



Wasserstoffrangier- lokomotive Duisport

Vorstudie

24.02.2022

**Deutsches Zentrum für Luft-
und Raumfahrt e.V.**

Institut für Fahrzeugkonzepte



Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

Institut für Fahrzeugkonzepte
 Pfaffenwaldring 38-40
 D-70569 Stuttgart

Institutsleitung
 Prof. Dr. Tjark Siefkes
 Tel.: +49 30 67055 691
 Tjark.Siefkes@dlr.de

Projektleitung
 Marcel Konrad
 Tel.: 0711 6862 497
 marcel.konrad@dlr.de

Titel	Wasserstoffrangierlokomotive Duisport Vorstudie		
Autoren	<p>Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) Institut für Fahrzeugkonzepte, Pfaffenwaldring 38-40, D-70569 Stuttgart Kapitel: 1, 2, 3, 4, 5.2, 6, 7 <i>Holger Dittus, Victoria Jäger, Marcel Konrad, Johannes Pagenkopf</i></p> <p>Duisburger Hafen AG (Duisport) Alte Ruhrorter Straße 42–52, 47119 Duisburg Gesamtkoordination, Datenbereitstellung, Kapitel 7 und Review <i>Alexander Garbar, Jan-Christoph Maaß</i></p> <p>Zentrum für BrennstoffzellenTechnik GmbH (ZBT) Carl-Benz-Straße 201, 47057 Duisburg Kapitel 5.1 <i>Georg Dura</i></p>		
Zitieren als	Konrad, Marcel; Pagenkopf, Johannes; Jäger, Victoria Carolin; Dittus, Holger; Dura, Georg; Garbar, Alexander; Maaß, Jan-Christoph (2022); Vorstudie Wasserstoffrangierlokomotive Duisport, https://doi.org/10.5281/zenodo.6274512 .		
Versions-Nr.	Änderung	Gesamt-Seitenzahl	Datum
1	Endversion	107	Datum wie Deckblatt

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	6
Ausgangslage, Ziele und Projektstruktur	14
1 AP 1 Aktueller Betrieb und Ableitung Anforderungen an Wasserstofflokomotiven	16
1.1 Charakterisierung des heutigen dpr-Betriebs mit Dieselerangierlokomotiven	16
1.1.1 Aktueller Rangierlokbestand der dpr	16
1.1.2 Infrastruktur und Rangierverkehr innerhalb Duisport	17
1.1.3 Relationen im Streckenregionalverkehr	18
1.1.4 Einsatzprofile der Dieselerangierlokomotiven	20
1.2 Konzeptionelle Anforderungen an Wasserstoff-Brennstoffzellen-Rangierloks.....	23
1.2.1 Betriebliche Anforderungen	23
1.2.2 Fahrzeugaufbau und technische Eigenschaften.....	23
1.3 Leistungs- und Energieanforderungen (Auswertung Lastprofile).....	25
1.3.1 Datengrundlage und Methodik	25
1.3.2 Datenaufbereitung (Pre-Processing).....	26
1.3.3 Ergebnisse (Post-Processing).....	27
2 AP 2 Stand der Technik	37
2.1 Brennstoffzellensysteme	37
2.1.1 Benötigte Baugruppen eines Brennstoffzellensystems	37
2.1.2 Beispiele für marktverfügbare Brennstoffzellensysteme	37
2.2 Batteriesysteme	39
2.2.1 Benötigte Baugruppen eines Batteriesystems	39
2.2.2 Beispielhafte Batteriesysteme marktverfügbarer Hersteller	40
2.3 Wasserstoffspeichersysteme	41
2.3.1 Wasserstoffspeichersysteme	41
2.3.2 Betankungsschnittstelle	43
2.4 Leistungselektronik und weitere Komponenten	43
2.5 Spezifische Kennzahlen der Antriebsstrangkomponenten	44
3 AP 3 Auslegung Brennstoffzellenhybridantriebs	45
3.1 Vorgehensweise und Betriebsstrategie	45
3.2 Konkretisierung der Leistungs- und Energieanforderungen an die BZ-Hybrid-Antriebsstrangkomponenten	46

