

**Van:** Frank Menger

**Onderwerp:** Elektrificatie spoor provincie Limburg heeft gelijk is een taak van het Rijk investeren in bovenleiding ook in context met Duitsland

**Datum:** vrijdag 19 april 2024 09:54:31

**Bijlagen:** [240417-pm-elektrifizierung-der-schiene.pdf](#)  
[Elektrifizierung\\_Bund muss Umsetzung vorantreiben\\_Allianz pro Schiene.pdf](#)  
[Bayerische Elektromobilitätsstrategie Schiene \(BESS\) - Bayerisches Staatsministerium für Wohnen, Bau und Verkehr.pdf](#)  
[bavende\\_150312 Bayerische Elektromobilitätsstrategie Schiene \(BESS\).pdf](#)  
[02 bewertung-alternativer-antriebe\\_outachten-tu-dresden\\_fortschreibung.pdf](#)  
[Mededeling\\_portefeuillehouder inzake voortaan moties 2951 en 2987 inzake Maaslijn, brief oedeputeerde Kuntzelaers van 26-3-2024 \(GS DOC-00628257\).pdf](#)

---

Geachte leden van Staten en gemeenteraden,

Afgelopen maandag 15 april 2024 stond dit bericht op de website van de NOS: <https://nos.nl/artikel/2516894-einde-van-de-dieseltrein-iets-dichterbij-twee-spoorlijnen-krijgen-bovenleiding> . De reactie van de provincie Overijssel op 16 april:

- <https://www.overijssel.nl/nieuws/den-haag-zet-sein-op-groen-voor-elektrificatie-treinverbinding-overijssel-gelderland/>

Maar ook deze week was er over hetzelfde thema elektrificatie van het spoor in Duitsland ook het nodige te doen zowel op nationaal niveau als op het gebied van deelstaat. Dit betreft Bayern met haar elektrificatie strategie. Het is raadzaam de bijlage onder nummer 02 eens goed door te lezen. Want voor grensoverschrijdende spoorlijnen staat elektrificatie door middel van bovenleiding op nummer 1 op de lijst. Dit komt ook door de betrokken partij de TU Dresden.

- <https://www.bayern.de/bayerische-elektromobilitaetsstrategie-schiene-bess/?seite=2453>
- <https://www.stmb.bayern.de/med/pressemitteilungen/pressearchiv/2024/46/index.php>
- [https://www.vdv.de/presse.aspx?id=fae7fde2-73c9-4070-8e8f-4fbf8e580665&mode=detail&coriander=V3\\_0e165c0f-ae0-35de-b469-339592ed5cb9](https://www.vdv.de/presse.aspx?id=fae7fde2-73c9-4070-8e8f-4fbf8e580665&mode=detail&coriander=V3_0e165c0f-ae0-35de-b469-339592ed5cb9)
- <https://www.allianz-pro-schiene.de/presse/pressemitteilungen/elektrifizierung-vorantreiben/#>

Ook met betrekking tot de Maaslijn is er een brief naar de PS daar gegaan. Uw collega's in Limburg hebben volledig gelijk: het Rijk is de enige financieel eindverantwoordelijke partij als het gaat over financiering van de bovenleiding. Dit hoort niet uit uw beperkte provinciale middelen. Maar gewoon via het BO-MIRT geregeld te worden.

Hoop dat u deze informatie nuttig gaat gebruiken in dossiers zoals de Wunderline. Dat ook een veel hoogwaardiger aanbod van treinen via Groningen naar Duitsland kan. Die boven uw eigen concessie treinen rijden.

Met vriendelijke groet,

Frank Menger

---

# Pressemitteilung

Berlin, den 17. April 2024

## **Elektrifizierung: Bund muss Umsetzung vorantreiben**

Allianz pro Schiene und VDV fordern Beschleunigung durch Bürokratieabbau

**Der Bund ist bei der Elektrifizierung des Schienennetzes in Deutschland deutlich im Rückstand. Die Allianz pro Schiene und der Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) beklagen, dass die Bundesregierung ihr im Koalitionsvertrag verankertes Ziel von 75 Prozent Elektrifizierung bis zum Jahr 2030 bei gleichbleibendem Tempo nicht mehr erreichen wird: denn es fehlen noch rund 4.500 Streckenkilometer. Außerdem braucht es aus Sicht beider Verbände eine ehrgeizige Fortschreibung der Ziele, um das Schienennetz resilienter zu machen, Elektrifizierungslücken zu schließen und Engpässe für den Schienengüterverkehr abzubauen.**

Der Geschäftsführer der Allianz pro Schiene, Dirk Flege, sagte bei einer gemeinsamen Pressekonferenz in Berlin: „Bislang sind erst 62 Prozent des Bundesschienennetzes in Deutschland elektrifiziert. Um das 75%-Ziel wie geplant bis 2030 zu erreichen, müsste der Bund sein bisheriges Tempo verachtfachen. Das ist, so bedauerlich wir das finden, beim bisherigen Umsetzungsstand gänzlich unrealistisch.“

Der Geschäftsführer Eisenbahnverkehr des Verbands Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV), Martin Henke: „Wir brauchen hier eindeutig mehr Tempo. Die Branche wünscht sich einen deutlich schnelleren Fortschritt. Wir halten ein Elektrifizierungsziel von 80% bis zum Jahr 2035 nicht nur für wünschenswert, sondern auch für realistisch.“

## **Mehr Tempo durch weniger Bürokratie**

Die von der Bundesregierung eingesetzte Beschleunigungskommission Schiene, in der beide Verbände vertreten waren, hat bereits Ende 2022 Vorschläge gemacht, wie man bei der Elektrifizierung schneller vorankommen könnte. „Neben einer stabilen Finanzierung geht es im Wesentlichen darum, Bürokratie

abzubauen. Sonst vergehen allzu oft viele Jahre bis zur Umsetzung“, so Flege. „Konkret schlagen wir vor, nicht bei jedem einzelnen Elektrifizierungsvorhaben aufs Neue eine Kosten-Nutzen-Bewertung durchzuführen, da es ja ein klares Ziel für mehr Oberleitungen gibt und eine Elektrifizierung ab einer gewissen Streckenauslastung in jedem Fall volkswirtschaftlich sinnvoll ist. Auch kann somit auf aufwändige Genehmigungsverfahren bei kleineren Elektrifizierungsprojekten verzichtet werden. Darüber hinaus würde eine Fondslösung helfen, die Finanzierung von Elektrifizierungsprojekten zu vereinfachen und zu beschleunigen.“

Beide Verbände wiesen zudem darauf hin, dass für Oberleitungen auf Nebenstrecken inzwischen deutlich kostengünstigere Standards entwickelt wurden. Martin Henke: „Bislang wurden Oberleitungen immer für Geschwindigkeiten von mindestens 160 km/h ausgelegt, selbst wenn eine Strecke nur mit deutlich geringerem Tempo befahren wird. Das ist in vielen Fällen unnötig und verursacht unnötig hohe Kosten. Der Branchenverband VDV empfiehlt bei der Elektrifizierung von Nebenstrecken eine Regeloberleitung 100 km/h (Einfachoberleitung), um Bauaufwand und Kosten zu sparen. Generell sollte bei Reaktivierungen mindestens 80 km/h Streckengeschwindigkeit erzielt werden. Das bedeutet nicht nur, dass Elektrifizierungen auf Nebenstrecken günstiger werden, sondern darüber hinaus, dass es im ländlichen Raum spürbar schneller gehen kann.“

Außerdem wiesen beide Verbände darauf hin, dass die Branche auch an anderer Stelle daran arbeite, bei der Elektrifizierung schneller voranzukommen, etwa durch Kooperationen bei der Ausbildung von Oberleitungsmonteuren.

Elektrifizierung bedeutet, eine Schienenstrecke mit einer Oberleitung zu versehen. Der Schienenverkehr wird dadurch noch umweltfreundlicher, weil nach einer Elektrifizierung auf Dieselantriebe verzichtet werden kann. Das Schienennetz wird außerdem leistungsfähiger und resilienter, da auf Strecken mit Oberleitungen längere und schwerere Züge gefahren werden und diese Strecken auch für Umleitungen genutzt werden können.

Weitere Informationen:

- Grafiken zum Download:
  - Beschleunigung bei Elektrifizierung nötig
  - Vorschläge für Strecken-Elektrifizierungen
- Themenseite Elektrifizierung
- Pressekonferenz zum Nachschauen auf youtube

## Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e. V. (VDV)

Lars Wagner · Pressesprecher · T 030 399932-14 · [wagner@vdv.de](mailto:wagner@vdv.de)

Eike Arnold · stv. Pressesprecher · T 030 399932-19 · [arnold@vdv.de](mailto:arnold@vdv.de)

## Allianz pro Schiene

Sabrina Wendling · Pressesprecherin · T 030 246 25 99 20 · [sabrina.wendling@allianz-pro-schiene.de](mailto:sabrina.wendling@allianz-pro-schiene.de)

---

Der **Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV)** ist der Branchenverband des öffentlichen Personen- und Schienengüterverkehrs mit rund **700 Mitgliedsunternehmen**. Branche und Branchenverband sorgen für mehr klimaschonende Beförderung und Transport von Menschen und Gütern bei weniger Verkehr: Rund **7,1 Milliarden Fahrgäste in Deutschland** nutzten im Corona-Jahr 2020 den Öffentlichen Personennahverkehr der VDV-Mitgliedsunternehmen. Busse und Bahnen ersetzen damit jeden Tag rund 14 Millionen Autofahrten auf deutschen Straßen. 2020 transportierten die VDV-Unternehmen im **Schienengüterverkehr 288 Millionen Tonnen** und ersetzen so rund 67.000 voll beladene Lkw auf deutschen Straßen.

---



---

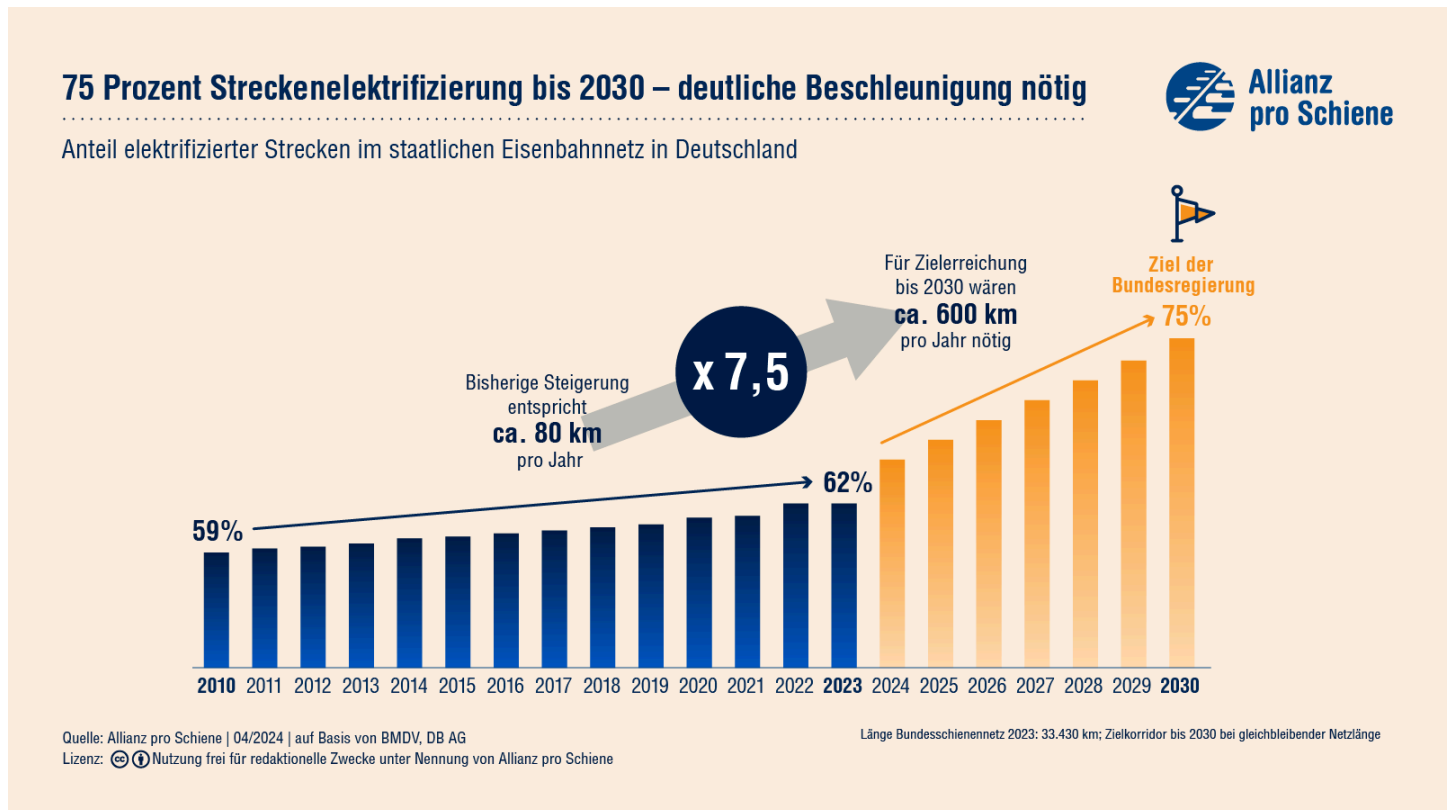
Wenn diese E-Mail nicht korrekt angezeigt wird, klicken Sie bitte [hier](#). Sollten Sie keine Presseinformationen mehr von uns wünschen oder sich Ihre Kontaktdaten geändert haben, informieren Sie uns bitte per Mail an [presse@vdv.de](mailto:presse@vdv.de). Die VDV-Newsletter können Sie [hier](#) abbestellen. Das Löschen Ihrer Daten leiten Sie durch eine E-Mail an [datenschutz@vdv.de](mailto:datenschutz@vdv.de) ein. Hinweise zur Datenverarbeitung beim Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V. (VDV) finden Sie [hier](#). Weitere VDV-Informationen im [Impressum](#).

Startseite / News / Elektrifizierung: Bund muss Umsetzung vorantreiben

Themen: Standard

# Elektrifizierung: Bund muss Umsetzung vorantreiben

Allianz pro Schiene und VDV fordern Beschleunigung durch Bürokratieabbau  
17. April 2024



**Berlin, 17.04.2024.** Der Bund ist bei der Elektrifizierung des Schienennetzes in Deutschland deutlich im Rückstand. Die Allianz pro Schiene und der Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) beklagen, dass die Bundesregierung ihr im Koalitionsvertrag verankertes Ziel von 75 Prozent Elektrifizierung bis zum Jahr 2030 bei gleichbleibendem Tempo nicht mehr erreichen wird: denn es fehlen noch rund 4.500 Streckenkilometer. Außerdem braucht es aus Sicht beider Verbände eine ehrgeizige Fortschreibung der Ziele, um das Schienennetz resilienter zu machen, Elektrifizierungslücken zu schließen und Engpässe für den Schienengüterverkehr abzubauen.

Der Geschäftsführer der Allianz pro Schiene, Dirk Flege, sagte bei einer gemeinsamen Pressekonferenz in Berlin: „Bislang sind erst 62 Prozent des Bundesschiennetzes in Deutschland elektrifiziert. Um das 75%-Ziel wie geplant bis 2030 zu erreichen, müsste der Bund fast acht Mal schneller werden als bisher. Das ist, so bedauerlich wir das finden, beim bisherigen Umsetzungsstand gänzlich unrealistisch.“

Der Geschäftsführer Eisenbahnverkehr des Verbands Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV), Martin Henke, ergänzte: „Wir brauchen hier eindeutig mehr Tempo. Die Branche wünscht sich einen deutlich schnelleren Fortschritt. Wir halten ein Elektrifizierungsziel von 80% bis zum Jahr 2035 nicht nur für

wünschenswert, sondern auch für realistisch.“

## **Mehr Tempo durch weniger Bürokratie**

Die von der Bundesregierung eingesetzte Beschleunigungskommission Schiene, in der beide Verbände vertreten waren, hat bereits Ende 2022 Vorschläge gemacht, wie man bei der Elektrifizierung schneller vorankommen könnte. „Neben einer stabilen Finanzierung geht es im Wesentlichen darum, Bürokratie abzubauen. Sonst vergehen allzu oft viele Jahre bis zur Umsetzung“, so Flege. „Konkret schlagen wir vor, nicht bei jedem einzelnen Elektrifizierungsvorhaben aufs Neue eine Kosten-Nutzen-Bewertung durchzuführen, da es ja ein klares Ziel für mehr Oberleitungen gibt und eine Elektrifizierung ab einer gewissen Streckenauslastung in jedem Fall volkswirtschaftlich sinnvoll ist. Auch kann somit auf aufwändige Genehmigungsverfahren bei kleineren Elektrifizierungsprojekten verzichtet werden. Darüber hinaus würde eine Fondslösung helfen, die Finanzierung von Elektrifizierungsprojekten zu vereinfachen und zu beschleunigen.“

Beide Verbände wiesen zudem darauf hin, dass für Oberleitungen auf Nebenstrecken inzwischen deutlich kostengünstigere Standards entwickelt wurden. Martin Henke: „Bislang wurden Oberleitungen immer für Geschwindigkeiten von mindestens 160 km/h ausgelegt, selbst wenn eine Strecke nur mit deutlich geringerem Tempo befahren wird. Das ist in vielen Fällen unnötig und verursacht unnötig hohe Kosten. Der Branchenverband VDV empfiehlt bei der Elektrifizierung von Nebenstrecken eine Regeloberleitung 100 km/h (Einfachoberleitung), um Bauaufwand und Kosten zu sparen. Generell sollte bei Reaktivierungen mindestens 80 km/h Streckengeschwindigkeit erzielt werden. Das bedeutet nicht nur, dass Elektrifizierungen auf Nebenstrecken günstiger werden, sondern darüber hinaus, dass es im ländlichen Raum spürbar schneller gehen kann.“

Außerdem wiesen beide Verbände darauf hin, dass die Branche auch an anderer Stelle daran arbeite, bei der Elektrifizierung schneller voranzukommen, etwa durch Kooperationen bei der Ausbildung von Oberleitungsmonteuren.

Elektrifizierung bedeutet, eine Schienenstrecke mit einer Oberleitung zu versehen. Der Schienenverkehr wird dadurch noch umweltfreundlicher, weil nach einer Elektrifizierung auf Dieselantriebe verzichtet werden kann. Das Schienennetz wird außerdem leistungsfähiger und resilienter, da auf Strecken mit Oberleitungen längere und schwerere Züge gefahren werden und diese Strecken auch für Umleitungen genutzt werden können.

## **Weitere Informationen:**

[Beschleunigung bei Elektrifizierung nötig \(Grafik zum Download\)](#)

[Elektrifizierte Schienenstrecken nach Bundesländern \(Grafik zum Download\)](#)

[Vorschläge für Strecken-Elektrifizierungen \(Grafik zum Download\)](#)

[Europäischer Vergleich Elektrifizierung \(Grafik zum Download\)](#)

[Elektrifizierung: Vorschläge für mehr Resilienz \(Liste\)](#)

[Themenseite Elektrifizierung](#)

[Die Pressekonferenz zum Nachschauen auf youtube](#)





# Bayerische Elektromobilitätsstrategie Schiene (BESS)

München, 16.04.2024

## Dieselbetrieb im Regionalverkehr soll bis 2040 enden

- Elektrifizierung von mehr als 1.000 km Bahnstrecken in Bayern
- Einsatz von Akku- und Wasserstoff-Zügen
- Testbetrieb mit klimafreundlichem Kraftstoff HVO-100

**Die Staatsregierung hat die Fortschreibung der Bayerischen Elektromobilitätsstrategie Schiene (BESS) beschlossen. Das neue Konzept enthält ein Bündel von Maßnahmen, um den Schienenverkehr klimafreundlicher zu machen. „Wir möchten den Dieselbetrieb im bayerischen Regionalverkehr bis 2040 beenden“, sagt Bayerns Verkehrsminister Christian Bernreiter: „Dafür planen wir die Elektrifizierung weiterer Bahnstrecken und setzen Züge mit klimafreundlichen Antrieben ein.“**

Derzeit verkehren noch gut die Hälfte der Linien des Schienenpersonennahverkehrs in Bayern mit Dieselantrieb. Um dies zu ändern, sollen in den kommenden Jahren zahlreiche Strecken elektrifiziert werden. Im aktuellen Bundesverkehrswegeplan (BVWP) ist in Bayern die Elektrifizierung von überregional bedeutsamen Strecken mit einer Gesamtlänge von 680 km vorgesehen. Darunter fallen die Achse Regensburg – Hof und die so genannte ABS 38 von München über Mühldorf nach Freilassing und Burghausen. Leider kommen die vom Bund finanzierten Projekte nur schleppend voran, für die Franken-Sachsen-Magistrale von Nürnberg nach Hof und Schirnding wurde sogar ein Planungsstopp verhängt.

Für die Elektrifizierung von Strecken, die vorrangig dem Schienenpersonennahverkehr dienen, gewährt der Bund eine Förderung aus Mitteln des Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetzes (GVFG). Um die Förderung beantragen zu können, sind jedoch eine fertige Planung und der Nachweis eines auskömmlichen Nutzen-Kosten-Verhältnisses erforderlich. Hierzu merkt Bernreiter an: „Es ist unsinnig, den volkswirtschaftlichen Nutzen jeder einzelnen Elektrifizierung immer wieder neu zu prüfen. Der Bund sollte endlich auf die von ihm eingesetzte Beschleunigungskommission Schiene hören und die Nutzen-Kosten-Untersuchung für Elektrifizierungsprojekte abschaffen.“

Der Freistaat ist dennoch in Vorleistung gegangen und hat bei den Infrastrukturbetreibern die Planung für die Elektrifizierung von Strecken mit einer Gesamtlänge von rund 210 km beauftragt. Dazu gehören die Strecken im Bayerischen Oberland, die Schnaittachtalbahn im Nürnberger Land und die Illertalbahn von Ulm nach Kempten inklusive der Zweigstrecke nach Weißenhorn. Noch in diesem Jahr sollen Planungsaufträge für die Elektrifizierung weiterer 115 km folgen. Dies betrifft die Strecken Aschaffenburg – Miltenberg, Bayreuth – Schnabelwaid, Kempten – Oberstdorf sowie die Brenzbahn Ulm – Aalen, die abschnittsweise über bayerisches Gebiet führt. Für verschiedene Strecken im Großraum Nürnberg wird eine Elektrifizierung im Rahmen des „Ausbauprogramms S-Bahn Nürnberg“ untersucht.

Für Strecken ohne Elektrifizierungsperspektive setzt die Staatsregierung auf den Einsatz von Akku- und Wasserstoff-Zügen, die inzwischen eine Marktreife für das deutsche Schienennetz erreicht haben. Im Herbst 2024 soll ein 30-monatiger Testbetrieb mit dem Wasserstoff-Zug Mireo Plus H auf den Strecken Augsburg – Füssen und Augsburg – Peißenberg starten. Zwischen Mühldorf und Burghausen werden ab Ende 2026 Wasserstoff-Züge zum Einsatz kommen. Ferner hat die Staatsregierung die Entwicklung eines neuen



Neigetechnik-Fahrzeugs beschlossen. Es soll neben einem Wasserstoff-Antrieb auch über einen Akku und einen Stromabnehmer verfügen und sukzessive ab 2029 auf den Neigetechnik-Linien im Allgäu und in Nordostbayern zum Einsatz kommen.

Ein Betrieb mit Akku-Zügen wird ab 2034 auf den Strecken des Netzes Bayerwald rund um Zwiesel erfolgen. Für weitere Netze im Allgäu, in Oberfranken und im Großraum Nürnberg wird gutachterlich geprüft, wie Akku-Züge dort eingesetzt werden können.

Als Übergangslösung für die Restlaufzeiten von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren wird derzeit die Nutzung des klimafreundlichen Kraftstoffs HVO-100 erprobt, der aus hydriertem Pflanzenöl gewonnen wird. Hierfür wurde die Schienenfahrzeugtankstelle in Straubing umgerüstet. Dort werden Triebzüge betankt, die auf der Gäubodenbahn und der Rottalbahn im Einsatz sind. Der einjährige Testbetrieb läuft noch bis Sommer 2024 und wird von der Technischen Universität Berlin wissenschaftlich begleitet. Auf Basis der gesammelten Erfahrungen soll entschieden werden, ob die Betankung mit HVO-100 fortgesetzt und auf weitere Fahrzeuge ausgeweitet wird.

---

© Bayerisches Staatsministerium für Wohnen, Bau und Verkehr



Sie befinden sich hier: [Startseite](#) › [Presse](#) › **Pressemitteilungen**

# Pressemitteilungen

## Bayerische Elektromobilitätsstrategie Schiene (BESS)

16. April 2024

- **Elektrifizierung von mehr als 1.000 km Bahnstrecken in Bayern**
- **Einsatz von Akku- und Wasserstoff-Zügen**
- **Testbetrieb mit klimafreundlichem Kraftstoff HVO-100**

**Die Staatsregierung hat die Fortschreibung der Bayerischen Elektromobilitätsstrategie Schiene (BESS) beschlossen. Das neue Konzept enthält ein Bündel von Maßnahmen, um den Schienenverkehr klimafreundlicher zu machen. „Wir möchten den Dieselmotor im bayerischen Regionalverkehr bis 2040 beenden“, sagt Bayerns Verkehrsminister Christian Bernreiter: „Dafür planen wir die Elektrifizierung weiterer Bahnstrecken und setzen Züge mit klimafreundlichen Antrieben ein.“**

Derzeit verkehren noch gut die Hälfte der Linien des Schienenpersonennahverkehrs in Bayern mit Dieselantrieb. Um dies zu ändern, sollen in den kommenden Jahren zahlreiche Strecken elektrifiziert werden. Im aktuellen Bundesverkehrswegeplan (BVWP) ist in Bayern die Elektrifizierung von überregional bedeutsamen Strecken mit einer Gesamtlänge von 680 km vorgesehen. Darunter fallen die Achse Regensburg – Hof und die so genannte ABS 38 von München über Mühldorf nach Freilassing und Burghausen. Leider kommen die vom Bund finanzierten Projekte nur schleppend voran, für die Franken-Sachsen-Magistrale von Nürnberg nach Hof und Schirnding wurde sogar ein Planungsstopp verhängt.

Für die Elektrifizierung von Strecken, die vorrangig dem Schienenpersonennahverkehr dienen, gewährt der Bund eine Förderung aus Mitteln des Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetzes (GVFG). Um die Förderung beantragen zu können, sind jedoch eine fertige Planung und der Nachweis eines auskömmlichen Nutzen-Kosten-Verhältnisses erforderlich. Hierzu merkt Bernreiter an: „Es ist unsinnig, den volkswirtschaftlichen Nutzen jeder einzelnen Elektrifizierung immer wieder neu zu prüfen. Der Bund sollte endlich auf die von ihm eingesetzte Beschleunigungskommission Schiene hören und die Nutzen-Kosten-Untersuchung für Elektrifizierungsprojekte abschaffen.“

Der Freistaat ist dennoch in Vorleistung gegangen und hat bei den Infrastrukturbetreibern die Planung für die Elektrifizierung von Strecken mit einer Gesamtlänge von rund 210 km beauftragt. Dazu gehören die Strecken im Bayerischen Oberland, die Schnaittalbahn im Nürnberger Land und die Illertalbahn von Ulm nach Kempten inklusive der Zweigstrecke nach Weißenhorn. Noch in diesem Jahr sollen Planungsaufträge für die Elektrifizierung weiterer 115 km folgen. Dies betrifft die Strecken Aschaffenburg – Miltenberg, Bayreuth – Schnabelwaid, Kempten – Oberstdorf sowie die Brenzbahn Ulm – Aalen, die abschnittsweise über bayerisches Gebiet führt. Für verschiedene Strecken im Großraum Nürnberg wird eine Elektrifizierung im Rahmen des „Ausbauprogramms S-Bahn Nürnberg“ untersucht.

Für Strecken ohne Elektrifizierungsperspektive setzt die Staatsregierung auf den Einsatz von Akku- und Wasserstoff-Zügen, die inzwischen eine Marktreife für das deutsche Schienennetz erreicht haben. Im Herbst 2024 soll ein 30-monatiger Testbetrieb mit dem Wasserstoff-Zug Mireo Plus H auf den Strecken Augsburg – Füssen und Augsburg – Peißenberg starten. Zwischen Mühldorf und Burghausen werden ab Ende 2026 Wasserstoff-Züge zum Einsatz kommen. Ferner hat die Staatsregierung die Entwicklung eines neuen Neigetechnik-Fahrzeugs beschlossen. Es soll neben einem Wasserstoff-Antrieb auch über einen Akku und einen Stromabnehmer verfügen und sukzessive ab 2029 auf den Neigetechnik-Linien im Allgäu und in Nordostbayern zum Einsatz kommen.

Ein Betrieb mit Akku-Zügen wird ab 2034 auf den Strecken des Netzes Bayerwald rund um Zwiesel erfolgen. Für weitere Netze im Allgäu, in Oberfranken und im Großraum Nürnberg wird gutachterlich geprüft, wie Akku-Züge dort eingesetzt werden können.

Als Übergangslösung für die Restlaufzeiten von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren wird derzeit die Nutzung des klimafreundlichen Kraftstoffs HVO-100 erprobt, der aus hydriertem Pflanzenöl gewonnen wird. Hierfür wurde die Schienenfahrzeugtankstelle in Straubing umgerüstet. Dort werden Triebzüge betankt, die auf der Gäubodenbahn und der Rottalbahn im Einsatz sind. Der einjährige Testbetrieb läuft noch bis Sommer 2024 und wird von der Technischen Universität Berlin wissenschaftlich begleitet. Auf Basis der gesammelten Erfahrungen soll entschieden werden, ob die Betankung mit HVO-100 fortgesetzt und auf weitere Fahrzeuge ausgeweitet wird.

[Pressemitteilung auf der Seite des Herausgebers](#)

[Inhalt](#)

[Datenschutz](#)

[Impressum](#)

[Barrierefreiheit](#)





# Bericht

<b>Titel:</b>	<b>Wissenschaftliche Bewertung von alternativen, emissionsarmen Antriebskonzepten für den bayerischen SPNV (Phase 2)</b> <b>Arbeitspaket 1: Analyse der Antriebsarten</b>
<b>Kurztitel:</b>	<b>Alternative Antriebe Bayern 2-1</b>
<b>Auftraggeber:</b>	Bayerische Eisenbahngesellschaft mbH (BEG) Boschetsrieder Str. 69 81379 München
<b>Auftragnehmer:</b>	Technische Universität Dresden Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ Institut für Bahnfahrzeuge und Bahntechnik Professur für Elektrische Bahnen 01062 Dresden
<b>Bearbeiter:</b>	Prof. Dr.-Ing. Arnd Stephan Dipl.-Ing. Nyascha Thomas Wittemann Dipl.-Ing. Tobias Bregulla
<b>Berichtsnummer:</b>	2020/008/EB
<b>Datum:</b>	Dresden, den 09.12.2020

# Freigabe

DATUM	VERSION	ÄNDERUNG/AKTUALISIERUNG
09.12.2020	1.0	Neuerstellung
27.01.2021	1.1	Redaktionelle Korrekturen

Erstellt: Nyascha Thomas Wittemann

09.12.2020.....

Datum, Unterschrift



Freigegeben: Prof. Dr.-Ing. Arnd Stephan

09.12.2020.....

Datum, Unterschrift



# Inhaltsverzeichnis

<b>Freigabe .....</b>	<b>2</b>
<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>3</b>
<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>7</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>10</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>11</b>
<b>1    Ausgangslage und Zielsetzung .....</b>	<b>12</b>
<b>2    Marktübersicht Antriebsarten .....</b>	<b>14</b>
2.1    Fahrzeug- und Anlagenkonzepte für den SPNV .....	14
2.2    Marktübersicht in Deutschland.....	15
2.3    Bestands- bzw. Referenzfahrzeug: Dieseltriebwagen (DMU).....	18
2.3.1    Charakterisierung der Technologie .....	18
2.3.2    Alternative/ Synthetische Kraftstoffe .....	19
2.3.3    Fahrzeugbeispiele Dieseltriebwagen.....	21
2.4    Elektrotriebwagen (EMU) .....	24
2.4.1    Charakterisierung der Technologie .....	24
2.4.2    Fahrzeugbeispiele Elektrotriebwagen .....	26
2.5    Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeuge (BEMU) .....	28
2.5.1    Charakterisierung der Technologie .....	28
2.5.2    Funktionsweise Oberleitungs-/ Batterie-Hybridfahrzeuge .....	30
2.5.3    Fahrzeugbeispiele Oberleitungs-/Batterie-Hybrid .....	32
2.5.4    Übersicht über Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeuge .....	36
2.6    Oberleitungs-/Diesel-Hybrid (Dual-Mode).....	41
2.6.1    Charakterisierung der Technologie .....	41
2.6.2    Funktionsweise Oberleitungs-/ Diesel-Hybrid (Dual-mode) .....	42
2.6.3    Fahrzeugbeispiele Oberleitungs-/Diesel-Hybrid (Dual-Mode).....	44
2.7    Diesel-/Batterie-Hybridfahrzeuge.....	46

2.7.1	Charakterisierung der Technologie .....	46
2.7.2	Funktionsweise Diesel-/ Batterie-Hybrid .....	47
2.7.3	Fahrzeugbeispiel Diesel-/Batterie-Hybrid.....	50
2.8	Wasserstoff-/ Batterie-Hybridfahrzeuge (FCMU/HEMU).....	52
2.8.1	Charakterisierung der Technologie .....	52
2.8.2	Fahrzeugbeispiele Wasserstoff-/Batterie-Hybrid .....	54
2.8.3	Auslegungskriterien für Wasserstofffahrzeuge mit höherer Leistung.....	56
2.9	Nutzung alternativer Antriebe bei Fahrzeugen mit aktiver Wagenkastensteuerung im Bogen (Neigetechnik).....	60
2.9.1	Motivation.....	60
2.9.2	Neigetechnik in Schienenfahrzeugen.....	62
2.9.3	Mögliche Antriebsarten .....	62
2.9.4	Leistungs- und Energiebedarf .....	63
2.9.5	Abschätzung der Machbarkeit anhand der BR 612.....	65
2.9.6	Fazit zur Machbarkeitsabschätzung anhand der BR 612 .....	69
<b>3</b>	<b>Infrastruktur Oberleitungs-/ Batterie-Hybrid.....</b>	<b>70</b>
3.1	Ladeinfrastruktur zum Einsatz von Oberleitungs-/ Batterie- Hybridfahrzeugen .....	70
3.2	Allgemeine Anforderungen für die Elektrifizierung .....	71
3.2.1	Anforderungen der Sicherungstechnik.....	72
3.2.2	Anforderungen des Personenschutzes im Fall eines Kurzschlusses oder Fahrleitungsrisses .....	72
3.2.3	Anforderungen an Lichtraumprofil und Streckenklasse .....	74
3.3	Speisung mit Bahnstrom aus zentralem Bahnstromnetz.....	78
3.4	Speisung aus dem Landesnetz.....	79
3.4.1	Allgemeine Randbedingungen .....	79
3.4.2	Vollumrichterlösung mit 16,7 Hz.....	80
3.4.3	Trafolösung mit 50 Hz.....	81

---

3.4.4	Symmetrierumrichterlösung mit 50 Hz .....	83
3.5	Teilelektrifizierung als Verlängerung oder Inseloberleitung .....	84
<b>4</b>	<b>Infrastruktur für Wasserstoffbereitstellung.....</b>	<b>85</b>
4.1	Wasserstoffversorgung .....	85
4.2	Herstellung.....	86
4.2.1	Prozesse.....	86
4.2.2	Einbindung erneuerbarer Energien.....	88
4.3	Bereitstellung.....	92
4.3.1	Aggregatzustände.....	92
4.3.2	Verteilungskonzepte .....	94
4.4	Systemkonzepte für die Versorgung.....	95
4.4.1	Standortwahl.....	95
4.4.2	Systemauswahl .....	96
<b>5</b>	<b>Wirtschaftliche Kenndaten.....</b>	<b>97</b>
5.1	Beschaffungs- und Instandhaltungskosten Fahrzeuge .....	97
5.2	Infrastrukturkosten.....	98
5.2.1	Tankstellenkosten .....	99
5.2.2	Kosten für Teilelektrifizierungen und Ladestationen .....	100
5.3	Energiekosten .....	100
<b>6</b>	<b>CO<sub>2</sub>-Emissionsvergleich .....</b>	<b>102</b>
6.1	CO <sub>2</sub> -Emissionen einer Beispielstrecke über 25 Jahre .....	102
6.2	Linien-spezifische Bestimmung von CO <sub>2</sub> -Reduktionspotentialen.....	106
6.2.1	Aufgabenstellung und Ausgangslage .....	106
6.2.2	Bestimmung des Energiebedarfs je Technologie .....	106
6.2.3	Überführung in CO <sub>2</sub> -Emissionen je Linie bzw. Gesamtnetz.....	107
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Fazit.....</b>	<b>108</b>



7.1	Betrieblich-technische Bewertung.....	108
7.2	Ökologische Bewertung .....	109

# Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1 Diesel-SPNV Linien in Deutschland (nach Länge absteigend sortiert).....	17
Abb. 2-2 Antriebsstrang dieselmechanisch (schematisch).....	18
Abb. 2-3 Beispiel Bestandsfahrzeug Siemens Desiro Classic, Baureihe 642 (Foto: Kriesel).....	22
Abb. 2-4 Beispiel Bestandsfahrzeug ADtranz/ Stadler RegioShuttle RS 1.....	22
Abb. 2-5 Beispiel Neufahrzeug Alstom Lint 54, Baureihe 622.....	23
Abb. 2-6 Antriebsstrang klassischer elektrischer Elektrotriebzug (schematisch).....	24
Abb. 2-7 Siemens Mireo Elektrotriebzug (Foto DB/Uwe Miethe).....	26
Abb. 2-8 Alstom Coradia Continental Plattform.....	27
Abb. 2-9 Antriebsstrang Oberleitungs-/Batterie-Hybrid im Oberleitungsbetrieb (schematisch).....	31
Abb. 2-10 Antriebsstrang Oberleitungs-/Batterie-Hybrid im Batteriebetrieb (schematisch).....	31
Abb. 2-11 Beispiel Siemens Cityjet Eco.....	32
Abb. 2-12 Beispiel Siemens Mireo Plus B für das Netz Ortenau, Rendering.....	33
Abb. 2-13 Beispiel Bombardier Talent 3 BEMU.....	33
Abb. 2-14 Beispiel Stadler Flirt Akku.....	34
Abb. 2-15 Beispiel Stadler Flirt Akku für Schleswig-Holstein, Rendering.....	35
Abb. 2-16 Beispiel Alstom Coradia Continental BEMU, Rendering.....	36
Abb. 2-17 Antriebsstrang Oberleitungs-/Diesel-Hybrid (Dual-mode) im Oberleitungsbetrieb (schematisch).....	42
Abb. 2-18 Antriebsstrang Oberleitungs-/Diesel-Hybrid (Dual-mode) im Dieselbetrieb (schematisch).....	43
Abb. 2-19 Beispiel Stadler Flirt für Greater Anglia, GB.....	44

