld
- EB 27: Sömmerda – Buttstädt
- EB 28: Jena Saalb. – Pößneck u. Bf
- EB 32: Saalfeld (Saale) – Blankenstein (Saale)
- EB 40: Meiningen – Schweinfurt

Süd-Thüringen-Bahn (Regio-Shuttle):

- STx 45: Erfurt – Ilmenau
- STx 50: Erfurt – Zella-Mehlis – Wernshausen/Meiningen
- STB 41: Eisenach – Meiningen – Eisfeld – Sonneberg – Neuhaus a. Rennweg
- STB 43: Wernshs. – Schmalkalden – Zella-Mehlis – Suhl
- STB 44: Erfurt – Meiningen
- STB 46: Erfurt – Ilmenau – Rennsteig
- STB 48: Fröttstadt – Friedrichroda

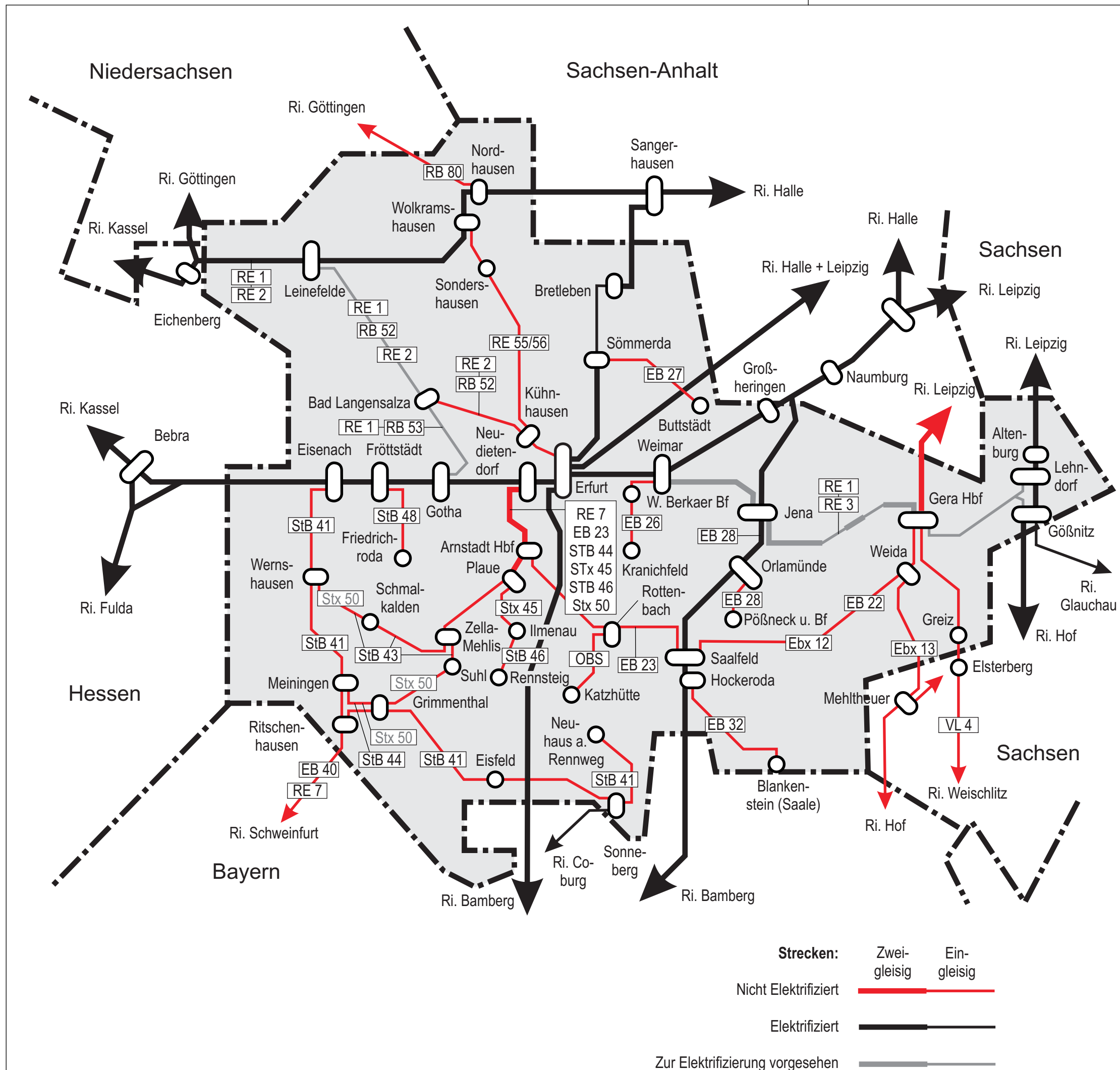
Oberweißb. Berg- und Schwarzatalbahn (versch. TW):

- OBS: Rottenbach - Katzhütte

Vogtlandbahn (Regio-Shuttle):

- VL 4: Gera - Greiz - Weischlitz

Freistaat Thüringen  Ministerium für Umwelt, Energie und Naturschutz	
Pilotprojekt Einsatz von H2BZ-Triebwagen in Thüringen	
Skizze der Bahnstrecken in Thüringen	
	Stand: 26.08.2018



Dieselbetriebene Linien

DB Regio, BR 612 (RegioSwinger, Neigetechnik):

- RE 1: Göttingen – Erfurt – Gera – Glauchau
- RE 3: Erfurt – Jena – Gera – Altenburg/Greiz
- RE 7: Erfurt – Grimmenthal – Würzburg

DB Regio, BR 642 (Siemens Desiro):

- RE 2: Erfurt – Bad Langensalza – Leinef. – KS-W.-höhe
- RB/ RE 55: Nordhausen – Erfurt (16 / 9 Zwischenhalte)
- RB/ RE 56: Nordhausen – Erfurt (17 / 14 Zwischenhalte)
- RB 55: Nordhausen – Erfurt (Halt auf allen Stationen)
- RB 52: Erfurt – Leinefelde
- RB 53: Gotha – Bad Langensalza
- RB 80: Nordhausen – Göttingen

Erfurter Bahn, BR 650 (Stadler Regio-Shuttle):

- EBx 12: Leipzig – Gera – Saalfeld (Saale)
- EB 13: Gera – Mehltheuer – Hof
- EB 21: Erfurt – Weimar – Jena – Gera
- EB 22: Leipzig – Gera – Saalfeld (Saale)
- EB 23: Erfurt – Arnstadt – Saalfeld (Saale)
- EB 26: Weimar – Kranichfeld
- EB 27: Sömmerda – Buttstädt
- EB 28: Jena Saalb. – Pößneck unt. Bf
- EB 32: Saalfeld (Saale) – Blankenstein (Saale)
- EB 40: Meiningen – Schweinfurt

Süd-Thüringen-Bahn BR 650 (Stadler Regio-Shuttle):

- STx 45: Erfurt – Ilmenau
- STx 50: Erfurt – Zella-Mehlis – Wernshausen/Meiningen
- STB 41: Eisenach – Meiningen – Eisfeld – Sonneberg – Neuhaus a. Rennweg
- STB 43: Wernshs. – Schmalkalden – Zella-Mehlis – Suhl
- STB 44: Erfurt – Meiningen
- STB 46: Erfurt – Ilmenau – Rennsteig
- STB 48: Fröttstädt – Friedrichroda

Oberweißb. Berg- und Schwarzatalbahn, BR 641:

- OBS: Rottenbach - Katzhütte

Vogtlandbahn, BR 650 (Stadler Regio-Shuttle):