3.3	Auslegung Brennstoffzellenleistung und Batteriekapazitäten für alle Fahrzyklen ..	48
3.4	Exkurs: Überlegung zu Batterie-Oberleitungs-BiMode	49
4	AP 4 Packaging und Integrationskonzept Bestandslok vs. Neubaulok	51
4.1	Methodik der fahrzeugbasierten Auslegungen	51
4.2	Umbaukonzeption.....	52
4.2.1	Komponentenstrategie Umbau - Allgemeine Randbedingungen.....	52
4.2.2	Umbaukonzept – MaK G 1206	53
4.2.3	Umbaukonzept – Vossloh Locomotives DE 18.....	57
4.3	Auslegungs- und Optimierungsstrategie.....	60
4.3.1	Differenzierung der Auslegungen.....	60
4.3.2	Entwicklung und Optimierung von Auslegungskonzepten für gruppierte Fahrzyklen	60
4.4	Auslegungsergebnisse	62
4.4.1	Rangierlastiger Mischbetrieb BZ-Hybrid	62
4.4.2	Streckenregionalverkehr BZ-Hybrid	64
4.4.3	Streckenregionalverkehr Oberleitungs-BZ-Hybrid-BiMode	66
4.4.4	Implikationen für die Neukonstruktion einer Lokomotive	69
4.5	Übertragbarkeitsanalyse Umbau	70
4.5.1	Vorüberlegungen	70
4.5.2	Betrachtung konkreter Fahrzeuge (Auswahl)	71
5	AP 5 Sicherheit und Zulassung	76
5.1	Gefährdungsanalyse.....	76
5.2	Zulassungsvoraussetzungen.....	78
5.2.1	Genereller Genehmigungsprozess und Zuständigkeiten	78
5.2.2	Geltende Normen und Standards und Sicherheitsnachweise.....	79
5.2.3	Besonderheiten der Zulassung einer Umbaulok im Vergleich zur Neubaulok	80
6	AP 6 Kostenabschätzung Förderprojekt und betriebliche Analyse	84
6.1	Anpassung Betriebskonzept.....	84
6.2	Kostenschätzung.....	85
6.2.1	Umbau Bestandsfahrzeug	85
6.2.2	Neufahrzeug	87
6.2.3	Energiekosten Wasserstoff/Strom – Hochrechnung	89
6.2.4	Infrastruktur	91

7	AP 7 Bewertung und Handlungsempfehlungen	92
7.1	Bewertung Konzepte.....	92
7.2	Handlungsempfehlung und Skizzierung Umsetzungskonzepte.....	94
7.2.1	Handlungsempfehlung Duisport.....	94
7.2.2	Skizzierung Umsetzungskonzepte	95
7.2.3	Handlungsempfehlungen für weitere Branchenakteure.....	99
8	Literatur	100
9	Abkürzungsverzeichnis	102
10	Abbildungsverzeichnis	104
11	Tabellenverzeichnis	107

Zusammenfassung

Die Projektpartner in Duisburger Hafen AG, das DLR Institut für Fahrzeugkonzepte und das Zentrum für BrennstoffzellenTechnik (ZBT) haben im Rahmen einer durch das Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie Nordrhein-Westfalen (MWIDE NRW) geförderten Vorstudie die **Machbarkeit von Lokomotiven mit Wasserstoff-Brennstoffzellenhybridantriebssystem** (BZ-Hybrid bzw. BZH) für den typischen Einsatz der Duisport Rail (dpr) im Duisburger Hafengebiet und auf dem öffentlichen Netz untersucht.

Auf Basis der Messdaten einer Rangierlokomotive, Typ Vossloh Locomotives DE 18, die von der Duisport Rail (dpr), dem Eisenbahnverkehrsunternehmen des Duisburger Hafens, betrieben wird, konnten die energetischen und leistungsbezogenen Anforderungen an den Brennstoffzellenhybridantrieb ermittelt werden. Im Fokus der Untersuchungen stand die Analyse der grundsätzlichen Eignung des Wasserstoff-Brennstoffzellenantriebs für den dpr-Betrieb. Die für einen Umbau untersuchten Referenzfahrzeuge waren die bei der dpr eingesetzten und im Markt weit verbreiteten Dieselerlokomotiven MaK G 1206 und Vossloh Locomotives DE 18. Zusätzlich wurde ein generisches Neufahrzeug betrachtet, losgelöst von etwaigen Bestandsbaugruppen der vorgenannten Lokomotiven. Auf Grundlage der Messdaten wurden zwei typische **Einsatzprofilkategorien** der Lokomotiven im dpr-Einsatz gebildet:

- der **rangierlastige Mischbetrieb** (Betrieb auf den Gleisanlagen der Duisport-Hafenbereiche sowie kurze Streckenfahrten zwischen den Duisport-Hafenbereichen) und
- der **Streckenregionalverkehr** (Betrieb in den Hafenbereichen sowie bis zu 100 km lange, durchgängige Streckenfahrten zu Anschlussbahnen von Chemie- und Logistikterminals).

Für beide Einsatzprofilkategorien wurden jeweils **BZ-Hybridantriebe (BZH) dimensioniert**. Dabei wurden spezifische Leistungs- und Energiekennzahlen von im Eisenbahnbereich marktverfügbaren Komponenten angesetzt. Es zeigte sich, dass für den **rangierlastigen Mischbetrieb** Brennstoffzellenleistungen von 125 kW sowie 43 kg Wasserstoff ausreichen um die Maximalanforderungen aller betrachteter Einzelfahrzyklen zu erfüllen. Für die Einzelzyklen des **Streckenregionalverkehrs** wurde eine Brennstoffzellenleistung von 1058 kW und eine Mindest-Tankkapazität von 170 kg berechnet. Bei den Auslegungen für den *rangierlastigen Mischbetrieb* konnte aufgrund der kleinen Brennstoffzellenleistungen und Batteriekapazitäten der verbleibende Bauraum mit zusätzlichen Wasserstofftankreserven aufgefüllt werden.