---

Abb. 2-20 Unterbringung der Komponenten der 2. Traktionsart in weiterem Wagenkasten .....	44
Abb. 2-21 Beispiel Alstom Coradia Polyvalent.....	45
Abb. 2-22 Antriebsstrang Diesel-/ Batterie-Hybrid im Oberleitungsbetrieb (schematisch).....	47
Abb. 2-23 Antriebsstrang Diesel-/Batterie-Hybrid im Diesel-/Batterie-Hybrid- Betrieb (schematisch).....	48
Abb. 2-24 Antriebsstrang Diesel-/Batterie-Hybrid im Batteriebetrieb (schematisch) .....	49
Abb. 2-25 Beispiel DB Erzgebirgsbahn EcoTrain mit Oberleitungs-Nachladung (Fotomontage) .....	50
Abb. 2-26 Eco Train mit deutlich erkennbarem zusätzlichem Dachaufbau.....	51
Abb. 2-27 Antriebsstrang eines Wasserstoff-/Batterie-Hybrid .....	53
Abb. 2-28 Beispiel Alstom iLint .....	54
Abb. 2-29 Beispiel Siemens Mireo Plus H, Rendering .....	55
Abb. 2-30 Beispiel Stadler H2-Triebzug Zillertalbahn, Österreich, Rendering.....	56
Abb. 2-31: BR 612 im Bogen mit deutlich erkennbarer Neigung.....	61
Abb. 2-32 Kräfte und Leistungen in der Ebene sowie einer 5 Promille Steigung.....	64
Abb. 2-33: Energiebedarf in kWh/100 km in der Ebene sowie der Steigung .....	65
Abb. 2-34: Abschätzung der Antriebsbezogenen Volumina im Fahrzeug.....	66
Abb. 3-1 nicht mit der Rückleitung verbundener Beleuchtungsmast, Anschlüsse Schraubverbindungen zur Nachrüstung erkennbar (Foto: Wittemann).....	73
Abb. 3-2 Nicht mit der Rückleitung verbundene Bahnsteigmöblierung (Foto: Wittemann).....	74
Abb. 3-3 Geländer ohne Längsverbindung, jedoch mit hierfür vorgesehenen Laschen (Foto: Wittemann).....	74

---

Abb. 3-4 Bahnsteigdach im Lichtraumprofil des Stromabnehmers (Foto: Wittemann).....	74
Abb. 3-5 beispielhaftes Brückenbauwerk (Foto & Grafik: Wittemann).....	75
Abb. 3-6 Profilprüfung eines Tunnels mit Maßabschätzung zur Gleisverschiebung (Foto & Grafik: Wittemann).....	76
Abb. 3-7 Beispiele zu prüfender Brücken: genietete Stahlträgerbrücke (oben) bzw. alte Betonbrücke aus den 1930er Jahren (unten) .....	77
Abb. 3-8 Beispielhafte Abbildung Bahn-Unterwerk der DB Energie (Foto: DB Netz) .....	79
Abb. 3-9 Mast einer 110-kV-Bahnstromleitung (Foto: Wittemann).....	79
Abb. 3-10 Aufbau einer 15-kV-16,7-Hz-Ladestation mit Vollumrichter (Grafik: Wittemann).....	81
Abb. 3-11 Aufbau einer 15-kV-50-Hz-Ladestation mit Trafolösung (Grafik: Wittemann).....	82
Abb. 3-12 Aufbau einer 15-kV-50-Hz-Ladestation mit Symmetrierumrichterlösung (Grafik: Wittemann).....	84
Abb. 4-1: Darstellung der schwankenden Verfügbarkeit von Solar- (orange) und Windenergie-Onshore (grün) im Verlauf von zweieinhalb Tagen.....	88
Abb. 4-2: Topologie des „Energiepark Mainz“ – Energieversorgungs- Möglichkeit aus dem öffentlichen Netz ist nicht dargestellt. ....	90
Abb. 4-3: Power to Gas (P2G/PTG) Anlage des „Energiepark Mainz“ .....	90
Abb. 4-4: Energetische und stoffliche Topografie des Projekts „Westküste 100“ .....	91
Abb. 4-5: Wasserstofftrailer mit integrierter Verdichtung und Dispensern. Quelle: Linde AG, 2016.....	96
Abb. 6-1: Technologiespezifische CO2-Emissionen im Betrachtungszeitraum von 25 Jahren .....	103

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Übersicht synthetische Kraftstoffe .....	21
Tabelle 5-1 Kostensätze Fahrzeugkostenanteile für verschiedene Antriebskonzepte .....	97
Tabelle 5-2 Kostensätze Energie für verschiedene Ladestationen .....	100
Tabelle 5-3 Kostensätze Energie für verschiedene Antriebskonzepte .....	101

# Abkürzungsverzeichnis

BEG	Bayrische Eisenbahngesellschaft mbH
BEMU	Battery Electric Multiple Unit (Oberleitungs-/ Batterie-Hybridtriebwagen)
BZ	Brennstoffzelle
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid, chemische Verbindung
DB (AG)	Deutsche Bahn (Aktiengesellschaft)
DMU	Diesel Multiple Unit (Dieseltriebwagen)
EB	Elektrische Bahnen
EMU	Electric Multiple Unit (Elektrotriebwagen)
EVU	Eisenbahnverkehrsunternehmen
FCMU	Fuel Cell Multiple Unit (Wasserstoff-/ Batterie-Hybridtriebwagen)
HEMU	Hydrogen-Electric Multiple Unit
HU	Hauptuntersuchung
H <sub>2</sub>	Wasserstoff, chemisches Element
kW	Kilowatt (Einheit einer Leistung)
kWh	Kilowattstunde (Einheit einer Energiemenge)
LFP	Lithiumbasierte Akkumulatortechnologie Lithiumeisenphosphat
LTO	Lithiumbasierte Akkumulatortechnologie Lithiumtitanatoxid
NMC	Lithiumbasierte Akkumulatortechnologie Nickel-Mangan-Cobalt-Oxide
TUD	Technische Universität Dresden

# 1 Ausgangslage und Zielsetzung

Die Bayerische Eisenbahngesellschaft mbH BEG organisiert als Aufgabenträger den gesamten SPNV im Freistaat Bayern. SPNV-Leistungen, die in den kommenden Jahren zur Ausschreibung anstehen, sollen möglichst mit effizienten und emissionsarmen Antriebssystemen erbracht werden. Ziel ist es, zukünftige Ausschreibungen mit jeweils vorher ausgewählten Antriebskonzepten durchzuführen, um einerseits Vergleichbarkeit bzw. Chancengleichheit für die potenziellen Wettbewerber zu gewährleisten und andererseits rechtzeitig Ausbaukonzepte für die benötigte Infrastruktur zu veranlassen.

Auf elektrifizierten Strecken sind leistungsstarke, effiziente und instandhaltungsarme elektrische Fahrzeugantriebe mit Drehstrommotoren seit vielen Jahren Standard. Auf nichtelektrifizierten Strecken dominieren aktuell dieselmechanische und dieselhydraulische Antriebe. Gründe für den Einsatz von Dieselfahrzeugen sind einerseits die niedrigen Leistungsanforderungen mit akzeptablen Reichweiten und andererseits die geringen Infrastrukturanforderungen.

Allerdings sind Verbrennungsantriebe mit lokalen CO<sub>2</sub>-, Schadstoff- und Lärmemissionen behaftet. Zudem kostet derzeit die Traktionsenergie am Rad bei elektrischem Betrieb mit Oberleitungen weniger als die Hälfte als bei Dieselbetrieb, was trotz annähernd gleicher Beschaffungskosten pro Kilowattstunde am deutlich höheren Wirkungsgrad des elektrischen Antriebs liegt. Darüber hinaus bieten elektrische Traktionsantriebe grundsätzlich die Möglichkeit der Rekuperation von Bremsenergie. Auf nichtelektrifizierten Strecken müssen dann allerdings Energiespeicher auf den Fahrzeugen mitgeführt werden. Diese eröffnen wiederum die Möglichkeit des (abschnittsweise) emissionsfreien Fahrens, etwa in Gebieten mit Abgas- oder Lärmschutzanforderungen sowie bei Tunnelbetrieb. Klassische Streckenelektrifizierungen mit Oberleitungen als Alternative zum Dieselbetrieb lohnen sich wirtschaftlich jedoch erst bei höheren Verkehrsleistungen.

Im Kontext der aktuellen umweltpolitischen Diskussion und langfristiger wirtschaftlicher Überlegungen besteht deshalb Handlungsbedarf für bisher nichtelektrifizierte Bahnverkehre. Hier versprechen die schon am Markt verfügbaren alternativen Antriebslösungen auch ohne vollständige Streckenelektrifizierungen einen emissionsarmen, umweltfreundlicheren Betrieb.

In einer ersten Studie hat die Professur für Elektrische Bahnen der TU Dresden im Auftrag der BEG im Jahr 2017 Untersuchungen zu verfügbaren Technologien und

deren Wirtschaftlichkeit durchgeführt. Zwischenzeitlich haben sich sowohl der Anbietermarkt als auch die verfügbaren Fahrzeug- und Antriebstechnologien derart weiterentwickelt, dass ein Update der Studie aus 2017 geboten ist.

Für die Fahrzeugantriebskonzepte und deren Energieversorgung sind somit Untersuchungen zu verfügbaren Technologien und deren Lebenszykluskosten sowie CO<sub>2</sub>-Emissionen durchzuführen. Die zum Betrieb erforderlichen Energieversorgungsanlagen je Antriebsart werden inklusive der jeweiligen Vor- und Nachteile analysiert, insbesondere deren Kosten und notwendige Standorte zur Abwicklung eines stabilen Betriebes.

In dieser Studie wird zunächst eine Marktanalyse durchgeführt, die Aspekte der Marktverfügbarkeit bis ca. zum Jahr 2025, Beispielfahrzeuge und Randbedingungen zur Zuverlässigkeit sowie zur Reichweite aufzeigt. Die Markterkundung dient auch zur Präzisierung der vorliegenden Kostenparameter, insbesondere der Beschaffungs- und Instandhaltungskosten von Fahrzeugen und Infrastruktur sowie der Ermittlung der kontinuierlich anfallenden Kosten als spezifische Werte. Außerdem werden die zu erwartenden CO<sub>2</sub>-Emissionen analysiert und dargestellt.

**Hinweis:**

Im Rahmen dieser Studie wird der Begriff „Batterie“, der allgemein nur einen nicht wieder aufladbaren chemischen Energiespeicher beschreibt, entsprechend allgemeiner Gepflogenheiten als Synonym für den wieder aufladbaren „Akkumulator/Akku“ verwendet.



## 2 Marktübersicht Antriebsarten

### 2.1 Fahrzeug- und Anlagenkonzepte für den SPNV

Bei einer Neuvergabe eines Verkehrsvertrags in einem bestehenden Dieselnetz ergeben sich prinzipiell die folgenden Möglichkeiten bei der Fahrzeugwahl:

- 1 **Weiterbetrieb mit klassischen Dieselfahrzeugen (DMU)**
  - Referenzfall als Basis für Kostenvergleich
  - Einsatz ohne zusätzliche Infrastruktur möglich
  - Ggf. Nutzung synthetischer Kraftstoffe möglich
- 2 **Einsatz klassischer Elektrofahrzeuge (EMU)**
  - Streckenelektrifizierung des Gesamtnetzes erforderlich
- 3 **Oberleitungs-/Diesel-Hybridfahrzeuge (sog. Dual-Mode-Fahrzeuge)**
  - Fahrzeugausrüstung mit elektrischem Antrieb und zusätzlichem Dieselmotor-Generatorsatz für Fahrten auf nicht elektrifizierten Abschnitten
  - Kein elektrochemischer Energiespeicher → keine Energiespeicherung beim Bremsen möglich
  - Einsatz ohne zusätzliche Infrastruktur möglich
- 4 **Diesel-/Batterie-Hybridfahrzeuge**
  - Bisherige Konzepte: Umbaufahrzeuge aus klassischen Dieseltriebwagen
  - Fahrzeugausrüstung mit elektrischem Antrieb, ergänzt mit einem elektrochemischen Energiespeicher (Batterie) und einem Dieselmotor-Generatorsatz
  - Nachlade-Infrastruktur für wirtschaftlichen Betrieb erforderlich (Nutzung vorhandener Oberleitung + ggf. Bau zusätzlicher Ladestationen)
- 5 **Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeuge (BEMU)**
  - Fahrzeugausrüstung entsprechend klassischer Elektrofahrzeuge, erweitert um zusätzlichen elektrochemischen Energiespeicher (Batterie)
  - Nachlade-Infrastruktur erforderlich (Nutzung vorhandener Oberleitung plus ggf. Bau zusätzlicher Elektrifizierungsabschnitte bzw. Ladestationen)
- 6 **Batterieelektrisches Fahrzeug (BMU)**
  - Keine Nachlade- sowie Betriebsmöglichkeit an der Oberleitung gegeben. Nur reine Standladung möglich.
  - Keine Nutzung von Teilelektrifizierungen, lange Ladezeiten.
  - Hohe betriebliche und fahrdynamische Anforderungen erschweren die Nutzung des Konzeptes (Reichweite, Wende- & Betriebszeiten)
  - Markteinführung nicht zu erwarten, daher keine weitere Betrachtung im Rahmen dieser Studie.

## 7 Wasserstoff-/Batterie-Hybridfahrzeuge (FCMU/HEMU)

- Fahrzeugausrüstung mit elektrischem Antrieb und elektrochemischem Energiespeicher (Batterie) sowie Brennstoffzelle
- Wasserstoff-Tankinfrastruktur und -logistik erforderlich

**Aufgrund der aktuellen umweltpolitischen Debatte stellen die o. g. Alternativen 1, 3 und 4 jedoch keine vorrangigen Optionen für die BEG dar.**

Die aktuell teilweise in Bayern eingesetzten Dieselfahrzeuge der Typen RegioShuttle (RS1) BR 650 des Herstellers Stadler, Lint 27 BR 640 des Herstellers Alstom sowie BR 641 des Herstellers Alstom/LHB eignen sich im Allgemeinen nicht für die Umrüstung auf das Diesel-/Batterie-Hybridkonzept aufgrund der Fahrzeuggröße und der dort nicht installierbaren zusätzlich notwendigen technischen Systeme für die Hybridisierung. Aktuell werden zudem von keinem Hersteller entsprechend kleine Dieselfahrzeuge in zugelassener Serienreife angeboten, die einen 1:1-Ersatz ermöglichen würden. Eine Umstellung auf alternative Antriebe erscheint deshalb nur mit größeren Fahrzeugen (mind. Zweiteiler mit Jacobs-Drehgestellen) möglich. Ziel sollte demzufolge zunächst ein möglichst langer Weiterbetrieb der Altfahrzeuge sein, jedoch abhängig von der Wirtschaftlichkeit weiterer Instandhaltung und den Energiekosten.

## 2.2 Marktübersicht in Deutschland

Das deutsche Schienennetz ist zu ca. 60 % elektrifiziert während es im Bundesland Bayern nur knapp 9 Prozentpunkte weniger sind<sup>1</sup>. Dennoch wird mehr als 90 % der Verkehrsleistung (Personen- bzw. Tonnenkilometer) elektrisch erbracht. Der Betrieb auf nicht elektrifizierten Strecken beschränkt sich überwiegend auf den Regionalverkehr, der dadurch jedoch noch immer zu ca. 1/3 der Zugkilometer mit Dieselfahrzeugen (überwiegend Triebwagen) betrieben wird. Die hier eingesetzten Dieselfahrzeuge sind im Hinblick auf die Emissionsfreiheit des Verkehrssektors in Zukunft zu ersetzen. Nach Zahlen der BAG SPNV aus dem Jahr 2017 werden in Bayern noch ca. 41 % der Zugkilometer mit Diesel erbracht.<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup> <https://www.allianz-pro-schiene.de/themen/infrastruktur/daten-fakten/>, abgerufen am 19. Mai 2020.

<sup>2</sup> <https://bag-spnv.de/files/bagspnv/downloads/Dossier%20Verteilung%20Traktion%20BL%20final%202018.pdf>, BAG SPNV, 2017.

Besonders für Ausschreibungen mit Betriebsaufnahmen zwischen 2023 und 2032 ist die Frage nach einem entsprechenden alternativen Antrieb bereits jetzt zu stellen. Während bis 2023 noch überwiegend Dieseltriebwagen zum Betriebsstart eingesetzt werden, ist die Traktionsart für Betriebsaufnahmen nach 2024 meist noch nicht endgültig festgelegt<sup>3</sup>. Nach aktuellem Stand sind jedoch bereits einige Netze fest mit alternativ angetriebenen Fahrzeugen geplant.

---

<sup>3</sup> Marktanalyse alternativer Antriebe im deutschen SPNV, NOW GmbH, 2020.

Diese verteilen sich wie folgt:

- 49,8 Mio. Zug-km für Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeuge
- 5,6 Mio. Zug-km für Wasserstoff-/Batterie-Hybridfahrzeuge
- 3,8 Mio. Zug-km für Batterie-Hybridfahrzeuge oder Wasserstoff-/Batterie-Hybridfahrzeuge (noch kein Ausschreibungsergebnis bekannt)
- 171 Mio. Zug-km ohne Entscheidung für eine Antriebstechnologie

Es ist erkennbar, dass ein Großteil der zum Betrieb mit alternativen Antrieben vorgesehenen Zugkilometer, für die bereits eine Technologieentscheidung getroffen wurde, mit Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeugen erbracht werden sollen.

Dies ist unter Berücksichtigung der Abb. 2-1 und den heute möglichen Reichweiten der Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeuge nachvollziehbar. Die Abbildung charakterisiert die im Bezug zur Linienlänge vorhandenen Distanzen zwischen elektrifizierten Abschnitten, die jeweils mit einem alternativen Antriebskonzept oder Diesel überbrückt werden müssen. Während Oberleitungs-/ Batterie-Hybridfahrzeuge nach aktuellem Stand wirtschaftlich etwa zwischen 50 und 100 km Reichweite bieten, sind mit Wasserstoff-/Batterie-Hybridfahrzeugen (600 – 800 km Reichweite) Umlaufpläne möglich, die mit dem Dieselbetrieb vergleichbar sind. Die Reichweiten charakterisieren demzufolge die wirtschaftlich sinnvollen unterschiedlichen Einsatzgebiete dieser Technologien.

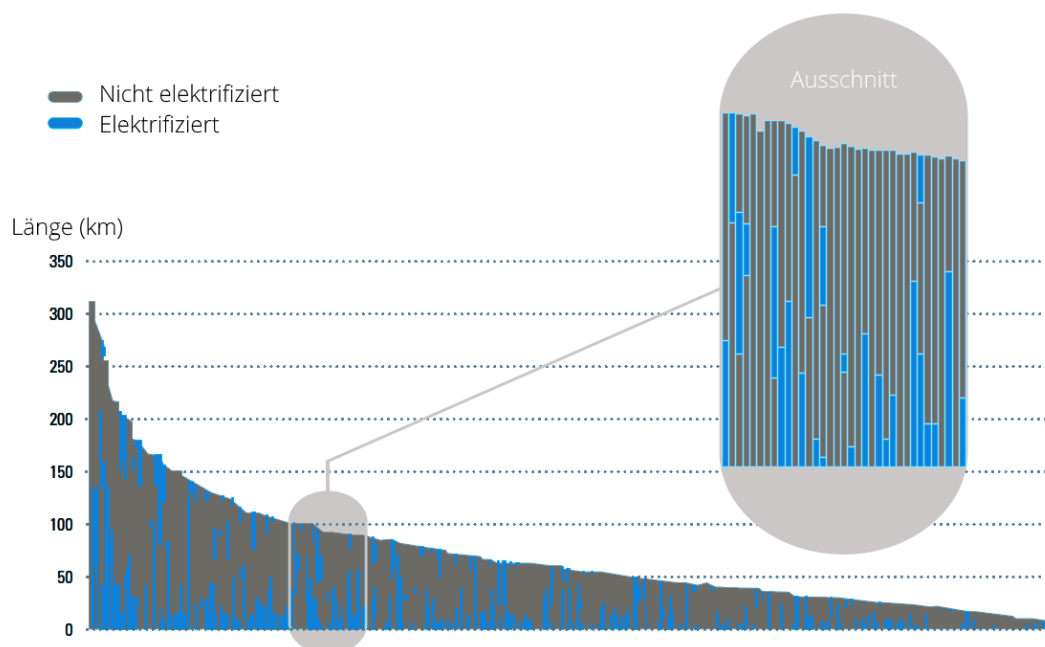


Abb. 2-1 Diesel-SPNV Linien in Deutschland (nach Länge absteigend sortiert)<sup>4</sup>

<sup>4</sup> Marktanalyse alternativer Antriebe im deutschen Schienenpersonennahverkehr, NOW GmbH, 2020.

Je größer die Elektrifizierungslücke ist, desto höher ist die erforderliche Reichweite (sofern keine Nachlademöglichkeiten eingerichtet werden), insbesondere, wenn am Linienendpunkt keine Fahrleitung vorhanden ist (Bedienung im Stich). Werden die Lücken größer als die überbrückbaren Reichweiten, können sich Wasserstoff-/Batterie-Hybridfahrzeuge anbieten.

## 2.3 Bestands- bzw. Referenzfahrzeug: Dieseltriebwagen (DMU)

### 2.3.1 Charakterisierung der Technologie

Klassische Dieseltriebwagen mit geringer Leistung (bis ca. 1,2 MW) stellen den Stand der Technik im Nahverkehr auf Nebenbahnen dar. Betrieblich bietet die Technologie einige Vorteile: hohe Reichweiten von ca. 1000 km zwischen dem Tanken und eine flächendeckend vorhandene, technologisch einfache und kostengünstige Tankinfrastruktur ermöglichen einen flexiblen Einsatz auf allen Strecken. Dies gilt auch bei Veränderungen im Liniennetz, bei einer Umsetzung in andere Netze aufgrund von Betreiberwechseln sowie für Umleitungen/Linienkürzungen bei Baustellen.

Dieselfahrzeuge verfügen über meist mehrere kompakte und als gesamte Einheit schnell austauschbare Traktionsanlagen bestehend aus Motor, Getriebe, Kühlung, Abgasnachbehandlung, Hilfsbetriebeversorgung, ggf. Retarder etc., die in sogenannten Power Packs zusammengefasst sind.

Die technologisch einfache Umsetzung des Antriebes im Fahrzeug ermöglicht es außerdem, kurze und leichte Fahrzeuge (siehe aktuelle Bestandsfahrzeuge) zu bauen sowie niedrige Streckenklassen zu befahren. Besonders auf Nebenbahnen sind die Streckenklassen A (Radsatzlast < 16 t/Radsatz) und B (Radsatzlast < 18 t/Radsatz) anzutreffen. Kurze Fahrzeuge mit geringer Sitzplatzkapazität können vor allem auf wenig ausgelasteten Strecken die Betriebskosten niedrig halten. Die geringe Masse und der daraus folgend niedrigere Energiebedarf sowie die geringere Anzahl an Drehgestellen und Traktionsanlagen (günstigere Instandhaltung) führen im Vergleich zu längeren Fahrzeugen zu geringeren Betriebskosten. Zudem können kurze Bahnsteiglängen bedient werden.

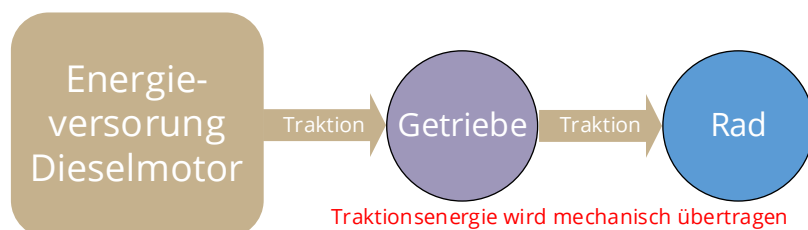


Abb. 2-2 Antriebsstrang dieselmechanisch (schematisch)

## **Traktion**

Die Traktionsenergie wird vom Dieselmotor über einen mechanischen (in Einzelfällen auch elektrischen) Antriebsstrang zum Rad übertragen.

## **Bremsen**

Die Bremsenergie wird durch Retarder (In Einzelfällen bei elektrischen Antriebssträngen auch in Bremswiderständen) verschleißfrei in Wärme gewandelt bzw. durch mechanische Bremsen aufgebracht. Die Wiederverwendung der Bremsenergie durch Speicherung ist nicht möglich.

## **Umweltaspekte**

Größter Nachteil des Dieselantriebs sind die unmittelbaren Emissionen von Schadstoffen wie Stickoxiden (NOx) und Kleinstpartikeln (Feinstaub/ PM) sowie des klimaschädlichen Gases CO<sub>2</sub>. Werden Neufahrzeuge in Betrieb genommen, so müssen diese seit 2019 den EU- Emissionsstandard Stage V erfüllen<sup>5</sup>. Dieser reduziert die Schadstoffemissionen erheblich verglichen mit Fahrzeugen mit Betriebsbeginn vor 1999 (Gültigkeitsbeginn des Emissionsstandards Stage 1).

Die Emission von CO<sub>2</sub> ist jedoch ausschließlich von der Verbrauchsmenge des Kraftstoffs abhängig. In diesem Bereich sind bei heutigen Dieselmotoren bereits nahezu alle physikalischen Grenzen ausgeschöpft, es kann deshalb allenfalls von einer begrenzten Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen durch den Einsatz von Neufahrzeugen ausgegangen werden.

Hinzu kommen erhebliche Schallemissionen, vor allem im Beschleunigungsvorgang. Verursacht werden diese durch erhöhte Drehzahlen der Dieselmotoren. Auch im Stillstand werden die tieffrequenten Motorengeräusche gegebenenfalls als störend wahrgenommen; ein Abschalten der Motoren ist aber häufig wegen der weiter notwendigen Heizung/Klimatisierung nicht möglich.

### **2.3.2 Alternative/ Synthetische Kraftstoffe**

Aktuell wird in Dieseltriebfahrzeugen ausschließlich fossiler Dieselkraftstoff eingesetzt<sup>6</sup>. Die Beimischung von Biodiesel ist aufgrund zahlreicher Auswirkungen auf den Kraftstoff selbst, die Verbrennung sowie Teile des Motors und der Versorgungseinrichtungen nur begrenzt möglich. Da sich dadurch allenfalls eine Reduktion der

---

<sup>5</sup> <https://www.dieselnet.com/standards/eu/nonroad.php>. [Zugriff am 19 Mai 2020].

<sup>6</sup> <https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/343542/> [Zugriff am 19. Mai 2020]

CO<sub>2</sub> Emissionen, nicht jedoch eine vollständige Neutralität ergibt, ist eine ausschließliche Beimischung von Biokraftstoffen oder synthetischen Kraftstoffen nicht zweckmäßig.

Größere Relevanz könnten flüssige Kraftstoffe erreichen, die auf Basis von Power-to-X-Verfahren erzeugt werden. Diese ermöglichen die strombasierte Herstellung von Kraftstoffen und stellen einen möglichen Pfad der Sektorkopplung zwischen erneuerbarer Energieerzeugung und dem Verkehrssektor dar. Eine bereits angewandte Variante ist hierbei die Elektrolyse zur Erzeugung von Wasserstoff. Durch weitere Verfahren können aus diesem gasförmigen Stoff auch flüssige Kraftstoffe synthetisiert werden (Power-to-Liquid (PtL)/Power-to-Fuels)<sup>7</sup>. Flüssige Kraftstoffe bieten gegenüber gasförmigem Wasserstoff den Vorteil der leichteren Handhabbarkeit im Betrieb und eine Speicherung auf dem Fahrzeug ohne Druckbehälter. Durch die geringen Prozesswirkungsgrade der Herstellung und der anschließenden Verbrennung im Dieselmotor ist der Gesamtwirkungsgrad sehr niedrig (< 25 %), so dass dies nur eine sinnvolle Anwendung bei Sektorenkopplung mit klimaneutral erzeugter elektrischer Energie eine sinnvolle Anwendung finden kann. Dieser Aspekt gilt auch für die Wasserstoffversorgung, wenn auch die Elektrolyse sowie die Brennstoffzelle selbst effizienter betrieben werden können (Wirkungsgrad Elektrolyse ca. 60 %<sup>8</sup>, Brennstoffzelle ca. 60 %<sup>9</sup>). Größte Herausforderung sind die geringen aktuell am Markt verfügbaren Kraftstoffmengen, die einen regulären Einsatz erheblich verteuern.

Wie sich in Abschnitt 2.9 zur Diskussion alternativer Antriebe bei Fahrzeugen mit aktiver Wagenkastensteuerung im Bogen zeigt, sind alternativ angetriebene Fahrzeuge aktuell noch nicht in der Lage, alle Leistungen des heutigen Dieselverkehrs gleichwertig zu ersetzen. Gleiches gilt neben den Neigetechnikfahrzeugen auch für sehr kleine Gefäßgrößen (z. B. RegioShuttle).

Aktuell erprobt die Deutsche Bahn AG deshalb in verschiedenen Diesel-Fahrzeugen unterschiedliche Arten synthetischen Kraftstoffs. Für die Anwendung dieser Kraftstoffe gilt weiterhin, dass diese nicht vollständig CO<sub>2</sub>-neutral sind und für eine rußarme Anwendung ein Rußpartikelfilter nachgerüstet werden muss. Auch ein SCR-Katalysator zur NO<sub>x</sub>-Reduktion ist für eine bessere Umweltbilanz zu empfehlen.

---

<sup>7</sup> <https://www.energieagentur.nrw/tool/sektorenkopplung/information/power-to-x/power-to-gas-power-to-liquid.php> [Zugriff am 19. Mai 2020]

<sup>8</sup> Töpler, Lehmann, Wasserstoff und Brennstoffzelle 2. Auflage, 2017, Springer Vieweg, S. 334

<sup>9</sup> Töpler, Lehmann, Wasserstoff und Brennstoffzelle 2. Auflage, 2017, Springer Vieweg, S. 182

Die Kraftstoffe haben verschiedene Eigenschaften. Teilweise erfüllen diese noch die einschlägige Norm für Dieselkraftstoff, bestehen jedoch bereits teilweise aus pflanzlichen Rohstoffen (Beispiel R33 aus 33 % regenerativen Rohstoffen). Es werden jedoch auch Kraftstoffe rein aus hydrierten Pflanzenfetten hergestellt (Beispiel HVO). Diese weisen eine deutliche höhere CO<sub>2</sub>-Reduktion auf, die Verträglichkeit mit den vorhandenen Motoren muss jedoch detailliert geprüft werden.

Neben der CO<sub>2</sub>-Reduktion kann es auch das Ziel sein, ausschließlich eine sauberere Verbrennung zu erreichen. Für diesen Einsatzfall können Gas-to-Liquid-Kraftstoffe, die aus umgewandelten Erdgas gewonnen werden, genutzt werden.

Eine knappe Übersicht der CO<sub>2</sub>-Emissionen (ungefähre Werte) sowie der erwarteten Kosten pro Liter bietet die folgende Tabelle:

Tabelle 2-1: Übersicht synthetische Kraftstoffe

Typ	Klassischer Diesel	Shell R33	HVO-Kraftstoff	Shell GtL
<b>CO<sub>2</sub>-Emission pro l</b> inkl. Erzeugung & ggf. Mehrverbrauch	ca. 3160 g/l	ca. 2500 g/l	ca. 40 g/l	Keine Reduktion, jedoch sauberere Verbrennung (Partikel, NOx)
<b>Reduktion in %</b> inkl. ggf. Mehrverbrauch	-	ca. 22 %	ca. 87 %	Mehrverbrauch ca. 4 %
<b>Kosten/ prozentuale Erhöhung</b>	ca. 1 bis 1,1 €/l	ca. 30 %	ca. 50 %	ca. 5 %

Die in der Tabelle 2-1 dargestellten Werte beziehen sich auf die Emissionen von der Quelle zum Rad (Well-to-Wheel). Der Liter synthetischer Kraftstoff enthält dabei nicht weniger Energie als der klassische Dieselkraftstoff, bringt jedoch meist bei Nutzung in bestehenden Motoren die Notwendigkeit eines Rußpartikelfilters mit. Dies führt zu geringen Mehrverbräuchen, was zu einer Verringerung des Einsparungseffekts führt. Diese Verringerung ist in der dargestellten Tabelle bereits enthalten. Der Kraftstoff Shell R33 hält gleichzeitig trotzdem die Norm für Dieselkraftstoffe ein.

### 2.3.3 Fahrzeugbeispiele Dieseltriebwagen

**Hinweis:** Die ebenfalls in Bayern eingesetzte BR 612, die leistungsstärker ist und in betrieblich anderen Einsatzfällen Verwendung findet, wird in Abschnitt 2.9 näher erläutert und für eine Umrüstung auf alternative Antriebe technisch analysiert.



## Siemens Desiro Classic BR 642



Abb. 2-3 Beispiel Bestandsfahrzeug Siemens Desiro Classic, Baureihe 642 (Foto: Kriesel)

Der Fahrzeugtyp steht beispielhaft für mehrere Bestands-Fahrzeugtypen mit ca. 110 bis 120 Sitzplätzen verschiedener Hersteller, wie diese derzeit in vielen Dieselnetzen eingesetzt werden. Sie wurden ab Ende der 1990er-Jahre bis ins neue Jahrtausend hinein in mittleren dreistelligen Stückzahlen je Baureihe beschafft. Die Fahrzeuge bieten noch ausreichend guten Fahrgastkomfort (Laufruhe, Klimaanlage, Barrierefreiheit), bei einem weiteren mehrjährigen Einsatz bietet sich jedoch eine Fahrgastraumauffrischung (Redesign) an. Sie erfüllen noch keinen EU-weit gültigen Emissionsstandard. Ein Einsatz für mindestens eine Hauptuntersuchungsperiode (8 Jahre) ist technisch gut möglich.

## Stadler RegioShuttle RS1 BR 650



Abb. 2-4 Beispiel Bestandsfahrzeug ADtranz/ Stadler RegioShuttle RS 1<sup>10</sup>

Die Fahrzeuge des Typs RegioShuttle RS1 des Herstellers Stadler sind Einteiler mit 70 (in Einzelfällen bis zu 100) Sitzplätzen. Sie wurden ab 1996 bis 2013 hergestellt<sup>11</sup>. Die kurze Länge von ca. 25 m<sup>12</sup> und die geringe Masse ermöglichen einen kostengünstigen Betrieb auf Linien mit geringer Nachfrage. Deshalb wurden 497

<sup>10</sup> <https://www.vmv-mbh.de>

<sup>11</sup> [https://wikipedia.org/wiki/Stadler\\_Regio-Shuttle\\_RS\\_1](https://wikipedia.org/wiki/Stadler_Regio-Shuttle_RS_1)

<sup>12</sup> <https://www.odeg.de/unternehmen/fahrzeugflotte/regioshuttle>

Fahrzeuge für diverse Nebenbahnen in Deutschland und der Tschechischen Republik beschafft<sup>13</sup>. Grundsätzlich ist auch hier eine Lebensdauer von mindestens ca. 25 Jahren zu erwarten, sodass ein Einsatz für mindestens eine weitere Hauptunter-suchungsperiode (8 Jahre) technisch möglich ist.

**Alstom Lint 41 BR 648, BR 623 bzw. Lint 54 BR 622 sowie Pesa Link**



Abb. 2-5 Beispiel Neufahrzeug Alstom Lint 54, Baureihe 622<sup>14</sup>

Neufahrzeuge in klassischer Dieseltriebwigentechnik sind weiterhin beziehbar. Auf dem deutschen Markt bieten aktuell Alstom mit der Lint-Fahrzeugplattform (Lint 27, 41, 54 und 81, wobei die Zahl für die Fahrzeuglänge steht) sowie Pesa mit der Link-Plattform solche Triebwagen in ein- bis dreiteiliger Ausführung an, wobei die einteilige Variante faktisch nicht als Serienprodukt verfügbar ist. Die Sitzplatzanzahl variiert dabei zwischen ca. 70 (Einteiler) bis ca. 300 (Dreiteiler). Sie erfüllen die aktuellen Emissionsstandards, die für eine Zulassung in Deutschland Voraussetzung sind (EU Standard Stage V). Die üblichen Komfortmerkmale von modernen Schienenfahrzeugen sind vorhanden.

**Zusammenfassung**

Dieseltriebwagen stellen das Rückgrat im nicht elektrifizierten SPNV dar. Aufgrund der geringen Infrastrukturanforderungen (Diesel-Tankstelle), der hohen Reichweite (bis zu 1000 km) und der nahezu uneingeschränkten betrieblichen Einsetzbarkeit sind sie weit verbreitet. Die Emission von CO<sub>2</sub> ist allerdings bei der Verbrennung von fossilem Kraftstoff unausweichlich. Mögliche Verfahren zur Herstellung von synthetischen Kraftstoffen aus Biomasse oder Elektroenergie sind zwar technisch möglich, aber noch nicht wirtschaftlich einsetzbar.

<sup>13</sup><https://www.tagblatt.ch/wirtschaft/stadler-in-zahlen-vom-kmu-zum-weltkonzern-mit-8000-mitarbeitern-ld.1076347> [Abgerufen am 19. Mai 2020]

<sup>14</sup> [bahnbilder.de](http://bahnbilder.de), Hans-Peter Kurz

## 2.4 Elektrotriebwagen (EMU)

### 2.4.1 Charakterisierung der Technologie

Elektrotriebwagen stellen das Rückgrat des elektrischen Nahverkehrs dar und werden aufgrund der Möglichkeit zur Installation von hoher, verteilter Antriebsleistung entlang des gesamten Zuges mittlerweile bevorzugt im Nahverkehr verwendet. Durch die hohe Anzahl an angetriebenen Radsätzen lässt sich eine gute Übertragung der Antriebsmomente auf die Schiene erreichen. Dies ermöglicht eine hohe Spurtstärke. Ebenso ermöglicht die Antriebsverteilung eine höhere Rekuperation von Bremsenergie im Vergleich zu lokomotivbespannten Garnituren, da die Bremsmomente auf mehr angetriebene Radsätze verteilt sind.