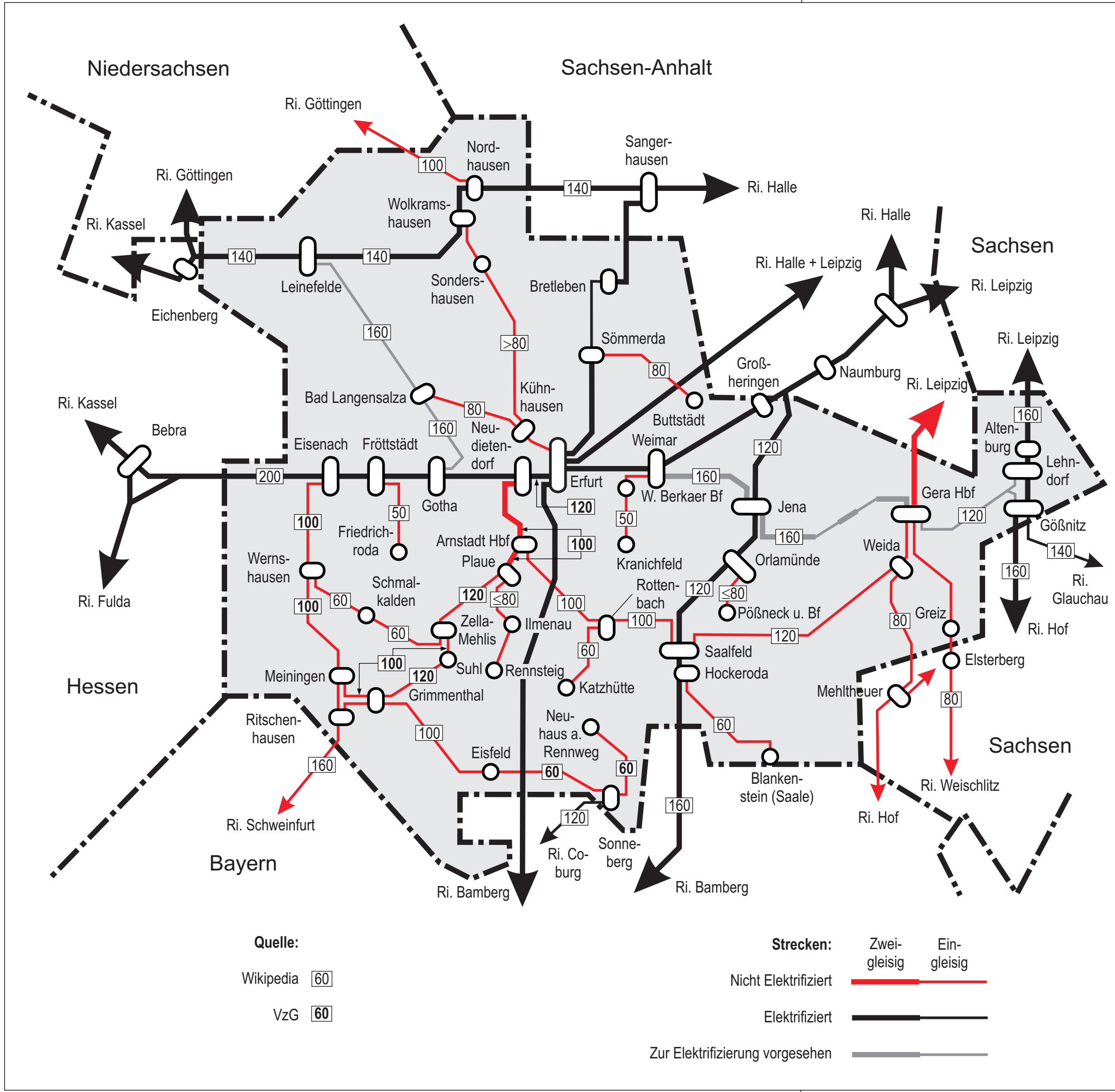
- VL 4: Gera - Greiz - Weischlitz



Pilotprojekt Einsatz von H2BZ-Triebwagen in Thüringen

Skizze der Bahnstrecken in Thüringen

Liniennummern



Dieselbetriebene Linien

DB Regio, BR 612 (RegioSwinger, Neigetechnik):

- RE 1: Göttingen – Erfurt – Gera – Glauchau
- RE 3: Erfurt – Jena – Gera – Altenburg/Greiz
- RE 7: Erfurt – Grimmenthal – Würzburg

DB Regio, BR 642 (Siemens Desiro):

- RE 2: Erfurt – Bad Langensalza – Leinef. – KS-W.-höhe
- RB/ RE 55: Nordhausen – Erfurt (16 / 9 Zwischenhalte)
- RB/ RE 56: Nordhausen – Erfurt (17 / 14 Zwischenhalte)
- RB 55: Nordhausen – Erfurt (Halt auf allen Stationen)
- RB 52: Erfurt – Leinefelde
- RB 53: Gotha – Bad Langensalza
- RB 80: Nordhausen – Göttingen

Erfurter Bahn, BR 650 (Stadler Regio-Shuttle):

- EBx 12: Leipzig – Gera – Saalfeld (Saale)
- EB 13: Gera – Mehltheuer – Hof
- EB 21: Erfurt – Weimar – Jena – Gera
- EB 22: Leipzig – Gera – Saalfeld (Saale)
- EB 23: Erfurt – Arnstadt – Saalfeld (Saale)
- EB 26: Weimar – Kranichfeld
- EB 27: Sömmerda – Buttstädt
- EB 28: Jena Saalb. – Pößneck unt. Bf
- EB 32: Saalfeld (Saale) – Blankenstein (Saale)
- EB 40: Meiningen – Schweinfurt

Süd-Thüringen-Bahn BR 650 (Stadler Regio-Shuttle):

- STx 45: Erfurt – Ilmenau
- STx 50: Erfurt – Zella-Mehlis – Wernshausen/Meiningen
- STB 41: Eisenach – Meiningen – Eisfeld – Sonneberg – Neuhaus a. Rennweg
- STB 43: Wernshs. – Schmalkalden – Zella-Mehlis – Suhl
- STB 44: Erfurt – Meiningen
- STB 46: Erfurt – Ilmenau – Rennsteig
- STB 48: Fröttstadt – Friedrichroda

Oberweißb. Berg- und Schwarzatalbahn, BR 641:

- OBS: Rottenbach – Katzhütte

Vogtlandbahn, BR 650 (Stadler Regio-Shuttle):