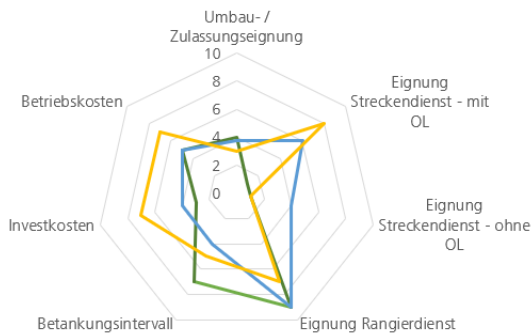
Der auf einer typischen vierachsigen Mittelführerhaus-Rangierlokomotive zur Verfügung stehende Bauraum für die Baugruppen eines BZ-hybriden Antriebsstranges ist vor allem hinsichtlich des mitführbaren Wasserstoffs und damit der erzielbaren Reichweite limitiert. Insbesondere im Streckeneinsatz muss wegen der hohen Verbräuche in Verbindung mit dem limitierten Tankvolumen häufig getankt werden, was bei der Lokomotiveinsatzplanung berücksichtigt werden muss. Darüber hinaus müssten Betankungsmöglichkeiten für Wasserstoff an verschiedenen Standorten geschaffen werden. Auch die Gewinnung weiterer Bauraumpotentiale zur Erweiterung der Tankkapazitäten sollte geprüft werden. So könnten beispielsweise die Seitengänge (ganz oder zumindest teilweise) für Energiewandler- und Energiespeicherkomponenten des neuen Antriebsstranges genutzt werden.

Da der Streckenbetrieb durch hohe Leistungsanforderungen gekennzeichnet ist, dieser im dpr-Einsatzbereich aber gleichzeitig unter Fahrdraht stattfindet, wurde zusätzlich die Eignung einer **BiMode-Brennstoffzellenlokomotive mit Oberleitungseinheit** in die Untersuchungen einbezogen (BZH-OL). In diesem Fall erfolgt die Auslegung des Brennstoffzellenhybridantriebs für den Rangier- und Mischbetrieb (125 kW Brennstoffzelle, 165 kWh Batterie, ca. 2000 kW elektrische Leistung im Fahrdrahtbetrieb), womit -oberleitungsfreie Autarkie in diesem Einsatzfall sichergestellt ist. Gleichzeitig besteht die Möglichkeit aufgrund der im Vergleich zu einem reinen BZH geringer dimensionierten BZH-Einheit zusätzliche Wasserstofftankkapazitäten mitzuführen und dadurch die Tankintervalle im Rangierbetrieb zu vergrößern.

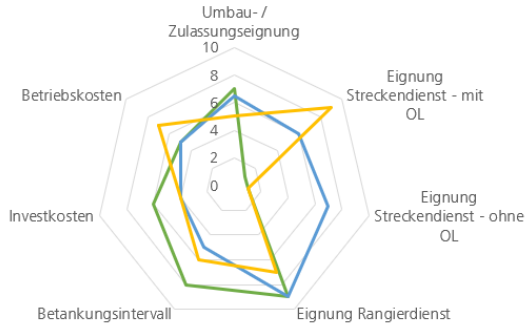
Ferner wurden die Rahmenbedingungen einer Gefährdungsanalyse und die geltenden Zulassungsvoraussetzungen für eine Brennstoffzellenhybrid-Lokomotive untersucht. Auf Grund des Neuheitscharakters von Brennstoffzellenhybridantrieben im Lokomotivbereich ist mit dem Erfordernis umfangreicher Nachweise für den Erhalt der **Fahrzeuggenehmigung** zu rechnen. Die Umrüstbarkeit von Bestandslokomotiven auf Brennstoffzellenantrieb ist grundsätzlich möglich, wobei im Einzelfall der Umrüstungsaufwand je nach Bestandslokomotivarchitektur (u.a. Art der Leistungsübertragung) variiert. In Bezug auf die Umrüstung von Bestandslokomotiven auf Brennstoffzellenhybridantrieb zeigt sich ferner, dass mit Inkrafttreten des 4. Eisenbahnpakets der EU die Hürden für eine Umrüstung nochmals gestiegen sind. Sowohl bei Neufahrzeugen als auch bei Umrüstungen ist mit Entwicklungs- und Genehmigungszeiträumen von zusammen mindestens vier Jahren zu rechnen.