Vorteilhaft sind sowohl das hohe Beschleunigungsvermögen als auch die Wartungsarmut der Antriebsanlage. Der Energiebezugspreis ist mit ca. 11 bis 13 ct/kWh<sup>15</sup> pro Kilowattstunde zwar preislich auf vergleichbarem Niveau mit der im Diesel gespeicherten Energie, die hohe Energieeffizienz des elektrischen Antriebs ermöglicht jedoch einen erheblich kostengünstigeren Betrieb (Faktor 2,5 bis 3 beim Energiebezug).

Grundvoraussetzung für den Betrieb von Elektrotriebwagen ist die Gesamtelektrifizierung einer Linie, die erhebliche Erstinvestitionen erfordert. Neben der Installation einer Fahrleitungsanlage entlang des gesamten Fahrwegs sind auch Fragen der Energiebereitstellung, elektromagnetischer Verträglichkeit, notwendiger baulicher Anpassungen von Ingenieurbauwerken sowie der Herstellung von elektrotechnisch sicheren Personenverkehrsanlagen im Planungsprozess detailliert zu untersuchen.

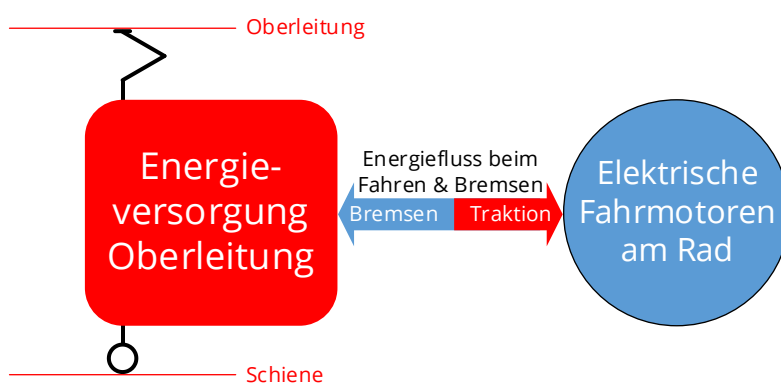


Abb. 2-6 Antriebsstrang klassischer elektrischer Elektrotriebzug (schematisch)

<sup>15</sup> DB Energie GmbH, „Preistabelle DB Energie Bahnstrompreise Mittelspannung,“ DB AG, Berlin, 2019.

## **Traktion**

Die Traktionsenergie wird aus der Oberleitung über Stromabnehmer, Transformator und Stromrichter zu den elektrischen Fahrmotoren übertragen. Die kontinuierliche, leistungsfähige Energieversorgung aus der Oberleitung ermöglicht hohe Geschwindigkeiten, schnelle Beschleunigung und geringe Traktionsenergiekosten.

## **Bremsen**

Beim Bremsen kann das Fahrzeug die Bremsenergie durch die als Generator arbeitenden Fahrmotoren wiedergewinnen/rekuperieren, diese in die Oberleitung zurückspeisen und so anderen Fahrzeugen bereitstellen. Ein Teil der Bremsenergie wird direkt für die Verbraucher im Fahrzeug (maßgeblich Heizung, Klimaanlage) weiterverwendet.

## **Umweltaspekte**

Die ökologische Bilanz des Betriebs ist bei dem Elektrotriebwagen maßgeblich durch die Energieerzeugung bestimmt, die durch steigende erneuerbare Anteile kontinuierlich verbessert wird. Die Bewertung wird durch die Berechnung mit spezifischen Emissionsfaktoren (Emission/kWh Elektroenergie) durchgeführt. Die Geräuschemissionen sind im Vergleich zu Dieselfahrzeugen wesentlich geringer, insbesondere beim Beschleunigen. Darüber hinaus ist das Fahrzeug im Stillstand, abgesehen von den Hilfsbetrieben, nahezu geräuschlos.

## **Zusammenfassung**

Die elektrische Traktion ist in Kombination mit einer Fahrleitung die energetisch günstigste Technologie. Keine Energiebereitstellung besitzt geringere Traktionsenergiekosten als die Bahnenergieversorgung. Dies führt auf lange Sicht zu einer deutlichen Reduktion der Betriebskosten. Die hohe Effizienz und die Rückspeisefähigkeit der Fahrzeuge unterstreichen dies. Aus diesem Grund werden die meisten der betrieblich hoch ausgelasteten Strecken bereits elektrisch befahren. Der hohe Aufwand zur Errichtung der nötigen Infrastruktur steht allerdings nicht überall in einem wirtschaftlichen Verhältnis zum Nutzen. Üblicherweise ist eine Elektrifizierungswürdigkeit erst ab einer Verkehrsleistung von ca. 10 bis 20 Mio. Bruttotonnen/Jahr (Fahrzeugmasse + Ladungsmasse) gegeben. Dies kann bereits mit leistungsfähigen Nahverkehrsangeboten im Stundentakt – bei Angeboten im Halbstundentakt sogar nahezu immer – erreicht werden, wie eine Studie der TU Dresden für die Bayerische Eisenbahngesellschaft (BEG) im Jahr 2017 gezeigt hat.

## 2.4.2 Fahrzeugbeispiele Elektrotriebwagen

### Siemens Mireo



Abb. 2-7 Siemens Mireo Elektrotriebzug (Foto DB/Uwe Miethe)

Die Mireo-Plattform von Siemens ist die jüngste EMU-Plattform auf dem deutschen Markt und hat erstmals im Jahr 2020<sup>16</sup> den planmäßigen Fahrplanbetrieb im Rheintal aufgenommen. Bislang ist sie als Dreiteiler in verschiedenen Ausführungen für Regionalbahn- und S-Bahn-Verkehre ausgeliefert worden.<sup>17</sup> Die Fahrzeuge können in zwei-bis sechsteiliger Ausführung geliefert werden und haben eine Höchstgeschwindigkeit von 160 km/h. Besonderheit sind innengelagerte Drehgestelle, die erstmals bei EMU-Triebwagen der modernsten Generation Anwendung finden. Ziel ist nach Angaben des Herstellers die Reduktion der Instandhaltungskosten durch die bei diesen Konstruktionen angestrebte Verschleißreduktion. Die benachbarten Wagenkästen stützen sich auf Jacobs-Drehgestellen ab. Charakteristisch sind außerdem die sehr langen Wagenkästen, die auf vier Drehgestellen (bei 3 Wagenkästen) eine Triebzuglänge von ca. 70 m ermöglichen (üblicherweise ca. 55 bis 60 m). Die Fahrzeugplattform wird auch als BEMU-Fahrzeug angeboten und ist auf Bestellung nach Herstellerangaben kuppelbar zwischen EMU und BEMU ausführbar.

---

<sup>16</sup> <https://www.urban-transport-magazine.com/erstzulassung-fuer-den-neuen-mireo-von-siemens-mobility-bislang-176-mireos-bestellt/>, abgerufen im September 2020.

<sup>17</sup> <https://press.siemens.com/global/de/feature/der-neue-mireo-intelligenz-auf-schienen>, abgerufen im September 2020.

## Alstom Coradia Continental



Abb. 2-8 Alstom Coradia Continental Plattform<sup>18</sup>

Die Coradia-Continental-Plattform von Alstom wird aktuell in Bayern an die S-Bahn Nürnberg ausgeliefert<sup>19</sup> und war auch in Bayern erstmals in den EMU-Netzen um Augsburg ab 2008<sup>20</sup> in Betrieb. Die Plattform wurde entsprechend den sich verändernden Normen und Anforderungen weiterentwickelt und ist in den aktuellen Auslieferungszuständen auch weiterhin zugelassen lieferbar. Bis zu fünf Wagenteile wurden bisher auf dem deutschen Markt geliefert, wobei zusätzlich die Wagenkastenlänge variiert wurde. Die benachbarten Wagenkästen stützen sich auf Jacobs-Drehgestellen ab. Die Fahrzeugplattform ist für 160 km/h geeignet. Sie wird auch als BEMU-Fahrzeug angeboten und ist auf Bestellung kuppelbar zwischen EMU und BEMU ausführbar.

**Weitere ähnliche Fahrzeugtypen** werden von CAF (Civity-Plattform, bisher nicht in Deutschland zugelassen), Bombardier (Talent-Plattform) sowie Stadler (Flirt-Plattform) angeboten. Alle bieten diese ebenfalls als BEMU-Fahrzeuge an.

---

<sup>18</sup> <https://bahnblogstelle.net/2017/01/11/db-regio-betreibt-elektro-netz-saar-rb-teilweise-weiter-2/alstom-coradia-continental-et-1440/>, abgerufen im September 2020.

<sup>19</sup> [https://www.s-bahn-nuernberg.de/s\\_nuernberg/view/wir/fahrzeuge.shtml#:~:text=Ab%20dem%2013.,waren%2C%20komplett%20au%20Ber%20Betrieb%20genommen.,](https://www.s-bahn-nuernberg.de/s_nuernberg/view/wir/fahrzeuge.shtml#:~:text=Ab%20dem%2013.,waren%2C%20komplett%20au%20Ber%20Betrieb%20genommen.,) abgerufen im September 2020.

<sup>20</sup> [https://de.wikipedia.org/wiki/E-Netz\\_Augsburg](https://de.wikipedia.org/wiki/E-Netz_Augsburg), abgerufen im September 2020.

## 2.5 Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeuge (BEMU)

### 2.5.1 Charakterisierung der Technologie

Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeuge sind klassische Elektrotriebwagen, die um einen elektrochemischen Energiespeicher erweitert wurden. Dieser kann während der Fahrt sowie im Stand an der Oberleitung geladen werden und stellt auf oberleitungsfreien Abschnitten die gesamte benötigte Energie (Traktion, Hilfsbetriebe, Heizung bzw. Klimatisierung) für das Fahrzeug zur Verfügung. Bei vorhandener Elektrifizierung wird die Oberleitung wie bei einem Elektrotriebzug als Energieversorgung genutzt. Bei bestehenden Elektrifizierungsperspektiven der zu befahrenden Strecken ist die Technologie zudem aufwärtskompatibel, da die Oberleitung später auch dort zum Fahren und Laden genutzt werden kann. Zudem schreitet die Alterung der Batterien weniger schnell voran infolge geringerer Entladetiefe. Bei Vollelektrifizierung ist auch die Stilllegung der Batterieanlage möglich, ggf. gegen Ausgleich der fahrdynamisch und zulassungsrelevanten Batteriemasse und unter Berücksichtigung in der Zugleittechnik (Anforderung sind im Lastenheft vorzusehen).

Herausforderung ist, ausreichend Energie speichern zu können, um auch größere oberleitungsfreie Distanzen von 40 – 80 km zuverlässig zu überbrücken. Die Fahrzeughersteller setzen aktuell auf drei verschiedene Zelltechnologien (Nickel-Mangan-Cobalt-Oxide NMC, Lithium-Titanat-Oxid LTO, Lithium-Eisen-Phosphat LFP), die sich in Energiedichte (Energieinhalt pro Masse bzw. pro Volumen), Leistungsfähigkeit beim Entladen bzw. Laden (Lade- und Entladeleistung, ausgedrückt in der C-Rate), Alterungsverhalten (Lebensdauer) sowie Beschaffungskosten je Kilowattstunde (kWh) Energieinhalt unterscheiden. Die genannten Technologien lassen sich nach den genannten Kriterien wie in Abb. 2-9 dargestellt vergleichen.<sup>21</sup>

---

<sup>21</sup> Batteries for Electric Cars – Challenges, Opportunities, and the Outlook to 2020, BCG, <https://www.ctc-n.org/sites/www.ctc-n.org/files/resources/file36615.pdf> (Abgerufen am 19. Januar 2021)



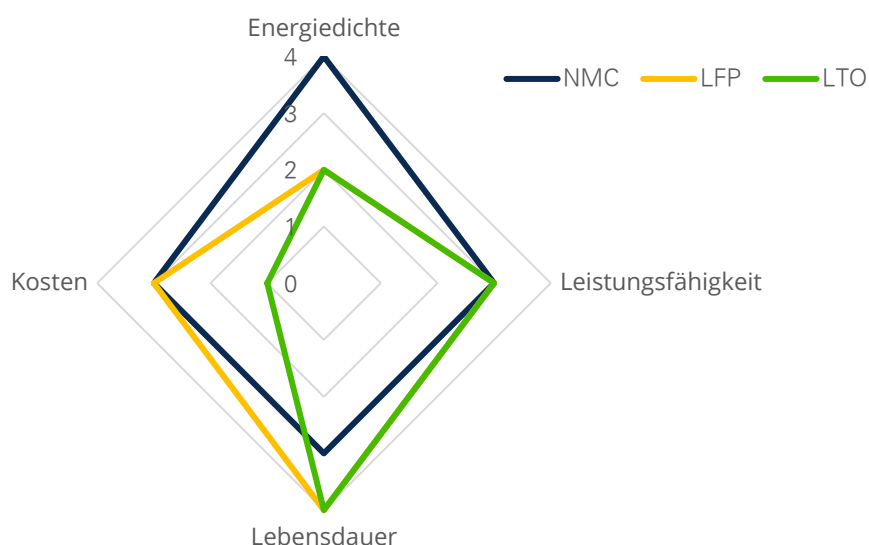


Abb. 2-9. Vergleich unterschiedlicher Zellchemien nach eigener Klassifizierung

Die Oberleitungs-/ Batterie-Hybridtechnologie lässt höhere Fahrgeschwindigkeiten und Beschleunigungswerte zu als diese mit Dieseltriebwagen möglich sind. Dies gilt insbesondere im Betrieb unter der Oberleitung, da die Fahrzeuge hier als klassische Elektrotriebwagen verkehren. Da sich die Beschleunigungszeiten verkürzen können, wird eine Teilnahme am dichten Takt auf elektrifizierten Hauptstrecken möglich. Gegebenenfalls gibt es ebenso Fahrzeitverkürzungen auf im Batteriebetrieb befahrenen Abschnitten. Eine Ausnahme bilden aktuell mit Stadler RS1 erbrachte Verkehre im nicht-elektrifizierten Netz, da diese Fahrzeuge außergewöhnlich stark motorisiert und damit besonders spurtstark sind. Eine detaillierte fahrdynamische und betriebliche Prüfung ist dort für einen genauen Vergleich erforderlich.

Die Ladeleistung der Fahrzeuge liegt im Stillstand bei ca. 1,0 - 1,2 MW pro Stromabnehmer. Sie wird dabei durch den maximal zulässigen Stillstandsstrom von 80 A<sup>22</sup> über die Kontaktstelle Oberleitung-Stromabnehmerschleifleiste begrenzt, da diese sonst zu heiß wird und der Fahrdrabt mittelfristig entfestigt wird sowie die Schleifleiste beschädigt werden kann. Eine aktuelle Diplomarbeit an der Professur für Elektrische Bahnen der TU Dresden<sup>23</sup> legt nahe, dass bei Nutzung von zwei Fahrdrähten in ausreichend hohem Abstand zueinander zur thermischen Entkopplung

<sup>22</sup> DKE/UK 351.2: Ortsfeste Anlagen, Norm DIN EN 50367 (VDE 0115-605):2017-01 Tabelle 5, Berlin: VDE-Verlag GmbH, 2017.

<sup>23</sup> Günther, Hans: Diplomarbeit Untersuchungen zur Optimierung der Schnittstelle Stromabnehmer-Fahrdrabt zur Erhöhung der übertragbaren Ströme im Stillstand, TU Dresden, 2020.



(bspw. 40 cm), der Nutzung von besser entwärmenden Stromschienenoberleitungen oder durch die Anwendung von höheren Anpressdrücken des Stromabnehmers an den Fahrdrabt der Ladestrom deutlich erhöht werden kann (ca. 110 bis 160 A). Eine Freigabe des höheren Ladestroms unter ertüchtigter Schnittstelle muss dann jedoch sicherheitsbedingt an eine Freigabe durch den Triebfahrzeugführer geknüpft werden. Je nach Batterietechnologie und deren maximal möglicher Ladeleistung kann die Leistung in Fahrt höher liegen. Somit sind im Stillstand Ladezeiten für das volle Aufladen der Batterie von 10 bis 15 min realistisch, in Fahrt kann diese geringer ausfallen. Dies liegt am viel höheren zulässigen Strom am Stromabnehmer während der Fahrt (je nach Oberleitungsbauart mehrere hundert Ampere, mind. 600 A). Allerdings müssen dafür auch die Fahrzeugtransformatoren ausreichend zusätzliche Leistung zur Ladung bereitstellen können, während Traktionsleistung benötigt wird.

Neue Anforderungen ergeben sich bei Beibehaltung des Triebwagenkonzepts ohne zusätzliche Wagenkästen ausschließlich für die Antriebstechnik (siehe hierzu das Beispiel zur Unterbringung zusätzlicher Antriebstechnik in Abb. 2-21) bei der Betriebsumstellung auf Oberleitungs-/ Batterie-Hybridfahrzeuge durch höhere zu erwartende Radsatzlasten. Die ca. 10 % höhere Masse durch die Ergänzung der Batterien im Vergleich zum Basiselektrofahrzeug sowie die ohnehin höhere Masse der elektrischen Komponenten (insbes. Trafo & Stromrichter) im Vergleich zum Dieseltriebwagen verursachen eine insgesamt erhöhte Fahrzeugmasse.

## 2.5.2 Funktionsweise Oberleitungs-/ Batterie-Hybridfahrzeuge

### 2.5.2.1 Oberleitungsbetrieb

Der technische Aufbau von Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeugen kann als Erweiterung des klassischen Elektrotriebwagens betrachtet werden:

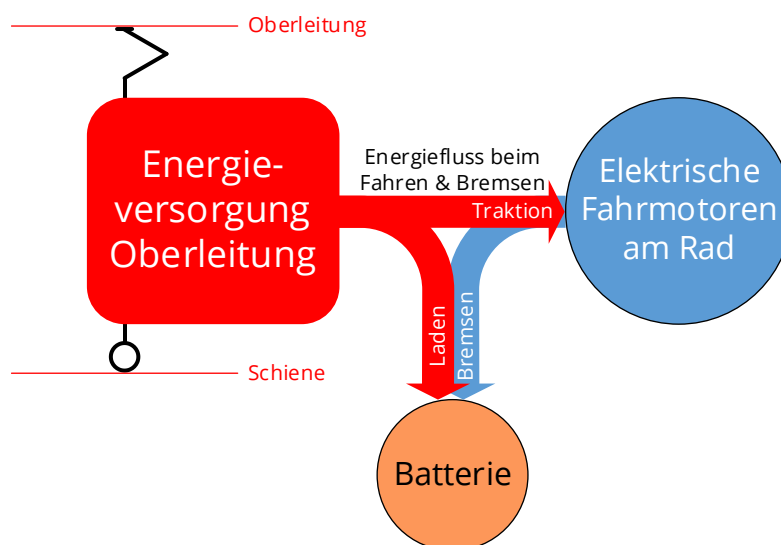


Abb. 2-10 Antriebsstrang Oberleitungs-/Batterie-Hybrid im Oberleitungsbetrieb (schematisch)

### Traktion

Im Oberleitungsbetrieb unterscheidet sich der Oberleitungs-/Batterie-Hybrid nicht wesentlich vom klassischen Elektrotriebzug. Erweitert wird dieser nur um das Laden der Batterie aus der Oberleitung sowohl im Stillstand als auch während der Fahrt.

### Bremsen

Das Fahrzeug kann die Bremsenergie ebenfalls rekuperieren. Sie wird bei nicht voll aufgeladener Batterie zum Laden derselben bzw. für alle Verbraucher im Fahrzeug genutzt. Nur auf dem Fahrzeug nicht benötigte Energie wird in die Oberleitung zurückgespeist.

#### 2.5.2.2 Batteriebetrieb

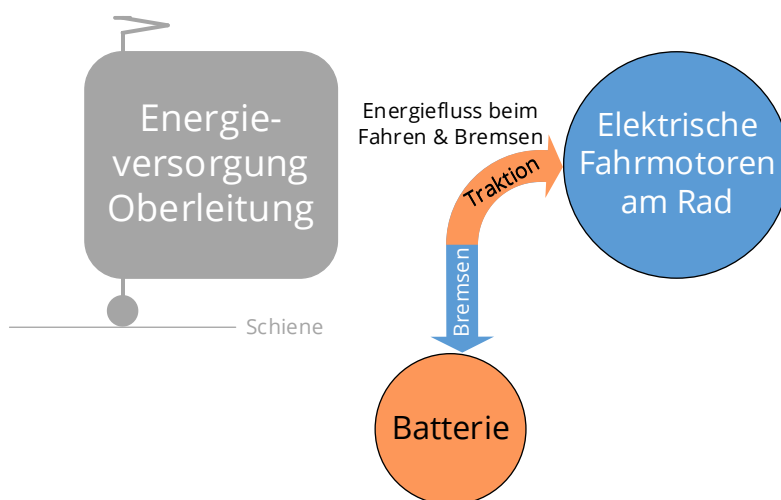


Abb. 2-11 Antriebsstrang Oberleitungs-/Batterie-Hybrid im Batteriebetrieb (schematisch)

### Traktion

Der Energiebedarf für die Traktion sowie für alle weiteren Verbraucher (auch Heizung/Klimaanlage) im Fahrzeug wird aus der Batterie gedeckt. Die Reichweite hängt dabei maßgeblich von Topografie, Geschwindigkeits- und Fahrplanprofil, Außentemperaturen, Fahrzeugmasse und batteriespezifischen Größen ab.

### Bremsen

Das Fahrzeug kann die Bremsenergie ebenfalls rekuperieren. Sie wird bei nicht voll aufgeladener Batterie zum Laden der Batterie und für alle Verbraucher im Fahrzeug genutzt. Überschüssige Energie wird in Bremswiderständen verschleißfrei (wenn vorhanden) oder in Reibungsbremsen verschleißbehaftet in Wärme gewandelt.

## 2.5.3 Fahrzeugbeispiele Oberleitungs-/Batterie-Hybrid

### Siemens Cityjet Eco



Abb. 2-12 Beispiel Siemens Cityjet Eco<sup>24</sup>

Der Cityjet Eco (Fahrzeugplattform Desiro Mainline) existiert bereits als Prototyp und wird in Zusammenarbeit mit den Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB AG) zurzeit erprobt. Er wurde aus einer laufenden Produktionslinie klassischer Elektrotriebwagen der Desiro Mainline Fahrzeugplattform für die ÖBB AG entnommen. Siemens hat durch den fahrplanmäßigen Einsatz des Fahrzeugs umfangreich Daten ermitteln und Betriebserfahrung sammeln können, die in die nachfolgenden Fahrzeuge einfließen können. Die Fahrzeugplattform selbst kommt in Mecklenburg-Vorpommern als Elektrotriebwagen seit 2019 im Netz Ostseeküste Ost zum Einsatz.

Das Fahrzeug ist 75,2 m lang und verfügt über 244 Sitzplätze. Als Batterietechnologie werden LTO-Zellen eingesetzt. Die regelmäßige Reichweite wird vom Hersteller mit bis zu 80 km angegeben<sup>25</sup>. Dies ist bei einem Batterieenergieinhalt der verwendeten Batterietechnologie von aktuell 528 kWh realistisch. Die Höchstgeschwindigkeit beträgt im Batteriebetrieb 120 km/h, unter Oberleitung 140 km/h<sup>26</sup>.

### Mireo Plus B

Die Desiro-Mainline-Fahrzeug-Plattform mit Batterie ist für Deutschland nicht bei Ausschreibungen verfügbar. Als Ersatz wird von Siemens die Fahrzeugplattform Mireo in einer Variante „Plus B“ angeboten. Ausschließliche Oberleitungs-Fahrzeuge der Mireo-Plattform verkehren seit Juni 2020 im Fahrgastverkehr auf der Rheintalbahn<sup>27</sup> und befinden sich derzeit auch in der sukzessiven Inbetriebnahme für die S-

<sup>24</sup> Foto: Siemens AG

<sup>25</sup> <https://futurezone.at/b2b/14-tonnen-akku-statt-diesel-oebb-testen-oeko-zug-ab-2019/400114013>, abgerufen am 19. Mai 2020.

<sup>26</sup> Siemens AG, „Factsheet Desiro ML ÖBB Cityjet eco,“ Siemens AG, München, 2018.

<sup>27</sup> <https://www.urban-transport-magazine.com/erstzulassung-fuer-den-neuen-mireo-von-siemens-mobility-bislang-176-mireos-bestellt/>, abgerufen im September 2020.

Bahn Rhein-Neckar<sup>28</sup>. Besonderheit der BEMU-Variante im Vergleich zu Mitbewerbern ist, dass nach Unternehmenspräsentationen auch Fahrzeuge für die Streckenklasse B2 angeboten werden sollen mit kleineren Reichweiten.



Abb. 2-13 Beispiel Siemens Mireo Plus B für das Netz Ortenau, Rendering<sup>29</sup>

Siemens konnte Ende 2019 die Ausschreibung im Netz Ortenau in Baden-Württemberg über 20 Fahrzeuge für sich entscheiden<sup>30</sup>. Die zweiteiligen Fahrzeuge sind mit ca. 46 m Länge und ca. 120 Sitzplätzen deutlich kleiner als die Fahrzeuge des Cityjet Eco und werden im steigungsreichen Netz regelmäßig eine Reichweite von ca. 58 km batterieelektrisch überbrücken. Sie sollen ab 2023 eingesetzt werden.

### Bombardier Talent 3



Abb. 2-14 Beispiel Bombardier Talent 3 BEMU<sup>31</sup>

Der „Talent 3 BEMU“ von Bombardier existiert bereits als Prototyp; die Entwicklung wurde mit Fördergeldern des Bundes unterstützt. Er wurde aus einer laufenden Produktionslinie klassischer Elektrotriebwagen für Baden-Württemberg entnommen. Die Zulassung ist bisher nicht erteilt, ein Ersteinsatz im Probetrieb soll für eine

<sup>28</sup> Verkehrsverbund Rhein-Neckar, „Vertrag über die Verkehrsleistungen zur S-Bahn Rhein-Neckar Los 2 unterzeichnet,“ Verkehrsverbund Rhein-Neckar, Mannheim, 2017.

<sup>29</sup> Rendering: Siemens AG

<sup>30</sup> <https://press.siemens.com/global/de/pressemitteilung/siemens-mobility-erhaelt-ersten-auftrag-fuer-batterie-zuege> [Zugriff 08. April 2020]

<sup>31</sup> Foto: Bombardier

Tochter der DB AG in der Alb-Bodensee-Region erfolgen<sup>32</sup>. Nach Aussage des ehem. Bayerischen Verkehrsministers Joachim Herrmann sollen außerdem Wochenendeinsätze auf der Strecke Gunzenhausen-Pleinfeld in Bayern stattfinden<sup>33</sup>.

Der Zug ist 56,2 m lang und verfügt über 155 Sitzplätze. Als Batterietechnologie werden NMC-Zellen eingesetzt. Die regelmäßige Reichweite wird vom Hersteller mit bis zu 40 km angegeben<sup>34</sup>. Dies ist bei einem Batterieenergieinhalt der verwendeten Batterietechnologie von aktuell 300 kWh realistisch (bis 440 kWh laut Quelle technisch möglich)<sup>35</sup>. Die Höchstgeschwindigkeit beträgt im Batteriebetrieb 120 km/h, unter Oberleitung 160 km/h.

Der Fahrzeughersteller soll nach Pressemeldungen vom 31. Juli 2020 durch die Firma Alstom übernommen werden. Den Verlautbarungen nach soll die Talent-Plattform inklusive des Herstellwerkes in Hennigsdorf aus kartellrechtlichen Gründen abgestoßen werden. Stadler habe daran Interesse, meldet die lokale Presse. Da Stadler selbst über eine konkurrierende Plattform verfügt, sind die weiteren Entwicklungen zu beobachten.<sup>36</sup>

### Stadler Flirt Akku



Abb. 2-15 Beispiel Stadler Flirt Akku<sup>37</sup>

<sup>32</sup> <https://www.internationales-verkehrswesen.de/batteriezug-ab-2019-im-testbetrieb/> [Zugriff am 15. April 2020]

<sup>33</sup> <https://www.stmi.bayern.de/med/aktuell/archiv/2018/180122elektromobilitat/> (Abgerufen am 21. Januar 2021)

<sup>34</sup> <https://www.internationales-verkehrswesen.de/batteriezug-ab-2019-im-testbetrieb/> [Zugriff am 15. April 2020]

<sup>35</sup> <https://www.golem.de/news/bombardier-und-tu-berlin-triebzug-mit-akku-soll-diesel-zuege-ersetzen-1808-136240.html> [Zugriff am 15. April 2020]

<sup>36</sup> <https://www.tagesspiegel.de/wirtschaft/grossfusion-in-der-bahnindustrie-alstom-darf-bombardier-uebernehmen/26056082.html> [Zugriff am 31.07.2020].

<sup>37</sup> Foto: Stadler Rail Deutschland GmbH

Das Fahrzeug existiert bereits und ist eine Eigenentwicklung der Firma Stadler. Laut Medienmitteilung des Herstellers verfügt das Fahrzeug bereits über eine eingeschränkte Zulassung für den Personenverkehr<sup>38</sup> durch die Entnahme aus der Flirt-Produktlinie. Die Entwicklung wurde mit Fördermitteln des Bundes unterstützt.

Es ist 58,6 m lang und verfügt über 154 Sitzplätze. Nach Aussagen des Herstellers sind sowohl LFP- als auch LTO-Zellen für die Installation im Fahrzeug geeignet. Die Höchstgeschwindigkeit beträgt im Batterie- und Oberleitungsbetrieb 140 km/h. Im Prototyp sind nach Daten der Professur für Elektrische Bahnen aktuell Batteriezellen mit einem Energieinhalt von 180 kWh eingebaut.

Stadler konnte im Juli 2019 die Ausschreibung zur Lieferung von 55 Fahrzeugen für das Land Schleswig-Holstein für sich entscheiden<sup>39</sup>. Die zweiteiligen Fahrzeuge sind mit ca. 46 m Länge und ca. 120 Sitzplätzen kleiner als der Prototyp des Herstellers und werden in den Flachland-Netzen in Schleswig-Holstein regelmäßig eine Reichweite von ca. 80 km batterieelektrisch überbrücken. Sie sollen ab 2022 eingesetzt werden und verfügen laut Hersteller über eine Reichweite von ca. 80 km auch im gealterten Zustand der Batteriezellen.



Abb. 2-16 Beispiel Stadler Flirt Akku für Schleswig-Holstein, Rendering<sup>40</sup>

<sup>38</sup> Stadler Deutschland, „Medienmitteilung Stadler lässt den FLIRT von der Leine,“ Stadler Deutschland, Berlin, 2018

<sup>39</sup> <https://www.stadlerail.com/de/medien/article/stadler-liefert-55-flirt-akku-fuer-dennah-verkehrsverbund-schleswig-holstein/530/> [Zugriff am 15. April 2020]

<sup>40</sup> Rendering: Stadler Rail Deutschland GmbH



## Alstom Coradia Continental BEMU



Abb. 2-17 Beispiel Alstom Coradia Continental BEMU, Rendering<sup>41</sup>

Der Verkehrsverbund Mittelsachsen hat 2019 die Beschaffung von elf dreiteiligen Alstom Coradia Continental in der Oberleitungs-/Batterie-Hybridvariante beschlossen. Diese sollen ab 2023 auf der Strecke Chemnitz-Leipzig eingesetzt werden. Besonderheit des Einsatzes auf dieser Strecke ist eine notwendige zu erreichende Höchstgeschwindigkeit von 160 km/h und eine zu überbrückende Oberleitungslücke von ca. 80 km, was den Energiespeichern auf dem Fahrzeug hohe Leistungen und viel Energiebezug abverlangt. Es ist deshalb damit zu rechnen, dass die Fahrzeuge, welche über ca. 150 Sitzplätze bei ca. 56 m Fahrzeuglänge verfügen, mit mindestens ca. 800 kWh Batterieenergieinhalt ausgestattet werden.

Der Bestellung beim Fahrzeughersteller Alstom erhöht zudem die Anzahl der Fahrzeuganbieter dieser Technologie auf dem deutschen Schienenverkehrsmarkt, da alle den Markt maßgeblich bestimmenden Lieferanten die Technologie im Portfolio anbieten. Alstom hatte vor der Bestellung maßgeblich auf das Wasserstoff-/ Batterie-Hybridfahrzeug iLint gesetzt.

### 2.5.4 Übersicht über Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeuge

Seit 2016 haben nahezu alle bedeutenden Hersteller von Triebwagen für den deutschen Markt BEMU Fahrzeuge entweder bereits vorgestellt oder zumindest angekündigt. Die folgende Übersicht zeigt einen Einblick in die Angebote dieser Hersteller:

#### **Stadler**

Der Schweizer Hersteller Stadler Rail AG erweiterte seine FLIRT-Plattform (Regionalzüge) um einen Batteriespeicher in zwei Größen. Bestellungen aus Deutschland sind bereits beim deutschen Ableger Stadler Pankow eingetroffen:

---

<sup>41</sup> Rendering: Alstom

<b>Anzahl der Fahrzeugglieder / Länge</b>	2 / ca. 46.5 m	3 / 56 m
<b>Höchstgeschwindigkeit (Fahrleitungs-/ Batterie-Modus)</b>	160 km/h / 140 km/h	160 km/h / 140 km/h
<b>Sitzplatzangebot</b>	124	154
<b>Streckenklasse</b>	C2	C2
<b>Reichweite</b>	80 km (150 km bei optimalen Bedingungen)	
<b>Bestellungen und geplanter Betriebsbeginn</b>	55 Fahrzeuge durch den Aufgabenträger NAH.SH bestellt. Betriebsaufnahme 2022	1 Fahrzeug als Prototyp mit verkürzter Reichweite
<b>Speichertechnologie</b>	Zur Zeit angeboten: LTO oder LFP (abhängig von den vertraglichen Anforderungen)	
<b>Erste öffentliche Vorstellung</b>	Im Rahmen der Innotrans 2018	

### Bombardier

Wie andere Hersteller hat Bombardier sein BEMU-Fahrzeug auf der Grundlage seiner bestehenden Elektrotriebzug-Plattform (TALENT 2) entwickelt, die nun in der dritten Version angeboten wird:

<b>Anzahl der Fahrzeugglieder / Länge</b>	3 / 56 m
<b>Höchstgeschwindigkeit (Fahrleitungs-/ Batterie-Modus)</b>	160 km/h / 140 km/h
<b>Sitzplatzangebot</b>	155
<b>Streckenklasse</b>	C2 (Fahrzeugmasse des Prototypen von 114 t)
<b>Reichweite</b>	35 - 40 km (zur Zeit), 80 - 100 km (geplant)
<b>Bestellungen und geplanter Betriebsbeginn</b>	Keine (1 Prototyp wurde 2018 für Testzwecke in Baden-Württemberg hergestellt, noch keine Zulassung)
<b>Speichertechnologie</b>	3 Batteriemodule (NMC/C) mit einer Kapazität von 300 kWh. Möglich sind bis zu 440 kWh. Die geplante Lebensdauer der Batterie wird mit 5 bis 8 Jahren angegeben.
<b>Erste öffentliche Vorstellung</b>	Im Rahmen der Innotrans 2018



## Siemens

Die Fahrzeugplattform Siemens Desiro Mainline (EMU) wurde durch die neuentwickelte Mireo Plattform ersetzt. Diese wird aktuell zum Mireo Plus B als Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeug (BEMU) weiterentwickelt, wobei auch Wasserstoff-/Batterie-Hybridzüge (FCMU/HEMU) und Standard Elektrotriebzüge (EMU) angeboten werden sollen.

<b>Anzahl der Fahrzeugglieder / Länge</b>	2 / 46 m	3 / 71 m
<b>Höchstgeschwindigkeit (Fahrleitungs-/ Batterie-Modus)</b>	160 km/h / 140 km/h	
<b>Sitzplatzangebot</b>	120	165
<b>Streckenklasse</b>	Mit verkürzter Reichweite B2, sonst C2	
<b>Reichweite</b>	35 - 40 km	60 - 120 km
<b>Bestellungen und geplanter Betriebsbeginn</b>	20 Fahrzeuge wurden vom Land Baden-Württemberg für den Betriebsstart im Juni 2023 auf dem Ortenau-Netz beschafft.	
<b>Speichertechnologie</b>	LTO Zellen mit einer geplanten Lebensdauer von 15 Jahren. Der Mireo plus B für das Ortenau Netz besitzt zwischen 400 und 450 kWh Batteriekapazität (Quelle: Siemens).	
<b>Erste öffentliche Vorstellung</b>	Im Rahmen der Innotrans 2018 noch auf Basis der Cityjet-Fahrzeuge (Desiro Mainline) für die ÖBB. Erste Renderings und PowerPoint-Präsentationen für die Mireo-Plattform mit Batterie in 2018.	

Ein Fahrzeug basierend auf der Desiro-Mainline-Plattform wurde im Jahr 2018 für die ÖBB hergestellt. Die dort verwendeten LTO Zellen besitzen eine Kapazität von 528 kWh. Es befindet sich im stabilen Fahrgasteinsatz und die ÖBB planen weitere Bestellungen.

## Alstom

Alstom erweiterte die existente Coradia Continental Plattform, welche für den Regionalverkehr entwickelt wurde, und stattet die Elektrotriebwagen des Typs Coradia Continental mit Batterien aus.

<b>Anzahl der Fahrzeugglieder / Länge</b>	3 / 57 m
<b>Höchstgeschwindigkeit (Fahrleitungs-/ Batterie-Modus)</b>	160 km/h / 160 km/h
<b>Sitzplatzangebot</b>	150
<b>Reichweite</b>	70 - 120 km
<b>Streckenklasse</b>	C2
<b>Bestellungen und geplanter Betriebsbeginn</b>	11 Fahrzeuge wurden durch den VMS (Verkehrsverbund Mittelsachsen) für den Betriebsstart in 2023 beschafft.
<b>Speichertechnologie</b>	Nicht bestätigte Quellen gehen von 800 kWh des LTO Zellentyps aus.
<b>Erste öffentliche Vorstellung</b>	Im Rahmen der Bestellung für die Linie Leipzig – Chemnitz im September 2019 als Rendering.

### Geplante Betriebsaufnahmen

Auf dem deutschen Markt sind mehrere Betriebsstarts für BEMUs geplant. Die folgende Liste zeigt einige der Netze zusammen mit den Fahrzeugen, die zum Einsatz kommen werden:

- 2022/23: NAH.SH, 55 Stadler Flirt Akku
- 2023: Ortenau Netz, 20 Siemens Mireo Plus B
- 2023: Leipzig – Chemnitz (ZVMS), 11 Alstom Coradia Continental BEMU
- 2024 - 2025: Pfalznetz, 61-82 BEMU (Start Ausschreibung April 2020)

Da BEMUs derzeit noch nicht auf dem deutschen Netz im Einsatz sind, werden die endgültig belastbaren Erfahrungen und Lebensdauerinformationen zu den Batterien erst in 5-8 Jahren verfügbar sein.