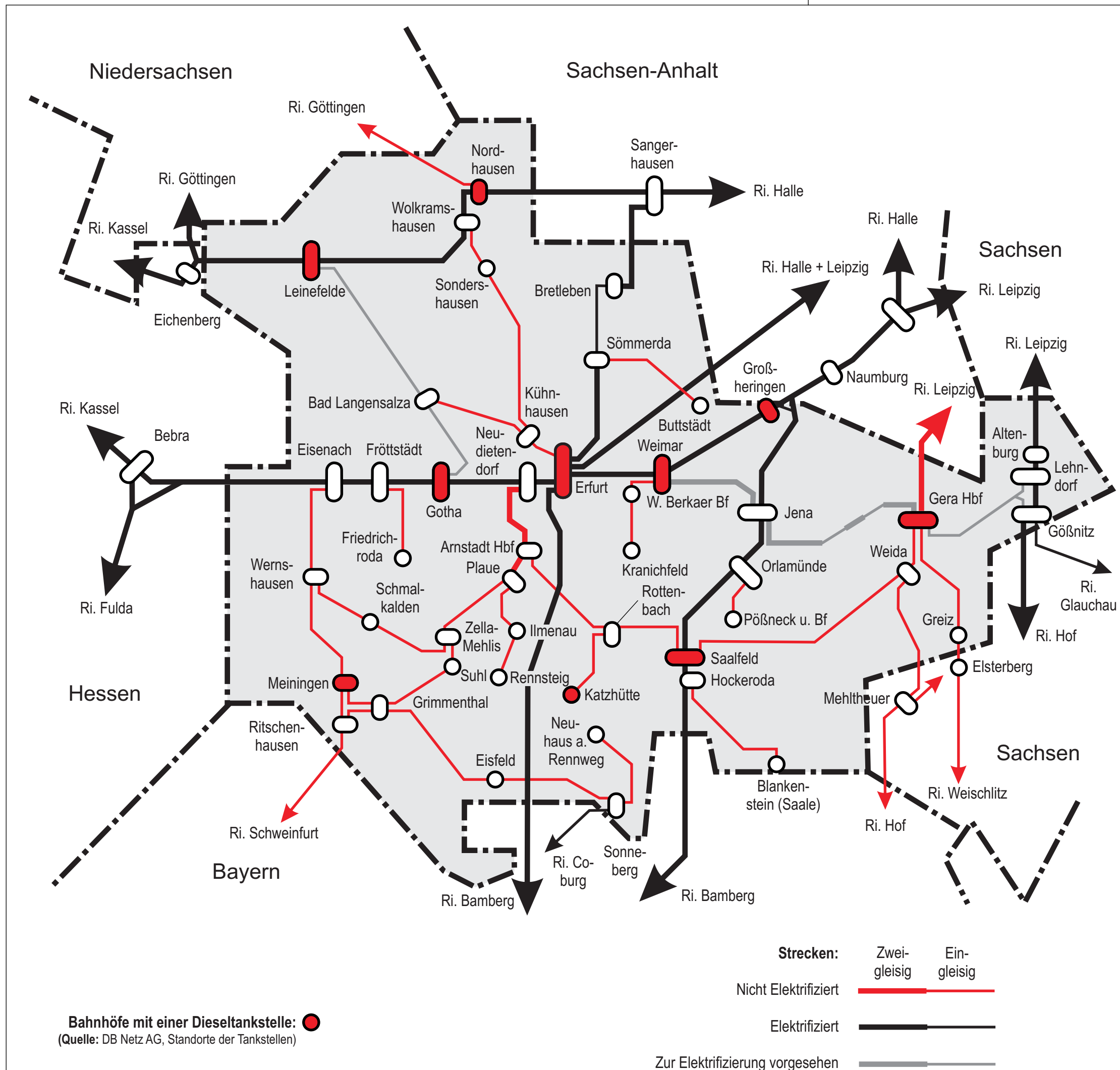
- VL 4: Gera – Greiz – Weischlitz



Pilotprojekt Einsatz von H2BZ-Triebwagen in Thüringen

Skizze der Bahnstrecken in Thüringen

Streckenhöchstgeschwindigkeit [km/h]



Dieselbetriebene Linien

DB Regio, BR 612 (RegioSwinger, Neigetechnik):

RE 1: Göttingen – Erfurt – Gera – Glauchau
RE 3: Erfurt – Jena – Gera – Altenburg/Greiz
RE 7: Erfurt – Grimmenthal – Würzburg

DB Regio, BR 642 (Siemens Desiro):

RE 2: Erfurt – Bad Langensalza – Leinef. – KS-W.-höhe
RB/ RE 55: Nordhausen – Erfurt (16 / 9 Zwischenhalte)
RB/ RE 56: Nordhausen – Erfurt (17 / 14 Zwischenhalte)
RB 55: Nordhausen – Erfurt (Halt auf allen Stationen)
RB 52: Erfurt – Leinefelde
RB 53: Gotha – Bad Langensalza
RB 80: Nordhausen – Göttingen

Erfurter Bahn, BR 650 (Stadler Regio-Shuttle):

EBx 12: Leipzig – Gera – Saalfeld (Saale)
EB 13: Gera – Mehltheuer – Hof
EB 21: Erfurt – Weimar – Jena – Gera
EB 22: Leipzig – Gera – Saalfeld (Saale)
EB 23: Erfurt – Arnstadt – Saalfeld (Saale)
EB 26: Weimar – Kranichfeld
EB 27: Sömmerda – Buttstädt
EB 28: Jena Saalb. – Pößneck unt. Bf
EB 32: Saalfeld (Saale) – Blankenstein (Saale)
EB 40: Meiningen – Schweinfurt

Süd-Thüringen-Bahn BR 650 (Stadler Regio-Shuttle):

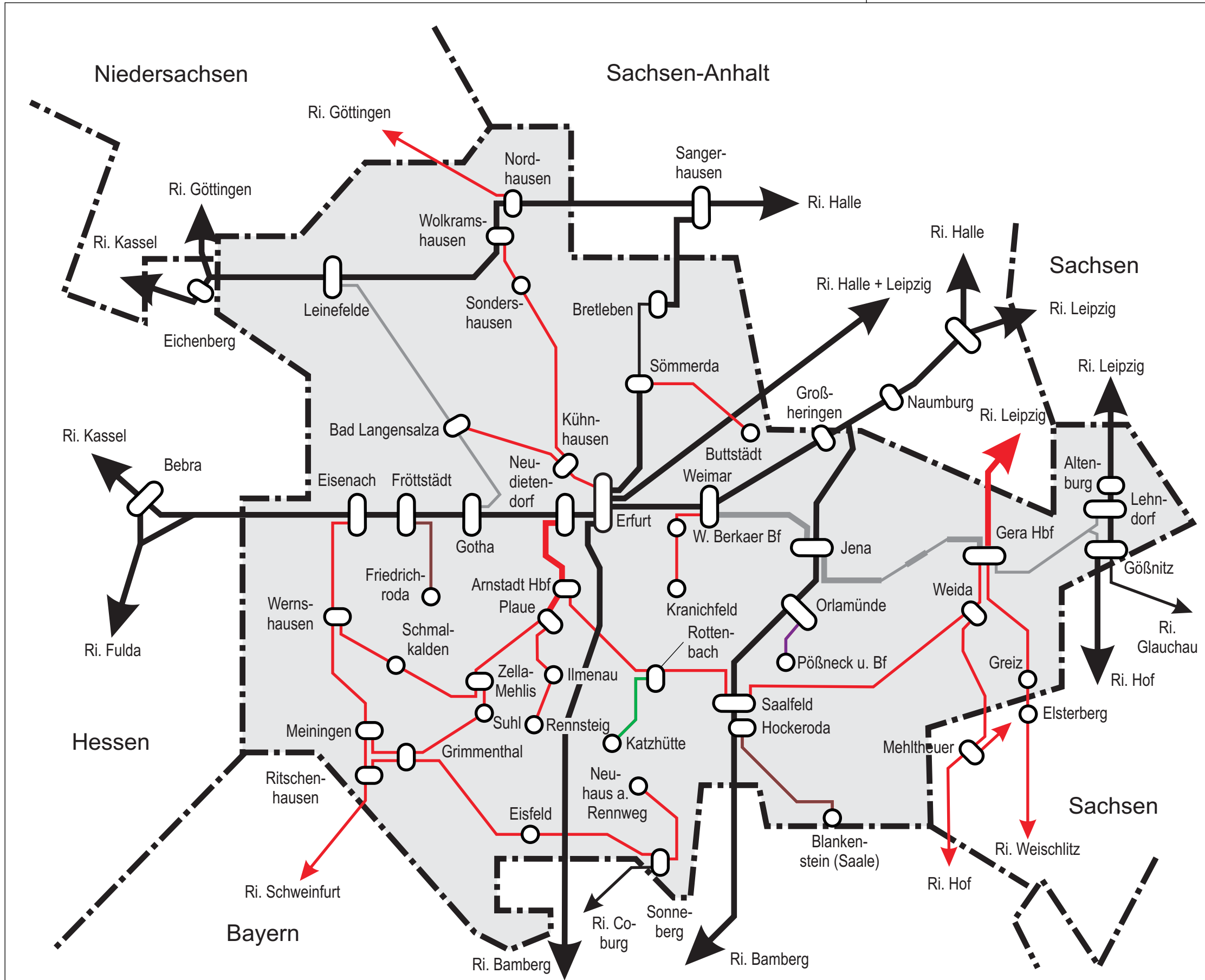
STx 45: Erfurt – Ilmenau
STx 50: Erfurt – Zella-Mehlis – Wernshausen/Meiningen
STB 41: Eisenach – Meiningen – Eisfeld – Sonneberg – Neuhaus a. Rennweg
STB 43: Wernshs. – Schmalkalden – Zella-Mehlis – Suhl
STB 44: Erfurt – Meiningen
STB 46: Erfurt – Ilmenau – Rennsteig
STB 48: Fröttstadt – Friedrichroda

Oberweißb. Berg- und Schwarzatalbahn, BR 641:

OBS: Rottenbach – Katzhütte

Vogtlandbahn, BR 650 (Stadler Regio-Shuttle):

VL 4: Gera – Greiz – Weischlitz



Dieselbetriebene Linien

DB Regio, BR 612 (RegioSwinger, Neigetechnik):

- RE 1: Göttingen – Erfurt – Gera – Glauchau
- RE 3: Erfurt – Jena – Gera – Altenburg/Greiz
- RE 7: Erfurt – Grimmenthal – Würzburg

DB Regio, BR 642 (Siemens Desiro):