Die **Kosten** für Material, Montage und Inbetriebnahme der untersuchten Brennstoffzellenhybridlokomotiven wurden mit ca. 3 bis 4 Mio. Euro je nach Konfiguration für die Szenarien Neubau und Umrüstung abgeschätzt. Im Fall der Umrüstung enthält die Kostenschätzung ca. 1 Mio. € für die Miete einer Ersatzlokomotive. Hinzu kommen jeweils Einmalkosten für Entwicklung, Test und Genehmigung, je nach Entwicklungs- bzw. Änderungsumfang in Höhe von mind. 4 bis über 20 Mio. €. Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen wurden die Varianten *Umbau MaK G 1206*, *Umbau Vossloh Locomotives DE 18* sowie *Neufahrzeug* jeweils für den dpr-spezifischen Einsatz hinsichtlich technischer, ökonomischer sowie entwicklungs- und zulassungsbezogener Kriterien **bewertet**. Eine Bewertung mit 10 stellt dabei die bestmögliche Eignung bzw. Bewertung dar.

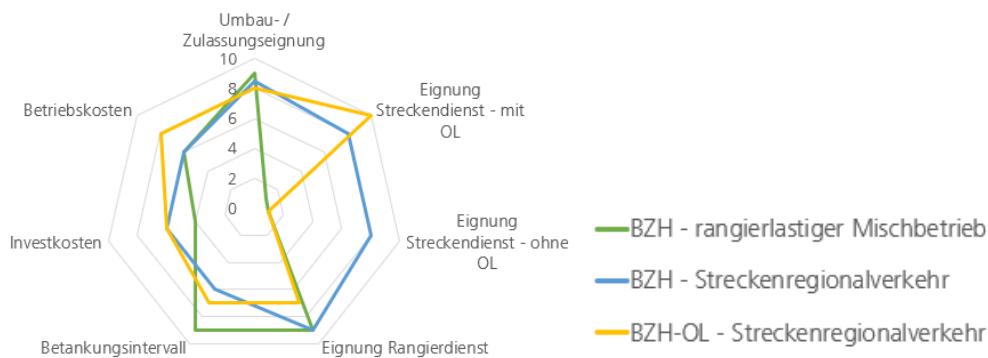
Umbau G 1206



Umbau DE 18



Neufahrzeug























Bewertung Umbau/Neubau für die Antriebssysteme und dpr-Einsatzgebiete

In Bezug auf die Umrüstung von Bestandsdiesellokomotiven bietet die Vossloh DE 18 aufgrund ihrer bestehenden elektrischen Leistungsübertragung grundsätzlich eine gute Basis für eine Umrüstung auf Brennstoffzellenbetrieb. Weniger gut geeignet, wenn auch grundsätzlich möglich, ist die Umrüstung auf Basis einer Mak G 1206 mit einer bestehenden hydraulischen Leistungsübertragung, da hier größere Anpassungen erforderlich sind und der nutzbare Bauraum im Vergleich zur DE 18 geringer ausfällt. Die **größte Flexibilität** sowohl für den BZH als auch für den BZH-OL bietet jedoch grundsätzlich ein entsprechend auf das Antriebssystem **optimiertes Neufahrzeug** bzw. ein Derivat einer bestehenden Lokomotivplattform.

Zur Gegenüberstellung der grundsätzlichen Eignung der untersuchten Antriebskonzepte mit den aus dem dpr-Betrieb abgeleiteten Einsatzfeldern wurde eine Bewertungsmatrix erstellt. Dabei wurde für den Streckenregionalverkehr zusätzlich danach unterschieden, ob im Streckendienst eine Oberleitung vorhanden ist oder nicht.

Im Streckenregionalverkehr mit hohem Oberleitungsanteil ist die Variante BZH-OL-BiMode am besten geeignet. Für Streckenfahrten ohne Oberleitung wird ein BZH auf Basis eines Neufahrzeugs empfohlen. Da der rangierlastige Mischbetrieb in der Regel nicht unter Fahrdrabt stattfindet, sind BZH-Antriebe besser geeignet als BiMode-Fahrzeuge.

Antriebs-Einsatzfeld-Fit Uneingeschränkt geeignet:  Ungeeignet: 	Rangierlastiger Mischverkehr (Rangierdienst und kurzer Streckendienst)	Streckenregionalverkehr inkl. rangierlastiger Mischverkehr - <u>ohne</u> Oberleitung	Streckenregionalverkehr inkl. rangierlastiger Mischverkehr - <u>mit</u> Oberleitung
Umbau dieselhydraulische Lok G 1206			
BZH			
BZH-OL			
Umbau dieselelektrische Lok DE 18			
BZH			
BZH-OL			
Neufahrzeug			
BZH			
BZH-OL			

Eignungsmatrix der untersuchten Variantenkombinationen für die Anwendung bei Duisport (technische, wirtschaftliche und zulassungsbezogene Aspekte)