### Weitere Marktteilnehmer

Es wird zudem erwartet, dass in den nächsten Jahren weitere Hersteller auf den deutschen Markt kommen werden:

- CAF, Spanien: Die angebotene Straßenbahn CAF Urbos 3 bietet die Möglichkeit, Batterien für oberleitungsfreie Abschnitte (wie bspw. in Birmingham) zu integrieren. Da CAF auch elektrische Regionalzüge anbietet (zurzeit in der

erstmaligen Inbetriebnahme in Deutschland auf der Schönbuchbahn in Baden-Württemberg), ist eine BEMU-Version zu erwarten. CAF hat für seine Civity-Plattform zudem angekündigt, an Ausschreibungen teilzunehmen. Aktuell ist von kleineren Reichweiten im Vergleich zu anderen Herstellern, dafür nach einzelnen Quellen aus Unternehmenskreisen jedoch der Streckenklasse B2 auszugehen (für übliche Reichweiten im Bereich 40 bis 60 km jedoch eher auch C2).

- Hitachi, Japan: Die ersten BEMUs gingen im Oktober 2016 in Japan in Betrieb (360 kWh Li-Ion-Speicher). Hitachi ist ein in Europa aktiver Hersteller (bspw. Fertigung in Großbritannien und Italien). Daher ist es zu erwarten, dass dieser auch ein BEMU-Fahrzeug einführen wird. Die Teilnahme am deutschen Markt wird nach eigenen Herstellerangaben angestrebt.
- CRRC, China: Im Jahr 2018 bestellte die DB vier Hybrid-Rangierlokomotiven bei CRRC. Dies wurde als ersten Schritt auf den deutschen/ europäischen Markt angesehen. Die Einführung von elektrischen Regionaltriebzügen und eines BEMU Fahrzeugs wird daher mittelfristig erwartet.

Darüber hinaus besteht auch die Nachfrage nach Straßenbahnen mit Batterieunterstützung. Dies ist auf diverse Gründe zurückzuführen, maßgeblich jedoch die prägende städtebauliche Optik von Oberleitungen. Einige Beispiele zeigen die Nachfrage nach batteriegestützten Straßenbahnen, die prinzipiell den Herstellern Knowhow-Aufbau für BEMU-Fahrzeuge für den Regionalverkehr ermöglichen. Auf folgende Unterschiede zwischen Straßenbahn- und Vollbahnfahrzeuge muss dennoch hingewiesen werden:

- Wesentlich kürzere Elektrifizierungslücken/ Haltestellenabstände
- Geringere Fahrgeschwindigkeiten
- Häufigeres Beschleunigen und Bremsen

Dies führt in Summe zu einem geringeren Bedarf an Batteriekapazität bei dem Einsatz in Straßenbahnen. Die längste batterieelektrisch gefahrene Strecke wurde von der Stadler Avenio Tram im Jahr 2011 zurückgelegt. Die Entfernung von ca. 19 km zeigt allerdings im Vergleich zu den Reichweiten derzeitig angebotener BEMUs deutlich die unterschiedlichen Bedürfnisse. Auch eine 2007 in Nizza eröffnete Straßenbahnlinie enthält zwei fahrdrahtlose Abschnitte. Der Betrieb auf diesen erfolgt mit Batterien des Typs NiMH und verlief bisher ohne größere Probleme.

### **Zusammenfassung**

Oberleitungs-/ Batterie-Hybridfahrzeuge sind technisch rein elektrische Triebfahrzeuge, welche durch die Ergänzung um Energiespeicher auch außerhalb elektrifizierter Strecken betreibbar sind. Aufgrund der hohen Effizienz der Batterie, des

elektrischen Antriebs sowie der Energiezuführung auf das Fahrzeug durch kontaktierende Systeme sind geringe Energiekosten, insbesondere an der Oberleitung, zu erwarten. Die chemisch bedingte geringe Energiedichte der Energiespeicher (ggü. Diesel) sorgt für eine hohe Batteriemasse bei gleichzeitig geringerer Reichweite. Hieraus resultiert, dass der Betrieb mit batterieelektrischen Fahrzeugen (auch bei Wasserstoff-/Batterie-Hybridfahrzeugen) immer auch ein Infrastrukturthema darstellt. Durch die Errichtung von zusätzlicher Ladeinfrastruktur kann Energie in das Fahrzeug zugeführt werden. Diese bewirkt zusätzliche Investitionskosten und höhere Energiebezugskosten durch den zusätzlichen Speicherschritt und dezentralen (ggf. teureren) Energiebezug. Beide Faktoren werden durch die Wahl des Bezugsnetzes (50 Hz Landesnetz bzw. 16,7 Hz Bahnenergie) determiniert. Die Speicherfähigkeit und Ladegeschwindigkeit der Batterien kann durch die gewählte Zellchemie beeinflusst werden. Grundsätzlich unterliegen Batterien aufgrund der Alterungsprozesse nach heutigem Stand allerdings regelmäßigen Austauschzyklen, die deutlich kürzer als die Fahrzeuglebensdauer sind. Aufgrund der häufig vorliegenden Teilelektrifizierung von Strecken in Deutschland sowie den resultierenden betrieblichen Einschränkungen (Reichweite, lange Ladezeiten, betrieblich schwieriges Laden) ist das reine Batteriefahrzeug (ohne Oberleitungsbetrieb) aktuell nicht im Portfolio der Fahrzeughersteller zu finden.

## 2.6 Oberleitungs-/Diesel-Hybrid (Dual-Mode)

### 2.6.1 Charakterisierung der Technologie

Bei Oberleitungs-/Diesel-Hybridfahrzeugen handelt es sich um Züge, die sowohl als vollwertiges Oberleitungsfahrzeug als auch als vollwertiges Dieselfahrzeug eingesetzt werden können. Sie verfügen über keinen elektrochemischen Traktionsenergiespeicher und kommen ausschließlich mit langjährig erprobten Standardkomponenten aus. Durch die in Teilen doppelte Fahrzeugausrüstung für zwei getrennte Systeme haben die Fahrzeuge eine hohe Masse (bis zu Streckenklasse C2 mit bis zu 20 t Radsatzlast).

Betrieblich bieten die Fahrzeuge jedoch Vorteile bei Linienläufen mit Streckenabschnitten in beiden Systemen, da ein Übergang fließend, mit marginalem Zeitaufwand und hoher Flexibilität durchgeführt werden kann. Eine Reichweiteneinschränkung gibt es nur durch die Menge getankten Dieselkraftstoffs, die jedoch für Fahrzeugumläufe meist unkritisch ist.

Der Fahrzeugtyp behält die Dieselantriebstechnologie bei. Dies führt ggf. zu einer ablehnenden Haltung bei Trägern öffentlicher Belange und Anwohnern. Die CO<sub>2</sub>-

Emissionen steigen durch die höhere Fahrzeugmasse für die Doppelausstattung der zwei Systeme und das dadurch längere Fahrzeug. Die Schadstoffemissionen entsprechen bei Neufahrzeugen jedoch dem aktuellen Emissionsstandard Stage V.

## 2.6.2 Funktionsweise Oberleitungs-/ Diesel-Hybrid (Dual-mode)

### 2.6.2.1 Oberleitungsbetrieb

#### Traktion

Im Oberleitungsbetrieb unterscheidet sich der Oberleitungs-/Diesel-Hybrid nicht vom klassischen Elektrotriebwagen.

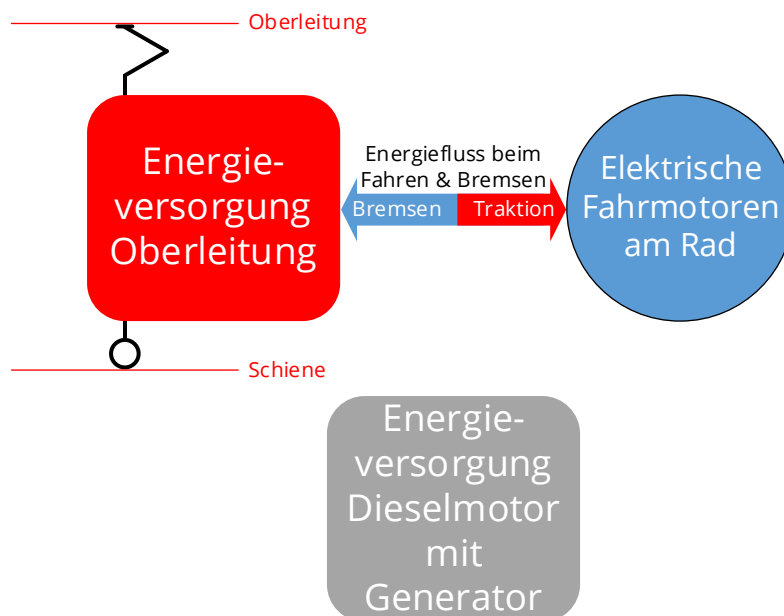


Abb. 2-18 Antriebsstrang Oberleitungs-/Diesel-Hybrid (Dual-mode) im Oberleitungsbetrieb (schematisch)

#### Bremsen

Das Fahrzeug kann die Bremsenergie ebenfalls rekuperieren und diese in die Fahrleitung zurückspeisen. Ein Teil der Bremsenergie wird direkt für alle Verbraucher (insbesondere Heizung, Klimaanlage) im Fahrzeug weiterverwendet.

### 2.6.2.2 Dieselbetrieb

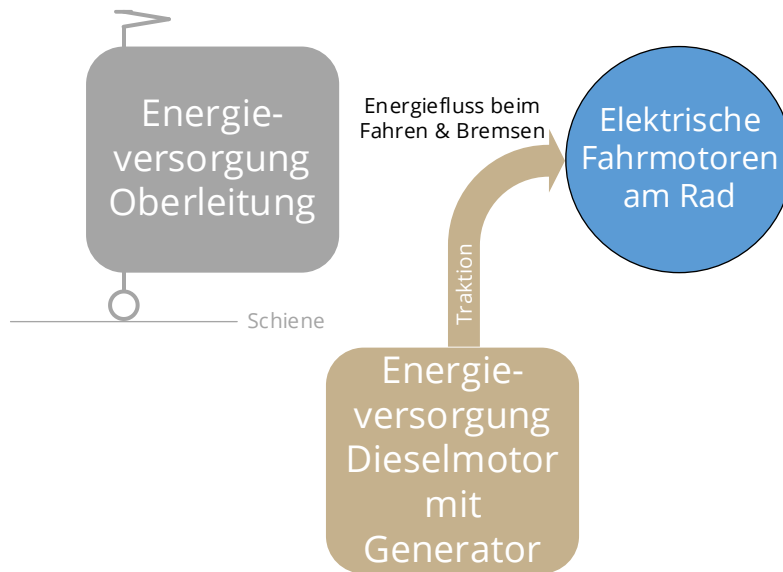


Abb. 2-19 Antriebsstrang Oberleitungs-/Diesel-Hybrid (Dual-mode) im Dieselbetrieb (schematisch)

#### Traktion

Die Fahrzeuge sind auf der Basis klassischer Elektrotriebzüge aufgebaut. Sie führen für den Betrieb auf nichtelektrifizierten Strecken Dieselmotor-Generator-Einheiten als mobile Bereitsteller elektrischer Energie mit. Dies entspricht dem Prinzip der die-selelektrischen Leistungsübertragung leistungsstärkerer Dieseltriebfahrzeuge.

Der Energiebedarf für Traktion sowie für die weiteren Verbraucher im Fahrzeug wird aus mehreren (meist auf dem Dach angebrachten) Dieselmotor-Generator-Einheiten und elektrischer Leistungsübertragung gedeckt.

#### Bremsen

Das Fahrzeug kann die Bremsenergie ebenfalls rekuperieren. Ein Teil der wiedergewonnenen Energie wird direkt für die Verbraucher wie Heizung und Klimaanlage im Fahrzeug weiterverwendet. Überschüssige Bremsenergie wird in Bremswiderständen verschleißfrei oder verschleißbehaftet mit Reibungsbremsen in Wärme gewandelt. Eine Speicherung rekuperierter elektrischer Bremsenergie im Dieselbetrieb ist mangels Batterie nicht möglich

## 2.6.3 Fahrzeugbeispiele Oberleitungs-/Diesel-Hybrid (Dual-Mode)

### 2.6.3.1 Stadler Flirt



Abb. 2-20 Beispiel Stadler Flirt für Greater Anglia, GB<sup>42</sup>



Abb. 2-21 Unterbringung der Komponenten der 2. Traktionsart in weiterem Wagenkasten<sup>43</sup>

Der Fahrzeugtyp existiert bereits als Serienfahrzeug in Großbritannien und steht seit 2019 im Einsatz. Es basiert auf der Fahrzeugplattform Stadler Flirt, die auch in Deutschland angeboten wird.

Für die Umsetzung des Dual-Mode-Betriebes wird ein klassischer Elektrotriebzug um einen kurzen Wagenkasten ergänzt, in dem die Dieselmotor-Generatorsätze zur Bereitstellung elektrischer Energie untergebracht sind. Das Konzept repräsentiert eine der beiden Einbaumöglichkeiten für leistungsstarke Dieselmotor-Generatorsätze. Sie wird in Großbritannien vor allem deshalb notwendig, weil das zulässige Fahrzeugumgrenzungsprofil deutlich kleiner als in Mitteleuropa ist. Eine Unterbringung der Diesel-Antriebsanlagen auf dem Dach scheidet dort aus.

Die Technologie ermöglicht grundsätzlich auch den nachträglichen Austausch der Dieselmotor-Generatorsätze durch Batterien zur Gestaltung eines Oberleitungs-/Batterie-Hybridzuges.

<sup>42</sup> Stadler Rail AG

<sup>43</sup> bahnonline.ch, Jürg D. Lüthard

### 2.6.3.2 Alstom Coradia Polyvalent



Abb. 2-22 Beispiel Alstom Coradia Polyvalent<sup>44</sup>

Der Fahrzeugtyp wird in Frankreich in verschiedenen Ausführungen bereits seit mehreren Jahren im Regional- und Fernverkehr eingesetzt. Verschiedene Fahrzeugkonfigurationen in Länge, Ausstattung und Leistung sind möglich.

Nahezu die gesamte Antriebstechnik bis auf die elektrischen Fahrmotoren ist auf dem Dach des Fahrzeugs untergebracht, auch die Dieselmotor-Generator-Sätze für den Dieselbetrieb. Die Fahrzeuge existieren in vier- und sechsteiliger Ausführung mit ca. 220 bzw. ca. 350 Sitzplätzen. Die Fahrzeuge haben im Dieselbetrieb eine geringere Leistung (ca. 50 % thermisch) als elektrisch, erreichen jedoch in beiden Betriebsmodi 160 km/h Höchstgeschwindigkeit<sup>45</sup>.

Die Fahrzeugtechnologie kommt in Europa vor allem in Frankreich bereits seit mehreren Jahren zur Anwendung. Dort sind mehr als 150 Fahrzeuge des Typs Alstom Coradia Polyvalent (Markenname Régiolis) im Einsatz, die als Oberleitungs-/Diesel-Hybride ausgeführt sind. Die Fahrzeuge sind aktuell nur für den Betrieb mit einer Wechselspannung von 25 kV 50 Hz, einer Gleichspannung von 1,5 kV und den Dieselbetrieb ausgelegt.

Im Mai 2019 hat außerdem der Zweckverband Schienenpersonennahverkehr Rheinland-Pfalz Süd beschlossen, zusammen mit der Région Grand Est Fahrzeuge dieses Typs auch für den Einsatz im grenzüberschreitenden Verkehr mit Deutschland durch Alstom entwickeln zu lassen<sup>46</sup>. Diese sind auch für Oberleitungsbetrieb mit

---

<sup>44</sup>ParYoyo697—Travailpersonnel,CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=56332543>

<sup>45</sup> Alstom, „Product sheet Coradia Polyvalent Low-floor electric or dual-mode multiple unit,“ Alstom, Saint-Ouen, 2015

<sup>46</sup> [https://www.zspnv-sued.de/fileadmin/user\\_upload/zweckverband/versammlungen/sued/59/Protokoll\\_59\\_VV\\_o\\_ffentliche\\_Sitzung.pdf](https://www.zspnv-sued.de/fileadmin/user_upload/zweckverband/versammlungen/sued/59/Protokoll_59_VV_o_ffentliche_Sitzung.pdf). [Zugriff am 15. April 2020]



15 kV, 16,7 Hz und Dieselbetrieb in Deutschland ausgelegt und werden bis zum dortigen Verkehrsvertragsstart Mitte der 2020er-Jahre verfügbar und zugelassen sein. Eine Zulassung für ein Fahrzeug dieser Technologie liegt in Deutschland aktuell jedoch noch nicht vor.

Die Fahrzeugtechnologie ist unabhängig von Entwicklungen am Batteriemarkt. Ein nachträglicher Ersatz der Dieselmotor-Generator-Sätze durch elektrochemische Energiespeicher ist bei Verfügbarkeit leistungsfähigerer Batterien (v. A. Reichweite) jedoch technisch möglich.

### **Zusammenfassung**

Oberleitungs-/Diesel-Hybridfahrzeuge können als Symbiose von Diesel- und Elektrotriebwagen angesehen werden. Auf elektrifizierten Strecken verkehren sie rein elektrisch (siehe Elektrotriebwagen), während sie auf Abschnitten ohne Oberleitung rein dieselgetrieben fahren (siehe Dieseltriebwagen). Nachteilig ist auf beiden Abschnitten die höhere Masse aufgrund der nötigen Fahrzeugausrüstung. Eine Zwischenspeicherung von Energie ist in diesem Fahrzeugkonzept aktuell nicht implementiert, wobei insbesondere jüngere Fahrzeuge des Typs ggf. mit Batterien anstatt von Dieselmotor-Generatorsätzen nachgerüstet werden können. Dennoch kann im Dieselbetrieb regenerierte Bremsenergie für die Versorgung der Hilfsbetriebe verwendet werden.

## **2.7 Diesel-/Batterie-Hybridfahrzeuge**

### **2.7.1 Charakterisierung der Technologie**

Diesel-/Batterie-Hybridfahrzeuge entsprechen einem Konzept, welches aus dem Automobilbau als Plug-In-Hybrid bekannt ist. Ein elektrischer Antriebsstrang wird durch eine oder mehrere Dieselmotor-Generator-Einheiten mit elektrischer Energie versorgt. Der Dieselmotor kann einen Teil des Leistungsbedarfes des Zuges decken (Wegfall eines oder zweier Dieselmotoren beim Umbau auf Hybrid). Äquivalent dazu befindet sich eine Batterie im Fahrzeug, die den verbleibenden Leistungsbedarf deckt. Grundbedingung ist, dass die Batterie jederzeit ausreichend geladen ist, um selbst zum Traktionsleistungsbedarf des Fahrzeugs beitragen zu können. Die Batterie kann dafür vor oder während einer Fahrt durch den Dieselmotor oder eine Einspeisung von außen (Oberleitung, Stecker) nachgeladen werden. Eine Ladung in Fahrt muss im Fahrzeugkonzept explizit vorgesehen sein. Im Zusammenspiel von Dieselmotor und Batterie steht so immer genügend Traktions- und Nebenverbraucherleistung zur Verfügung. Je nach von außen nachgeladener

Energiemenge wird ein entsprechender Anteil des Energiebedarfes während der Zugfahrt aus der Batterie bzw. der Dieselmotor-Generator-Einheit bereitgestellt.

## 2.7.2 Funktionsweise Diesel-/ Batterie-Hybrid

### 2.7.2.1 Oberleitungsbetrieb (wenn im Fahrzeugkonzept vorgesehen)

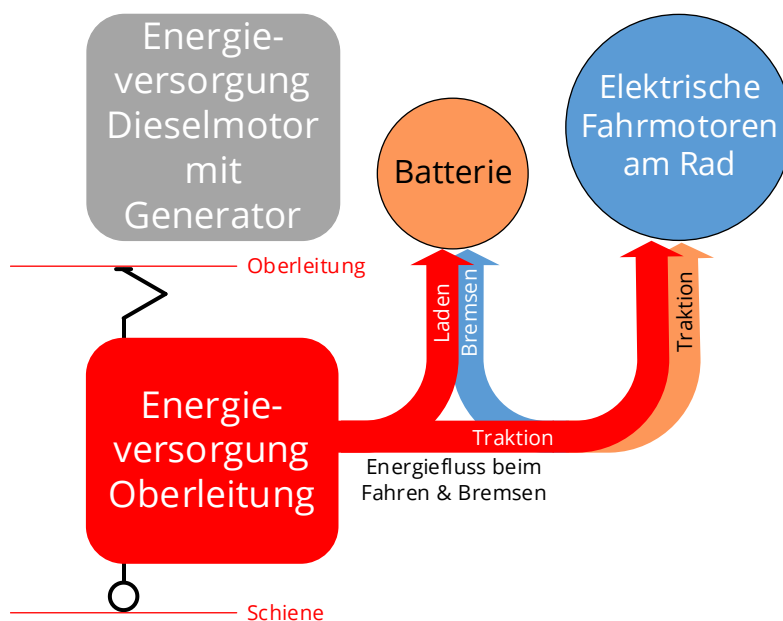


Abb. 2-23 Antriebsstrang Diesel-/ Batterie-Hybrid im Oberleitungsbetrieb (schematisch)

#### Traktion

Ist im Konzept ein Oberleitungsbetrieb während der Fahrt vorgesehen, unterscheidet sich der Diesel-/Batterie-Hybrid nicht wesentlich vom klassischen Elektrotriebzug. Erweitert wird dieser jedoch um das Laden der Batterie aus der Oberleitung sowohl im Stillstand als auch in Fahrt.

Das Konzept eignet sich besonders für den Umbau von bestehenden Dieseltriebzügen. Diese haben jedoch meist wenig Reserve für zusätzliche Massen im bzw. am Fahrzeug. Ein Transformator zum Betrieb an der Oberleitung mit 15 kV und 16,7 Hz, wie in Deutschland üblich, hat eine hohe Masse. Zur Massereduzierung könnte eine geringere Trafoleistung beitragen. Die Trafoleistung ist dann nur zum Nachladen ausreichend, nicht jedoch gleichzeitig als Traktionsenergiequelle zum Fahren. Je nach Umsetzung des Konzepts kann es deshalb vorkommen, dass auch bei Fahrt mit angelegtem Stromabnehmer unter Oberleitung ein Teil des Traktionsleistungsbedarfs aus der Batterie oder dem Dieselmotor bereitgestellt werden muss.

Das Konzept kann außerdem vorsehen, die Batterie über eine leistungsfähige Steckerlösung aufzuladen. Sie kann dann jedoch ausschließlich im Stand wieder

aufgeladen werden, eine Fahrt während des Ladens ist nicht möglich. Diese Einschränkung kann betriebliche Nachteile (Standzeit für Ladung, wenig Reichweite) hervorrufen. Für Werkstattaufenthalte ist die Realisierung dieser Schnittstelle jedoch immer sinnvoll.

## Bremsen

Das Fahrzeug kann die Bremsenergie ebenfalls rekuperieren. Sie wird bei nicht voll aufgeladener Batterie zum Laden derselben bzw. für alle Verbraucher im Fahrzeug genutzt. Nur im Fahrzeug nicht benötigte Energie wird in die Oberleitung zurückgespeist, verschleißfrei in Bremswiderständen oder verschleißbehaftet durch Reibungsbremsen in Wärme gewandelt.

### 2.7.2.2 Diesel-/Batterie-Hybridbetrieb

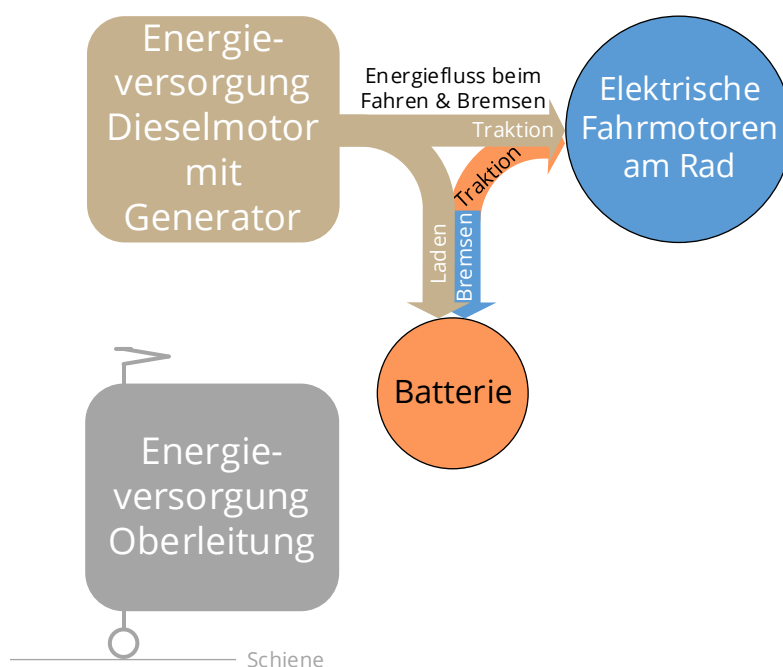


Abb. 2-24 Antriebsstrang Diesel-/Batterie-Hybrid im Diesel-/Batterie-Hybrid-Betrieb (schematisch)

## Traktion

Die Fahrzeuge führen für den Betrieb auf nichtelektrifizierten Strecken Dieselmotor-Generator-Einheiten, also mobile Bereitsteller elektrischer Energie, mit. Dies entspricht dem Prinzip der dieselektrischen Leistungsübertragung in leistungsstärkeren Dieseltriebfahrzeugen. Sie decken mit der Batterie gemeinsam den Traktions- und Zusatzleistungsbedarf des Fahrzeugs und können so meistens im optimalen Drehzahlbereich betrieben werden, da die Batterie wechselnde Leistungen bereitstellt, während der Dieselmotor die Grundlast trägt. Ist keine Ladeinfrastruktur

vorhanden, dienen die Dieselmotor-Generator-Sätze auch als Nachlademöglichkeit für die Batterie, allerdings mit ungünstigem Wirkungsgrad.

### Bremsen

Das Fahrzeug kann die Bremsenergie ebenfalls rekuperieren. Sie wird bei nicht voll aufgeladener Batterie zum Laden derselben bzw. für die Versorgung aller Verbraucher im Fahrzeug genutzt. Nur im Fahrzeug nicht benötigte Energie wird verschleißfrei in Bremswiderständen oder verschleißbehaftet durch Reibungsbremsen in Wärme gewandelt.

#### 2.7.2.3 Batteriebetrieb

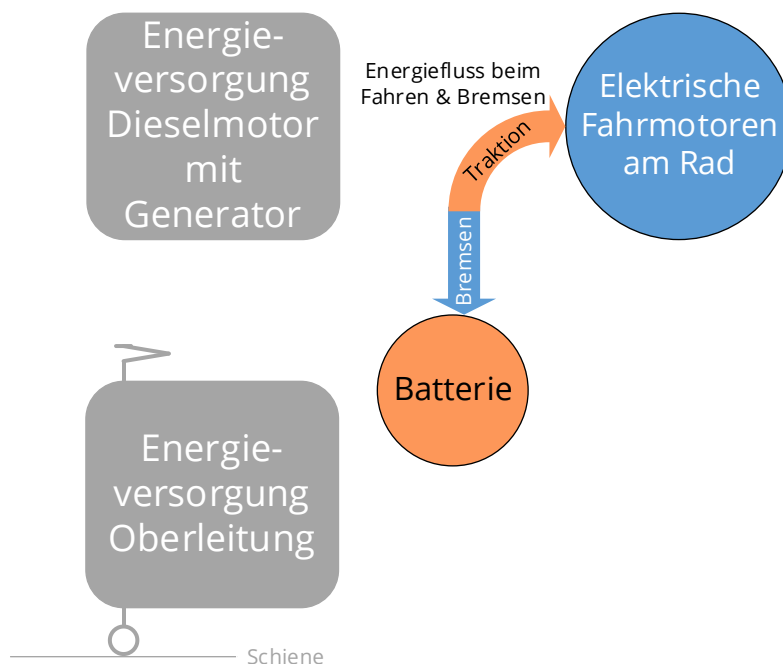


Abb. 2-25 Antriebsstrang Diesel-/Batterie-Hybrid im Batteriebetrieb (schematisch)

### Traktion

Für Abschnitte, auf denen Geräusch- und Schadstoffemissionen als besonders unerwünscht eingestuft werden (Bahnhofsausfahrten, Ortsdurchfahrten, Nähe zu Krankenhäusern, Schulen, etc.), kann auf den Dieselmotor verzichtet und nur aus der Batterie gefahren werden. Die Traktionsart wird vor allem durch die Energiemenge der Batterie begrenzt, ggf. auch das Beschleunigungsverhalten im oberen Geschwindigkeitsbereich durch die Batterieleistung.

### Bremsen

Das Fahrzeug kann die Bremsenergie ebenfalls rekuperieren. Sie wird bei nicht voll aufgeladener Batterie zum Laden derselben bzw. für die Versorgung aller Verbraucher im Fahrzeug genutzt. Nur im Fahrzeug nicht benötigte Energie wird

verschleißfrei in Bremswiderständen oder verschleißbehaftet durch Reibungsbremsen in Wärme gewandelt.

### 2.7.3 Fahrzeugbeispiel Diesel-/Batterie-Hybrid

Diesel-/Batterie-Hybride sind vor allem für Umbaukonzepte interessant, ein Neubau von Fahrzeugen ist bei den in Deutschland vertretenen Herstellern nicht angekündigt. Ziel des Umbaus ist vor allem eine mögliche Weiternutzung noch nicht am Lebensdauerende befindlicher Dieseltriebwagen, die bei Ausschreibungen durch den Verlust von Verkehrsverträgen freigesetzt werden. Aufgabenträger können für Neuverträge heute die Rekuperationsfähigkeit der Fahrzeuge, also die Möglichkeit der Rückgewinnung der beim Bremsen freiwerdenden Energie, vorschreiben. Reine dieselmotorige angetriebene Fahrzeuge können dies technologisch nicht, sodass sie sich für eine Bewerbung durch den Betreiber ohne vorherigen Umbau nicht eignen.

#### Eco Train der DB



Abb. 2-26 Beispiel DB Erzgebirgsbahn EcoTrain mit Oberleitungs-Nachladung (Fotomontage)<sup>47</sup>

Der Fahrzeugtyp steht beispielhaft für ein solches Umbaukonzept, bei dem ein Fahrzeug der Plattform Siemens Desiro Classic bei der DB Erzgebirgsbahn unter dem Produktnamen EcoTrain zu Diesel-/Batterie-Hybriden umgebaut wurde. Der Hybridantrieb wird technologisch umgesetzt, indem ein neues PowerPack mit einem Dieselmotor-Generator-Satz und integriertem elektrischem Fahrmotor einen der Dieselmotoren ersetzt. Der zweite Dieselmotor wird durch einen Batteriesatz und einen weiteren elektrischen Fahrmotor ersetzt. Der Dieselmotor hat eine ähnliche Leistung wie die vorher verbauten Anlagen. Der Energiegehalt der Lithium-Ionen-NMC-Batterien beträgt ca. 150 kWh.

Zur Nachladung der Batterie wird in einer ersten Stufe des Projekts eine Steckerlösung auf Basis eines bahnungelassenen Standards (UIC 552) eingesetzt, wenn nötig kann zudem mit dem Dieselmotor nachgeladen werden. In einer zweiten Stufe kann

<sup>47</sup> Falk Angermann, Professur für Elektrische Bahnen

das Fahrzeug einen Stromabnehmer zur Nachladung der Batterie aus der Oberleitung erhalten, der im Fahrzeug für die Steckerladung integrierte Transformator ist dafür bereits ausgelegt. Die Zulassungsfahrten des Prototyps sollten nach Projektangaben noch in 2020 beginnen. Aktuell ist die Zulassung jedoch ausgesetzt.



Abb. 2-27 Eco Train mit deutlich erkennbarem zusätzlichem Dachaufbau<sup>48</sup>

Wie aus Abb. 3-23 hervorgeht, ist eine erhebliche Anzahl an Komponenten für den Umbau erforderlich. Diese können im Falle des EcoTrain auf dem Dach montiert werden. Das Fahrzeug ist aufgrund seiner konstruktiven Ausführung und Länge fähig, diese aufzunehmen, da es auch als elektrisches Fahrzeug in andere europäische Länder geliefert wurde.

Kleinere Bestandsfahrzeuge, wie beispielsweise vom Typ Stadler RegioShuttle RS1, lassen sich allerdings nicht derartig umbauen.

### Zusammenfassung

Diesel-/Batterie-Hybridfahrzeuge können einerseits durch einen Dieselmotor und andererseits durch eine Batterie angetrieben werden. Letztere kann entweder im Stand über einen Stecker, in Fahrt durch den Motor oder beim Bremsen durch rekuperierte Energie geladen werden. Aufgrund der Vielzahl der nötigen Komponenten besitzt das Fahrzeug eine höhere Masse. Aktuell existiert dieses Fahrzeugkonzept nur als Umbauversion im Rahmen einer Demonstration. Neufahrzeuge werden z. Z. nicht angeboten.

---

<sup>48</sup> Nyascha Thomas Wittemann, Professur für Elektrische Bahnen

## 2.8 Wasserstoff-/ Batterie-Hybridfahrzeuge (FCMU/HEMU)

### 2.8.1 Charakterisierung der Technologie

Wasserstoff-/Batterie-Hybridfahrzeuge sind technisch Elektrotriebwagen, die ohne Fahrleitung verkehren können. Die Energieversorgung erfolgt auf diesen Strecken, ähnlich wie bei dieselektrischen Fahrzeugen, durch Umwandlung eines chemischen Energieträgers in elektrische Energie. Im betrachteten Fall handelt es sich um Wasserstoff, ein Gas, welches auf mehrere Arten hergestellt werden kann.

CO<sub>2</sub>-neutral ist dies aktuell nur durch Elektrolyse von reinem Wasser unter Verwendung elektrischer Energie möglich. Dies kann durch Sektorkopplung mit erneuerbaren Energien gut umgesetzt werden. Eine Erzeugung mittels Elektrolyse mit dem aktuellen deutschen Strommix ist jedoch CO<sub>2</sub>-intensiver als der Dieselbetrieb. Aufgrund der geringen Dichte von Wasserstoff muss dieser zunächst verdichtet und in dieser Form gelagert werden. Auch die Betankung des Fahrzeugs findet unter Hochdruck statt. Die anschließend in der Brennstoffzelle erzeugte Elektroenergie kann dann für die Versorgung des Fahrzeugs verwendet werden. Eine große Batterie zur Zwischenspeicherung ist immer notwendig, um die aus der Traktionsanforderung resultierende Dynamik der Leistungsanforderung nicht direkt an die Brennstoffzelle weiterzugeben. Aufgrund der zweistufigen Wandlung der elektrischen Energie im Erzeugungsprozess und im Fahrzeug und der damit verbundenen Verluste ist eine Betrachtung der Energieerzeugung in diesem Fall besonders ausschlaggebend (vgl. Abb. 6-1).

Wasserstoff-/Batterie-Hybridfahrzeuge wandeln in einer Brennstoffzelle die im Wasserstoff gespeicherte Energie in Kombination mit Luftsauerstoff im Prozess der sogenannten kalten Verbrennung in elektrische Energie um. Diese wiederum wird dann in einem Elektromotor in mechanische Energie umgewandelt. Abgas ist Wasserdampf bzw. kondensiertes Wasser. Da in einem elektrischen Netzwerk immer eine ausgeglichene Energiebilanz zwischen Leistungsangebot und -bezug herrschen muss, Brennstoffzellen jedoch zur Reduzierung der Alterungserscheinungen immer möglichst in einem konstanten Leistungsbereich belastet werden<sup>49</sup>, muss für den ständig schwankenden Leistungsbedarf ein Zwischenspeicher integriert werden.

---

<sup>49</sup> O. Uluc, „Wasserstoff als Energieträger, Ballard Power Systems,“ in DMG Seminar E1, Berlin, 2018

Insbesondere bei Traktionsspitzen übernimmt dieser die wechselnden Lasten. Hierzu verfügt der Wasserstoff-/Batterie-Hybrid über Batterien.

Leistungsfähige Brennstoffzellen sind für den nutzbaren Betrieb als Stapel aus mehreren Zellen aufgebaut, von denen jede einzelne für sich eine Brennstoffzelle darstellt. Diese Stapel werden Stacks genannt, die einzelnen Zellen sind darin in Reihe geschaltet. Die Stapelung ist notwendig, um eine ausreichend hohe Spannung am Systemausgang des Stacks bereitstellen zu können. Eine Alterung tritt bei Brennstoffzellen maßgeblich an der protonenleitenden Membran im Innern der Zelle auf. Bei der Instandhaltung werden deshalb vor allem die Zellmembranen überarbeitet bzw. getauscht, die Zellumgebung kann bestehen bleiben. Die Standdauer der Zellmembran wird im Rahmen dieser Studie als Lebensdauer bezeichnet.

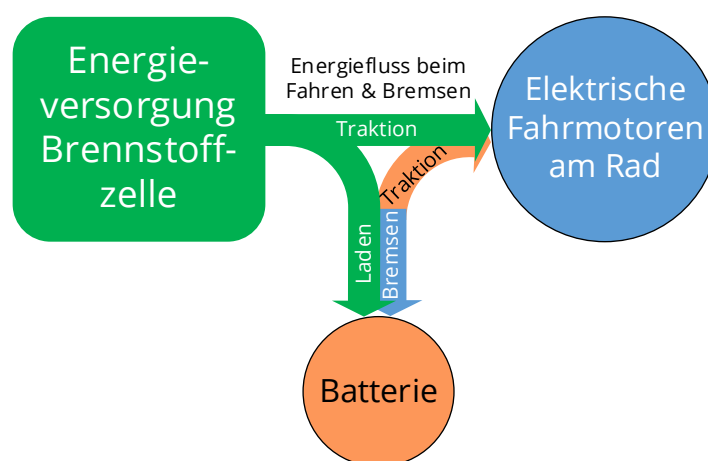


Abb. 2-28 Antriebsstrang eines Wasserstoff-/Batterie-Hybrid

### Traktion

Der Leistungsbedarf wird durch ein Zusammenspiel der Batterie und der Brennstoffzelle (BZ) gedeckt. Vor allem bei Leistungsspitzen für Beschleunigungsphasen werden dabei große Anteile aus der Batterie entnommen, da die Leistung der BZ kleiner ist als jene des Antriebes. In traktionsarmen Phasen wird die Batterie wieder aus der BZ aufgeladen. Der benötigte Wasserstoff wird in Tanks mitgeführt, die unter mehreren 100 bar Druck stehen, und den Wasserstoff so in großen Mengen speichern zu können.