- RE 2: Erfurt – Bad Langensalza – Leinef. – KS-W.-höhe
- RB/ RE 55: Nordhausen – Erfurt (16 / 9 Zwischenhalte)
- RB/ RE 56: Nordhausen – Erfurt (17 / 14 Zwischenhalte)
- RB 55: Nordhausen – Erfurt (Halt auf allen Stationen)
- RB 52: Erfurt – Leinefelde
- RB 53: Gotha – Bad Langensalza
- RB 80: Nordhausen – Göttingen

Erfurter Bahn, BR 650 (Stadler Regio-Shuttle):

- EBx 12: Leipzig – Gera – Saalfeld (Saale)
- EB 13: Gera – Mehltheuer – Hof
- EB 21: Erfurt – Weimar – Jena – Gera
- EB 22: Leipzig – Gera – Saalfeld (Saale)
- EB 23: Erfurt – Arnstadt – Saalfeld (Saale)
- EB 26: Weimar – Kranichfeld
- EB 27: Sömmerda – Buttstädt
- EB 28: Jena Saalb. – Pößneck unt. Bf
- EB 32: Saalfeld (Saale) – Blankenstein (Saale)
- EB 40: Meiningen – Schweinfurt

Süd-Thüringen-Bahn BR 650 (Stadler Regio-Shuttle):

- STx 45: Erfurt – Ilmenau
- STx 50: Erfurt – Zella-Mehlis – Wernshausen/Meiningen
- STB 41: Eisenach – Meiningen – Eisfeld – Sonneberg – Neuhaus a. Rennweg
- STB 43: Wernshs. – Schmalkalden – Zella-Mehlis – Suhl
- STB 44: Erfurt – Meiningen
- STB 46: Erfurt – Ilmenau – Rennsteig
- STB 48: Fröttstadt – Friedrichroda

Oberweißb. Berg- und Schwarzatalbahn, BR 641:

- OBS: Rottenbach - Katzhütte

Vogtlandbahn, BR 650 (Stadler Regio-Shuttle):

- VL 4: Gera - Greiz - Weischlitz

Eignung für den Einsatz des iLint:

- Aus betrieblichen und organisatorischen Gründen gut geeignet. Zwar geringe, aber schwankende Nachfrage, touristische Strecke
- Aus betrieblichen Gründen gut geeignet, aber geringe Nachfrage
- Aus betrieblichen Gründen gut geeignet, aber geringe Nachfrage und besser für den Einsatz eines Akku-Triebwagens geeignet.

- Strecken:**
- Zweigleisig
 - Ein-gleisig
 - Elektrifiziert
 - Zur Elektrifizierung vorgesehen



Pilotprojekt Einsatz von H2BZ-Triebwagen in Thüringen

Skizze der Bahnstrecken in Thüringen

Für den Einsatz eines iLint geeignete Strecken

Stand: 11.11.2018

Anhang B Anforderungen an Wasserstofftankstellen entsprechend den relevanten technischen Regeln und Normen

Die folgenden Ausführungen zeigen wesentliche Anforderungen aus den in Abschnitt 2.2.4 aufgeführten technischen Regelwerken an Wasserstofftankstellen im Eisenbahnbetrieb sowie in deren Kombination mit der Betankung von Straßenfahrzeugen auf. Sie geben einen Überblick über ausgewählte, wichtige Anforderungen und sind somit zusammenfassend und verkürzend. Sie ersetzen nicht die detaillierte Betrachtung der einzelnen technischen Regeln und Normen für die Tankstellenplanung.

- **TRBS 3151 / TRGS 751 - Vermeidung von Brand-, Explosions- und Druckgefährdungen an Tankstellen und Gasfüllanlagen zur Befüllung von Landfahrzeugen**
 - ➔ Schutz eines leeren ober- oder unterirdisch verlegten Treibstoffbehälters bei Hochwasserereignissen bzw. Grundwasserdruck – Anforderung: mind. 1,3-fache Auftriebssicherheit, kein Wassereindringen durch betriebsbedingte Öffnungen, keine Beschädigung durch Treibgut bzw. Eismassen.
 - ➔ Keine Funkenbildung beim Befestigen oder Lösen von Füllleitungen am Füllstutzen.
 - ➔ Verlegung unterirdischer Treibstoffbehälter bei mindestens 1,0 m allseitiger Erdüberdeckung (wenn überfahrbar) bzw. 0,5 m (wenn nicht überfahrbar), einem Abstand untereinander von mind. 0,4 m bzw. zu Gebäuden und Grundstücken von mind. 1,0 m.
 - ➔ Schutzabstand bei frei aufgestellten oberirdischen H₂-Lagerbehältern zu Abgabevorrichtungen, Gebäuden, Verkehrsflächen und benachbarten Grundstücken von mindestens 5,0 m: Schutzabstand darf verringert werden bei Anwendung einer dazwischenliegenden feuerhemmenden Wand bzw. Einhausung, wobei eventuell austretende Gase eine freie Entweichungsmöglichkeit nach oben haben müssen.
 - ➔ Keine gemeinsame oberirdische Lagerung von Behältern mit verschiedenen Kraftstoffen in einer Einhausung.
 - ➔ Gasbefüllte Betankungsschlauchleitungen dürfen max. 5 m lang sein und ihr Innenvolumen darf 1,5 Liter nicht überschreiten.
 - ➔ Die Abgabevorrichtung von Zapfsäulen muss auf der zu einem benachbarten Gebäude abgewandten Seite der Zapfsäule angebracht sein, und der Abstand zu Gebäudeöffnungen mindestens 2,0 m betragen.
 - ➔ Zur Vermeidung von Auffahrunfällen an Zapfsäulen müssen diese auf einem mind. 12 cm hohen Sockel mit einem mind. 20 cm breiten seitlichen Überstand aufgestellt sein, und zusätzlich ein integriertes Abscherventil aufweisen.
 - ➔ Der Wirkbereich einer Abgabevorrichtung für Gase muss belüftet sein. Er entspricht dem betriebsmäßig in 1,0 m Höhe über Erdniveau mit der Abgabevorrichtung horizontal maximal erreichbaren Bereich zuzüglich 1,0 m.
 - ➔ Tankstellen müssen für die jeweilige Nutzung ausreichend beleuchtet sein, wobei an Abgabevorrichtungen mindestens 100 lx vorherrschen müssen.
- **VdTÜV MB DRGA 514 – Anforderungen an Wasserstofftankstellen**
 - ➔ Zulässiger Betankungsdruck bei 35-MPa-Systemen und 15 °C Umgebungstemperatur:
 $P_{\max} = 43,8 \text{ MPa}$ bei $T_{\max} = 85 \text{ °C}$ bzw. $T_{\min} = -15 \text{ °C}$;
 - ➔ Zulässiger Betankungsdruck bei 70-MPa-Systemen und 15 °C Umgebungstemperatur:
 $P_{\max} = 87,5 \text{ MPa}$ bei $T_{\max} = 85 \text{ °C}$ bzw. $T_{\min} = -40 \text{ °C}$;