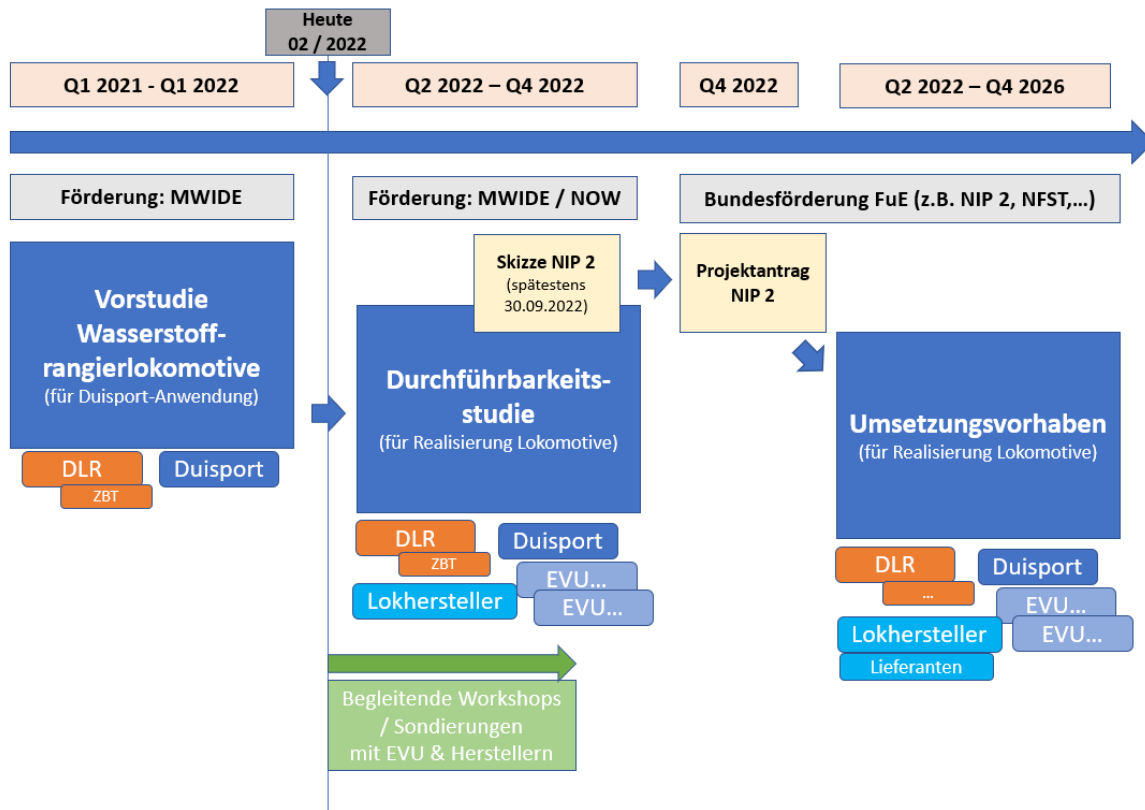
Für den spezifischen Fall von Duisport ist ein Neubau einer entsprechenden Lokomotive einem Umbau vorzuziehen, wobei ein Umbau einer Bestandslokomotive nicht grundsätzlich ausgeschlossen ist. Es wird die **Entwicklung** eines **modularen Antriebskonzepts** auf Basis eines Neufahrzeuges empfohlen. Dies ermöglicht es, dass auf einer einheitlichen Basislokomotivplattform sowohl der **BZH** für den **rangierlastigen Mischverkehr** als auch der **BZH-OL** für den kombinierten **Streckenregionalverkehr unter Oberleitung inkl. rangierlastigen Mischverkehr** realisiert würde.

Da die Wirtschaftlichkeit von Neuentwicklungen im Eisenbahnbereich erst ab einer kritischen Mindestanzahl an Fahrzeugen gewährleistet ist (u.a. zur Amortisation der Einmalkosten und wegen dem erforderlichen Aufwand der Baureihenbetreuung etc.), sollten Fahrzeugbedarfe betreiberübergreifend gebündelt werden. Aktuell gibt es in Deutschland gemäß der Studie „Machbarkeitsanalyse alternative Antriebe“ im Auftrag der NOW etwa 2800 Rangierlokomotiven und das Durchschnittsalter der Rangierlokflotte der DB Cargo betrug 42 Jahre im Jahr 2019. Daraus ergeben sich über die nächsten Jahre in Deutschland Absatzpotentiale über alle Antriebsarten hinweg von 20-60 neuen und bis zu 25 modernisierten Lokomotiven pro Jahr (Pagenkopf et al. 2022). Folglich besteht in der Branche ein substantzieller Flottenerneuerungsbedarf.