### Bremsen

Das Fahrzeug kann die Bremsenergie ebenfalls rekuperieren. Sie wird bei nicht voll aufgeladener Batterie zum Laden derselben bzw. für alle Verbraucher im Fahrzeug genutzt. Nicht benötigte Energie wird in Bremswiderständen verschleißfrei oder in Reibungsbremsen verschleißbehaftet in Wärme gewandelt. Bei in Betrieb befindlicher BZ lädt diese während des Bremsvorgangs die Batterie zudem weiter auf.



## 2.8.2 Fahrzeugbeispiele Wasserstoff-/Batterie-Hybrid

### Alstom iLint



Abb. 2-29 Beispiel Alstom iLint<sup>50</sup>

Der Fahrzeugtyp war seit 2018 bis Mai 2020 im planmäßigen Fahrgasteinsatz mit zwei Vorserienfahrzeugen in Norddeutschland zwischen Buxtehude und Bremervörde. Dort wurden durch die Prototypen in 530 Tagen ca. 180.000 Fahrzeug-km zurückgelegt<sup>51</sup>. Er basiert auf der Dieseltriebwagen-Plattform Coradia Lint der Firma Alstom. Die PowerPacks des Fahrzeugs wurden durch Elektromotoren und Batterien ersetzt und um Drucktanks, Stromrichter und die Brennstoffzellen auf dem Dach und unter dem Fahrzeug erweitert. Die Beschleunigungswerte entsprechen annähernd jenen von vergleichbaren Dieseltriebzügen desselben Herstellers.

Der Fahrzeugtyp wurde im Jahr 2018 außerdem in einer Stückzahl von 27 (Betriebsaufnahme Ende 2022<sup>52</sup>) durch den Rhein-Main-Verkehrsverbund (RMV) für das Taunusnetz bestellt. Niedersachsen hat 14 Fahrzeuge für den Betrieb im Weser-Elbe-Netz (Betriebsaufnahme Ende 2021<sup>53</sup>) bestellt.

Das Fahrzeug verfügt über 150 Sitzplätze, ist 54,3 m lang und hat eine Höchstgeschwindigkeit von 140 km/h. Die elektrische Energie stellen zwei PEM Brennstoffzelleneinheiten (PEM – Proton Exchange Membrane Fuel Cell) auf dem Dach, jeweils bestehend aus mehreren BZ-Stacks, bereit. Diese bringen in Zusammenspiel mit zwei Fahrzeugbatterien die nötige Traktionsleistung auf. Nach Herstellerangaben haben die Brennstoffzellen je eine Leistung von 200 kW, der Energieinhalt der zwei Batterien liegt bei insgesamt 222 kWh. Ca. 260 kg netto Wasserstoff sorgen für eine

---

<sup>50</sup> Foto: Alstom

<sup>51</sup> [https://www.kreiszeitung-wochenblatt.de/buxtehude/c-panorama/positive-ergebnisse-mit-dem-weltweit-ersten-wasserstoffzug\\_a167651](https://www.kreiszeitung-wochenblatt.de/buxtehude/c-panorama/positive-ergebnisse-mit-dem-weltweit-ersten-wasserstoffzug_a167651), abgerufen am 04.08.2020.

<sup>52</sup> <https://www.alstom.com/de/press-releases-news/2019/5/rmv-tochter-fahma-bestellt-groesste-brennstoffzellenzug-flotte-der-welt>, abgerufen am 04.08.2020.

<sup>53</sup> <https://www.golem.de/news/coradia-ilint-alstoms-brennstoffzellenzuege-bewaehren-sich-1907-142626.html>, abgerufen am 04.08.2020.

Reichweite im Bereich der Dieseltriebzüge zwischen 800 und 1000 km pro Tankfüllung. Eine Überarbeitung der Brennstoffzellenmembran hat nach Aussage des Fahrzeugherstellers nach 15.000 h (~20.000 h Betriebsstunden des Zuges) zu erfolgen, dies entspricht ca. 4 bis 5 Jahren. Hersteller der Brennstoffzellen ist Hydrogenics.

### Siemens Mireo Plus H



Abb. 2-30 Beispiel Siemens Mireo Plus H, Rendering<sup>54</sup>

Das Fahrzeugkonzept basiert auf der Mireo-Plattform der Firma Siemens. Als Wasserstofffahrzeug wird der Mireo in der Variante „Plus H“ angeboten. Ein Prototyp existiert bisher nicht, die Entwicklung der nötigen Brennstoffzellen ist jedoch mit dem vorgesehenen Hersteller Ballard bereits angestoßen. Oberleitungs-Fahrzeuge der Mireo-Plattform befinden sich bereits im Planbetrieb im Rheintal.

Das Fahrzeug soll über zwei Traktionsanlagen mit den jeweils zugehörigen Batterien und Brennstoffzellen verfügen, 160 km/h erreichen und als 2-Wagen-Zug mit 120 bzw. 3-Wagen-Zug mit 165 Sitzplätzen angeboten werden und über bis zu 600 km bzw. 900 km Reichweite verfügen<sup>55</sup>.

Angestrebt wird nach Aussage des Brennstoffzellenanbieters Ballard, die notwendige Überarbeitung der Brennstoffzellenmembran erst nach circa 30.000 h<sup>56</sup> (~40.000 h Betriebsstunden des Zuges), durchzuführen, dies entspricht 7 - 9 Jahren.

Die Firmen Siemens und DB AG haben im November 2020<sup>57</sup> verkündet, dass sie ab 2024 ein Fahrzeug des Typs Mireo Plus B auf der Strecke zwischen Tübingen, Horb und Pforzheim mit einer durch die DB bereitgestellten Tankstelle erproben wollen.

<sup>54</sup> Fotomontage: Siemens AG

<sup>55</sup> J. Steinbauer, „Mireo - Ein starker Zug wird jetzt noch stärker,“ München, 2019.

<sup>56</sup> O. Uluc, „Wasserstoff als Energieträger, Ballard Power Systems,“ in DMG Seminar E1, Berlin, 2018.

<sup>57</sup> [https://www.deutschebahn.com/de/presse/pressestart\\_zentrales\\_uebersicht/Deutsche-Bahn-und-Siemens-starten-ins-Wasserstoff-Zeitalter-5735960](https://www.deutschebahn.com/de/presse/pressestart_zentrales_uebersicht/Deutsche-Bahn-und-Siemens-starten-ins-Wasserstoff-Zeitalter-5735960), abgerufen 23.11.2020.

Dies stellt den öffentlich geförderten Schritt in die reale Fahrzeugumsetzung der Siemens-Plattform-Abwandlung für Wasserstoff-/ Batterie-Hybridfahrzeuge dar.

### Stadler Schmalspurfahrzeug



Abb. 2-31 Beispiel Stadler H2-Triebzug Zillertalbahn, Österreich, Rendering<sup>58</sup>

Der Fahrzeugtyp wird als Schmalspurfahrzeug für die Zillertalbahn in Österreich entwickelt. Er soll als vierteiliger Gliedertriebzug ausgeführt werden und noch im Jahr 2020 für erste Testfahrten verfügbar sein. Geplante Betriebsaufnahme ist 2022.

Das Fahrzeug soll über vier Brennstoffzellen mit jeweils ca. 100 kW Leistung sowie über zwei Energiespeicher verfügen. Die Energiespeicher bestehen jeweils aus einer hybriden Struktur (Batterie plus Kondensator) mit ca. 80 bis 100 kWh Energieinhalt. Die Druckbehälter sollen ca. 150 kg netto Wasserstoff mitführen können, sodass einmaliges Tanken pro Tag für den Fahrzeugumlauf ausreichend ist<sup>59</sup>.

Das Fahrzeug ist für einen Einsatz im normalspurigen Eisenbahnnetz nicht geeignet, die Wasserstofftechnologie kann jedoch übertragen werden.

### 2.8.3 Auslegungskriterien für Wasserstofffahrzeuge mit höherer Leistung

Bei konventionellen Antrieben wie der Elektro- oder Dieseltraktion kann im Allgemeinen von einer zeitlich unbegrenzten und unabhängigen Verfügbarkeit der angegebenen Leistungsfähigkeit ausgegangen werden. Bei dem Dieselfahrzeug setzt dies lediglich eine ausreichende Menge an mitgeführten Kraftstoff voraus. Dies führt zu einer im Rahmen des Fahrplans und im Horizont eines Umlaufs uneingeschränkter Einsetzbarkeit der Fahrzeuge. Bei Oberleitungs-/Batterie-Hybriden gilt diese Annahme im Batteriemodus zumindest während des Vorhandenseins ausreichender Speicherenergie. Dies gilt dann im Rahmen der vorgegebenen Reichweite von

<sup>58</sup> [https://www.meinbezirk.at/tirol/c-lokales/infoveranstaltung-bzgl-zillertalbahn\\_a3182976](https://www.meinbezirk.at/tirol/c-lokales/infoveranstaltung-bzgl-zillertalbahn_a3182976)

<sup>59</sup> H. Schreiner, „Strategische Überlegungen der Zillertalbahn zum Einsatz von Wasserstoff als Energieträger,“ in DMG Seminar E1, Berlin, 2018.

ca. 60-100 km (fahrzeugabhängig). Für Wasserstoff-/Batterie-Hybride kann dies aufgrund der Antriebstopologie und Leistungsaufteilung nicht angenommen werden. Ein Grund ist die Anforderung des konstanten Betriebs der Brennstoffzelle. Ist beispielsweise für einen Beschleunigungsvorgang ein höherer Leistungsbedarf erforderlich, so wird dieser durch einen Energiespeicher mit begrenztem Energieinhalt bereitgestellt. Diese Begrenzung führt zu dem Umstand, dass die zeitlich begrenzt lieferbare Leistung weit über der der Brennstoffzelle liegt. Der Zeitraum für die Bereitstellung der zusätzlichen Leistung liegt, je nach Technologie des Energiespeichers, Energieinhalt und Abgabeleistung und unter Voraussetzung einer Vollladung des Speichers, bei maximal 15 Minuten. Dies lässt sich auf Basis gängiger C-Faktoren von im Traktionsbereich eingesetzten Energiespeichern abschätzen. Unter C-Faktor versteht sich (unter Annahme von Vereinfachungen und aus physikalischen Basisgrößen resultierend) die reziproke vollständige Lade- bzw. Entladezeit (bspw. 15 Min. vollständige Ladezeit entspricht  $1/0,25 = 4\text{ C}$ )<sup>60</sup>. Hieraus resultiert, dass nach Ablauf der Zeit der gesamte Leistungsbedarf des Fahrzeugs durch die Brennstoffzelle gedeckt werden muss. Diese liegt bei bisherigen Anwendungen weit unterhalb der gesamten Fahrzeugleistung. Darüber hinaus ist eine gewisse Regenerationszeit notwendig, um die Energiespeicher aus der Brennstoffzelle zu laden. Dies kann selbstredend nur dann erfolgen, wenn der gesamte Leistungsbedarf im Fahrzeug unterhalb der von der Brennstoffzelle abgegebenen, konstanten Leistung liegt. Aufgrund der bereits beschriebenen, wesentlich geringeren Brennstoffzellenleistung kann, selbst im Bereich niedriger Leistungsanforderungen, von einer Ladezeit bzw. Regenerationszeit ausgegangen werden, die weit über 15 Minuten liegt.

Soll ein Wasserstoff-/Batterie-Hybrid eine Strecke entsprechend einem definierten Fahrplan befahren, so ergibt sich eine erforderliche Geschwindigkeit sowie eine notwendige Beschleunigung. Hierauf basierend kann ein Leistungs- und Energiebedarf abgeschätzt werden, der über dem zeitlichen Verlaufe betrachtet eine gewisse Mindestdimensionierung von Brennstoffzelle und Energiespeicher erfordert. Daraus ergeben sich unter zusätzlicher Berücksichtigung nicht streckenspezifischer Anforderungen (Hilfsenergie, Aufenthaltszeiten etc.) Kriterien für die Auslegung der Antriebs- und Energieversorgungsanlage.

---

<sup>60</sup> <https://www.batterieforum-deutschland.de/infportal/lexikon/c-koeffizient/> (Abgerufen am 20.01.2021)

### **Anforderungen aus dem Energiebedarf**

- Bereitstellung von Traktionsleistung über einem Zeitraum von einigen Minuten aufgrund von:
  - hohem Streckenwiderstand (Steigungen, Tunnel, Bögen etc.)
  - hohem Fahrwiderstand bei hohen Geschwindigkeiten
  - Beschleunigung der Fahrzeugmassen
- Traktions- und Hilfsenergie (nach Abzug von Rekuperation) für eine gesamte Fahrt bzw. Umlauf.
- Bereitstellung von Hilfsbetriebeleistung über den Zeitraum der Fahrt.

### **Anforderungen aus dem Leistungsbedarf**

- Bereitstellung von Leistungsspitzen aus der Traktionsanforderung zur Ermöglichung des Beschleunigungsvermögens
- Aufnahme von Leistungsspitze der Rekuperation zur Erhöhung der Energieeffizienz

Alle genannten Anforderungen führen zwangsläufig zu einer entsprechend erforderlichen Mindestdimensionierung. Aufgrund von begrenzt möglicher Zusatzmasse bzw. Einbauvolumen stellt die tatsächliche Auslegung ein multikriterielles Problem dar. Nur in seltenen Fällen findet eine genaue Fahrzeugdimensionierung zur Erfüllung einer konkreten Transportaufgabe statt. Vielmehr wird aus bestehenden Konfigurationen eine passende gewählt. Die Prüfung, ob die Transportaufgabe mit der favorisierten Wasserstoff-/Batterie-Hybrid-Konfiguration zu bewältigen ist, erfordert eine gesonderte Untersuchung. Dabei sind neben der maximalen Leistungsfähigkeit auch entsprechende zeitabhängige Leistungsfähigkeiten zu berücksichtigen. Eine unpassend gewählte Konfiguration der Betriebsmittel kann zu einer Leistungs-drosselung führen. Dies wirkt sich negativ auf das Beschleunigungsvermögen und die Höchstgeschwindigkeit und somit den Fahrplan aus.

### **Lastprofile von Brennstoffzellensystemen**

Aufgrund der im Verhältnis zur Fahrtdauer kurzzeitigen und hohen Leistungsanforderungen ist eine dynamische Belastung der Brennstoffzelle zunächst eine Überlegung wert. Dies würde die erforderliche Leistungsfähigkeit des Energiespeichers erheblich reduzieren und damit Bauraum und Masse reduzieren. Dennoch ist dies aus

zellchemischer Sicht keine anstrebenswerte Betriebsstrategie. Dynamische Laständerungen führen zu lokalen Unterversorgungen und beschleunigen die Degradation der Zelle, was wiederum zu einer Verkürzung der Lebensdauer führt.<sup>61</sup>

Aus diesem Grund ist eine möglichst konstante Belastung wünschenswert. Die erforderliche Leistung kann sich durch Mittelung des Nettoenergiebedarfs (abzüglich Rekuperation) über der Fahrzeit (zzgl. eines Zuschlags) ergeben. Auch eine vollständige Abschaltung der Brennstoffzelle ist aus Gründen der Zellchemie nicht erstrebenswert (Start-Stopp-Zyklen)<sup>62</sup>. Hierbei ist vielmehr eine Drosselung der Abgabeleistung zu empfehlen (Ruhebetrieb). Diese sollte allerdings mindestens 10 % der Nennleistung betragen.

### **Lastprofile von Dynamikbatterien**

Elektrochemische Energiespeicher, im allgemeinen Sprachgebrauch auch Batterien genannt, besitzen eine für den Einsatz in Wasserstoff-/Batterie-Hybriden geeignete Belastungscharakteristik. Dies bedeutet schnelle Lastwechsel und eine entsprechende Leistungsfähigkeit in der Energieaufnahme sowie -abgabe. Die Zellspannung dient dabei als Indikator für den Ladezustand<sup>63</sup>. Aufgrund des speziellen Lade- und Entladeverhaltens ist eine eigene Regelung nötig. Je nach Anwendung kann außerdem eine Spannungsanpassung erforderlich sein, um eine konstante nutzbare Gleichspannung bereitzustellen<sup>64</sup>. Bemerkenswert sind die bei Lithiumionen-Zellen erreichbaren Lade- und Entladeleistungen. Diese können, je nach Zellchemie, bei konstant 2-3 C liegen<sup>65</sup>. Herausfordernd sind allerdings die thermische Konditionierung sowie die Überwachung im Hinblick auf Sicherheit und Lebensdauer. Durch eine schonende Belastung durch das Vermeiden von „Stressfaktoren“ kann die Lebensdauer verlängert werden<sup>66</sup>.

Bei der Dimensionierung von Wasserstoff-/Batterie-Hybridfahrzeugen spielt die verfügbare Leistung, überschlägig hervorgehend aus dem C-Faktor, sowie der maximal

---

<sup>61</sup> Dynamischer Betrieb von PEM-Brennstoffzellen, ZSW (abgerufen am 28.08.2020) <https://www.zsw-bw.de/projekt/h2-und-brennstoffzellen/dynamischer-betrieb-von-pem-brennstoffzellen.html>

<sup>62</sup> STRESS – Start-Stop-Alterung von PEM Brennstoffzellen, Fraunhofer ISE (abgerufen am 28.08.2020) <https://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/stress.html>

<sup>63</sup> S 299, Michael Sterner Et al., Energiespeicher, Springer 2017

<sup>64</sup> S 299, Michael Sterner Et al., Energiespeicher, Springer 2017

<sup>65</sup> S 298, Michael Sterner Et al., Energiespeicher, Springer 2017

<sup>66</sup> S 301, Michael Sterner Et al., Energiespeicher, Springer 2017

nutzbare Energieinhalt eine Rolle. Während die Leistung die verfügbare Fahrzeugleistung determiniert bestimmt der Energieinhalt maßgebend die mögliche Dauer der Belastung. Aufgrund der Größenunabhängigkeit des C-Faktors sind Leistung und Energie dahingehend verkoppelt, dass eine Verdoppelung der Leistung, beispielsweise resultierend aus der Leistungsanforderung, auch eine Erhöhung des Energieinhalts und somit der Masse und der Kosten zur Folge hat. Hieraus lässt sich ableiten, dass die erforderliche technische Konfiguration von Wasserstoff-/Batterie-Hybriden sehr stark von dem konkreten Betriebsprogramm auf einer Strecke abhängig ist. Bei dem Einsatz standardisiert angebotener Fahrzeuge ist die entsprechende Einsatzfähigkeit daher nicht alleine anhand der verfügbaren Leistung zu prüfen. Vielmehr sind die jeweiligen Zeitdauern maximaler Belastungsabschnitte ebenso relevant. Hinzu kommen im Vergleich zu DMU kleinere Fahrzeugreichweiten mit einer Tankfüllung.

Dies gilt bei Oberleitungs-/Batterie-Hybriden auch, jedoch nur hinsichtlich des Gesamtenergiebedarfs und nicht der Dauer der erforderlichen Leistungsabgaben. Bei bisherigen Diesel- oder Elektrofahrzeugen spielte dies, abgesehen von Ausschlusskriterien wie Höchstgeschwindigkeit, Beschleunigung o.ä., bisher nur eine sekundäre Rolle.

## 2.9 Nutzung alternativer Antriebe bei Fahrzeugen mit aktiver Wagenkastensteuerung im Bogen (Neigetechnik)

### 2.9.1 Motivation

Zur Erhöhung der Attraktivität von Regionalverkehren werden im großen Stil Fahrzeuge mit aktiver Neigetechnik eingesetzt. Um die Jahrtausendwende wurde eine erhebliche Anzahl von Fahrzeugen der BR 612 beschafft und bis heute überwiegend im schnellen Regionalverkehr eingesetzt. Diese werden ausschließlich mit Diesel betrieben und erreichen Geschwindigkeiten von 160 km/h.

Durch die aktive Neigung des Wagenkastens in Richtung Bogeninnen kann die auf die Fahrgäste wirkende Horizontalkraft reduziert werden. Dies ermöglicht eine höhere Fahrgeschwindigkeit bei gleichzeitiger Einhaltung der Grenzen für die maximale Seitenbeschleunigung. Dass sich hierdurch eine Vielzahl von Anforderungen an das Fahrzeug sowie den Fahrweg ergeben ist bekannt und wird an dieser Stelle nicht thematisiert. Es wird davon ausgegangen, dass ein potentiell Neigetechnikfahrzeug mit alternativen Antrieben prinzipiell auf den gleichen Strecken eingesetzt werden kann wie der Bestandsfuhrpark mit dieser Technik.





Abb. 2-32: BR 612 im Bogen mit deutlich erkennbarer Neigung<sup>67</sup>

Aufgrund der hohen Anforderungen resultierend aus der Geschwindigkeit, sowohl in der Geraden als auch im Bogen, und des begrenzten Marktvolumens, gab es bis heute noch keine Weiterentwicklung vergleichbarer Dieseltriebwagen in Deutschland. Darüber hinaus sind alle bisherigen Hersteller bereits vor über 10 Jahren aus dem Geschäft mit dieselbetriebenen Neigetechnik-Regionalzügen ausgestiegen. Elektrische Neigetechnikfahrzeuge werden allerdings weiterhin angeboten. Dennoch ist im Hinblick auf ein fortschreitendes Alter der Fahrzeuge ein Austausch spätestens in den 2030er-Jahren erforderlich. Die Frage nach der CO<sub>2</sub> Neutralität ist ebenso unklar wie die des möglichen Herstellers. Im Rahmen dieses Kapitels soll daher die Anwendung alternativer Antriebe in Fahrzeugen mit Neigetechnik diskutiert werden.

---

<sup>67</sup> CC BY-SA 3.0, A. Gutwein, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3498905>



## 2.9.2 Neigetechnik in Schienenfahrzeugen

Fahrzeuge mit aktiver Neigetechnik benötigen entsprechende Sensoren und Aktoren zur Durchführung der Neigebewegung. Aufgrund der nicht unerheblichen Kraftwirkung geht dies mit entsprechend dimensionierten Komponenten und einem höheren Energiebedarf einher. Prinzipiell gibt es, neben der passiven Neigetechnik durch Nutzung Fliehkraft, zwei Möglichkeiten zur Realisierung:

- **Hydraulisch**
- **Elektromechanisch**

Aufgrund des höheren Wirkungsgrads sowie weiterer technischer und ökonomischer Faktoren wurde die elektromechanische Variante in der BR 612 verwendet. Hierbei erfolgt die Messung durch Steuerpendel und Gyroskopen und die Neigung durch unterhalb des Wagenbodens angebrachte elektrische Stellmotoren. Das verwendete System „neicontrol-e“ der damaligen Firma Adtranz ermöglichte Stellwinkel von bis zu 8 ° und konnte vollständig unterflur angebracht werden.<sup>68 69</sup>

Da die Neigetechnik die dynamische Lage des Fahrzeugs maßgeblich verändert, müssen weitere konstruktive Aspekte berücksichtigt werden:

- **Verringerung der Fahrzeugquerschnittsfläche** zur Einhaltung der Fahrzeugbegrenzung auch im geneigten Zustand
- **Ausgleich der Neigebewegung am Stromabnehmer** bei oberleitungsgebundenen Fahrzeugen oder Oberleitungs-/ Batterie-Hybridfahrzeugen
- **Niederflurigkeit und uneingeschränkte Barrierefreiheit** aufgrund der notwendigen unterflurigen Komponentenunterbringung nur schwer herstellbar.

## 2.9.3 Mögliche Antriebsarten

Zur Herstellung der CO<sub>2</sub> Neutralität im Schienenverkehr soll auch für Neigetechnikfahrzeuge mit Dieselantrieb ein Antriebswechsel stattfinden. Abhängig von Fahrprofil und Einsatzgebiet sollen diese durch Fahrzeuge mit alternativen Antrieben ersetzt werden. Wesentliche Herausforderung beim Traktionswechsel sind die hohen Leistungsanforderungen für die Geschwindigkeit und die hohen Energiebedarfe für die

---

<sup>68</sup> S. 28, Andreas Steimel, El. Triebfahrzeuge und ihre Energieversorgung, Oldenbourg Industrieverlag, 2004

<sup>69</sup> Karl-Heinz Linke Et al., Pro und Contra Neigetechnik, Verkehrsgeschichtliche Blätter, 2019

Reichweite. Beides zusammen kann heute nur von leistungsstarken Dieselfahrzeugen erfüllt werden.

Die Möglichkeiten können grob wie folgt zusammengefasst werden, um eine anschauliche Heranführung an einen geeigneten alternativen Antrieb für Neigetechnikfahrzeuge zu ermöglichen:

- **Oberleitung zum Fahren und Laden** + Traktionsbatterie
- **Wasserstoff mit Brennstoffzelle** + Dynamikbatterie
- **Hubkolbenmotoren** mit Wasserstoff, alternativen Kraftstoffen (Stichwort Power-to-X)

Der Einsatz von Hubkolbenmotoren hat den Vorteil, dass lediglich eine Anpassung oder ein Austausch des Motors und Getriebes erforderlich ist. Hieraus ergibt sich eine schnelle Möglichkeit zur CO<sub>2</sub> Neutralisation. Als nachteilig zu bewerten sind die weiterhin entstehenden Schadstoffe durch den Verbrennungsprozess (im speziellen Stickoxide, ggf. Partikel sowie unverbrannte Kohlenwasserstoffe) sowie bestehende Lärmemissionen. Es verbleiben somit Oberleitungs-/Batterie- sowie Wasserstoff-/Batterie-Hybride als diskutierbare Varianten.

Da sowohl Oberleitungs-/Batterie-Hybride als auch Wasserstoff-/Batterie-Hybride technologisch begründete Einschränkungen hinsichtlich ihrer Einsetzbarkeit bieten (Reichweite, Leistung), ist die Wahl eines passenden Antriebs nicht von vornherein klar zu treffen. Vielmehr spielen Faktoren, die nicht nur den Energiebedarf, sondern auch den Leistungsbedarf sowie dessen zeitlichen Verlauf betreffen, eine Rolle. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit einer Vorabschätzung.

#### 2.9.4 Leistungs- und Energiebedarf

Die bisherige Methodik bei der Feststellung der Eignung eines Schienenfahrzeugs für eine Transportaufgabe bestand darin, aus kritischen Punkten des Fahrtverlaufs eine maximale Leistung abzuleiten und diese als grundlegende Voraussetzung zu betrachten. Der Energiebedarf spielte, abseits hoher Reichweiten von Dieselfahrzeugen, nur eine wirtschaftliche Rolle. Durch den Einsatz alternativer Antriebe ändert sich dieses Vorgehen grundlegend. Während Oberleitungs-/Batterie-Hybride zwar eine höhere Leistungsfähigkeit besitzen, ist ihre Reichweite jedoch begrenzt. Wasserstoff-/Batterie-Hybride hingegen haben eine höhere Reichweite, sind allerdings in ihrer Leistungsfähigkeit auch zeitabhängig. Dies resultiert aus der Charakteristik der Dynamikbatterie.

Aus diesem Grund ist die Auswahl einer geeigneten alternativen Antriebstechnologie nicht trivial. Erschwerend kommt hinzu, dass die durch Neigetechnik erst ermöglichten höheren Geschwindigkeiten gleichwohl einen höheren Leistungs- und Energiebedarf erwirken. Dies ist in Abb. 2-33 klar erkennbar. Aus den dargestellten Linien, die den Leistungsbedarf in unterschiedlichen Steigungen zeigen, lässt sich ebenfalls ableiten, dass dieser Parameter einen signifikanten Einfluss besitzt. Da sich während einer Zugfahrt im Regionalverkehr Fahrzustände, determiniert durch Geschwindigkeit und Zugkraft, regelmäßig ändern, ist die Energieversorgung im Fahrzeug für die kritischsten auszulegen. Damit können gleichermaßen anspruchsvolle Topologien oder hohe Geschwindigkeiten gemeint sein. Bei der Bemessung der Leistungsfähigkeit eines Fahrzeugs beeinflussen diese Parameter entweder die Ausgangsleistung der Traktionsbatterie (Oberleitungs-/Batterie-Hybrid) oder die Summe der Leistungen von Pufferbatterie und Brennstoffzelle (Wasserstoff-/Batterie-Hybrid). Wird die Zeit als Betrachtungsparameter hinzugezogen, so ergibt sich ein mindestens erforderlicher Energieinhalt. Dies ist besonders für den Wasserstoff-/Batterie-Hybrid relevant.

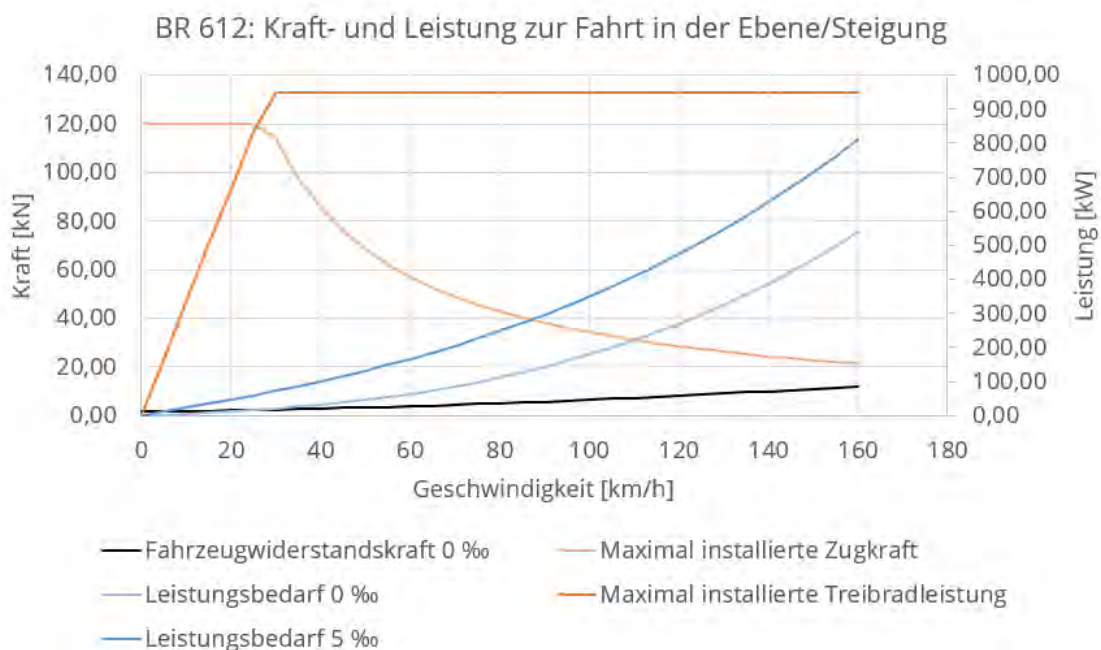


Abb. 2-33 Kräfte und Leistungen in der Ebene sowie einer 5 Promille Steigung

Aus dem Leistungsbedarf zur Überwindung der Fahrzeug- und Streckenwiderstandskräfte ergibt sich über der Fahrzeit ein Energiebedarf. Dieser ist maßgeblich für die Energiespeicher Traktionsbatterie oder Tank im Fahrzeug relevant. Abb. 2-34 stellt analog zur vorherigen Abbildung den über der Geschwindigkeit steigenden

Energiebedarf dar. Dabei ist zu berücksichtigen, dass dieser nur für die Konstantfahrt gilt. Beschleunigungs- oder Verzögerungsvorgänge sind zuzüglich zu berechnen.

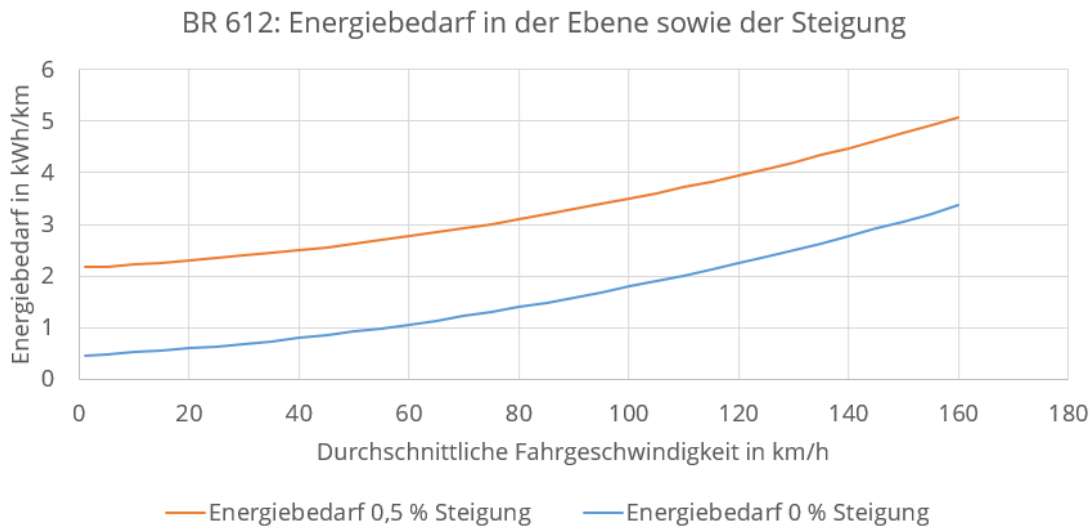


Abb. 2-34: Energiebedarf in kWh/100 km in der Ebene sowie der Steigung

## 2.9.5 Abschätzung der Machbarkeit anhand der BR 612

Im vorherigen Absatz wurden Leistungs- und Energiebedarf für ein Fahrzeug der BR 612 dargestellt. Im Folgenden soll nun eine grobe Abschätzung zur konstruktiven Machbarkeit eines wasserstoff- oder batteriebetriebenen Neigetechnikfahrzeugs durchgeführt werden. Dabei werden die folgenden Parameter betrachtet:

- **Verfügbares Einbauvolumen** auf Basis der BR 612
- **Leistungs- und Energiebedarf** auf Basis eines typischen Einsatzprofils

Spezielle mechanische und technologiespezifische Parameter, die die Machbarkeit nicht wesentlich verändern, werden nicht betrachtet. Die Volumina der erforderlichen Komponenten werden mithilfe von Erfahrungswerten der Professur für Elektrische Bahnen abgeschätzt.

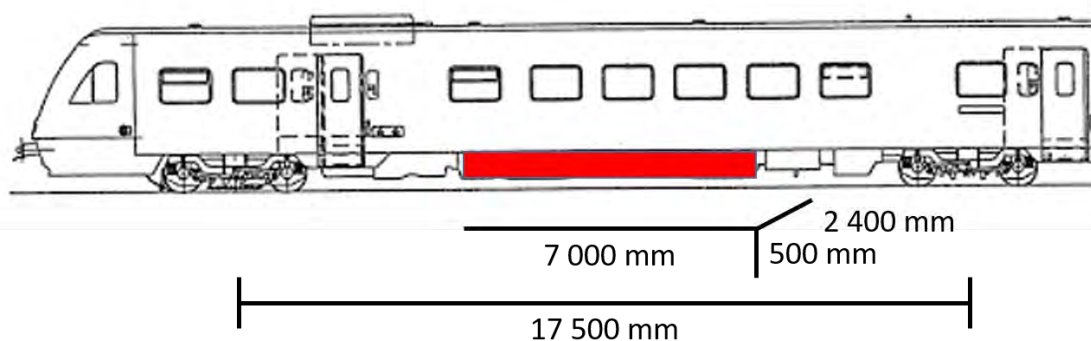


Abb. 2-35: Abschätzung der Antriebsbezogenen Volumina im Fahrzeug<sup>70</sup>

Abb. 2-35 zeigt die grobe Abschätzung des verfügbaren Raums im Unterflurbereich des Fahrzeugs. Die Annahme beruht auf einem Austausch aller dieselbezogenen Antriebskomponenten wie Dieselmotor, Kraftstofftank, Kühlung und Generator. Der Raumbedarf der elektrischer Fahrmotoren wurde hierbei mit dem freiwerdenden Raum durch Wegfall des Strömungsgetriebes angenommen. Aus der Abschätzung ergibt sich somit ein verfügbarer Raum pro Wagenkasten von

**7.000 mm Länge; 500 mm Höhe; 2.400 mm Breite**

entspricht

**8400 Liter**

Dieser Raum wird im weiteren nur für die Unterbringung der Komponenten eines alternativen Antriebs mit Wasserstoff oder Traktionsbatterien verwendet. Für die Wahl eines alternativen Kraftstoffs (PtX) wird angenommen, dass der hierfür erforderliche Verbrennungsmotor hinsichtlich Raum- und Hilfsbetriebebedarf dem Dieselmotor hinreichend ähnlich ist, sodass dafür eine Abschätzung nicht notwendig ist. Hier müssten allerdings Partikelfilter nachgerüstet werden. Für wasserstoff- oder batteriebetriebene Fahrzeuge muss ein Energiebedarf von ca. 5 kWh/km am Rad bereitgestellt werden. Dieser enthält sowohl Energie für Beschleunigung als auch entsprechend rekuperierte Bremsenergie.

- **Batterieelektrisches Fahrzeug**

- **Traktionsbatterie:** Die Dimensionierung der Traktionsbatterie sollte typische Umläufe von Neigetechnikzügen berücksichtigen. Diese sind durch längere Linien charakterisiert. Aus diesem Grund sollte der nutzbare Energieinhalt mindestens 200 km Reichweite ermöglichen. Hieraus resultiert eine erforderliche nutzbare Kapazität von 1000 kWh. Für die Hilfsbetriebe

<sup>70</sup> S.18, Einsatzmerkblatt für Eisenbahnfahrzeuge, 2000, DB AG

mit einer durchschnittlichen Leistung von 150 kW muss ebenfalls eine entsprechende Energie mitgeführt werden. Diese beträgt 600 kWh unter der Maßgabe eines Betriebs von 4 Stunden bei voller Hilfsbetriebeleistung. Zusätzlich einer Reserve zur Verlängerung der Batterielebensdauer entspräche dies ca. 1900 kWh. Zusammen mit einer gängigen Annahme von 120 Wh/Liter ergäbe dies einen Raumbedarf von 15.000 Litern. Dies wäre unter Ausnutzung des gesamten verfügbaren Volumens umsetzbar. Nicht eingerechnet ist hierbei jedoch die Ausrüstung mit einem Fahrzeugtransformator, Motorstromrichter und weiteren Komponenten der elektrischen Fahrzeug-ausrüstung. Zudem sei angemerkt, dass mit einer Reichweite von 200 km ein Laden an jedem Endpunkt erforderlich wäre, da Linienläufe von Fahrzeugen mit Neigetechnik üblicherweise länger sind. Dies würde nach aktuellem Stand der Technik selbst bei hohen Ladeleistungen weit über eine Stunde pro Nachladung dauern. Dies ist rein physikalisch der hohen Energiemenge geschuldet und kann betrieblich große Einschränkungen mit sich bringen. Ggf. kann ein Laden während der Fahrt unter Oberleitung diesen Zeitbedarf jedoch reduzieren.