- ➔ Wirkbereich einer Abgabevorrichtung hinsichtlich Definition und Sicherheitsabstandsmaßen analog TRBS 3151 / TRGS 751.
 - ➔ Maximale Länge einer Betankungsschlauchleitung analog TRBS 3151 / TRGS 751, zusätzlich muss diese Leitung elektrisch leitfähig sein, sie darf nicht überfahren werden können und sie muss dem 1,5-fachen Betriebsdruck standhalten können.
 - ➔ Der Füllvorgang muss abgebrochen werden, sobald bei Fahrzeugen ohne bzw. mit Kommunikation mit der Zapfsäule ein Füllgewicht von 91 % bzw. 100 % erreicht wird, oder sobald die Grenzwerte von Betankungsdruck bzw. Betankungstemperatur nicht eingehalten werden.
 - ➔ Sämtliche Komponenten einer Wasserstofftankstelle sind gegen Zutritt Unbefugter zu sichern. Sie dürfen nicht in Durchgängen, Durchfahrten, allgemein zugänglichen Fluren, Treppenhäusern oder an Treppen von Freianlagen errichtet sein. Sie müssen auf einem festen und ebenen Aufstellungsplatz errichtet sein.
 - ➔ Der Schutzabstand oberirdischer Lagerbehälter zu Ein- oder Ausfahrbereichen einer öffentlichen Straße und zu den Abgabevorrichtungen ist in einer gutachterlichen Äußerung zu bewerten.
 - ➔ Im Wirkbereich einer Abgabevorrichtung dürfen sich Öffnungen zu tiefer gelegenen Räumen, Gruben oder Schächten befinden, die Wirkbereiche von Abgabevorrichtungen verschiedener Kraftstoffe dürfen sich überschneiden.
 - ➔ Einzuhaltende Schutzabstände zu frei aufgestellten Verdichtern und Entspannungsbehältern: 3 m, zu Vorratsbehältern: 5 m, zu Abgabevorrichtungen: 2 m, zu allen frei aufgestellten wasserstoffbeaufschlagten Komponenten: 3 m.
- **VdTÜV MB TANK 965-1 – Anfahrschutz oberirdischer Lagerbehälter an Tankstellen sowie Füllanlagen von Landfahrzeugen mit Druckgasen zur Abgabe an Dritte, Teil 1: Anforderungen**
 - ➔ Ein Anfahrschutz muss mindestens 0,5 m von einem Lagerbehälter entfernt aufgestellt sein.
 - ➔ Die auf den Anfahrschutz wirkende Kraft ist in einer Höhe von 0,8 m anzusetzen – daraus resultierend ist dies auch die Mindesthöhe des Anfahrschutzes selbst.
 - ➔ Der waagerechte lichte Abstand von ggf. verwendeten Pollern darf untereinander 1,33 m in einer Höhe von 0,8 m nicht überschreiten (Ausschluss einer PKW-Durchfahrt).
 - ➔ Die Entfernung zwischen einem Poller und dem zu schützenden Lagerbehälter muss mindestens gleich der Hälfte des lichten Abstandes der Poller untereinander sein.
 - **VdTÜV MB TANK 965-3 – Anfahrschutz oberirdischer Lagerbehälter an Tankstellen und Füllanlagen zum Befüllen von Landfahrzeugen mit Druckgasen, Teil 3: Anforderungen an nicht öffentlich zugängliche Tankstellen und Füllanlagen mit ausschließlichem Fahrzeugverkehr durch eingewiesene Personen**
 - ➔ Anforderungen analog VdTÜV MB TANK 965-1.
 - ➔ Eine Schienenfahrzeugbetankung muss die Kriterien einer nicht öffentlich zugänglichen Tankstelle erfüllen – auch im Falle einer straßenverkehrs-kombinierten Wasserstoffbetankung ist der zugseitige Tankstellen-Abschnitt entsprechend zu sichern.
 - **DIN EN ISO 17268 – Gasförmiger Wasserstoff – Anschlussvorrichtungen für die Betankung von Landfahrzeugen**
 - ➔ Verhinderung der Betankung von Fahrzeugen mit höheren Nennbetriebsdrücken, höheren Durchflussraten oder ungeeigneten Gasen als für sie zugelassen durch mechanische Maßnahmen direkt am Füllstutzen.

- ➔ Funktionstüchtigkeit des Füllstutzens innerhalb des für die Gesamtanlage üblichen Umgebungstemperaturbereiches mit Grenzwerten von – 40 °C bis + 50 °C sowie (systeminterne) Betankungstemperaturen des Wasserstoffs von – 40 °C bis + 85 °C. In der Folge erfordert dies insbesondere einen schnee-, regenwasser- und sonneneinstrahlungsfesten Witterungsschutz sowohl herstellerseitig innerhalb der Zapfsäule (systemintern) als auch in Form einer Überdachung des Tankbereiches einschließlich Zapfsäule. Diese Maßnahme ist planerisch zu berücksichtigen.
 - ➔ Lebensdauer des Empfängerstutzens am Fahrzeug: 15.000 Zyklen und 15 Jahre bei sachgemäßer Handhabung nach Herstellerangaben.
 - ➔ Lebensdauer des Füllstutzens an der Zapfsäule (einschließlich zur Bedienung ggf. direkt damit verbundener Armaturen): 100.000 Zyklen bei sachgemäßer Handhabung nach Herstellerangaben.
 - ➔ Es sind Tankstellenstandorte zu wählen, welche innerhalb des oben genannten Umgebungstemperaturbereiches liegen.
- **DIN EN 17127 (Entwurf) – Gasförmiger Wasserstoff – Betankungsanlagen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen**
 - ➔ Maximal zulässige Durchflussgeschwindigkeiten bei der H₂-Betankung von Schwerlastfahrzeugen bei 35 MPa (in diesem Sinne auch für Züge oder ÖPNV-Fahrzeuge anwendbar): 120 g/s (ggf. als kritischer Zeitfaktor einer zugseitigen Betankung).
 - ➔ Maximal zulässige Durchflussgeschwindigkeiten bei der H₂-Betankung von leichten Straßenfahrzeugen bei 70 MPa (PKW; relevant bei einer kombinierten Wasserstofftankstelle): 60 g/s.
 - **DIN EN 17124 (Entwurf) – Wasserstoff als Kraftstoff – Produktfestlegung und Qualitätssicherung – Protonenaustauschmembran (PEM) – Brennstoffzellenanwendungen für Straßenfahrzeuge**
 - ➔ Einhaltung eines minimalen molaren Wasserstoffanteils am Gesamtgasgemisch bei der H₂-Ver-tankung am Tankstutzen von 99,97 %.
 - ➔ Vermeidung von Verunreinigungsgefahren von H₂-Rohrleitungen und H₂-Tankstellenkompo-nenten unmittelbar nach Wartungsarbeiten wie eine erhöhte N₂-Konzentration (bei unzu-reichender Spülung) bzw. H₂O-Konzentration (bei unzureichender Trocknung).
 - ➔ Vermeidung von Verunreinigungsgefahren von H₂-Druckbehälter-Anhängern und -Abfüllstati-onen unmittelbar nach Wartungsarbeiten: erhöhte O₂- oder N₂-Konzentration (bei unzu-reichender Spülung) bzw. H₂O-Konzentration (bei unzureichender Trocknung).
 - ➔ Maximal zulässiger O₂-Gehalt bei bzw. nach einer N₂-Spülung: unter 2 % (darüber darf keine H₂-Befüllung stattfinden).
 - **DIN EN 50122-1 / VDE 0115-3 – Bahnanwendungen - Ortsfeste Anlagen - Elektrische Sicherheit, Erdung und Rückleitung - Teil 1: Schutzmaßnahmen gegen elektrischen Schlag**
 - ➔ Einhaltung eines Sicherheitsabstandes analog eines in der Regel nicht überschreitbaren maxi-mal möglichen Einflussbereiches einer abgerissenen Stromoberleitung von 4 m zwischen H₂BZ-Triebwagen / H₂-Tankstellenkomponenten und der Achse des Bahngleises mit Oberleitung.
 - ➔ Die Betankung eines H₂BZ-Triebwagens darf nicht auf einem Bahngleis erfolgen, der in der üb-rigen Betriebszeit als Durchfahrtgleis genutzt wird.

- **DIN EN 50125-3 / VDE 0115-108-3 – Bahnanwendungen – Umweltbedingungen für Betriebsmittel – Teil 3: Umweltbedingungen für Signal- und Telekommunikationseinrichtungen**
 - ➔ Vibrationen aufgrund von Zugbewegungen sind in einem Abstand ab 3 m von einer Bahnschiene entfernt vernachlässigbar. Dieser Abstand sollte daher zwischen der Außenkante eines zu betankenden H₂BZ-Triebwagens und einem Durchfahrtgleis eingehalten werden.
 - ➔ Tankstellenkomponenten dürfen nicht im Gleisbett errichtet werden.
 - ➔ Betriebsmittel (einschließlich Wasserstoff) müssen grundsätzlich an Stellen mit möglichst geringen Schwingungen und Stößen gelagert werden.
 - ➔ Elektromagnetische Verträglichkeiten sind zu beachten; es ist jedoch nicht möglich, hierfür allgemeingültige Werte festzulegen.