Seitens der Autorenschaft werden konkret die folgenden **weiteren Schritte empfohlen**:

- a) **Branchenworkshop** zum Abgleich der Duisport-spezifischen Fahrzeugauslegung mit Einsatzprofilen anderer Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU),
- b) **Sondierungsgespräche mit Schienenfahrzeugindustrie**,
- c) Initiierung einer vertiefenden **Durchführbarkeitsstudie** mit Herstellerbeteiligung sowie ggf. weiteren EVU als Vorbereitung eines Umsetzungsvorhabens (Ergebnis u.a.: gestufte, modulare Auslegungsgrößen der Antriebskomponenten),
- d) Zusammenstellung eines Konsortiums für ein **gefördertes Umsetzungsvorhaben**.

Die weiteren Schritte für ein Realisierungsvorhaben sind in der nachfolgenden Abbildung mit einer idealen Zeitschiene skizziert.



Skizzierung der nächsten Schritte für die Realisierung einer Brennstoffzellen-Lokomotive

Darüber hinaus werden an Politik und Industrie folgende Empfehlungen gegeben:

- Schaffung geeigneter Rahmenbedingungen für Umsetzungsvorhaben mit finanzieller Unterstützung der Anlaufkosten zur Risikominderung, z.B. im Rahmen von sektorenübergreifenden Reallaboren,
- Verstetigung von Förderprogrammen für Entwicklung und Beschaffung von BZ-Lokomotiven und Tankstelleninfrastruktur sowie die finanzielle Ausstattung mit ausreichenden Mitteln, auch für die Mehrkosten im Betrieb,
- Verstetigung der Forschungs- und Entwicklungsprojektförderung für Hersteller und Forschungseinrichtungen im europäischen Raum,
- Entwicklung modularer Fahrzeugplattformen für verschiedene Null-Emissions-Antrieben und variablen Leistungsklassen (Fahrzeughersteller),
- Schaffung von branchenweiten Standards für bahnzugelassene Systeme,
- Demonstration baureihenübergreifend anwendbarer Umbaukonzepten von Diesel- auf Brennstoffzellenhersteller (Umrüster),
- Weiterentwicklung der Technologiekomponenten Brennstoffzelle, Batterie und Wasserstofftanks.

Summary (English)

The project partners in Duisburger Hafen AG, the DLR Institute of Vehicle Concepts and the Center for Fuel Cell Technology (ZBT) have investigated the feasibility of locomotives with hydrogen fuel cell hybrid powertrains (FCH) for typical use by Duisport Rail (dpr) in the Duisburg port area and on the public rail network. The preliminary study was funded by the Ministry of Economic Affairs, Innovation, Digitalization and Energy of North Rhine-Westphalia (MWIDE).

Based on the measurement data of a diesel powered shunting locomotive type Vossloh Locomotives DE 18 operated by Duisport Rail (dpr), the railway undertaking of the Port of Duisburg, energy and performance-related requirements of the fuel cell hybrid drive system were derived. The analysis focused on investigating the fundamental feasibility of hydrogen fuel cell powertrains for dpr operation. The reference locomotives examined for fuel cell feasibility were the MaK G 1206 and Vossloh Locomotives DE 18 diesel shunting locomotives which are used by dpr and are also widely used across the railway sector. In addition, a generic new locomotive was considered, independent from the aforementioned existing locomotives. On the basis of the measured and processed data, two typical operating profile categories of locomotives in dpr service were formed:

- Firstly, shunting-intensive mixed operation (operation on the tracks of the Duisport port areas as well as short main line runs connecting the port areas operated by Duisport).
- Secondly, regional freight rail services (including shunting-intensive mixed operation in the port areas as well as up to 100 km long main and secondary line trips to sidings of chemical and logistics terminals nearby).

FCH powertrains were dimensioned for both application profile categories. Specific performance and energy parameters of components available on the market in the rail sector were applied. It was shown that for the shunting-intensive mixed operation, fuel cell ratings of 125 kW and 43 kg of hydrogen are sufficient to meet the maximum requirements of all the individual driving cycles considered. A fuel cell rating of 1058 kW and a minimum refueling capacity of 170 kg were calculated for the most demanding individual cycles of regional freight rail services. In the layouts for shunting-intensive mixed operation, the low fuel cell power and battery capacities open up additional hydrogen tank reserves for the remaining installation space.

Installation space available on a typical four-axle center-cab shunting locomotive for the assemblies of a FC hybrid powertrain is limited, especially with regard to hydrogen storage tanks and thus the achievable range. Particularly in mainline operation, this significantly shortens the refueling intervals, which requires adjustments in locomotive allocation planning. In addition, hydrogen refueling facilities would have to be created at various sites. Supplementary, added installation space potentials on locomotives should be investigated. Since mainline operation is characterized by high power requirements, but at the same time takes place under 15 kV, 16.7 Hz overhead catenary (overhead wire) in the dpr application area, the suitability of a bi-mode fuel cell locomotive with an overhead wire unit was also included in the investigations (FCH-bi-mode). Here, the fuel cell hybrid powertrain is designed for shunting-intensive mixed operation (125 kW fuel cell, 165 kWh battery, approximately 2000 kW electrical power in overhead wire operation). This configuration allows installation of additional hydrogen tank capacities due to the smaller dimensions of the fuel cell unit compared to a FCH-only configuration, thus extending the refueling intervals in shunting operations.