Besonders kritisch ist zudem, dass die Radsatzfahrmasse von Neigetechnikfahrzeugen auf maximal 16 t/Radsatz nach den Regularien der DB Netz beschränkt ist. Die hohe Masse der Traktionsbatterien und des Trafos führt zu einer Überschreitung dieses Kriteriums. Bereits nahezu alle heute verfügbaren BEMU überschreiten dieses Kriterium und benötigen die Streckenklasse C2 (18 t/Radsatz).

- **Wasserstoff-/Batterie-Hybrid**

- **Brennstoffzelle:** Die Brennstoffzelle muss in Ihrer Leistungsfähigkeit so bemessen sein, dass sie die Traktions- und Hilfsenergie in voller Höhe bereitstellen kann. Darüber hinaus soll sich im Rahmen eines Umlaufs nur ein marginaler Saldo innerhalb der Dynamikbatterie ergeben. Für diesen Anwendungsfall wird die gemittelte Traktionsleistung wie folgt abgeschätzt. Die Relation Hof Hbf. – Nürnberg Hbf. (via. Marktredwitz) wird aktuell von Fahrzeugen der BR 612 befahren. Für die 166 km lange Strecke werden laut Fahrplan in 99 Minuten benötigt. Bei einem Energiebedarf von 5 kWh/km am Rad ergibt sich ein Energiebedarf von 830 kWh und über der Fahrzeit eine durchschnittliche Leistung von 500 kW. Zusätzlich Hilfsbetriebe und einer Reserve werden im Weiteren 700 kW angenommen. Hieraus ergibt sich, gepaart mit einer pessimistischen Annahme für das Brennstoffzellenvolumen, ein Bedarf von 2000 Litern zuzüglich erforderlicher Umrichter.

- **Dynamikbatterie:** Die Dynamikbatterie dient der Energieversorgung auf Abschnitten mit gesteigertem Leistungsbedarf. Der erforderliche Energieinhalt bemisst sich an der zeitlichen Länge des Leistungsbedarfs und die erforderliche Entladeleistung an dessen betragsmäßiger Höhe. Im Rahmen dieser Abschätzung wird folgende Maßgabe als erforderlich betrachtet: Bereitstellung der maximalen Dieselmotorleistung des Referenzfahrzeugs (1126 kW) der BR 612 für einen Zeitbereich von 20 Minuten. Die Pufferbatterie muss in diesem Fall den Differenzbetrag zur Brennstoffzelle bereitstellen. Inklusiv Umrichterverluste ergibt sich eine Leistung von ca. 500 kW in Kombination mit 700 kW Brennstoffzellenleistung. Die im Zeitraum bereitgestellte Energiemenge beträgt damit 150 kWh. Da bei Anwendung der Ladungserhaltungsstrategie nicht von einem vollständig geladenen Energiespeicher ausgegangen werden kann muss die nutzbare Speicherkapazität größer bemessen werden. Wird die Maßgabe angenommen, den Energiespeicher bei 60 % Ladezustand zu halten, so darf nach Entnahme der 150 kWh kein kritischer Ladezustand unterhalb 20 % eintreten. Aus dieser Maßgabe leitet sich eine erforderliche Batteriekapazität von 375 kWh ab. Von dieser soll 60 % nutzbar sein, also 225 kWh. Mit der zuvor ebenfalls verwendeten Annahme von 120 Wh/Liter ergibt sich ein Volumen von 1900 Litern. Dies würde knapp ein Viertel des in einem Wagenkasten verfügbaren Volumens einnehmen.
- **Tanksystem:** Die Größe des Tanksystems bemisst sich nach der Menge des erforderlichen Wasserstoffs zur Erfüllung einer Reichweite. Das Dieselfahrzeug besitzt mit einem Tankinhalt von 2x650 Litern ca. 1100 km Reichweite. Für ein vergleichbares Wasserstofffahrzeug sollte daher mindestens die Hälfte, also 600 km angesetzt werden. Dies ergibt, gemeinsam mit der Hilfsbetriebeenergie, einen Energiebedarf von ca. 4500 kWh. Dies entspricht einer Wasserstoffmenge von 270 kg. Bei Verwendung eines 700 bar Tanksystems wäre hierfür ein rechteckiges Volumen von 10.500 Litern erforderlich. Dies würde, zuzüglich Halterungen, ca. drei Viertel des abgeschätzten verfügbaren Volumens beider Wagenkästen (je 8400 Liter) einnehmen.
- **Summierter Raumbedarf:** Auf Basis der Abschätzungen ergibt sich ein Raumbedarf von 14.400 Litern. Vorbehaltlich eines abschätzbaren Raumbedarfs zur Integration der Komponenten kann damit ausgesagt werden, dass ein Neigetechnikfahrzeug mit Wasserstoffantrieb grundsätzlich technisch machbar ist. Ob die entsprechende Masse unter Einhaltung der Radsatzlasten einbaubar ist, wurde nicht untersucht.

## 2.9.6 Fazit zur Machbarkeitsabschätzung anhand der BR 612

Die Abschätzung zur prinzipiellen Machbarkeit von schnellen Neigetechnikfahrzeugen mit Batterie- oder Wasserstoffantrieb ergibt, dass eine technische Umsetzung von Oberleitungs-/ Batterie-Hybridfahrzeugen bzw. Wasserstoff-/ Batterie-Hybridfahrzeugen auf Basis der Dimensionierung der bestehenden BR 612 aktuell noch nicht realistisch erscheint und zudem betrieblich nicht sinnvoll ist.

Eine Machbarkeit für Fahrzeuge mit größerer Dimensionierung wird allerdings nicht ausgeschlossen. Es ist denkbar, einen Fahrzeugtyp zu wählen, der durch zusätzliche Achsen die zulässigen Radsatzlasten einhält und neue Möglichkeiten zur Unterbringung der schweren alternativen Fahrzeugenergieversorgung eröffnet. Ebenso würde dies weitere Nutzungskonzepte (bspw. partielle Niederflurigkeit) erschließen, wenn auch durch die resultierende höhere Fahrzeuglänge erhebliche Einschränkungen entstehen könnten. Hier sind sowohl betriebliche (bspw. Kuppel- und Flügelkonzepte) als auch infrastrukturelle (verfügbare Bahnsteiglängen) Aspekte zu nennen, die eine individuellen Prüfung erforderlich machen.

Beim Oberleitungs-/ Batterie-Hybridfahrzeug geht die äußerst große Traktionsbatterie und die Oberleitungsausstattung bei der Umsetzung mit einer zu erwartenden deutlichen steigenden Fahrzeugmasse einher, die aufgrund der Anforderungen hinsichtlich der maximalen Radsatzlasten von 16 t für Neigetechnikfahrzeuge auch mit zusätzlichen Radsätzen aktuell unrealistisch erscheint.

Gleiches gilt für Wasserstoff-/ Batterie-Hybridfahrzeuge. Ein erheblicher Masse-Vorteil dieser Fahrzeuge gegenüber dem Oberleitungs-/ Batterie-Hybrid läge in der nicht notwendigen Oberleitungsausstattung. Diese nimmt mit dem schweren Transformator einen nennenswerten Anteil an der Fahrzeugmasse ein. Dennoch sind auch die wasserstoffbezogenen Komponenten schwierig unterzubringen. Es ist außerdem zu erwarten, dass die Energiebezugskosten durch die kostenintensive Bereitstellung der gesamten Fahrzeugenergie aus Wasserstoff ggü. dem Oberleitungs-/ Batterie-Hybridfahrzeug höher ausfallen. Größte Herausforderung ist die Installation ausreichend hoher Wasserstoffspeicherkapazitäten im Fahrzeug, die bei aktuellen Wasserstofffahrzeugen auf der deutlich größeren Dachfläche (im Vergleich zum Unterflurbereich) angeordnet werden können. Dies ist durch die Einschränkung des Lichtraumprofils bei Neigetechnikfahrzeugen sowie der kinematisch sehr unvorteilhaften Positionierung der Masse weit oberhalb des Schwerpunkts nicht umsetzbar. Hieraus resultiert grundsätzlich, dass die Anordnung masseintensiver Komponenten nur unterflurig sinnvoll erscheint. Als kritisch sind zudem die hohen Austauschkosten der Hochtechnologiekomponenten wie Brennstoffzelle und Dynamikbatterie nach Ablauf der Lebensdauer anzusehen.



Beheben ließen sich diese Herausforderungen ggf. durch die längere Gestaltung der Fahrzeuge, deren zusätzliche Masse unterproportional (vor allem bei hohen Geschwindigkeiten) in den Energiebedarf eingeht. Somit ließe sich Bauraum für weitere Fahrzeugkomponenten gewinnen. Dem steht jedoch der Wunsch nach flexibler Sitzplatzkapazitätsgestaltung entgegen. Grundsätzlich sollten dabei aber auch technische und betriebliche Randbedingungen des Zielnetzes geprüft werden, um eine Aussage über die Einsetzbarkeit längerer betrieblich nicht trennbarer Fahrzeugeinheiten treffen zu können (Flügel-/Kuppeln, Bahnsteiglängen, Abstellung).

Als alternative Option besteht die Nutzung alternativer Kraftstoffe (PtX). Bei dieser Variante wäre eine Umstellung unter Beibehaltung der Fahrzeugdimensionen der BR 612 möglich. Auch wenn dies technologisch betrachtet die einfachste Möglichkeit zur Herstellung der CO<sub>2</sub>-Neutralität darstellt erfolgt hierbei kein echter Technologiewandel. Durch die Nutzung des Verbrennungsmotors entstehen weiterhin unvermeidlich Luftschadstoffe sowie Lärmemissionen. Darüber hinaus ist die Versorgung mit alternativen Kraftstoffen zurzeit sowohl logistisch schwierig als auch deutlich unwirtschaftlicher. Außerdem stehen dem Einsatz die fortschreitende Weiterentwicklung der mittlerweile marktreifen Batterie- sowie Wasserstofftechnologien hindernd entgegen. Beispielsweise könnten sich durch angestrebte weitere Druckerhöhungen oder verflüssigte Speicherung von Wasserstoff die Bauraumgrößen reduzieren lassen. Bis Innovationen aus dem Versuchsstadium allerdings auf Schienenfahrzeugen installiert werden vergehen nach Erfahrungen anderer Technologietransfers aus der maßgeblich technologietreibenden Automobilindustrie jeweils ca. 10 bis 15 Jahre bis zur Inbetriebnahme von Prototypfahrzeugen.

## 3 Infrastruktur Oberleitungs-/ Batterie-Hybrid

### 3.1 Ladeinfrastruktur zum Einsatz von Oberleitungs-/ Batterie-Hybridfahrzeugen

Oberleitungs-/ Batterie-Hybridfahrzeuge benötigen zum Nachladen der Fahrzeugenergiespeicher Nachladeinfrastruktur. Die Energie kann hierbei über diverse Möglichkeiten dem Fahrzeug zugeführt werden. Diejenige Variante, die mit einem aktuell teilweise elektrifizierten Netz die größte Kompatibilität aufweist und bei einer Erweiterung desselben ebenfalls die größte Migrationsfähigkeit besitzt, ist die Ladung über einen Oberleitungs-Stromabnehmer-Kontakt mit 1AC 15 kV, wie er bei klassischen Elektrofahrzeugen vorhanden ist. Diese kann in Form von

Oberleitungsabschnitten für die Ladung in Fahrt oder Ladestationen für Standladung ausgeführt werden. Bereits vorhandene Oberleitungen werden hierzu zunächst ohne Ausbau als gegeben angenommen. Zur Standortbestimmung für Ladestationen sind folgende Rahmenbedingungen zu empfehlen:

- Die einzusetzenden Oberleitungs-/ Batterie-Hybridfahrzeuge haben eine regelmäßige Reichweite im Batteriebetrieb von 50 bis 60 km (Herstellerkommunikation teilweise auch 70 – 80 km bei großen Speichern), die auch bei gealterten Batterien (entspricht ca. 80 % des Nennenergieinhalts) garantiert werden kann.
- Jede Linie im Netz soll mit dem gleichen Fahrzeugtyp und gleicher Speichergröße befahrbar sein → nur eine Technologie sichert Wirtschaftlichkeit
- Jede Linie soll mit Oberleitungs-/ Batterie-Hybridfahrzeugen befahren werden können. Dies impliziert, dass jede Linie mindestens eine Ladestation erhalten müsste, wenn kein Linienabschnitt im elektrifizierten Netz liegt.
- Linienendpunkte, die mehr als 27,5 km (ergibt 55 km hin und zurück) vom Ausgangsbahnhof entfernt sind, sollten zur Abwicklung eines stabilen Betriebs mit einer Nachlademöglichkeit ausgerüstet werden. Zum stabilen Betrieb zählen auch Faktoren wie mögliche Bauzustände, planmäßige- und außerplanmäßige Streckensperrungen mit eingekürztem Betrieb, Verstärkerleistungen, die ggf. nur einen der Endpunkte der Linie erreichen etc.
- Die Standorte werden so gewählt, dass sie keine zusätzlichen langen Aufenthaltszeiten an Zwischenstationen der Linien nötig machen und so planmäßige Haltezeiten nicht erheblich verlängert werden müssen.
- Die Eingriffe in Landschaft und Lebensräume sollen so gering wie möglich sein (Landschaftsschutz). Diese bedeutet auch: möglichst wenig Eingriffe.

Soll im Stillstand geladen werden, muss beachtet werden, dass im Allgemeinen nur ein Strom von 80 A pro Stromabnehmer übertragen werden kann. Wird dieser überschritten, wird die Schnittstelle Stromabnehmer-Fahrleitung zu heiß. Daraus ergibt sich eine Ladeleistung von ca. 1 bis 1,2 MW. Aktuell laufen an der Professur für Elektrische Bahnen Untersuchungen, wie dieser Strom bei Stillstandsladung erhöht werden kann. Begrenzende Größe kann dann jedoch die Ladeleistung der Energiespeicher werden. Dies ist im Detail für jede Linie und jedes Fahrzeug zu prüfen.

### 3.2 Allgemeine Anforderungen für die Elektrifizierung

Bei allen Elektrifizierungsvorhaben, unabhängig ob als Nachladestation oder als Vollelektrifizierung ausgeführt, sind zunächst maßgebliche technische Randbedingungen zu prüfen. Diese basieren auf normativen Anforderungen des elektrischen

Bahnbetriebs sowie Randbedingungen der Leit- und Sicherungstechnik. Grundsätzlich gilt, dass bei jeder Elektrifizierung mit Wechselstrom die Gleisanlage kurzschlussfest zu erden ist um das Auftreten von gefährlichen Berührspannungen zu verhindern.

### 3.2.1 Anforderungen der Sicherungstechnik

Vor Errichtung von Fahrleitungs- und Ladeinfrastruktur muss sichergestellt werden, dass eine Elektrifizierung und die daraus resultierenden Traktionsströme bzw. Rückströme keine Beeinflussung sicherungstechnischer Systeme bewirken. Grund dafür ist, dass auf nichtelektrifizierten Strecken Technik im Einsatz sein kann, die zwar der üblichen Leit- und Sicherungstechnik entspricht, nicht jedoch gegen Störströme, induktive und kapazitive Kopplungen mit bestimmten Frequenzen geschützt ist. Dies ist in im Rahmen der Planung detailliert zu prüfen.

Es sollte zudem insbesondere sichergestellt sein, dass keine 50-Hz-Gleisstromkreise zur Freimeldung von Streckenabschnitten installiert sind, die bei Elektrifizierung häufig umfangreiche Umrüstungen auf Gleisfreimeldung durch Achszähler erfordern. Strecken mit moderner oder modernisierter Signaltechnik sind häufig so ausgelegt, dass eine Umrüstung einfach möglich ist. Bestands-Altanlagen mit mechanischen oder elektromechanischen Stellwerken sowie bestimmte Relais-Stellwerkstypen unterliegen aufgrund von Bestandsschutzregularien oder nicht mehr verfügbaren Ersatzteilen einem Umrüstungsverbot durch den Netzbetreiber. Dies ist bei der Planung zu berücksichtigen.

### 3.2.2 Anforderungen des Personenschutzes im Fall eines Kurzschlusses oder Fahrleitungsrisses

Der Betrieb einer Oberleitung mit 15 kV 16,7 Hz (auch 50 Hz) hat im Kurzschlussfall (zum Beispiel bei Fahrzeugfehlern oder Fahrdratrisen) hohe Ströme in der Rückleitung (Schienen) zur Folge. Die Rückleitung muss diese mit geringer Impedanz (komplexer Widerstand) zum Unterwerk zurückführen. Die niedrige Impedanz ist notwendig, um den auftretenden Spannungsfall vom Eintrittsort des Stromes bis zum Unterwerk über den Schienen so gering wie möglich zu halten. Zudem ist zur Vermeidung unzulässig hoher Potentialdifferenzen zwischen Gleis und Erde eine dauerhafte, kurzschlussfeste Erdung des Gleises (vorrangig über Mastfundamente) erforderlich. Trotzdem können beim Eintritt eines Kurzschlusses in der direkten Umgebung hohe Potentialdifferenzen in der Erde auftreten. Diese setzen sich in Form eines sogenannten Potentialtrichters (sehr steiles Absinken der Spannung

mit größer werdenden Abstand kreisförmig zum Kurzschluss) fort. Dieser Potentialtrichter muss möglichst flach abfallen, sodass eine Person, die einen Schritt tätigt, keinen großen Potenzialdifferenzen (d. h. einer hohe Spannung → sogenannte Schrittspannung) ausgesetzt ist. Dies ist normativ durch die Begrenzung der Berührungsspannungen <sup>71</sup> detailliert geregelt. Um den Potentialtrichter möglichst weit auszubreiten und so die Schrittspannungen klein zu halten, müssen alle metallischen Anlagen ((Licht-)Masten, Geländer (dort auch parallel zum Gleis zu verbinden), Bänke, Bahnsteigmöblierung etc.) im Oberleitungsbereich kurzschlussfest mit der Rückleitung verbunden werden. Dies gilt auch für naheliegende Bauwerke wie Brücken (Stahlbewehrung) oder Tunnel. Die Maßnahmen dort sind im Einzelfall zu prüfen. Hierzu gehören außerdem beispielsweise Erdungsmaßnahmen im Bahnhofsbereich oder die Überprüfung von entsprechenden Schutzabständen zwischen spannungsführenden Bauteilen und geerdeten Anlagen.

Die Verbindung der gesamten Bahnsteigmöblierung mit der Rückleitung stellt ein gängiges Verfahren bei Elektrifizierungen dar. Die Nachrüstung (vgl. Abb. 3-1, Abb. 3-2, Abb. 3-3) ist einfach möglich, jedoch im Rahmen einer Kostenschätzungen zu berücksichtigen.



Abb. 3-1 nicht mit der Rückleitung verbundener Beleuchtungsmast, Anschlüsse Schraubverbindungen zur Nachrüstung erkennbar (Foto: Wittemann)

Die leitfähige Verbindung mit der Rückleitung dient außerdem im Fall des Risses einer Oberleitung dazu, dass diese immer sicher auf einen metallischen Gegenstand fällt, der einen gut leitfähigen Kurzschluss bildet. Die gute Leitfähigkeit führt dazu, dass hohe Kurzschlussströme fließen, die man zuverlässig messen und anschließend in kürzester Zeit abschalten kann.

---

<sup>71</sup> Kießling, Puschmann und Schmieder, Fahrleitungen elektrischer Bahnen, Siemens, 2014.



Abb. 3-2 Nicht mit der Rückleitung verbundene Bahnsteigmöblierung (Foto: Wittemann)



Abb. 3-3 Geländer ohne Längsverbindung, jedoch mit hierfür vorgesehenen Laschen (Foto: Wittemann)

### 3.2.3 Anforderungen an Lichtraumprofil und Streckenklasse

Zur Freihaltung des erforderlichen lichten Raumes des Stromabnehmers sowie Einhaltung entsprechender Schutzabstände sind bei jeder Strecke ggf. Anpassungen an den Bahnsteigdächern der mit Fahrleitung auszustattenden Bahnsteiggleise notwendig. Ein entsprechend anzupassendes Dach ist in Abb. 3-4 dargestellt.



Abb. 3-4 Bahnsteigdach im Lichtraumprofil des Stromabnehmers (Foto: Wittemann)



Bei anspruchsvollen Streckenverläufen in Bergtälern mit hohen Längsneigungen gestaltet sich eine Voll- oder Teilelektrifizierung zudem aufgrund geografischer Randbedingungen und Zwangspunkten (enge und viel Bögen, viele Einschnitte oder Tunnel) als herausfordernd. Für eine Elektrifizierung ist deshalb zu prüfen, ob **Brücken/ Straßenüberführungen** die Installation einer Oberleitungsanlage baulich zulassen bzw. ausreichend lichte Höhe besitzen. Dabei kann zunächst anhand von groben graphischen Auswertungen (siehe Abb. 3-5, Bezugspunkt ist die festgelegte Spurweite von 1435 mm) festgestellt werden, ob die Straßenüberführungen/ Brücken noch detaillierter zu prüfen sind oder ob diese ausreichend lichte Höhe bieten. In Abb. 3-5 eingezeichnet ist die minimal zulässige Stromabnehmerdurchgangshöhe (oben) im Bezug zur Schienenoberkante (unten). Es ist zu erkennen, dass der notwendige Isolationsabstand zum Bauwerk vermutlich nicht eingehalten wird. Zudem ist der Bauraum für die Fahrleitungsanlage einzuplanen, der hier nicht vorhanden ist.



Abb. 3-5 beispielhaftes Brückenbauwerk (Foto & Grafik: Wittemann)

Für eine nachträgliche Herstellung des Bauraums und des Isolationsabstands muss zudem beachtet werden, dass ein einfaches „tiefer stopfen“ des Gleisrostes aufgrund anderer baulicher Gegebenheiten nicht immer möglich ist. Hinzu kommt, dass das Bauwerk ggf. für eine Gewährung der Erdung angepasst werden muss.

Die gleiche Prüfung ist für **Tunnel** entlang der Strecken durchzuführen. An diesen wären im Falle einer Elektrifizierung ebenso Umbaumaßnahmen erforderlich. Ein solches Beispiel ist in Abb. 3-6 ersichtlich. Aus historischen Gründen ist in dem Tunnel das Gleis links der Tunnelachse verlegt. Hierdurch ergibt sich der Umstand, dass im Falle einer Elektrifizierung der Arbeitsbereich des Stromabnehmers nicht frei ist. In Abb. 3-6 ist dies daran erkennbar, dass die grüne Linie (Ist-Zustand) die Tunnelwand schneidet. Die Richtlinie Ril 810.0242 der DB Netz AG sieht eine übliche Arbeitshöhe des Stromabnehmers von 5,50 m vor, bis zu 4,95 m über Schienenoberkante (SOK) sind jedoch technisch unter allen Bedingungen möglich. Erst nach einer Korrektur (blaue Linie in Höhe von 5,00 m über SOK) ist der Arbeitsbereich für den Stromabnehmerdurchgang frei. Dort könnte nach dieser Abschätzung eine Deckenstromschiene die Installation einer Fahrleitungsanlage ermöglichen.

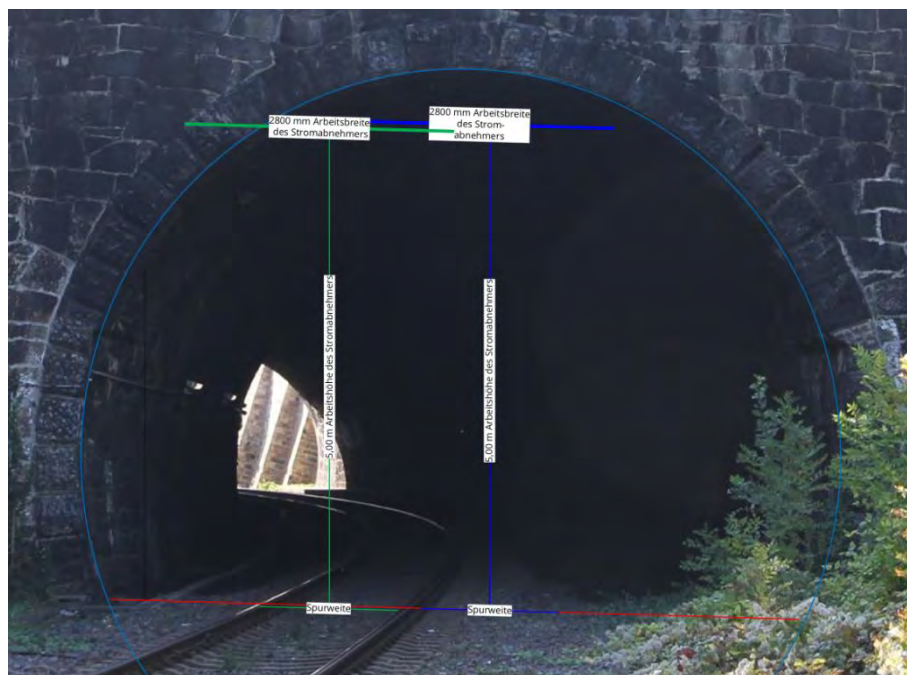


Abb. 3-6 Profilprüfung eines Tunnels mit Maßabschätzung zur Gleisverschiebung (Foto & Grafik: Wittemann)

Im Falle einer Elektrifizierung sind auch Eisenbahnbrücken mit Oberleitung auszustatten. Bei Brücken, deren Länge unterhalb einer typischen Feldlänge (im geraden Gleis ca. 65 m) eines Kettenwerks liegen, kann angenommen werden, dass diese ohne Sonderlösung elektrifizierbar sind. Für Brücken, die dieses Kriterium nicht erfüllen, ist eine Sonderlösung erforderlich.

Abb. 3-7 zeigt beispielhaft zwei Brücken, bei denen eine solche Maßnahme erforderlich wäre. In der oberen Abbildung ist eine genietete Brücke dargestellt, die nach einer ersten Abschätzung nur nach einer komplexen Prüfung die Anbringung eines Mastes erlaubt, da für eine statische Bestimmung die alte Nietkonstruktion genau analysiert und im Statikmodell abgebildet werden müsste. Die in der unteren Abbildung gezeigte Betonbrücke lässt erwarten, dass diese zu schmal für die Anbringung eines Mastes auf der Brücke ist und nur eine Anbringung von außen am Brückenträger umsetzbar erscheinen lässt. In beiden Fällen wäre aufgrund der geringen Bauwerkshöhe der Brücken und dem baulichen Aufwand der Mastpositionierung auf dem Bauwerk eine Mastgründung im Erdboden neben dem Bauwerk realisierbar und voraussichtlich einfacher. Alternativ können Masten durch eine Verstärkung der Brückenkonstruktion von außen an die Brückenüberbauten angebracht werden. Dies führt jedoch dazu, dass ggf. ein Neubau wirtschaftlicher erscheint.



Abb. 3-7 Beispiele zu prüfender Brücken: genietete Stahlträgerbrücke (oben) bzw. alte Betonbrücke aus den 1930er Jahren (unten)

Häufig liegt die bestimmende Streckenklasse auf Nebenbahnen, die für alternative Antriebe besonders prädestiniert sind, nur bei B2 (zul. max. Radsatzlast 18,0 t) oder sogar nur bei A (zul. max. Radsatzlast 16,0 t). Für den Einsatz von Oberleitungs- oder Oberleitungs-/ Batterie-Hybridfahrzeugen ist diese dann jedoch fast immer auf die



Streckenklasse C2 zu erhöhen. Ggf. kann durch die Ausführung als besonders leichtes EMU- oder BEMU-Fahrzeug auch die Streckenklasse B2 eingehalten werden, dies führt jedoch bei BEMU-Fahrzeugen zu einer Einschränkung der Reichweite.

### 3.3 Speisung mit Bahnstrom aus zentralem Bahnstromnetz

Die deutsche zentrale Bahnstromversorgung (Übertragungsnetz mit 110 kV, 16,7 Hz; Fahrleitungsnetz mit 15 kV, 16,7 Hz) hat mit ca. 3.500 MW Erzeugerleistung ausreichend Leistungsreserve, um auch batterieelektrische Fahrzeuge im Stand und während der Fahrt unter Oberleitung aufladen zu können, außerdem kann die Energie mit 11 bis 13 ct/kWh<sup>72</sup> im gesamten Oberleitungsnetz erheblich günstiger bezogen werden als aus dem Landesnetz (17 – 20 ct/kWh<sup>73</sup>).

Unter der Voraussetzung, dass aktuell über 90 % der Transportleistung im deutschen Eisenbahnnetz bereits elektrisch erbracht werden, geht es energetisch um weniger als 10 % der gesamten derzeitigen Netzleistung. Dies bedeutet, das Oberleitungs-/ Batterie-Hybridfahrzeuge ohne Einschränkung an allen Netzpunkten des vorhandenen Oberleitungsnetzes über ihren Stromabnehmer geladen werden können. Heute schon in der Spannungshaltung und damit auch in der verfügbaren Leistung schwache Netzaußenäste (nach BEG-Angaben beispielsweise an der Außenfernbahn Pfronten-Steinach zu erwarten) sollten hierfür gesondert analysiert werden. Die Ladeleistungen liegen jedoch meist unterhalb üblicher Traktionsleistungen und werden deshalb in den überwiegenden Fällen keine Verstärkungsmaßnahmen, beispielsweise durch Blindleistungskompensation, notwendig machen.

Eine Versorgung mit Bahnstrom aus dem zentralen 110-kV-Bahnübertragungsnetz (betrieben mit 16,7 Hz) für Ladestationen und Oberleitungsinseln ist grundsätzlich denkbar, ist allerdings nur dann für einzelne Vorhaben wirtschaftlich darstellbar, wenn eine Versorgung ohne die Errichtung von zusätzlichen langen 110-kV-Übertragungsleitungen (Abb. 3-9) möglich ist. Diese Leitungen führen üblicherweise nahe an bestehenden elektrifizierten Bahnstrecken entlang/ vorbei, sodass sich der Fall der Versorgung aus einer 110-kV-Bahnstromtrasse sehr selten ergeben wird.

---

<sup>72</sup> DB Energie GmbH: Preistabelle DB Energie Bahnstrompreise Mittelspannung, Berlin, 2019.

<sup>73</sup> Eurostat/statista.com: Industriestrompreis in Deutschland in den Jahren 2000 bis 2018 (in Euro-Cent pro Kilowattstunde), 2019.

Vorteil dieser Variante wäre, dass die Versorgung des Ladeabschnitts durch ein Bahn-Unterwerk 110 kV, 16,7 Hz auf 15 kV, 16,7 Hz mittels einfachem Transformator erfolgen kann. Hierzu ist der Bau eines kostengünstigen Bahn-Unterwerks, wie in Abb. 3-8 dargestellt ausreichend.



Abb. 3-8 Beispielhafte Abbildung Bahn-Unterwerk der DB Energie (Foto: DB Netz)



Abb. 3-9 Mast einer 110-kV-Bahnstromleitung (Foto: Wittemann)

## 3.4 Speisung aus dem Landesnetz

### 3.4.1 Allgemeine Randbedingungen

Alternativ zur Speisung aus dem Bahnstromnetz können Umrichterwerke bzw. Umspannwerke gebaut werden, die Oberleitungsabschnitte oder Ladestationen mit Energie versorgen. Aktuelle Fachdiskussionen lassen erwarten, dass an diesen Oberleitungs(insel)abschnitten Energie ebenfalls zu Bahnstrompreisen bezogen werden kann. Für Ladestationen ausschließlich zur Ladung im Stand ist angesichts der dort umgesetzten verhältnismäßig geringen Energiemengen bei hohen Bezugsleistungen jedoch nach aktuellem Stand von anzusetzenden Energiepreisen des Landesnetzes auszugehen. Diese können nach Auskunft der Bundesnetzagentur als

sogenannte Serviceeinrichtungen (vergleichbar zu Tankstellen oder Zugvorheizanlagen) betrieben werden.

Die Ladeabschnitte bzw. Ladestationen werden am öffentlichen 50-Hz-Mittelspannungsnetz angeschlossen. Sollte die Anschlussleistung der Mittelspannungsebene nicht ausreichend sein, so muss ab dem nächstgelegenen Übergabepunkt aus der 110-kV-50-Hz-Hochspannungsebene eine leistungsfähigere Energieversorgung aufgebaut werden. Diese kann beispielsweise durch eine Verstärkung der ortsüblichen Mittelspannungsebene umgesetzt werden oder alternativ durch eine Anordnung des Umrichters in unmittelbarer Nähe des Übergabepunktes und anschließende Errichtung einer 15-kV-Bahnstrom-Leitung vom Umrichter zur Ladestation/ zum Ladeabschnitt. Auch eine direkte Anbindung an die 110-kV-Spannungsebene ist möglich.

### 3.4.2 Vollumrichterlösung mit 16,7 Hz

Für Ladestationen mit Bahnstromfrequenz von 16,7 Hz sind Vollumrichter notwendig. Diese richten aus der anliegenden 50-Hz-Landesenergieversorgung den Strom in 16,7-Hz-Bahnstrom um. Sie sind kleiner skalierte Varianten vorhandener Bahnstromumrichter, die in den letzten Jahren in vielen Ausführungen ältere sogenannte Umformerwerke mit rotierenden Maschinen abgelöst haben, um sowohl das zentrale Bahnstromnetz als auch einzelne dezentral gespeiste Oberleitungsabschnitte im Nordosten von Deutschland mit Bahnstrom zu versorgen. Sie können als erprobte Technik betrachtet werden.

Ist eine Elektrifizierungsperspektive vorhanden, können diese perspektivisch im Falle einer anschließenden Elektrifizierung mit Verbindung zum schon elektrifizierten Netz als sogenannte dezentrale (ggf. frequenzelastische) Umrichter weiterverwendet werden (wenn von vorn herein so konzipiert). Dadurch ist die Verbindung des durch den Umrichter versorgten Inselnetzes mit weiteren, aus der zentralen oder dezentralen Bahnenergieversorgung gespeisten Oberleitungsanlagen, möglich.

Die Vollumrichteranlagen sind die kostenintensivste Möglichkeit zur Ladestationsausführung und können nach Daten der Professur für Elektrische Bahnen bei 5 MW Leistung mit 4,5 bis 5,0 Mio. € angesetzt werden. Leistungen über 5 MW sind noch kostenintensiver. Vorteil dieser Anlagen ist jedoch, dass keine technische Ausstattung auf den Fahrzeugen verändert werden muss, da diese bereits als Fahrzeuge, die auch unter Oberleitung verkehren können, für eine Nachladung mit 15 kV, 16,7 Hz geeignet sind.

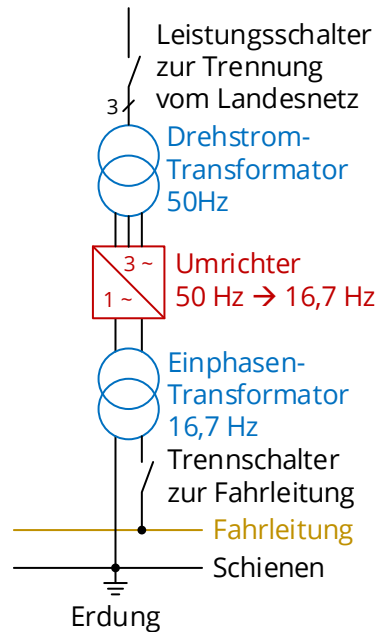


Abb. 3-10 Aufbau einer 15-kV-16,7-Hz-Ladestation mit Vollumrichter (Grafik: Wittemann)

Wie in Abb. 3-10 dargestellt, muss die gesamte Leistung, die dem Fahrzeug zugeführt wird, durch den Umrichter geführt werden. Daraus folgt, dass zwei Transformatoren (einer auf der 50-Hz-Seite, einer auf der 16,7-Hz-Seite) notwendig sind, da der Umrichter nicht mit den hohen Spannungen der Fahrleitung bzw. des Mittelspannungsnetzes umgehen kann. Zudem wird der Umrichter durch die hohe Leistungsdimensionierung sehr kostenintensiv.

### 3.4.3 Trafolösung mit 50 Hz

Die Frequenz von 50 Hz ist in der Normungswelt der Bahn keine unbekannte Größe. Viele umliegenden Länder (z.B. Frankreich, Dänemark, Teile von Tschechien, der internationale Hochgeschwindigkeitsverkehr) nutzen das nach der EN 50163 genormte System mit einer Spannung von 25 kV und einer Frequenz von 50 Hz. Es liegt deshalb nahe, die ohnehin im Landesnetz vorhandene Frequenz von 50 Hz auch zum Laden der Fahrzeuge zu nutzen.

Am Fahrzeugtransformator, der mit der Frequenz 50 Hz ebenfalls umgehen können soll, muss nahezu nichts verändert werden, da 16,7-Hz-Transformatoren hier abwärtskompatibel sind. Allerdings muss das Fahrzeug softwareseitig für die entsprechenden Rahmenbedingungen gerüstet sein.

Anders gestaltet sich dies bei einer Nennspannung von 25 kV, hier muss die Fahrzeugisolierung auch für die höhere Spannung ausgelegt werden. Dies ist jedoch beispielsweise beim Siemens CityJet Eco bereits vorgesehen<sup>74</sup> und kann verhältnismäßig kostengünstig gelöst werden. Trotzdem kann es bei großen Fahrzeugflotten aus Kostengründen sinnvoll sein, auf die zusätzliche Ausstattung für 25 kV zu verzichten und nur mit 15 kV das Fahrzeug zu laden. Zur Zulassung dieses Spannungssystems für die Stillstandsladung läuft nach Informationen der Professur für Elektrische Bahnen aktuell ein Normänderungsverfahren der Norm EN 50163, um die Kombination aus 15 kV und 50 Hz normativ für Stillstandsladung zuzulassen.