- **TRGS 509 – Lagern von flüssigen und festen Gefahrstoffen in ortsfesten Behältern sowie Füll- und Entleerstellen für ortsbewegliche Behälter**
 - ➔ Die Norm gilt nur, wenn sich auf oder in der Nähe der Wasserstofftankstelle Behälter für feste oder flüssige Treibstoffe befinden, die kein Bestandteil der eigentlichen Wasserstofftankstelle sind.
 - ➔ Gebäude wie z.B. Service-Gebäude der H₂-Tankstelle müssen mindestens 10 m entfernt von freistehenden oberirdischen Behältern mit flüssigen und festen Gefahrstoffen mit einem Brennstoff-Flammpunkt $\leq 55^\circ \text{C}$ und einem Behälter-Gesamtvolumen größer 2.500 Litern (bei extrem leicht entzündbaren Flüssigkeiten größer 500 Litern) bzw. 5 m entfernt von deren Füllstellen sein. Die genannten Abstände können verringert werden oder entfallen, wenn:
 - die Dacheindeckung und die dem jeweiligen Behälter zugewandten Außenwände (inklusive etwaiger Öffnungen) des Gebäudes bis zu einer Höhe von 10 m über dem Behälterscheitel und innerhalb eines Abstandes von 5 m beiderseits der Kante seines Auffangraumes für mindestens 90 Minuten feuerbeständig sind,
 - aufgrund enger Platzverhältnisse oder im Falle einer generell unzureichenden Feuerbeständigkeit zwischen dem Gebäude und dem jeweiligen Lagerbehälter eine nach den oben genannten Kriterien ausreichend dimensionierte feuerbeständige Trennwand aufgestellt wird.
 - ➔ Keine Komponente der Wasserstofftankstelle darf den erforderlichen Mindestabstand zu einem oder ggf. mehreren in einem gemeinsamen Auffangraum befindlichen oberirdischen, einwandigen Lagerbehältern unterschreiten. Der Mindestabstand entspricht mindestens der Breite des Auffangraumes und ergibt sich aus der Breite des Schutzstreifens R um den Lagerbehälter entsprechend dem Gesamtlagervolumen V der Behälter im Auffangraum wie folgt:
 - $V \leq 30 \text{ m}^3$, $R = 0 \text{ m}$,
 - $30 < V \leq 200 \text{ m}^3$, $R = 10 \text{ m}$,
 - $200 \text{ m}^3 < V \leq 2000 \text{ m}^3$, $R = (V+700)/90$,
 - $V > 2000 \text{ m}^3$ $R = 30 \text{ m}$.

Der Schutzstreifen ist bei oberirdischen, einwandigen Tank-Lagerbehältern ab der Behälteraußenwand anzusetzen, wobei 2/3 der Breite außerhalb des Auffangraumes liegen müssen. Für doppelwandige ortsfeste Behälter für feste oder flüssige Treibstoffe gilt ihre Außenwand (Außenhülle) als Auffangraumgrenze. Das Volumen, die Funktion und die Beschaffenheit eines Auffangraumes sind in der TRGS 509 definiert, seine endgültige Dimensionierung (Breite x Tiefe) kann jedoch aufgrund der Vor-Ort-Verhältnisse im Einzelfall unterschiedlich sein.

- **TRGS 727 – Vermeidung von Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladungen**
 - ➔ Anordnung/Anbringung der Einzelkomponenten der Wasserstofftankstelle in Bereichen mit möglichst freiem Gasaustritt zur generellen Vermeidung einer explosionsgefährdeten Atmosphäre.
 - ➔ Wasserstoffbehälter (unabhängig ihrer Form und Druckstufe) sind bevorzugt mithilfe von in offener Bauweise hergestellten Träger- bzw. Transport-Konstruktionen mit entsprechender seitlicher Aussteifung zu transportieren und auf dem Tankstellengelände zu lagern.
 - ➔ In geschlossenen Containern (z.B. zur Wasserstoffherstellung über Wasserelektrolyse) sind aktive bzw. passive Belüftungsmaßnahmen vorzusehen.
 - ➔ An Stellen mit Möglichkeit einer unvorhergesehenen Leckage von brennbaren Druckgasen sind alle gasführenden und zugleich leitfähigen Einrichtungen (z.B. Gefäße und Rohre) sowie sich in diesen Bereichen aufhaltende Personen einschließlich von ihnen mitgeführte leitfähige Gegenstände zu erden. Gleichzeitig dazu dürfen Isolationsmaterialien in den gefährdeten Bereichen nicht von extern eingeführt werden.
 - ➔ Falls eine explosionsgefährdete Atmosphäre nicht auszuschließen ist (Wasserstoff gehört zur Explosionsgruppe IIC) kommen Tabellen 1a (höchstzulässige Oberflächen isolierender Gegenstände), 1b (höchstzulässige Durchmesser oder Breiten langgestreckter isolierender Gegenstände) sowie Punkte 3.2.3.1 (Begrenzung der Dicke isolierender Beschichtungen), 3.2.3.2 (Begrenzung der Durchschlagsspannung) und 3.2.4 (Begrenzung der übertragenen Ladung) zum Einsatz. Darüber hinaus sind keine Feuerlöschmittel (einschließlich Inertgas) erlaubt, welche sich nach Austritt aus einer Feuerlöschanlage elektrostatisch aufladen können.
 - ➔ Zur Vermeidung einer Brand- und Explosionsgefahr aufgrund eines potentiell schlecht geerdeten Fahrzeuges während einer H₂-Betankung ist die mechanische Verbindung zwischen dem Füllstutzen der Zapfleitung und dem Empfängerstutzen am Fahrzeug als elektrisch leitend herzustellen. Somit ist eine Systemerdung über die Zapfsäule hergestellt. Die Verbindung darf nur nach eindeutig beendeter Betankung mit anlageninterner Unterbindung des Wasserstoffzuflusses wieder gelöst werden können.

- **ISO/TR 15916 – Basic considerations for the safety of hydrogen systems** (Grundlegende Anforderungen an die Sicherheit von Wasserstoffsystemen)
 - ➔ Geschlossene, wasserstoffbeaufschlagte Systeme müssen über einen Leckage- bzw. Gasaustrittsmelder für H₂-Luftvolumenkonzentrationen ab 1 % verfügen.
 - ➔ Im Umkreis von 5 m um einen H₂-Gasbehälter darf nur geeignete bzw. geeignet abgeschirmte elektrische Ausrüstung verwendet werden, welche keine Funkbildung verursacht. Eine Entfernung von weniger als 1 Meter wird als besonders kritisch angesehen. Alle wasserstoffbeinhaltenen Komponenten müssen blitzgeschützt sein.

- **Surface Vehicle Standard SAE J2600 – Compressed Hydrogen Surface Vehicle Fueling Connection Devices:** (Verbindungseinrichtungen für die Betankung von mit verdichtetem Wasserstoff betriebenen Landfahrzeugen)
 - ➔ Relevante Anforderungen analog DIN EN ISO 17268.

- **Surface Vehicle Standard SAE J2601 – Fueling Protocols for Light Duty Gaseous Hydrogen Surface Vehicles** (Betankungsprotokolle für mit gasförmigem Wasserstoff betriebene leichte Landfahrzeuge)
 - ➔ Relevante Anforderungen analog DIN EN ISO 17268 und DIN EN ISO 17127 (Entwurf).