Furthermore, the study analyzed the framework conditions of a hazard analysis and the applicable approval requirements for a fuel cell hybrid locomotive. Due to the innovative character of fuel cell hybrid powertrains in the locomotive sector, we expect that extensive certificates will be required to obtain vehicle approval. In principle, it is possible to convert existing locomotives to fuel cell propulsion, although in individual cases the conversion effort varies depending on the architecture of the existing locomotive (e.g. type of power transmission). With regard to the conversion of existing locomotives to fuel cell hybrid powertrains, it is also apparent that the barriers for retrofit solutions have risen again with the entry into force of the EU's 4th railroad package. Development and approval periods of at least four years can be expected for both new vehicles and conversions.

The costs for materials, assembly and commissioning of the fuel cell hybrid locomotives investigated were estimated at approx. 3 to 4 million euros depending on the configuration for the new construction and retrofit scenarios. In the case of retrofit, the cost estimate includes about €1 million for the lease of a replacement locomotive. In addition, there are one-off costs for development, testing and approval, depending on the scope of development or modification, of at least €4 million to over €20 million. Based on the findings, the variants MaK G 1206 retrofit, Vossloh Locomotives DE 18 retrofit and new vehicle were each evaluated for dpr-specific use in terms of technical, economic, development and approval-related criteria.

With regard to the conversion of existing diesel locomotives, the Vossloh DE 18 offers a good retrofit basis to fuel cell operation due to its existing electrical power transmission. Less suitable, although possible in principle, is retrofitting a Mak G 1206 (hydrodynamic power transmission), since it requires more comprehensive modifications with smaller usable installation than with the DE 18. However, the greatest flexibility for both the FCH and the FCH-bi-mode is offered by a newly developed locomotive optimized for a fuel cell hybrid powertrain or a fuel cell optimized derivative of an existing newly build locomotive platform.

The FCH-bi-mode variant is most suitable for regional freight rail services with a high proportion of overhead lines. For line haulage without overhead contact line, a FCH based on a new vehicle is recommended. Since shunting-intensive mixed operation does not usually take place under overhead wire, FCH drives are more suitable than bi-mode vehicles.

For the specific case of Duisport, a purpose-fit design of a new locomotive was deemed more preferable compared to a retrofit, although a conversion of an existing locomotive is not ruled out in principle. The development of a modular powertrain concept is recommended. This would open possibilities to implement both the FCH for shunting-intensive mixed operation and the FCH-bi-mode for regional freight rail services under overhead wire, including shunting-intensive mixed operation, on a uniform basic locomotive platform.

Since the economic viability of new rail vehicles can usually only be guaranteed once a critical minimum number of vehicles has been sold (e.g., for amortization of the one-off costs and because of the effort required for series support, etc.), vehicle requirements should be harmonized across operators. According to the study "Feasibility analysis of alternative drive systems" commissioned by NOW, there are currently around 2800 shunting locomotives in Germany and the average age of the DB Cargo shunting locomotive fleet was 42 years in 2019. This results in sales potential across all powertrain options of 20 to 60 new and up to 25 modernized locomotives per year in Germany over the next few years (Pagenkopf et al. 2022). Consequently, there is a substantial need for fleet renewal in the railway sector.

The authors recommend the following concrete steps:

- a) Industry workshop to compare the Duisport-specific vehicle design with the operational profiles of other railway undertakings,
- b) Exploratory talks with the rolling stock industry,
- c) Initiation of an in-depth feasibility study with the participation of manufacturers and, if necessary, other railway undertakings as preparation for an implementation project (resulting also in modular design sizes of powertrain components),
- d) Set up of a consortium for a funded implementation project.

In addition, the following recommendations are made to policy makers and industry:

- Creation of supportive framework conditions for implementation projects including funding of start-up costs,
- Continuation of funding programs for the development and procurement of FC locomotives and refueling station infrastructure, as well as the provision of adequate funding for CAPEX and OPEX,
- Continuation of research and development project funding for manufacturers and research institutions in Europe,
- Development of modular vehicle platforms for a broad range of zero-emission powertrains and variable power classes (vehicle manufacturers),
- Implementation of industry-wide standards for rail-approved systems
- Demonstration of retrofit concepts from diesel to fuel cell, that can be applied across multiple railway classes (retrofit specialist),
- Further development of the technology components fuel cell, battery and hydrogen tanks.