Beiden Spannungsebenen bei 50 Hz ist gemein, dass diese über eine einfache Transformatorschaltung aus dem Mittelspannungsnetz entnommen werden können. Allerdings verfügt die Eisenbahn systembedingt nur über 2 Pole (Hinleitung über die Oberleitung, Rückleitung durch die Schiene), das Landesnetz ist jedoch als Drehstromsystem (3 Pole) ausgeführt. Wird eine 2-polige Last an ein 3-poliges Drehstromsystem angeschlossen, so entsteht dort eine unsymmetrische Belastung. Dies wird von den Netzbetreibern nur stark begrenzt toleriert. Es muss deshalb im Einzelfall geprüft werden, ob die zu erwartende sogenannte Netzunsymmetrie auf der Landesnetzseite in den zulässigen Grenzen liegt. Dies ist abhängig von der sogenannten Netzkurzschlussleistung. Dieser Wert wird durch Netzbetreiber des Landesnetzes bereitgestellt. Ein bestimmter Prozentsatz dieser Leistung ist normativ für unsymmetrische Lasten zugelassen.

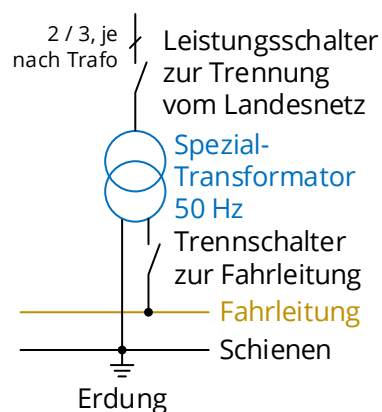


Abb. 3-11 Aufbau einer 15-kV-50-Hz-Ladestation mit Trafolösung (Grafik: Wittemann)

<sup>74</sup> <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:f48fa9d1-2abd-41ab-b2f9-f37cfd6d59e6/db-desiro-ml-oebb-cityjet-eco-d.pdf>, abgerufen am 17.11.2020.

Aufgebaut ist diese Lösung wie in Abb. 3-11 dargestellt. Größter Vorteil ist, dass nur ein spezieller Transformator, jedoch keinerlei Umrichtertechnik mit höherer Ausfallwahrscheinlichkeit und kürzen Lebensdauern sowie einem hohen Preis notwendig ist. Dies führt zu günstigen Anschaffungs- und Instandhaltungskosten. Die Firma Furrer&Frey aus der Schweiz entwickelt eine solche Lösung aktuell und befindet sich aktuell in der Erprobungsphase mit einer realen Anlage, jedoch noch ohne Fahrzeug. Die zu erwartenden Kosten werden durch die Professur für Elektrische Bahnen auf ca. 1,5 bis 2 Mio. Euro pro Anlage taxiert.

Ob die Anlage mit 15 oder 25 kV ausgeführt wird, spielt für die Ladestation kaum eine Rolle. Lediglich die Fahrzeuge müssen dann ggf. die höhere Spannung beherrschen.

#### 3.4.4 Symmetrierumrichterlösung mit 50 Hz

Reicht die am Netzanschlusspunkt vorhandene Netzkurzschlussleistung nicht aus, um die eingebrachte Unsymmetrie ins Landesnetz zu tolerieren, so muss diese ausgeglichen werden. Dies lässt sich durch einen sogenannten Symmetrierumrichter erreichen, der nur den unsymmetrischen Anteil der bezogenen Fahrzeugleistung auf alle drei Pole des Drehstromnetzes gleichmäßig verteilt. Dieser Umrichter kann erheblich leistungsschwächer sein als jener für die Lösung in Abschnitt 3.4.2. Dies führt zu reduzierten Kosten für diesen Teil der Anlage. Zudem wird zwar wieder ein spezieller Transformator benötigt, jedoch genügt ein Transformator, der mit einer dritteln Wicklung für den Symmetrierumrichter ausgestattet wird. Zudem wird die Verfügbarkeit erhöht, da bei Ausfall des Umrichters immer noch mit verminderter Leistung durch den Transformator geladen werden kann.

Der in Abb. 3-12 dargestellte Aufbau führt durch die Einsparung des zweiten Transformators sowie den leistungsschwächeren Umrichter zu einer Kostensenkung im Vergleich zur Vollumrichterlösung, ist jedoch kostenintensiver als die reine Trafolösung. Die zu erwartenden Kosten werden durch die Professur für Elektrische Bahnen auf ca. 2,0 bis 2,5 Mio. Euro pro Anlage taxiert.

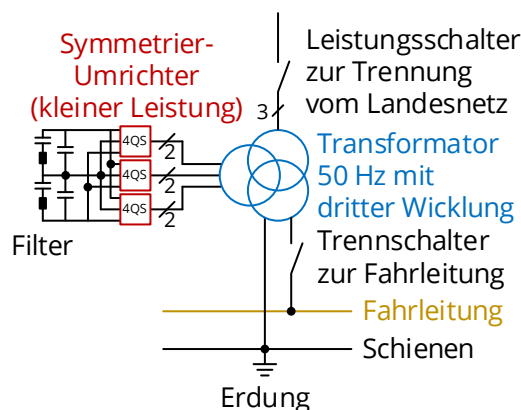


Abb. 3-12 Aufbau einer 15-kV-50-Hz-Ladestation mit Symmetrierumrichterlösung (Grafik: Wittemann)

Ob die Anlage mit 15 oder 25 kV ausgeführt wird, spielt für die Ladestation kaum eine Rolle. Lediglich die Fahrzeuge müssen dann ggf. die höhere Spannung beherrschen.

### 3.5 Teilelektrifizierung als Verlängerung oder Inseloberleitung

Neben den bisher vorgestellten Ladestationen kann für den Betrieb von BEMU-Fahrzeugen auch die Teilelektrifizierung sinnvoll sein. Insbesondere wenn mit begrenzten Verlängerungen bestehender Elektrifizierungen eine Befahrung mit BEMU-Fahrzeugen möglich wird, kann diese Lösung sehr wirtschaftlich sein. Hintergrund ist, dass die bestehende Energieversorgung im Allgemeinen dann auch zur Speisung kurzer zusätzlicher Fahrleitungsanlagen genutzt werden kann. Dies senkt sowohl die Errichtungs- als auch insbesondere die Lebenszykluskosten der Anlage, da diese für die Energieversorgungsanlage dann nicht anfallen. Diese Möglichkeit sollte bei Linien, die bereits elektrifizierte Abschnitte beinhalten, immer vorrangig geprüft werden.

Reicht eine einfache Verlängerung der Fahrleitung nicht aus oder ist diese nicht umsetzbar, so können auch Oberleitungsinselanlagen sinnvoll sein. Diese ermöglichen ein Laden während der Fahrt und verlängern so die Ladezeit. Insbesondere bei Zwischenladungen an Unterwegsstationen oder bei sehr kurzen Linienende-Wendezeiten kann sich diese Option anbieten. Es muss dann jedoch sichergestellt sein, dass die dafür notwendige Energieversorgungsinfrastruktur ausreichend Leistung auf für fahrende Fahrzeuge bereitstellen kann. Diese wird üblicherweise wie die Ladestation, beschrieben im Abschnitt 3.4.2, ausgeführt, jedoch mit höherer Leistung.

## 4 Infrastruktur für Wasserstoffbereitstellung

### 4.1 Wasserstoffversorgung

Brennstoffzellenfahrzeuge bieten die Möglichkeit, lokal vollständig emissionsfrei zu verkehren. Ihr Vorteil liegt dabei vor allem in den hohen Reichweiten ohne Notwendigkeit des Nachtankens oder der Nachladung nach jeder Fahrt. Größte Herausforderung ist aktuell die ausreichende und stabile Versorgung mit Wasserstoff. Es gibt dabei verschiedene Verfahren zur Herstellung, die entweder CO<sub>2</sub>-neutral (Wasser- bzw. Chloralkali-Elektrolyse mit CO<sub>2</sub>-neutralem Strom) oder CO<sub>2</sub>-emittierend (Reformation von Erdgas/ anderen Kohlenwasserstoffen, Wasser- bzw. Chloralkali-Elektrolyse ohne CO<sub>2</sub>-neutralen Strom) industrielle Anwendung finden. Diese werden meist zentral in großen Anlagen mit hoher Ausstoßmenge angewandt. Elektrolyseure für die Wasser-Elektrolyse sind aber auch dezentral in kleinen Anlagen gleichnah realisierbar. Für die dezentrale Wasserstoffversorgung bietet sich in windreichen Regionen auch eine Sektorenkopplung mit der Erzeugerwirtschaft der Windenergie als Speichermöglichkeit für überschüssige elektrische Energie an.



## 4.2 Herstellung

### 4.2.1 Prozesse

Die Herstellung von Wasserstoff basiert heutzutage zu über 90 % auf fossilen Energieträgern. Dies ist für eine angestrebte CO<sub>2</sub> Neutralität nicht förderlich, sofern auch Verfahren zur möglichen CO<sub>2</sub>-neutralen Erzeugung vorhanden sind (bspw. Elektrolyse)<sup>75</sup>. Da die tatsächliche CO<sub>2</sub> Bilanz des per se kohlenstofffreien Wasserstoffs ausschließlich von seiner Erzeugung abhängig ist, muss dieser besondere Betrachtung geschenkt werden. Im allgemeinen Sprachgebrauch haben sich unterschiedliche Farben als herkunftsdifferenzierender Bezeichner für Wasserstoff etabliert. Grundsätzlich ist anzumerken, dass chemischer Wasserstoff ein farbloses Gas darstellt<sup>76</sup>:

**Grüner Wasserstoff:** Elektrolytisch hergestellter Wasserstoff. Hierbei wird ausschließlich CO<sub>2</sub>-neutraler Strom, vorzugsweise aus erneuerbaren Energiequellen, verwendet.

**Grauer Wasserstoff:** Durch Umwandlung aus fossilen Brennstoffen gewonnener Wasserstoff. Laut BMBF werden bei Herstellung von 1 kg Wasserstoff durch Dampfreformierung 10 kg CO<sub>2</sub> emittiert.

**Türkiser Wasserstoff:** Durch die thermische Spaltung von Methan erzeugter Wasserstoff. Der Kohlenstoff wird hierbei als Feststoff gebunden, welcher dadurch eine dauerhafte klimaneutrale Lagerung ermöglicht. Voraussetzung für eine CO<sub>2</sub>-neutrale Herstellung ist die Wärmeversorgung des Hochtemperaturreaktors mit erneuerbaren Energien.

**Blauer Wasserstoff:** Ähnlich wie bei der Herstellung von türkischem Wasserstoff entsteht bei dieser Variante Kohlenstoff. Da dieser allerdings gasförmig vorliegt, ist die Abscheidung und Lagerung komplexer. Zwar existieren Verfahren zur Speicherung (Carbon Capture and Storage CCS), diese wurden aber bis heute noch nicht großtechnisch angewandt. Das Umweltbundesamt legt außerdem einige umwelttechnische Risiken dar, aus denen sich Anforderungen ergeben, „die damit als umfassend und streng zu bewerten“ sind<sup>77</sup>.

---

<sup>75</sup> S.6, Töpler Et al., Wasserstoff und Brennstoffzelle 2. Aufl., Springer 2017

<sup>76</sup> <https://www.bmbf.de/de/eine-kleine-wasserstoff-farbenlehre-10879.html>, abgerufen am 01.09.2020.

<sup>77</sup> <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/gewaesser/grundwasser/nutzung-belastungen/carbon-capture-storage#ccs-im-clean-development-mechanism-cdm>, abgerufen am 01.09.2020.

Im Folgenden wird eine Übersicht über die Möglichkeiten zur Wasserstoffherstellung gegeben:

### **Herstellung aus fossilen Energieträgern und Biomasse**

Hierbei ist das Verfahren der Dampfreformierung das am häufigsten angewandte. Dabei werden Methan und Wasser unter hohem Druck sowie hoher Temperatur gemischt und in einem zweistufigen Prozess zu Wasserstoff und Kohlendioxid umgewandelt. Der Wirkungsgrad liegt bei 70 %. Ein weiteres Verfahren ist die partielle Oxidation. Feste, flüssige oder gasförmige fossile Energieträger werden dabei unter Zuführung von Wärme und Sauerstoff in einem unterstöchiometrischen Verhältnis zu Kohlenmonoxid und Wasserstoff umgewandelt. In einer nachfolgenden Reaktion werden diese anschließend zu Kohlenstoffdioxid und Wasserstoff gewandelt.<sup>78</sup>

### **Herstellung durch Wärmeenergie**

Hierbei wird unter Zuführung von Wärmeenergie Wasser in u.a. Wasserstoff gespalten. Die hohe Prozesstemperatur von ca. 2000 °C erschwert die technische Prozessführung. Aus diesem Grund werden Katalysatoren und thermische Kreisprozesse verwendet. Der Wirkungsgrad des Gesamtprozesses liegt bei ca. 50 %.<sup>79</sup>

### **Herstellung durch Elektrolyse unter Zuhilfenahme elektrischer Energie**

Bei diesem Prozess kann reines Wasser zur Spaltung verwendet werden. Es existieren unterschiedliche Elektrolyseurtechnologien<sup>80</sup>:

- Alkalische Elektrolyseure (80 °C): Spaltung von wässriger Kalilauge bei Wirkungsgraden von bis zu 80 %.
- Membranelektrolyseure (80 °C): Verwendung einer protonenleitfähigen Membran. Geringerer verfahrenstechnischer Aufwand als bei der alkalischen Elektrolyse. Interessant für Anlagen mit geringerer Leistung.
- Wasserdampfelektrolyseure mit Betriebstemperaturen von 650-1000 °C. Die Einkopplung von Wärme kann bei diesem Prozess den Bedarf an elektrischer Energie weit reduzieren und somit den auf diese Größe bezogenen Wirkungsgrad erhöhen.

Der grundsätzliche Vorteil der strombasierten Wasserstofferzeugung ist die Möglichkeit zur Verwendung CO<sub>2</sub> neutraler sowie erneuerbar erzeugter elektrischer Energien.

---

<sup>78</sup> S.6.f, Töpler Et al., Wasserstoff und Brennstoffzelle 2. Aufl., Springer 2017

<sup>79</sup> S.8, Töpler Et al., Wasserstoff und Brennstoffzelle 2. Aufl., Springer 2017

<sup>80</sup> Dr. W. Schnurnberger, Wasserspaltung mit Strom und Wärme, DLR, 2004

## Untersuchung der Photokatalyse

In aktueller Forschung wird die Herstellung von Wasserstoff durch Sonnenlicht untersucht. Dabei wird einerseits die Abänderung des photosynthetischen Prozesses von Algen und andererseits die Herstellung eines „künstlichen Blatts“ untersucht. Beide Bestrebungen sind zum aktuellen Stand noch weit von einer industriellen Nutzbarkeit entfernt.<sup>81</sup>

### 4.2.2 Einbindung erneuerbarer Energien

Die Verwendung erneuerbarer Energien ist einer der zentralen Vorteile der elektrolytischen Erzeugung von Wasserstoff. Eine maßgebende Herausforderung der Energiewende ist dabei die zeitgleiche Verwendung dargebotsabhängiger und erneuerbar erzeugter Energie. Aufgrund der schlechten Planbarkeit der Verfügbarkeit von Wind und Sonne ist eine Speicherung, neben flexiblen Verbrauchern, eine Variante der Nutzung. Eine Möglichkeit stellt dabei die Wasserstofferzeugung dar. Durch die damit herstellbare Verbindung des Sektors der Energieerzeugung und demjenigen Sektor, in dem der Wasserstoff verwendet wird, wird von Sektorkopplung bzw. Sektorenkopplung gesprochen. Eine Verwendung könnte beispielsweise in die Wärmeerzeugung oder dem Verkehrssektor gefunden werden.

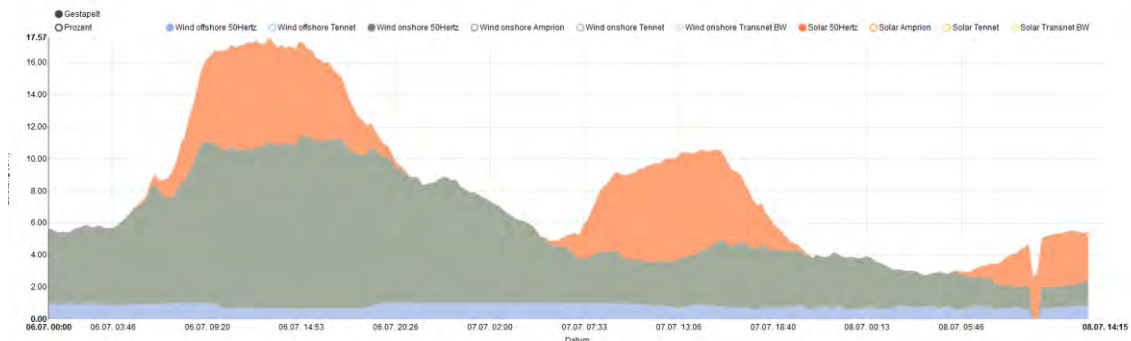


Abb. 4-1: Darstellung der schwankenden Verfügbarkeit von Solar- (orange) und Windenergie-Onshore (grün) im Verlauf von zweieinhalb Tagen.<sup>82</sup>

In Abb. 4-1 ist die schwankende Verfügbarkeit von erneuerbarer Erzeugerleistung erkennbar. Es ist allerdings anzumerken, dass bei der strombasierten Elektrolyse ein Zielkonflikt aus Kosteneffizienz durch maximalen Output (möglichst während den vollen 24 h des Tages) und ausschließlicher Verwendung erneuerbarer Energien entstehen kann. Darüber hinaus ist auch das ggf. zu entrichtende Netzentgelt für die Nutzung des Übertragungsnetzes zu berücksichtigen. Dieses kann durch die direkte

<sup>81</sup> S.10.f, Töpler Et al., Wasserstoff und Brennstoffzelle 2. Aufl., Springer 2017

<sup>82</sup> Quelle: energy-stats.com

räumliche Verknüpfung von Erzeugung und Verwendung vermieden werden. Im Folgenden werden Beispiele aus der Anwendung und Forschung aus dem Bereich gegeben:

### **Energiepark Mainz**

Der Energiepark Mainz ist das Ergebnis eines Projekts mit dem Ziel des Einsatzes innovativer Technologien zur Erzeugung von Wasserstoff aus erneuerbaren Energien.<sup>83</sup> Die seit 2016 im Forschungsbetrieb befindliche Anlage verfügt über einen Netzanschluss an das Stromnetz sowie eine direkte Verbindung zu drei (bis zu vier) Windkraftanlagen. Hierdurch kann die unmittelbare Verwendung von erneuerbarer Erzeugerkapazität ohne Netznutzung sichergestellt werden. Gleichzeitig wird durch den Netzanschluss eine dauerhafte Versorgungsmöglichkeit gewährleistet.

Die Kosten von ca. 17 Mio. wurden zu 50 % gefördert. Es entstand eine Elektrolyseurkapazität von 6 MW bzw. 3,9 MW (Spitzenlast bzw. Dauerlast), welche in der Lage ist, einerseits durch die schnelle Regelbarkeit netzdienliche Maßnahmen zu erbringen (negative Regelleistung) und andererseits bei voller Leistung 90 kg Wasserstoff pro Stunde herzustellen.<sup>84 85</sup> Der Wasserstoff kann entweder zur Einspeisung in das öffentliche Gasnetz oder zur Befüllung von Trailern verwendet werden. Eine kurzzeitige Speicherung ist ebenfalls möglich. Abb. 4-2 und Abb. 4-3 stellen die Topologie photographisch und schematisch dar. Eine bereits durchgeführte Evaluation ergab darüber hinaus einen Systemwirkungsgrad von 70 %.

---

<sup>83</sup> <https://www.energiepark-mainz.de/projekt/projektziele/>, abgerufen am 10.09.2020.

<sup>84</sup> <https://www.energiepark-mainz.de/wissen/technische-daten/>, abgerufen am 10.09.2020.

<sup>85</sup> [https://www.m-r-n.com/neuigkeiten/2017/20171019-Regionalkonferenz%20Energie%20-%20Umwelt/F3\\_Aichinger\\_Mainz%20E-Park.pdf](https://www.m-r-n.com/neuigkeiten/2017/20171019-Regionalkonferenz%20Energie%20-%20Umwelt/F3_Aichinger_Mainz%20E-Park.pdf), abgerufen am 10.09.2020.



Abb. 4-2: Topologie des „Energiepark Mainz“ – Energieversorgungs-Möglichkeit aus dem öffentlichen Netz ist nicht dargestellt.<sup>86</sup>



Abb. 4-3: Power to Gas (P2G/PTG) Anlage des „Energiepark Mainz“<sup>87</sup>

<sup>86</sup> Grafik: energiepark-mainz.de

<sup>87</sup> Foto: bine.info

## Aufbau einer regionalen Wasserstoffwirtschaft an der schleswig-holsteinischen Westküste

Im August 2020 erhielt das Konsortium „Westküste 100“ einen Förderbescheid für den Aufbau einer regionalen Wasserstoffwirtschaft. Mit dem Projektbudget von 89 Mio. Euro, wovon 30 Mio. Euro gefördert werden, soll eine Elektrolysekapazität von 30 MW errichtet werden<sup>88</sup>. Diese soll aus Windenergie Wasserstoff produzieren, welcher für vielfältige Einsatzzwecke verwendet werden soll. Abb. 4-4 zeigt die stoffliche und energetische Topografie des Projekts. Dabei ist die Nähe zur Industrie klar erkennbar. Ein interessanter Aspekt ist in diesem Fall auch die Kavernenspeicherung sowie die Methanol-Synthese aus abgeschiedenem CO<sub>2</sub>. In diesem Anwendungsfall liegt der Fokus auf der Erzeugung alternativer Flüssigkraftstoffe, der Dekarbonisierung von Industrieprozessen sowie der Einspeisung in das öffentliche Gasnetz.



Abb. 4-4: Energetische und stoffliche Topografie des Projekts „Westküste 100“

<sup>88</sup> <https://www.thb.info/rubriken/single-view/news/wasserstoff-an-der-westkueste.html>, abgerufen am 01.09.2020.

## 4.3 Bereitstellung

### 4.3.1 Aggregatzustände

Die Verteilung des Wasserstoffs kann im gasförmigen oder flüssigen Aggregatzustand erfolgen. Aufgrund der unterschiedlichen Wirkungsgrade der benötigten Verfahren zur Zustandsherstellung gibt es unterschiedliche anwendungsabhängige Bewertungen. Die technischen Möglichkeiten werden im Folgenden erläutert:

#### **Gasförmiger Wasserstoff (GH<sub>2</sub>)**

Nach dem Allgemeinen Gasgesetz ist der Quotient aus dem Produkt von Druck und Volumen sowie der Temperatur konstant. Dem folgt, dass bei gleichbleibender Temperatur vor und nach der Kompression eine Volumenverkleinerung nur mit einer Druckerhöhung erreicht werden kann. Die hierbei zugeführte Volumenänderungsarbeit geht zu Lasten des Wirkungsgrades des Gesamtprozesses. Da ein geringes Volumen allerdings im Sinne eines wirtschaftlichen Transports ist, wird deutlich, dass es sich hierbei um zwei entgegengesetzte Optimierungsziele handelt. Da ein höherer Druck gleichzeitig auch ein druckfesteres Tanksystem benötigt, ist auch hier keine unbegrenzte Skalierbarkeit vorhanden. Aus dem Grund der unterschiedlichen Optimierungsziele etablierten sich zwei maßgebliche Druckebenen im Bereich der Wasserstoffverteilung: 350 bar und 700 bar<sup>89</sup>.

Bei der Speicherung auf beiden Druckebenen wird aufgrund der positiven Spannungsverteilung auf kugelförmige oder zylindrische Speicher gesetzt<sup>90</sup>. Dies ist bei der konstruktiven Unterbringung der Speicher zu berücksichtigen. Die Typisierung des Speichersystems auf Basis des Drucks ist dabei nicht relevant. Ggf. relevant könnte im Laufe der Lebensdauer hingegen die Anzahl der ertragbaren Lastwechsel sein. Aufgrund des während der Wasserstoffentnahme abfallenden Innendrucks geht jede Entleerung des Tanks mit einer Reduktion der Beanspruchung einher. Dieser Vorgang kann gemeinsam mit der anschließenden Betankung als Zyklus betrachtet werden. Jeder Tank besitzt eine begrenzte Anzahl an ertragbaren Lastwechseln (LW), welche typ- und temperaturabhängig sind. Die Ausführung eines Tanks als Typ-IV Zylinder begünstigt die Anzahl der ertragbaren Lastwechsel und verlängert

---

<sup>89</sup>[https://www.energieagentur.nrw/netzwerk/brennstoffzelle--wasserstoffwasserstoff--elektromobilitaet/wasserstoffspeicher\\_distribution\\_tankstellen](https://www.energieagentur.nrw/netzwerk/brennstoffzelle--wasserstoffwasserstoff--elektromobilitaet/wasserstoffspeicher_distribution_tankstellen), abgerufen am 01.09.2020.

<sup>90</sup> S.22, Rosen, Beitrag zur Optimierung von Wasserstoffdruckbehältern, VW AG AutoUni 2017

somit die Lebensdauer. Bei Typ-IV Zylindern kann von einer Zyklusfestigkeit von 45000 LW gesprochen werden (Tiefe Temperaturen sowie Raumtemperatur). Interessant ist hierbei der Hinweis, dass die ertragbare Zyklenzahl um 24 % reduziert wird, wenn die Temperatur auf 85 °C steigt<sup>91</sup> (kann bei Schnellbetankung eintreten).

An dieser Stelle wird die Permeabilität von Werkstoffen für Wasserstoff hingewiesen. Die geringe Molekülgröße Wasserstoffs führt dazu, dass dieser durch andere Stoffe hindurch diffundieren kann. Der hierfür zulässige Grenzwert nach EG 70/2009 beträgt 12,8 mg/d/Innenvolumen (in Liter). Mit der Annahme einer konstanten Permeationsrate wäre ein 700 bar Speichersystem „nach über 4 Jahren noch zu 50 % gefüllt“.<sup>92</sup>

Die Druckebenen 350 bar und 700 bar können anhand mehrerer Kriterien verglichen werden. Ursprüngliche Motivation der Druckerhöhung ist die Speicherung von mehr Wasserstoff bei gleichem Volumen. Aufgrund des in der Realität nicht linearen Zusammenhangs von Dichte und Druck ist bei einer Verdoppelung des Drucks nur eine Dichtesteigerung von 67,7 % zu erreichen. Dazu kommt ein steigender Massebedarf zur Herstellung der Belastbarkeit mit dem höheren Druck. Unter Berücksichtigung dieser Eigenschaft kann abschließend nur von einer 50 %-igen Kapazitätssteigerung bei der Verdopplung von 350 bar gesprochen werden. Der Energiebedarf zur weiteren Verdichtung ist allerdings nicht mit Faktor 2 belegt. Für eine Verdichtung auf 350 bar kann mit 12 % Energieaufwand, bezogen auf die chemische Energie des Wasserstoffs, gerechnet werden. Bei 700 bar beträgt Aufwand 15 %.

### **Flüssiger Wasserstoff (LH2)**

Eine Alternative zu GH2 stellt die flüssige Verteilung von Wasserstoff dar. Dies kann zunächst durch die Dichte belegt werden. Beträgt diese bei atmosphärischem Druck (ca. 1 bar) 0,08 kg/m<sup>3</sup>, können bei anderen gasförmigen Drücken Dichten von 23,3 kg/m<sup>3</sup> (350 bar) bzw. 40 kg/m<sup>3</sup> (700 bar) erreicht werden. Findet eine Verflüssigung statt, so beträgt die Dichte bei 1 bar hingegen 70 kg/m<sup>3</sup>. Dies ist Motivation der kryogenen Speicherung. Aufgrund der geringen Siedetemperatur von -241 °C (1 bar) ist allerdings eine dauerhafte Kühlung und Isolierung erforderlich, welche das

---

<sup>91</sup> S.22, Rosen, Beitrag zur Optimierung von Wasserstoffdruckbehältern, VW AG AutoUni 2017

<sup>92</sup> S.24, Rosen, Beitrag zur Optimierung von Wasserstoffdruckbehältern, VW AG AutoUni 2017



Systemgewicht erhöhen.<sup>93</sup> Dies spiegelt sich außerdem auch im energetischen Aufwand zur Verflüssigung wieder. Dieser kann mit ca. 30 % angegeben werden<sup>94</sup>.

Da ein Wärmeeintrag auch bei guter Isolation alleine bereits aufgrund der hohen Temperaturdifferenz zur Umgebung unvermeidbar ist, findet eine Verdampfung stets statt. Dies führt nach längerer Zeit zu einer Druckerhöhung im Tank. Diese muss bei Überschreitung eines Schwellwerts durch Abblasung ausgeglichen werden. Abgesehen von sicherheitstechnischen Risiken reduziert dies den Wirkungsgrad sowie die Speicherdauer des Tanks.

### **Vergleich der unterschiedlichen Transportkonzepte**

Die Verflüssigung von Wasserstoff bietet zwar höhere Transportmengen an, benötigt allerdings auch mehr Prozessenergie. Während sich die Speicherung von gasförmigem Wasserstoff als einfach erweist, ist die dauerhafte Isolation von verflüssigtem Wasserstoff ein technisch aufwändiger und verlustbehafteter Prozess. Die Verflüssigung oder Vergasung könnte dann notwendiger Zwischenschritt des Auslieferungsprozesses, bspw. an der Tankstelle, sein.

## 4.3.2 Verteilungskonzepte

### **Gasförmige Verteilung**

Mit speziellen Hochdruck-LKW-Trailern (> 350 bar bis 700 bar Druck) würde das Gas auf dem Straßenweg mit perspektivisch verfügbaren CO<sub>2</sub>-neutralen LKW zu den gleisnahen Tankstellen transportiert, wo nur noch Druckminderer bzw. Tankanlagen/ Dispenser vorhanden sind. Ein Zeithorizont für die perspektivisch vorgesehenen Hochdrucktrailer ist noch nicht abschließend aufgestellt, jedoch forschen mehrere Hersteller an Brennstoffzellen-/ Batterie-LKW, einzelne Prototypen sind bereits unterwegs. Es ist damit zu rechnen, dass die Belieferung zunächst mit Diesel betriebenen LKW und Trailern mit niedrigerem Druck (ca. 350 bar) durchgeführt wird. Die so verminderte Kapazität der Trailer führt zu häufigerer Belieferung der Tankstellen. Geringere Drucke komprimieren den Wasserstoff auf geringere Dichten und erfordern somit, bei gleicher Masse, ein höheres Volumen. Dem steht allerdings auch ein geringerer Materialaufwand für das Tanksystem, aufgrund der geringeren Druckanforderungen, entgegen. Die häufigeren LKW-Fahrten lassen für diesen Zeitraum vorübergehend einen Anstieg der Kosten und des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes erwarten. Dies wird in der vorliegenden Studie nicht berücksichtigt.

---

<sup>93</sup> S.86 f., Eichlseder, Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik, Springer 2008

<sup>94</sup> S.94, Eichlseder, Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik, Springer 2008

## Flüssige Verteilung

Die flüssige Verteilung ermöglicht aufgrund der höheren Dichte eine höhere Transportmenge pro Fahrt. Entsprechende Quellen geben eine Transportmenge von 4 t pro Trailer an. Dem gegenüber stehen Trailer mit gasförmiger Speicherung, die eine Transportkapazität von ca. 500-1000 kg (je nach Druckebene) besitzen.<sup>95</sup> Dieser Vorteil kann allerdings nur durch zusätzliche Maßnahmen wie Isolation erreicht werden. Dazu kommt eine entsprechende Vergasung und Verdichtung bei gasförmiger Übergabe an verbrauchende Fahrzeuge. Dies ist an der Übergabestelle, ausgeführt als Tankstelle oder mobiler Dispenser, einzurichten.

## 4.4 Systemkonzepte für die Versorgung

### 4.4.1 Standortwahl

Die Prüfung der notwendigen Tankstellenstandorte muss maßgeblich betrieblich durchgeführt werden, da die Reichweite der Fahrzeuge für einen Tagesumlauf ausreicht. Für eine Standortwahl sollten folgende Kriterien berücksichtigt werden:

- Es kommen nur Standorte in Frage, an denen Linien planmäßig enden bzw. beginnen, sodass keine Linienläufe gebrochen werden müssen oder nächtliche Überführungen entlang der Linie, wenn möglich, nicht erforderlich werden.
- Es sollen möglichst viele Tageseinsätze der Fahrzeuge am Standort beginnen bzw. enden, sodass die Fahrzeuge in der Nachtpause lokal betankt werden können.
- Die Standorte der Tankstellen sollen in der Nähe zur Herstellungsanlage liegen um die Überführungskosten und -risiken des Wasserstoffs zu minimieren.
- Die Umgestaltung der heutigen Umlaufpläne ist ggf. notwendig und zulässig, daraus kann ein Fahrzeugmehrbedarf resultieren. Dieser wird nicht mitbetrachtet.

---

<sup>95</sup> [https://www.energieagentur.nrw/brennstoffzelle/brennstoffzelle-wasserstoff-elektromobilitaet/wasserstoffspeicher\\_distribution\\_tankstellen](https://www.energieagentur.nrw/brennstoffzelle/brennstoffzelle-wasserstoff-elektromobilitaet/wasserstoffspeicher_distribution_tankstellen), abgerufen am 10.09.2020.

## 4.4.2 Systemauswahl

Die Wasserstoffversorgung von Standorten zur Betankung kann auf viele Arten realisiert werden. Dabei kann primär zwischen Erzeugung vor Ort und Versorgung durch Belieferung differenziert werden. Bei der weiteren Betrachtung kann bei fremdbelieferten Anlagen nach der Unterbringung des Dispensers unterschieden werden. Auf die Möglichkeiten der Erzeugung wurde bereits in Kapitel 4.2 eingegangen. Hierbei bietet die zentralisierte Erzeugung grundsätzlich den Vorteil des hohen Wirkungsgrads und der zeitlich höheren Auslastung durch Überlagerung von Nachfragekurven. Dem stehen entsprechende Transportkosten und ggf. Emissionen gegenüber. Hierbei werden standardmäßig Trailer verwendet. Diese können, wie in Abb. 4-5 dargestellt, einen integrierten Dispenser besitzen.



Abb. 4-5: Wasserstofftrailer mit integrierter Verdichtung und Dispensern. Quelle: Linde AG, 2016

Alternativ dazu besteht die Möglichkeit, einen stationären Dispenser zu errichten und den Gasspeicher in Form eines austauschbaren Trailers zu betreiben. Der Vorteil besteht hierbei in dem geringeren Aufwand und dem höheren Speichervermögen des Trailers.

## 5 Wirtschaftliche Kenndaten

### 5.1 Beschaffungs- und Instandhaltungskosten Fahrzeuge

Tabelle 5-1 führt die Beschaffungs- und Instandhaltungskosten nach den möglichen Antriebssystemen auf. Dabei sind vergleichbare Fahrzeuggrößen für alle Technologien mit ca. 145-170 Sitzplätzen zugrunde gelegt. Preisbasis ist das Jahr 2019.

Die angegebenen Werte entstammen der Datenbasis der Professur für Elektrische Bahnen, die u. a. durch Auswertungen von Fahrzeugbeschaffungen der vergangenen Jahre im gesamten Bundesgebiet und Kontakte zu Herstellern gewonnen wurden. Potentielle Förderungen einzelner Fahrzeuge wurden nicht berücksichtigt.

Angenommen als Basis sind ca. 150.000 km Fahrzeuglaufleistung pro Jahr und im Wochenschnitt ca. 15 h Fahrzeugeinsatzdauer pro Tag. Die Höhe der Beschaffungskosten sowie Anteile der Kosten für die Instandhaltung richten sich jedoch auch maßgeblich nach der Anzahl der Fahrzeuge, da hier Skaleneffekte erzielt werden.

Tabelle 5-1 Kostensätze Fahrzeugkostenanteile für verschiedene Antriebskonzepte

<b>Technologie</b>	<b>Elektrotriebzug</b>	<b>Dieselttriebzug</b>	<b>Oberleitungs-/ Batterie-Hybrid</b>	<b>Wasserstoff-/ Batterie-Hybrid</b>
Fahrzeugbeschaffung [Mio. €]	5,5	5,0	6,1	6,7
Betriebsnahe Instandhaltung [Cent/km]	0,54	0,78	0,60	0,63
Schwere Instandhaltung (Hauptuntersuchungen) [Cent/km]	0,22	0,25	0,24	0,26*
Powerpack-Revision [Cent/km] (ca. 3,5 Jahre zwischen den Revisionen)		0,50		
Batterietausch [Cent/km] (LTO-Zellen, 12 a Lebensdauer & 600 kWh)			0,43	
Batterietausch [Cent/km] (NMC-Zellen, 10 a Lebensdauer & 220 kWh)				0,15
Brennstoffzellentausch [Cent/km] (400 kW Leistung, 20.000 h Lebensdauer)				0,37
	*inkl. Druckbehälterprüfung			

### **Besonderheiten PowerPacks**

Erfahrungen von EVU zeigen, dass die Revisionen abhängig von der Fahrzeug-Leistung nach ca. 480.000 km erfolgen müssen.

### **Besonderheiten Batterien**

Lithium-Ionen-Zellen aller Technologien altern je nach Betriebsverfahren sowie betrieblichen Anforderungen und Belastungen schneller oder langsamer. Vier Größen sind dafür maßgeblich:

- Anzahl der Lade- und Entladezyklen (enthalten darin sind Voll- und Teilzyklen)
- Entladetiefe der Batterie (DoD – Depth of Discharge; Anteil des gespeicherten Energieinhalts, der beim Entladen regelmäßig im Betrieb entnommen wird)
- Temperatur in der Zelle (konstant im optimalen Bereich oder ständig wechselnd)
- Entnommene Leistung bzw. Stromhöhe in der Zelle (wirkt v. a. auf Temperatur)

Hinzu kommt die kalendarische Alterung der Zellen. Jede dieser Größen wirkt sich bei unterschiedlichen Batterie- und Antriebstechnologien mehr oder weniger stark auf deren Lebensdauerverhalten aus. Im Hinblick auf den Umfang dieser Studie können deshalb nur qualifizierte Abschätzungen getroffen und Daten der Hersteller herangezogen werden. Basis für die Abschätzung ist die Annahme, dass alle Fahrzeuge des Netzes eine Batterie mit gleichem Energieinhalt besitzen, auch wenn auf manchen Linien geringere Batteriegrößen ausreichend wären. Ziel ist, die hohe betriebliche Flexibilität zum Tausch der Fahrzeuge zwischen den Linien zu erhalten.