- **Surface Vehicle Standard SAE J2601-2 – Fueling Protocols for Gaseous Hydrogen Powered Heavy Duty Vehicles** (Betankungsprotokolle für mit gasförmigem Wasserstoff betriebene schwere Landfahrzeuge)
 - ➔ Relevante Anforderungen analog DIN EN ISO 17268 und DIN EN ISO 17127 (Entwurf).
- **Surface Vehicle Standard SAE J2601-3 – Fueling Protocols for Gaseous Hydrogen Powered Industrial Trucks** (Betankungsprotokolle für mit gasförmigem Wasserstoff betriebene Flurförderfahrzeuge)
 - ➔ Relevante Anforderungen analog DIN EN ISO 17268 und DIN EN ISO 17127 (Entwurf).
- **Surface Vehicle Standard SAE J2719 – Hydrogen Fuel Quality for Fuel Cell Vehicles** (Wasserstoffqualität für Brennstoffzellenfahrzeuge)
 - ➔ Relevante Anforderungen analog ISO/TS 14687-2, DIN EN ISO 17124 (Entwurf) und DIN EN ISO 17127 (Entwurf).
- **Surface Vehicle Standard SAE J2799 – Hydrogen Surface Vehicle to Station Communications Hardware and Software** (Hard- und Software für die Kommunikation zwischen wasserstoffbetriebenen Landfahrzeugen und Wasserstofftankstellen)
 - ➔ Die Datenkommunikation zwischen Wasserstofftankstelle und H₂-Fahrzeug hat über den Füllstutzen mit einer optischen Infrarotschnittstelle zu erfolgen.
- **ECE/TRANS/WP.29/2014/78 – Proposal for a new Regulation on hydrogen and fuel cell vehicles (HFCV) & E/ECE/324/Rev.2/Add.133–E/ECE/TRANS/505/Rev.2/Add.133 – Uniform provisions concerning the approval of motor vehicles and their components with regard to the safety-related performance of Hydrogen-Fuelled Vehicles (HFCV)**
 - ➔ Unter den Betriebsbedingungen während eines Standard-Betankungsvorganges darf keine Leckage des Wasserstoffbehälters während den ersten 11.000 Betankungszyklen und innerhalb einer Betriebsdauer von 15 Jahren auftreten.
- **National Fire Protection Association (NFPA) 2 – Hydrogen Technologies Code**
 - ➔ Eine Einhausung für Wasserstoffkomponenten muss aus mindestens 3 Wänden bestehen und eine Fläche von mindestens 41,8 m² aufweisen.
 - ➔ Eine Festinstallation von Wasserstoffkomponenten im Freien darf sich nur außerhalb von Gebäuden befinden, ihr Umfang zu maximal 25 % von Wänden umschlossen sein sowie lediglich teilweise überdacht werden.
 - ➔ Vorratsbehälter für Wasserstoff müssen fest aufgestellt sein und ein Volumen von mindestens 230 Litern aufweisen. Ihr Inhalt darf kein Bestandteil der Erzeugungsprozesskette sein.
 - ➔ Zur Vermeidung von Zündgefahren ist das Rauchen in einem Umkreis von 7,6 Metern um freistehende Behälter und Abgabevorrichtungen zu vermeiden und ggf. durch eine geeignete Ausschilderung zu verbieten.
 - ➔ Der mechanische Anfahrschutz von Wasserstoffkomponenten in Form von Pollern ist in einem Abstand von mindestens 1,5 m von der zu schützenden Komponenten aufzustellen bei einer Mindesthöhe von 0,9 m und einem lichten Abstand von 1,2 m zwischen den Pollern.
 - ➔ Mindestabstand von Wasserstoffbehältern zu Lufteinsaugöffnungen: 15 m.

- ➔ Mindestabstand von Tankstellenkomponenten zu Behältern mit inkompatiblen Gasen: 6,1 m bzw. eine gemeinsame Lagerung innerhalb einer Umhausung ist zu vermeiden.
- ➔ Sicherheitsabstand aller Tankstellenkomponenten zu brennbaren Abfällen / Vegetation: 3,1 m.
- ➔ Es muss ein Wetterschutz gegen Sonneneinstrahlung genutzt werden, sobald Umgebungstemperaturen über 52 °C zu erwarten sind.
- ➔ Es darf keine durch Fremdausrüstung künstlich hervorgerufene Erwärmung der Tankstellenkomponenten über 52 °C auftreten.
- ➔ Mindestentfernung elektrischer Installationen zu frei aufgestellten H₂-Abgabevorrichtungen: 1,5 m.
- ➔ Mindestabstand einer H₂-Abgabevorrichtung (bzw. eines H₂-Abgabepunktes) zu jedweden Gebäudeöffnungen, Gebäudewänden mit einer Feuerbeständigkeit von weniger als 120 Minuten, Behältern mit leicht entzündlichen oder verflüssigten Gasen: 3,0 m.
- ➔ In Abhängigkeit des Bettungsmaterials und der Befahrbarkeit gelten verschiedene Mindestverlegetiefen für erdverlegte wasserstoffführende Rohrleitungen.

Anhang C Grundlegende Dimensionierung eines Trailers mit 300 bar Stahlflaschenbündeln zur Sicherstellung der Wasserstofflogistik

Die limitierende Größe für einen mit 300 bar Stahlflaschenbündeln bestückten Trailer ist das maximal zulässige Gesamtgewicht eines Sattelzuges von 40 t. Hierbei gelten die folgenden ungefähren Rahmenparameter:

- Zugmaschine, vollgetankt: 8,5 – 9,5 t
- Trailer / Sattelaufleger: 6,0 – 7,0 t
- Mögliche Nutzlast: 23,5 – 25,5 t
- Stahlflaschenbündel (300 bar): 1,4 t

Aus diesen Angaben folgt je nach Gewicht der zusätzlichen Einrichtungen und Instrumente zur Verschaltung der einzelnen Stahlflaschenbündel eine mögliche Anzahl von Flaschenbündeln von 15 bis maximal 18 Bündel pro Trailer. Im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie wurden Trailer mit 16 Flaschenbündeln angenommen. Die hieraus resultierende transportierbare Masse Wasserstoff ermittelt sich wie folgt:

$$m [kg] = \rho_{H_2} \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot V_{Bd} [m^3] \cdot n_{Bd} \quad [\text{Formel C-1}]$$

Mit:

$m [kg]$ = Masse des Wasserstoffs

$\rho_{H_2} \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ = Dichte des Wasserstoffs bei 300 bar Flaschendruck und 15°C Umgebungstemperatur

$V_{Bd} [m^3]$ = verfügbares Volumen pro Flaschenbündel: 0,6 m³

n_{Bd} = Anzahl der Flaschenbündel

Die Dichte des Wasserstoffs bei 300 bar Flaschendruck und 15°C Umgebungstemperatur errechnet sich hierbei wie folgt:

$$\rho_{H_2} \left[\frac{kg}{m^3} \right] = \frac{p [kPa] \cdot M_{H_2} \left[\frac{g}{mol} \right]}{R_m \left[\frac{J}{mol K} \right] \cdot T [K]} \quad [\text{Formel C-2}]$$

Mit:

$p [kPa]$ = im Gas herrschender Druck, hier 30.000 kPa

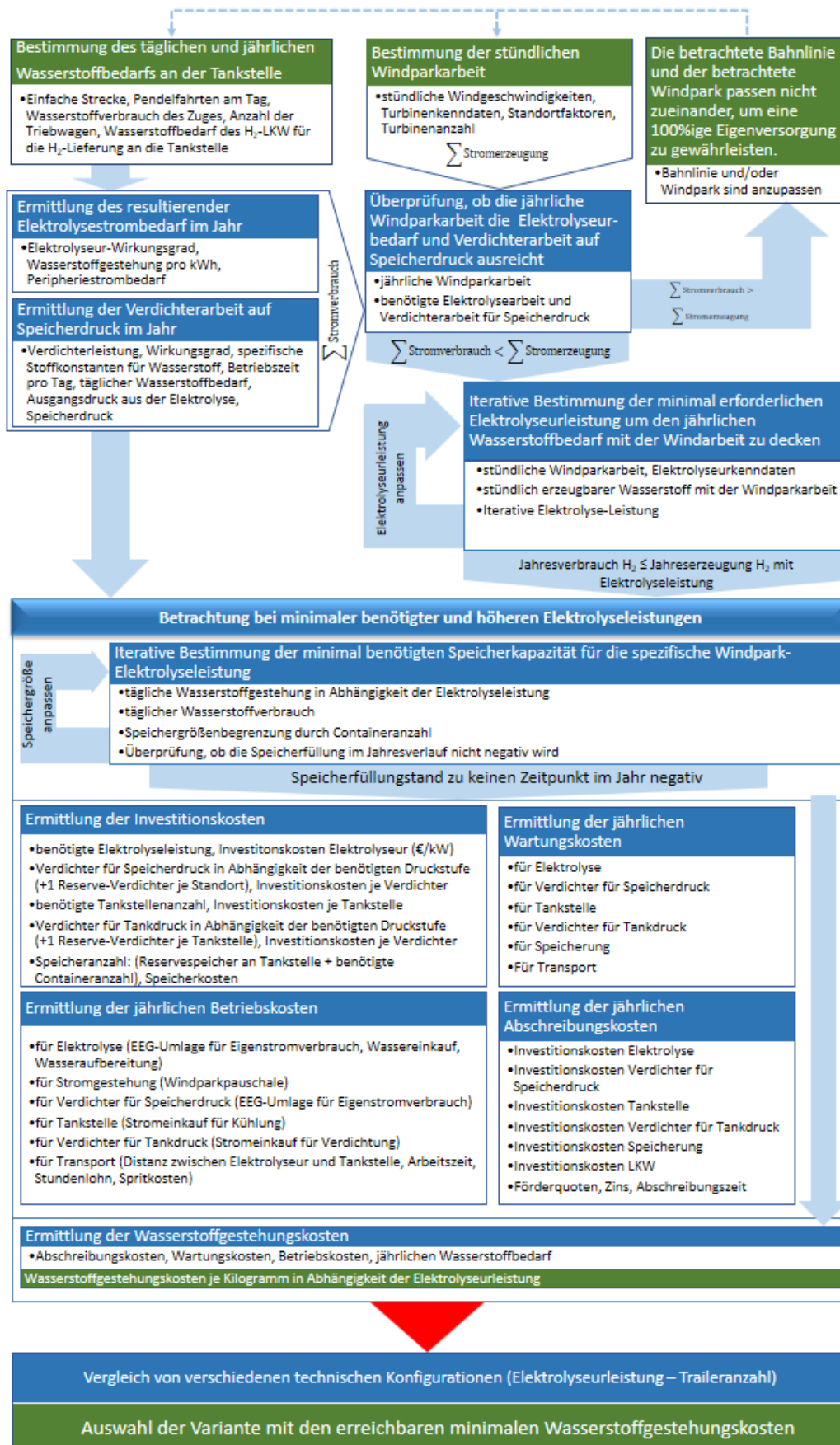
$M_{H_2} \left[\frac{g}{mol} \right]$ = molare Masse des Wasserstoffes: 2,016 g/mol

$R_m \left[\frac{J}{mol K} \right]$ = allgemeine Gaskonstante: 8,314 J/mol K

$T [K]$ = absolute Temperatur, hier 288,15 K (15 °C)

Hieraus ergibt sich eine transportierbare Masse von etwa 225 bis 270 kg Wasserstoff, bei den gewählten 16 Flaschenbündeln pro Trailer also rund 240 kg Wasserstoff pro Trailer.

Anhang D Detailliertes Ablaufschema für die Ermittlung der Gestehungskosten pro kg Wasserstoff für ein Pilotprojekt zum Einsatz von H₂BZ-Triebwagen in Thüringen



Anhang E Rahmenparameter für die Tabellenkalkulation zur iterativen Ermittlung der Wasserstoffgestehungskosten für die Bahnlinie Rottenbach – Katzhütte

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die Rahmenparameter für die Ermittlung der Gestehungskosten für die Wasserstoffversorgung der Bahnlinie Rottenbach – Katzhütte (siehe Abschnitt 4.1).

a) Bahnlinie Rottenbach - Katzhütte		
<u>Bahnstrecke</u>		
einfache Strecke	24,9	km
Anzahl der Triebwagen	2	Triebwagen
Pendelfahrten je Tag und Triebwagen	15	Fahrten
<u>H₂BZ-Triebwagen</u>		
H ₂ -Verbrauch	0,22	kg/km
Tankdruck	350	bar
H ₂ -Tankmenge	180	kg
<u>Zusätzlicher Wasserstoffbedarf</u>		
Betankung von Straßenfahrzeugen	6	kg/d
b) Förderung		
Förderquote für alle Investitionen (keine Betriebskosten)	0 bis 80	%
c) Off-Site-Elektrolyse an einem Windpark		
<u>Elektrolyseurmodule</u>		
Modulleistung mit Periphere (brutto)	100	kW
Modulleistung (netto)	63	kW
Wasserstofferzeugung	0,2	Nm ³ /kWh
Investitionskosten	3.000	€/kW
Abschreibungszeitraum	15	a
Abschreibungs-zins	0,50	%
Wartungskosten (jährlich)	1	% der Investition
<u>Verdichtung auf Speicherdruck</u>		
Gasdruck nach Elektrolyse (Ausgangsdruck)	100	bar
Gastemperatur aus der Elektrolyse	40	°C
Speicherdruck	300	bar
Wirkungsgrad	0,675	-
Investitionskosten Verdichter mittlerer Druck (<300 bar)	500.000	€/Stück
Anzahl der Verdichter (Vorhalten von Redundanz)	2	Stück
Abschreibungszeitraum	15	a
Abschreibungs-zins	0,50	% Zins
Wartungskosten (jährlich)	1	% der Investition

d) Liefer-Tankstelle

Tankstelleninfrastruktur

H ₂ -Speichervorhaltung an Tankstelle (Versorgungssicherheit)	5	d
Investitionskosten (Infrastruktur, 500 bar Speicher, Dispenser)	1.000.000	€
Anzahl Tankstellen	1	Stück
Abschreibungszeitraum	15	a
Abschreibungszeitraum	0,50	% Zins
Wartungskosten (jährlich)	1	% der Investition

Verdichtung auf Tankdruck

Tankdruck	500	bar
Wirkungsgrad	0,675	-
Investitionskosten Verdichter mittlerer Druck (<500 bar)	600.000	€/Stück
Anzahl der Verdichter (Vorhalten von Redundanz)	2	Stück
Abschreibungszeitraum	15	a
Abschreibungszeitraum	0,50	% Zins
Wartungskosten (jährlich)	1	% der Investition

Kühlung

Leistungszahl (COP)	1,43	-
Zieltemperatur	-40	°C

e) Wasserstofflogistik

Transport

Distanz zwischen Elektrolyseur und Tankstelle (Wegstrecke)	85	km
Durchschnittsgeschwindigkeit Sattelzug	50	km/h
Zeit für Trailer aufladen	0,5	h
Zeit für Trailer abladen	0,5	h
Lohnkosten Fahrer (Bruttolohn mit Arbeitgeberentgelt)	30	€/h

Speichertrailer

Flaschenbündel je Trailer	16	
Speichervolumen Flaschenbündel	0,6	Nm ³
H ₂ -Speicherdruck	300	bar
H ₂ -Speichermenge je Trailer	244	kg
Investitionskosten Fahrgestell	30.000	€/Stück
Investitionskosten Flaschenbündel mit Verschaltung	6.550	€/Stück
Investitionskosten Speichertrailer	135.000	€/Stück
Abschreibungszeitraum	15	a
Abschreibungszeitraum	0,50	%
Wartungskosten (jährlich)	1	% der Investition

Variante 1 – Logistik mit Diesel-Lkw

Logistik über Spedition/Fuhrunternehmen (Lkw nur anteilig für Tankstellenbelieferung genutzt)

Investitionskosten Zugmaschine	110.000	€/Stück
Gesamtfahrleistung (Abschreibung)	1.000.000	km
Abschreibungsumlage	0,11	€/km
Wartungskosten (jährlich)	2	% der Investition
Wartungskostenumlage	0,0022	€/km
Kraftstoffverbrauch bei durchschnittlicher Geschwindigkeit	35	l/100 km
Kraftstoffkosten	1,05	€/l

Variante 2 – Logistik mit H₂BZ-LKW:

Lkw ausschließlich für Wasserstofftankstellenbelieferung genutzt

Investitionskosten Zugmaschine	385.000	€/Stück
Abschreibungszeitraum	15	a
Abschreibungszins	0,5	%
Wartungskosten (jährlich)	5	% der Investition
Kraftstoffverbrauch	7,5 - 8,0	kg/100 km

f) Elektrizitätspreise

EEG-Umlage	6,78	ct/kWh
EEG-Umlage für Strom zur Eigenversorgung (Elektrolyse)	40	%
Erlös Stromverkauf bei Direktvermarktung (Windpark)	0,03	€/kWh
Kosten Strombezug Liefer-Tankstelle	0,20	€/kWh
Stromgestehungskosten bei Weiterbetrieb von Windkraftanlagen nach 20 Jahren (Investitionen, Betrieb und Wartung)	0,03	€/kWh

Anmerkung: Sämtliche in der Tabelle angegebenen Preise sind Nettopreise.