### **Besonderheiten Brennstoffzelle**

Die Brennstoffzelle verfügt über eine Protonaustauschmembran (PEM) und andere Komponenten, die einer Alterung unterliegen. Die Lebensdauer dieser Komponenten wird in Betriebsstunden der Brennstoffzelle angegeben und liegt nach Herstellerangaben bei ca. 15.000 Stunden. Dies entspricht einer Fahrzeugbetriebsdauer von ca. 20.000 Betriebsstunden, was ca. drei bis fünf Jahren entspricht. Es ist also entscheidend, die durchschnittliche tägliche Betriebsdauer der Brennstoffzelle valide abzuschätzen, inklusive Vor- und Nachbereitungsdienst sowie längeren Pausen.

## **5.2 Infrastrukturkosten**

Die Infrastrukturkosten ergeben sich aus den Streckengegebenheiten und den erforderlichen Infrastrukturmaßnahmen für das jeweilige System und können deshalb hier nur pauschalisiert angegeben werden. Für die Instandhaltung können pauschal ca. 0,5 – 1 % der Investitionssumme (branchenüblich) pro Jahr angesetzt werden.

## 5.2.1 Tankstellenkosten

Die betrachteten Technologien Dieselfahrzeug und Wasserstoff-/ Batterie-Hybrid benötigen Tankstellen zur Kraftstoffversorgung. Für eine Dieseltankstelle können ca. 350.000 bis 400.000 €/Tankstelle angesetzt werden. Die Kosten können höher ausfallen, wenn zusätzlich eine Gleisinfrastruktur geschaffen werden muss.

Für eine Wasserstofferzeugungsanlage für grauen Wasserstoff und zur Versorgung von ca. 30 Fahrzeugen werden Errichtungskosten von ca. 27,5 Mio. € angesetzt. Die angeführten Kosten ergeben sich aus Daten der Professur für Elektrische Bahnen und orientieren sich an einer Studie für ein zwischenzeitlich im Vergabeprozess abgeschlossenes Netz <sup>96</sup>. Neben diesen Kosten kann für den in Abschnitt 4 beschriebenen Energiepark Main ein Errichtungspreis von ca. 17 Mio. Euro angenommen werden. Dieser produziert die notwendige grüne Wasserstoffmenge, um ca. 20 – 25 Fahrzeuge mit Energie zu versorgen und entstand unter finanzieller Beteiligung der sich ein Geschäftsmodell versprechenden Technologiehersteller. Es ist deshalb von einem unteren Preisniveau der Errichtungskosten auszugehen. Zudem beziehen sich die Investitionskosten auf einen Preisstand von 2015. Nimmt man eine Teuerungsrate von 1,5 % an, so ergibt sich im Jahr 2019 ein Kostenstand von ca. 18 Mio. €.

Die angeführten Kosten beinhalten auch die Kosten für eine Reinigungs-, Verdichtungs- und Befüllanlage für LKW-Drucktrailer am Erzeugerstandort, um gleisnahe Tankstellen mittels LKW-Trailer versorgen zu können.

Für das Wasserstoff-/ Batterie-Hybridfahrzeug müssen auch gleisnahe Tankstellen errichtet werden. Nach Daten der Professur für Elektrische Bahnen liegen deren Kosten bei ca. 3 – 3,5 Mio. € für eine Tankanlage, die aus LKW-Trailern über Dispenser die Betankung der Fahrzeuge ermöglicht. Die Kosten können höher ausfallen, wenn zusätzlich eine Gleisinfrastruktur geschaffen werden muss.

Die Anzahl der gleisnahen Tankstellen sollte immer anhand der aktuellen Situation im Netz festgelegt. Wo heute planmäßig genutzte Dieseltankstellen vorhanden sind, kann davon ausgegangen werden, dass auch zukünftig Tankinfrastruktur notwendig ist. Dies liegt daran, dass die Reichweite der Wasserstoff-/ Batterie-Hybridfahrzeuge tendenziell sogar kleiner ist als die der Dieseltriebzüge und bei durchschnittlichen Tagesumläufen nahezu immer tägliches Tanken erfordert.

---

<sup>96</sup> Bayer, Thomas; Horn, Elmar; Lienkamp, Heinrich; Orgrisek, Sirko: Machbarkeits-/ Realisierungsstudie Druck-Wasserstoff-Betankung von Schienenfahrzeugen, Infraseriv GmbH & Co., Frankfurt, 2015.

## 5.2.2 Kosten für Teilelektrifizierungen und Ladestationen

Wie bereits im Abschnitt 3 detailliert beschrieben sind die Kosten für Ladestationen und Ladeabschnitte maßgeblich von ihrer Technologie und ihrer Ausdehnung abhängig. In der folgenden Tabelle werden deshalb alle Ladestationstechnologien mit Kostensätzen zur Erstabschätzung angegeben. Insbesondere bei höherer Leistung, mehr zu elektrifizierenden Gleisen oder längeren zu elektrifizierenden Anschlussstrecken können die Werte jedoch stark abweichen und müssen im Detail je nach Anlage geprüft werden. Nicht enthalten sind ggf. notwendige Anpassungen an der Leit- und Sicherungstechnik oder Spurplanveränderungen zu Realisierung von Mastgassen oder ähnlichem.

Anzumerken ist, dass alle Kostensätze im Folgenden bisher auf Annahmen beruhen, da noch keine Anlage vollständig umgesetzt wurde. Die Kosten können also lediglich als Indikation für etwaige erste Kostenrechnungen angenommen werden. Sie würden im Rahmen einer Netzstudie für jeden mit Ladestation auszustattenden Bahnhof separat detaillierter analysiert und berechnet.

Tabelle 5-2 Kostensätze Energie für verschiedene Ladestationen

<b>Technologie</b>	<b>Vollumrichterlösung 16,7 Hz</b>	<b>Trafolösung 50 Hz</b>	<b>Symmetrierumrichter 50 Hz</b>	<b>Oberleitung freie Strecke im Flachland</b>	<b>Oberleitung freie Strecke bergige Strecke</b>
Leistung ca. 2,5 MW	3,5 Mio. €	1,5 Mio. €	2,5 Mio. €	-	-
Leistung ca. 5,0 MW	4,5 Mio. €	-	-	-	-
Leistung ca. 10 MW	6,5 Mio. €	-	-	-	-
Pro km Fahrleitung [Tsd. €]	-	-	-	540	650
Projektierte Lebensdauer [a]	30	30	30	70	70

## 5.3 Energiekosten

Die Energiekosten lassen sich gut über gemessene Energiebedarfswerte von Elektrotriebwagen je nach Streckentopologie, gefahrenen Geschwindigkeiten und Fahrprofil (z. B. viele Halte und langsam/ seltene Halte und schnell) differenzieren. Die Professur für Elektrische Bahnen verfügt hierzu über umfangreiche Energiebedarfsdaten vieler repräsentativer Linienläufe in Deutschland, sodass aus diesen Zahlen valide Abschätzungen getroffen werden können. Bei Bedarf kann auch eine präzise

Simulation der Fahrten bestimmter Fahrzeuge auf der zu betrachtenden Infrastruktur angeboten und durchgeführt werden.

Die Kosten sind maßgeblich von der befahrenen Infrastruktur abhängig. Durchschnittlich kann bei EMU-Fahrzeugen von einem spezifischen Elektroenergiebedarf inklusive Rückspeisung von ca. 30 – 33 Wattstunden/Tonnenkilometer (Wh/tkm) ausgegangen werden (eines besetzten Fahrzeugs) Befährt ein Elektrotriebwagen jedoch beispielsweise die Strecke Murnau-Oberammergau, so fallen hier über 40 Wh/tkm spezifischer Energiebedarf an. Hintergrund ist, das langsame Fahren den Anteil der Hilfsbetriebe und Heizung erhöht, da diese für einen längeren Zeitraum ihre Aufgabe erfüllen müssen. Der spezifische Energiebedarf pro Kilometer erhöht sich entsprechend. Demgegenüber kann ein Expressverkehr mit Triebwagen auch mit 25 bis 28 Wh/tkm auf schnellen Hauptbahnen bei wenigen Halten erbracht werden. Für die folgende Tabelle wurden 31 Wh/tkm für eine Fahrt mit einem elektrischen Triebzug angesetzt. Für die Berechnung des Energiebedarfs wurden aktuell verfügbare Fahrzeuge mit alternativen Antrieben am Markt ausgewählt.

Über statische Wirkungsgrade von EMU-Fahrzeugen wird zunächst der Energiebedarf am Rad bestimmt. Ist dieser bekannt, kann wiederum über einen statischen Wirkungsgrad auf den Energiebedarf anderer alternativer Antriebstechnologien geschlossen werden.

Tabelle 5-3 Kostensätze Energie für verschiedene Antriebskonzepte

<b>Technologie</b>	<b>Elektrotriebzug</b>	<b>Dieselttriebzug</b>	<b>Oberleitungs-/ Batterie-Hybrid</b>	<b>Wasserstoff-/ Batterie-Hybrid</b>
Energiebedarf ca. pro km [kWh/km]	3,3	8,3	3,9	5,9
Mengeneinheit (Diesel bzw. H <sub>2</sub> )		0,85 l/km		0,18 kg/km
Energiekosten [€/km] Oberleitung (12 ct/kWh)	0,39		0,47	
Energiekosten [€/km] Ladestation (17 ct/kWh)			0,66	
Energiekosten [€/km] Diesel (1 €/l), H <sub>2</sub> grau (5 €/kg)		0,85		0,90
Energiekosten [€/km] H <sub>2</sub> grün (7 €/kg)				1,26



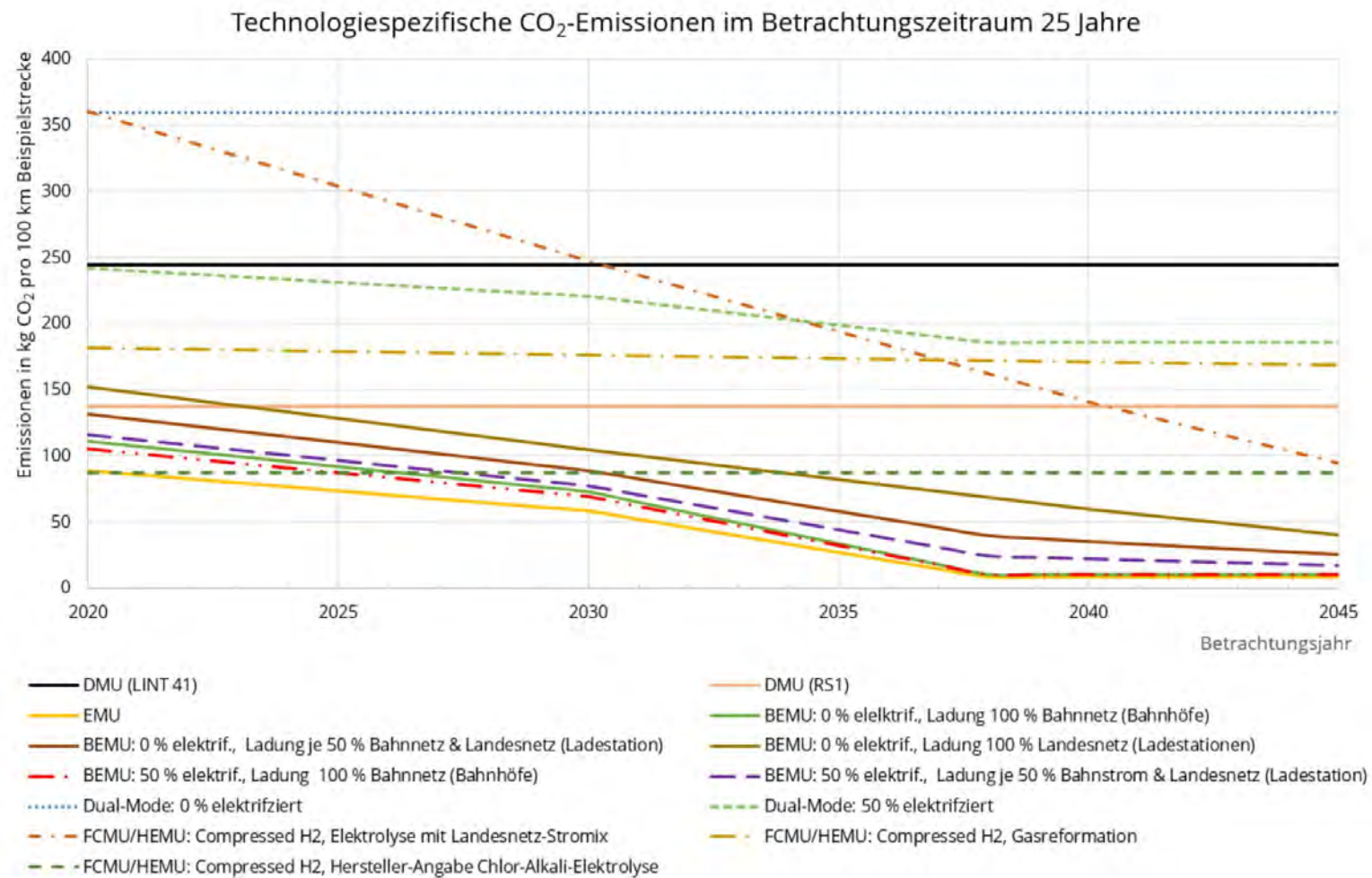
## 6 CO<sub>2</sub>-Emissionsvergleich

### 6.1 CO<sub>2</sub>-Emissionen einer Beispielstrecke über 25 Jahre

Ein direkter Vergleich aller Technologien ist aufgrund der hohen Infrastrukturabhängigkeit nur streckenspezifisch umsetzbar und valide (siehe Abschnitt 6.2). Dennoch soll zur Erhellung der aktuellen Debatte zur Klimaerwärmung eine Betrachtung der Emissionen des klimawirksamen CO<sub>2</sub> Gases als vergleichende Größe durchgeführt werden, um so eine valide Vergleichsbasis der einzelnen Antriebstechnologien zu schaffen. Mittels dieser kann ein „Einsparpotenzial“ abgeschätzt werden.

Aufgrund des komplexen Prozesses der Energiebereitstellung und der breiten Spannweite an Bereitstellungsmöglichkeiten ist bei einigen Technologien eine aufgeschlüsselte Betrachtung nach diesen Technologien notwendig. Diese zeigt die starke Abhängigkeit der CO<sub>2</sub>-Emissionen von der Energieerzeugung. Dies wird insbesondere beim Oberleitungs-/Batterie-Hybrid deutlich, welcher technologisch bedingt lokal CO<sub>2</sub>-neutral ist, jedoch ggf. am Erzeugungsort der elektrischen Energie vor allem bei Umwandlung von Braunkohle umfangreich CO<sub>2</sub> emittiert. Abb. 6-1 zeigt den Verlauf der CO<sub>2</sub> Emissionen für eine beispielhafte Strecke von **100 km Länge über einem Betrachtungsverlauf von 25 Jahren** für die verschiedenen Antriebstechnologien.

Basis für die CO<sub>2</sub>-Emissionsberechnung ist ein Werkzeug zur Berechnung linienspezifischer CO<sub>2</sub>-Emissionen der Professur für Elektrische Bahnen. Die Anwendung auf zu untersuchende Linien kann gesondert beauftragt werden.

Abb. 6-1: Technologiespezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen im Betrachtungszeitraum von 25 Jahren

Für die Berechnungen wurden vergleichbare Fahrzeuggrößen von ca. 120 Sitzplätzen (vergleichbare DMU-Größe Lint 41) angenommen. Da die CO<sub>2</sub>-Emissionen maßgeblich von der umgesetzten Energie beeinflusst werden, ist die relative Einordnung der einzelnen Emissionen auch bei größeren Gefäßgrößen als nahezu gleich einzuschätzen.

Für die korrekte Interpretation der Abbildung sind folgende Hinweise zu beachten:

- **DMU (Dieseltriebwagen):** Die CO<sub>2</sub> Emissionen und die Menge des verbrannten Kraftstoffs sind aus chemischen Gründen proportional und bei gleichbleibender Fahrzeugkonfiguration (Effizienz, Masse, Energiebedarf, etc.) über den betrachteten Zeitraum konstant.
- **EMU (Elektrotriebwagen):** Da elektrische Triebwagen die Energie aus der Oberleitung beziehen, werden die CO<sub>2</sub> Emissionen der Bahnenergieerzeugung über dem Betrachtungszeitraum für die Berechnung angesetzt. Diese werden nach dem Klimaschutzplan der zum Deutsche Bahn Konzern gehörenden DB Energie ab 2038 klimaneutral sein. Dies fällt mit dem geplanten Kohleausstieg zusammen. Bereits bis 2030 soll eine achtzigprozentige Klimaneutralität erreicht sein<sup>97</sup>. Der Bahnstrommix ist in seinen CO<sub>2</sub>-Emissionen heute schon CO<sub>2</sub>-ärmer als die Landesenergieversorgung.
- **BEMU (Oberleitungs-/Batterie-Hybrid):** Der Oberleitungs-/Batterie-Hybrid erzeugt per se keine CO<sub>2</sub>-Emissionen und Schadstoffe am Ort des Transports, ist also lokal emissionsfrei. Analog zum EMU bezieht der Oberleitungs-Batterie-Hybrid seine Energie über die Schnittstelle Stromabnehmer-Oberleitung. Je nach örtlicher Gegebenheit wird das Oberleitungsnetz entweder durch das Netz der Bahnenergieversorgung oder Ladestationen durch das Netz der öffentlichen Energieversorgung gespeist. Für diese sind unterschiedlichen Entwicklungen der CO<sub>2</sub>-Emissionen in den nächsten 25 Jahren zu erwarten. Bei einer Aufteilung auf beide Energieversorgungen erfolgt die Berechnung der CO<sub>2</sub> Emission jeweils anteilig. Ein höherer Elektrifizierungsanteil sorgt grundsätzlich für einen geringeren Energiebedarf auf diesen Abschnitten (und somit auch in Summe), da die Wirkungsgrad-Verluste des Energiespeichers durch Laden und Entladen entfallen.

Für den Oberleitungsanteil der Fahrt wird der bei den EMU-Fahrzeugen beschriebene Klimaschutzplan der DB Energie für die Prognose der zu erwartenden CO<sub>2</sub>-Emissionen angesetzt. Für die Nachladung an Ladestationen wird das Klimaschutzszenario 80 des Ökoinstituts bzw. der Fraunhofer-Gesellschaft ISI<sup>98</sup> angesetzt. Dieses sieht eine Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen in gewählten Szenario um

---

<sup>97</sup> [https://www.deutschebahn.com/resource/blob/267812/66cba64017fc242d66a71ebb64d2f1e1/themendienst\\_klimaschutzziel-data.pdf](https://www.deutschebahn.com/resource/blob/267812/66cba64017fc242d66a71ebb64d2f1e1/themendienst_klimaschutzziel-data.pdf), abgerufen im Juni 2020.

<sup>98</sup> <https://www.oeko.de/oekodoc/2451/2015-608-de.pdf>, Berlin 2015.

80 % im Jahr 2050 verglichen zu 1990 vor. Dieses wird als besonders passend zu den aktuellen Ausbau- und Ausstiegsszenarien eingeschätzt.

- **Dual-Mode:** Dual-Mode Fahrzeuge fahren als DMU auf nicht-elektrifizierten Strecken und als EMU unter der Oberleitung. Die höhere Masse sorgt auf beiden Abschnitten für einen höheren Energiebedarf gegenüber den artreinen Fahrzeugen. Der jeweilige Emissionsfaktor wird für Oberleitungsfahrt entsprechend eines Oberleitungsfahrzeugs und für eine Fahrt im Dieselbetrieb entsprechend eines DMU angenommen. Das Fahrzeug ist also nur dann lokal emissionsfrei, wenn die Fahrt unter Fahrleitung erfolgt. Im Dieselbetrieb entstehen lokal CO<sub>2</sub>- und Schadstoffemissionen.
- **Diesel-/ Batterie-Hybrid:** Für diesen Technologietyp sind so viele Eingangsparameter je nach Strecke, Technologievariante (mit und ohne Stromabnehmer) sowie Speichergröße erforderlich, dass eine seriöse Aussage nur linienspezifisch getroffen werden kann.
- **FCMU/HEMU (Wasserstoff-/Batterie-Hybrid):** Der Wasserstoff-/Batterie-Hybrid erzeugt keine CO<sub>2</sub>-Emissionen und Schadstoffe am Ort des Transports, ist also lokal emissionsfrei. Die Menge des emittierten CO<sub>2</sub> wird deshalb grundsätzlich über die Erzeugung des Wasserstoffs bemessen. Hierfür gibt es unterschiedliche Varianten, die in der Grafik entsprechend berücksichtigt werden. Hierbei wird insbesondere mit der Gasreformation, bei der aus Erdgas Wasserstoff gewonnen wird, eine hohe CO<sub>2</sub>-Emission bewirkt. Aktuell ist jedoch die Erzeugung aus dem deutschen Strommix (d. h. inklusive aller Kohlestromanteile) noch emissionsintensiver. Die Erzeugung aus elektrischem Strom hat jedoch den Vorteil, dass dieser kurzfristig auf den Bezug von erneuerbaren Energiequellen umgestellt werden kann und somit eine CO<sub>2</sub>-Neutralität erreicht werden kann. Hierzu bietet sich eine Sektorenkopplung mit der Windenergieerzeugung an.  
Die Herstellerangabe zur Chlor-Alkali-Elektrolyse bezieht sich auf einen üblichen Herstellungsprozess in der chemischen Industrie, meist zur Herstellung von Chlor. Wasserstoff fällt dabei als Zweitprodukt an, sodass diesem ein geringer CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor (entsprechend des jeweiligen wirtschaftlichen Wertes, Chlor erhält demnach den größeren CO<sub>2</sub>-Anteil des Prozesses) zugewiesen wird. Siehe hierzu auch Abschnitt 4.

## 6.2 Linienspezifische Bestimmung von CO<sub>2</sub>-Reduktionspotentialen

### 6.2.1 Aufgabenstellung und Ausgangslage

Ziel ist die möglichst präzise linien- bzw. netzweise Einschätzung möglicher Reduktionspotentiale der CO<sub>2</sub>-Emissionen der verschiedenen alternativen Antriebstechnologien. Die Professur für Elektrische Bahnen verfügt hierzu über ein Softwaretool, das gleichzeitig die Ermittlung der CO<sub>2</sub>-Emission aller Technologien, auch bei Variationen der Eingangsparameter, ermöglicht.

Zunächst müssen die CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren in gCO<sub>2</sub>/kWh jedes Energieträgers bestimmt werden. Diese stammen wie oben beschrieben aus den Herstellungsprozessen der einzelnen Energiebereitstellungspfade bzw. aus dem chemischen Umwandlungsprozess bei Verbrennung bei Dieselkraftstoff.

Neben den CO<sub>2</sub>-Faktoren ist es notwendig, den Energiebedarf der Fahrzeuge je nach Technologie abzuschätzen und auf die neuen Technologien zu übertragen. Eine Betrachtung der Herstellungsemissionen der Fahrzeuge wird aufgrund der erwarteten Neubeschaffung aller Fahrzeugtypen hier als vernachlässigbar angenommen. Die Fahrzeugherstellung macht im Verhältnis zum Lebenszyklus des Schienenfahrzeugs ohnehin einen erheblich geringeren Anteil aus als bei Automobilen, da die Schienenfahrzeuge nahezu im Dauereinsatz mit erheblich höheren Laufleistungen pro Jahr betrieben werden und zusätzlich langlebiger sind. Eine Berücksichtigung ist jedoch möglich und kann umgesetzt werden.

Unterscheiden lassen sich die Herstellungsemissionen der einzelnen Fahrzeuge deshalb maßgeblich nur an den Hochtechnologiekomponenten Batterie bzw. Brennstoffzelle. Siemens gibt für seine Mireo-Züge für das Ortenau-Netz hierbei eine Emission für die Batterie-Herstellung von ca. 36 t an. Bei Betrieb mit dem dort verwendeten Bahnstrom ergibt sich ein Break-Even der Emissionen im Vergleich zum Dieselzug nach Herstellerangaben nach ca. 300.000 km. Dies entspricht bei üblichen Fahrzeuglaufleistungen ca. einer Betriebszeit von 2 – 3 Jahren im Verhältnis zu 10 – 12 Jahren Batterielebensdauer (Herstellerewartung).<sup>99</sup> Diese zusätzlichen Emissionen werden in der netzspezifischen Betrachtung zunächst ausgeklammert.

### 6.2.2 Bestimmung des Energiebedarfs je Technologie

Die Professur für Elektrische Bahnen verfügt über umfangreiches gemessenes Datenmaterial zu den Energiebedarfswerten elektrisch geführter Zugläufe aller Zugarten und

---

<sup>99</sup> Göbel, S.: Siemens Mobility trotz Corona und tritt mit neuer Vision und neuem Motto an, „stadtverkehr“ 7-8/2020, S. 19.

Netztopologien. Über eine Umrechnung in spezifische Werte pro Kilometer und Tonne Fahrzeugmasse kann dieser Wert auch in größere und kleinere Fahrzeugeinheiten überführt werden. Vergleicht man die zu analysierende Linie bzw. das Netz mit ähnlichen elektrisch betriebenen Strecken (Fahrtechnik, gefahrene Geschwindigkeiten, Gefäßgröße, Topographie, Topologie) und wählt eine in ihrer Charakteristik ähnliche Strecke aus, so können die dort bei elektrischen Zugfahrten gemessenen Energiebedarfswerte auf die zu analysierende Strecke übertragen werden. Die statistische Sicherheit ist bei diesem Verfahren sehr hoch, weil es zu jeder Strecke mehrere 100 bis mehrere 1000 gemessene Zugfahrten gibt.

Sind die elektrischen Energiebedarfswerte eines im Netz oder auf einer Linie verkehrenden Elektrotriebzuges am Stromabnehmer derart bestimmt, kann über statische Wirkungsgradketten der mechanische Energiebedarf am Rad berechnet werden. Es ergibt sich ein streckenspezifischer mechanischer Grundenergiebedarf, der bei angenommenem ähnlichem Fahrprofil pro Tonne Fahrzeuggewicht und Kilometer für jede Technologie annähernd gleich ist. Lediglich für die nicht rekuperationsfähigen Technologien der Dieseltriebzüge und Oberleitungs-/ Diesel-Hybride muss ein Faktor, der die nicht wiedernutzbare Energie repräsentiert, aufgeschlagen werden. Sind die mechanischen Grundenergiebedarfe am Rad derart bestimmt, kann wiederum über statische Wirkungsgradketten der Energiebedarf aus der jeweiligen Energiequelle berechnet werden. Im Ergebnis bildet sich für jede Technologie und jede Linie ein Energiebedarfswert, der in kWh/km angegeben werden kann und den Energiebedarf ab Tankeingang bzw. Stromabnehmer darstellt.

Der Energiebedarfswert wird dann entsprechend der jeweils vorhandenen Energiebereitsteller (Dieselmotor (mit Generator), Oberleitung, Ladestation, Brennstoffzelle) technologie- und linienspezifisch aufgeteilt. Ergebnis ist ein Energiewert in kWh der Abnahmemenge je Erzeuger.

Vorteil des Verfahrens ist die Möglichkeit des Verzichts auf Simulationen und die daraus folgende schnelle und trotzdem ausreichend valide Ermittlung der Einsparpotentiale einzelner Technologien auf einer Linie oder im Netz.

### 6.2.3 Überführung in CO<sub>2</sub>-Emissionen je Linie bzw. Gesamtnetz

Der Energiewert je Erzeuger in kWh aus Abschnitt 6.2.2 wird mit den CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren in gCO<sub>2</sub>/kWh aus Abschnitt 6.2.1 multipliziert, sodass sich je Linie und Technologie ein Emissionswert pro Jahr Vertragslaufzeit ergibt. Diese Jahreswerte werden beispielsweise über einer Vertragslaufzeit von 15 Jahren (max. 22,5 Jahre) aufsummiert. Längere Zeiträume werden nicht berücksichtigt, da die Prognosen dann zu geringe Präzision aufweisen.

## 7 Zusammenfassung und Fazit

### 7.1 Betrieblich-technische Bewertung

Bereits die Studie der TU Dresden für die BEG im Jahr 2017 hat gezeigt, dass (alternativ angetriebene) Elektrofahrzeuge einschließlich der Infrastruktur den Bereich der Wirtschaftlichkeit von Dieselfahrzeugen erreichen können. Außerdem hatte sich gezeigt, dass erste Fahrzeugplattformen eine Weiterentwicklung hin zu alternativen Antrieben bereits durchlaufen hatten und kurz vor den Prototypenprobungen standen.

Als Fazit auf die Frage, welche moderne Antriebstechnologie wirtschaftlich unter welchen Randbedingungen am geeignetsten erscheint, seien an dieser Stelle die Ergebnisse der vorangegangenen Studie aus dem Jahr 2017 nochmals zusammengefasst. Damals konnte festgestellt werden:

- Langfristig ist für Regionalverkehre mit mindestens 1-h-Takt und Fahrzeuggrößen >2 Einheiten die Streckenelektrifizierung am wirtschaftlichsten.
- Für schnelle Effekte sind Konzepte auf Basis vorhandener Antriebstechnologien (Oberleitungs-/ Diesel-Hybrid) zweckmäßig, wenn es bereits Elektrifizierungsanteile gibt.
- Mittelfristig sind Konzepte mit batteriegestützten elektrischen Antrieben (Oberleitungs-/ Batterie-Hybrid, Diesel-/ Batterie-Hybrid) am günstigsten, sofern sich Elektrifizierungsanteile nicht schnell erhöhen lassen.
- Für Verkehre ohne Elektrifizierungsperspektive sind Diesel-/ Batterie-Hybridfahrzeuge wirtschaftlicher als ein reiner Dieselfahrzeugbetrieb.
- Wenn sich die Austauschkosten für Brennstoffzellen-Stacks und Traktionsbatterien deutlich verringern lassen, werden auch Brennstoffzellen-Fahrzeuge wirtschaftlicher sein als Dieselfahrzeuge.

Weitere ähnliche Studien der Professur für Elektrische Bahnen ergaben seitdem, dass diese wirtschaftlich wichtigen Ergebnisse weiterhin Bestand haben, die Fülle von am Markt befindlichen Fahrzeugplattformen, die auch als Oberleitungs-/ Batterie-Hybridfahrzeuge oder Wasserstoff-/ Batterie-Hybridfahrzeuge lieferbar sind, aber deutlich zugenommen hat. Die aktive Entwicklung von Diesel-/ Batterie-Hybridfahrzeugen wurde hingegen nicht weiter fortgeführt. Oberleitungs-/ Diesel-Hybridfahrzeuge werden durch Alstom zwar aktuell für den deutschen Markt (für Rheinland-Pfalz, Baden-Württemberg und Saarland) adaptiert, jedoch verbleiben weiterhin die Dieselmotoren für nicht elektrifizierte Strecken in den Fahrzeugen, verbunden mit Geräusch-, CO<sub>2</sub>- und Schadstoffemissionen.

Umfangreiche öffentliche Erprobungsträgerfahrten der Firma Alstom mit Fahrzeugen des Typs iLint und der Firma Siemens mit Fahrzeugen des Typs Desiro Mainline CityJet Eco haben außerdem gezeigt, dass alternative Antriebssysteme auch für den täglichen Einsatz

technisch und betrieblich geeignet sind. Weiterhin ausstehend ist der Nachweis, dass die prognostizierten Lebensdauern für Hochtechnologiekomponenten letztendlich erreicht werden können.

Die vorliegende Studie zeigt, dass für einen umfangreichen Markteintritt alternativer Antriebe ausreichend Marktteilnehmer verfügbar sind, die den Wettbewerb bei Ausschreibungen sicherstellen. Auch die Infrastrukturkonzepte sind sowohl technisch als auch überwiegend regulatorisch entworfen und teilweise bereits im Bau. Weiterer Präzisions- bzw. Validierungsbedarf besteht vor allem im Bereich der Kostenstruktur und Lebensdauer von Hochtechnologiekomponenten.

Allerdings bringen alternative Antriebe Einschränkungen bei Fahrdynamik und Reichweite mit sich. Für sehr kleine bzw. sehr leistungsstarke Fahrzeuge mit Neigetechnik existieren bisher noch keine praxistauglichen Lösungen.

Trotz valider technischer und wirtschaftlicher Angaben in dieser Studie zeigt sich auch, dass letztendlich nur eine betrieblich-wirtschaftliche Bewertung für einzelne Linien und Netze eine Entscheidung für eine alternative Antriebstechnologie oder die Vollelektrifizierung ermöglicht, da insbesondere Kostenparameter für die Infrastruktur maßgeblich von der vorhandenen Infrastruktur abhängig sind. Hierfür bietet die Studie aus dem Jahr 2017 eine gute Basis, die mit der umfangreich erweiterten Daten- und Erfahrungsbasis der Professur für Elektrische Bahnen eine Aktualisierung netz- und streckenkonkret erfahren sollte. Die technische Machbarkeit für die Einführung der neuen Technologien ist vorhanden. Nun kann die Technologieentscheidung pro Netz umgesetzt werden.

## 7.2 Ökologische Bewertung

In der Studie wurden die betrieblichen CO<sub>2</sub>-Emissionen aller Antriebstechnologien miteinander vergleichend dargestellt.

Oberleitungs-Fahrzeuge und Oberleitungs-/ Batterie-Hybride erreichen jeweils eine Einsparung von ca. 90 % der Emissionen im Vergleich zur Dieseltraktion bei 25 Jahren Betrachtungsdauer. Ihnen kommt der fortschreitende Prozess der Erneuerung der Energieerzeugung zugute.

Auch Wasserstoff-/ Batterie-Hybride erreichen je nach Herstellungsverfahren ca. 42 – 74 % Einsparung.

Das Ziel, den Betrieb von SPNV-Netzen deutlich ökologischer zu gestalten, kann also durch alle drei Technologien erreicht werden. Sie bieten zudem die Möglichkeit zukünftig nahezu vollständig emissionsfrei zu verkehren. Die Untersuchung bestätigt die ökologischen Ambitionen der Antriebstechnologiemstellung der BEG.





Provinciale Staten

**Clustercode** PP

**Ons kenmerk** DOC-00628257

**Bijlage(n)** -

**Uw kenmerk** -

**Maastricht** 26 maart 2024

**Verzonden** 27 maart 2024

## Onderwerp

Mededeling portefeuillehouder inzake voortgang moties 2951 en 2987 Maaslijn

Geachte Staten,

Op 19 december 2022 heeft u naar aanleiding van een debat over de Maaslijn motie 2951 (De Maaslijn is een Rijksproject) aangenomen. Kern van deze motie is uw oproep richting het college van Gedeputeerde Staten om met het Rijk tot overeenstemming te komen over het dragen van alle meerkosten Maaslijn vanaf oktober 2021, en over het overdragen van het project Maaslijn aan het Rijk. Zoals meermaals met u gedeeld heeft het ministerie van IenW destijds steeds het standpunt ingenomen dat eerst de aanbestedingsresultaten moesten worden afgewacht, alvorens over bovenstaande oproep in gesprek te treden. Naar aanleiding van dit standpunt van Rijkszijde hebben uw Staten op 29 september 2023 met motie 2987 de boodschap uit de eerdere motie 2951 nogmaals bekrachtigd. Met deze mededeling informeren wij u over de uitkomsten van de overleggen met het Rijk.

### *Overleg en lobby*

Vanuit ons college heeft meerdere malen, en vanuit meerdere portefeuilles overleg plaatsgevonden met zowel de minister als staatssecretaris van IenW over de Maaslijn, en de oproep uit uw moties. Daarnaast zijn via meerdere lijnen contacten gelegd met kamerleden en zijn er kamervragen over deze kwestie gesteld. Aanvankelijk stelden de bewindspersonen van IenW zich op het standpunt dat eerst de aanbestedingsresultaten moesten worden afgewacht om zicht te krijgen op de impact en omvang van de vraagstelling uit Limburg. Na de aanbesteding hebben de gesprekken en lobby richting het ministerie echter niet tot nieuwe of andere resultaten geleid. IenW stelt zich op het standpunt dat alle bij de Bestuursovereenkomst Maaslijn en het Addendum op deze bestuursovereenkomst betrokken partners bewust en relatief recent met de vigerende afspraken hebben ingestemd. Daarbij komt dat vanuit het ministerie wordt gesteld dat er gelet op de gehele projectenportefeuille van IenW, en de daarin breed optredende financiële opgaven en prijsstijgingen, geen ruimte is om aanvullende financiële inspanningen te leveren voor het project Maaslijn. Ook is IenW niet bereid om bestaande of eventuele nieuwe risico's geheel over te nemen. Tot slot is IenW niet bereid tot overname van het project vanwege daarmee samenhangende fiscale gevolgen die tot € 30 mln. meerkosten voor het ministerie kunnen oplopen.



## *Juridische toets*

Naast onze inspanningen om via bestuurlijk overleg dan wel via lobby tot aangepaste afspraken over de Maaslijn te komen, hebben wij zowel intern als met een externe analyse onze juridische positie richting het Rijk tegen het licht gehouden. Uit deze analyses blijkt dat het Rijk en ProRail tot op heden juridisch niet zijn tekortgeschoten in de nakoming van de met de Provincie gemaakte afspraken. Ook hebben zij tot op heden niet onrechtmatig gehandeld jegens de Provincie. Zij kunnen dan ook niet met succes aansprakelijk worden gesteld voor de vertragingsschade. Dit laat onverlet dat het Rijk conform de Bestuursovereenkomst Maaslijn en het Addendum op deze bestuursovereenkomst voor 50% dient bij te dragen in de meerkosten welke een gevolg zijn van de langere dieseexploitatie Maaslijn.

## *Financieel beeld*

Het door uw Staten genomen aanvullende kredietbesluit Maaslijn van 29 september 2023 is voldoende voor het opvangen van de indexeringskosten tot en met 2027 en als reservering voor enkele grote projectrisico's. Wij zullen u via de IPML rapportages hierover verder informeren nadat de belangrijkste projectrisico's (vergunningverleningen en behandeling Provinciaal Inpassingsplan door de Raad van State) zijn gemitigeerd. Naar verwachting kan dit begin 2025 plaatsvinden.

## *Afdoening moties*

Alles overziende zien wij op dit moment geen mogelijkheid om tot invulling van uw oproep uit de moties 2951 en 2987 te komen. Mochten er na de vorming van een nieuw kabinet mogelijkheden ontstaan om alsnog tot (gehele of gedeeltelijke) invulling van uw oproep te komen dan zullen wij daar op dat moment actie op ondernemen. Met deze mededeling beschouwen wij de moties 2951 en 2987 als afgedaan.

Gedeputeerde Staten van Limburg  
namens dezen,

J.J.M. Kuntzelaers  
Gedeputeerde Provincie Limburg  
Cultuur & Erfgoed, Mobiliteit, Landbouw