Ausgangslage, Ziele und Projektstruktur

Ausgangssituation

Durch den European Green Deal ist der Startschuss gefallen in der Europäischen Union die Netto-Emissionen von Treibhausgasen auf Null zu reduzieren und somit klimaneutral zu werden. Es ist daher von nationalem Interesse technische Umsetzungen hierfür zu finden. Der Sektor Mobilität stellt bei der Erreichung dieses Ziels einen großen Hebel dar. Besonders im Ballungsraum Rhein-Ruhr werden täglich Waren und Rohstoffe benötigt. Daher haben sich in der Region Logistikschwerpunkte ausgebildet in denen täglich zahlreiche Güter auf der Schiene bewegt werden. Durch den in der Regel nicht vorhandenen Fahrdraht an den Terminals der Güterverkehrszentren und Häfen kommen in der ersten und letzten Meile fast ausschließlich Diesellokomotiven zum Einsatz. In Deutschland sind dies ca. 3.000 Fahrzeuge, die im Mittel 40 Jahre alt sind und häufig über keine Abgasnachbehandlung verfügen.

Ziel und Vorgehensweise der Vorstudie

Ziel dieser Studie ist, die Grundlagen für weitere Aktivitäten zur Entwicklung, zum Aufbau und zur Inbetriebnahme einer wasserstoffbetriebenen Schienengüterverkehrslokomotive zu schaffen und die grundsätzliche Machbarkeit zu prüfen. Insbesondere soll analysiert und bewertet werden, welche Anforderungen und Lösungsansätze bestehen und ob ein derartiges Entwicklungsvorhaben besser als Umbau eines Bestandsfahrzeugs oder als Neubaufahrzeug anzustreben ist. Die Untersuchungen erfolgen auf Basis der am Markt weitverbreiteten und bei Duisport Rail (dpr) im Regeleinsatz befindlichen MaK G 1206 und Vossloh DE 18.

Die Studie ist in sieben Arbeitspakete unterteilt (Abbildung 1).

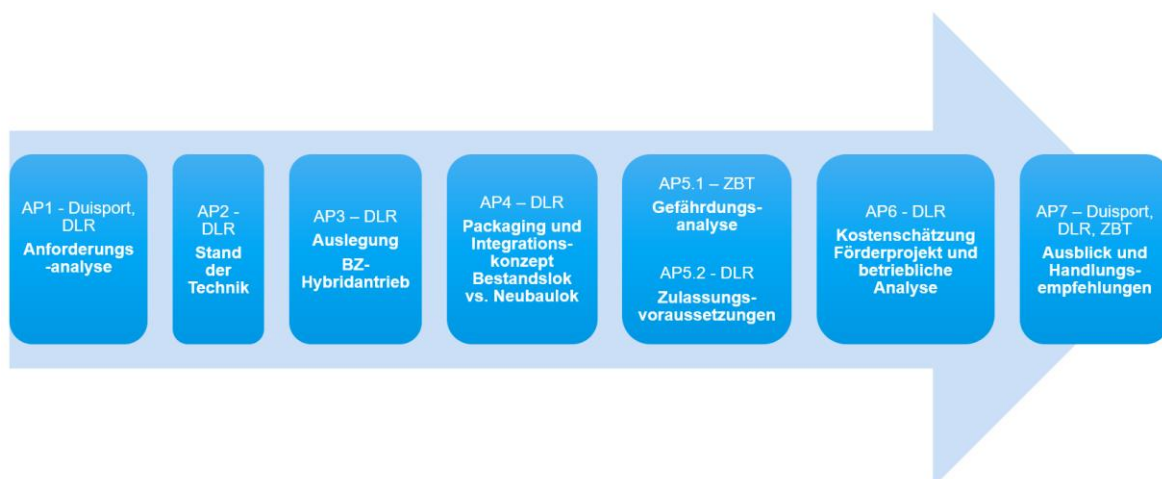


Abbildung 1: Aufbau der Vorstudie

In AP 1 werden zunächst die Anforderungen an Wasserstoff-Brennstoffzellenlokomotiven anhand typischer Einsatzszenarien existierender Diesellokomotiven der dpr erfasst. Dies sind u.a. typische Anhängelasten, notwendige Zugkraft, Radleistung, typische Relationen der Lokomotiven sowie Referenzlastprofile. Für zwei Dieselmotorenlokomotiven aus dem dpr-Bestand (MaK G 1206 und Vossloh Locomotives DE 18) werden die für einen Umbau zur Verfügung stehenden Bauräume ermittelt sowie die durch die Umrüstung betroffenen Hauptbaugruppen

identifiziert (Energiewandler, Leistungsübertragung, Fahrzeugsteuerung, Bremsanlage, Druckluftherzeugung usw.).

Anhand der Referenzlastprofile und einer Recherche von am Markt verfügbaren Komponenten (AP 2) erfolgt in AP 3 eine Grobauslegung des Brennstoffzellen-Hybrid-Antriebssystems mit Schwerpunkt Brennstoffzelle (BZ), Batterie, Kühlung, H₂-Tanks und Betankungsschnittstelle und eine exemplarische Auswahl geeigneter Komponenten für den Aufbau des Antriebssystems (Stückliste). Darauf aufbauend werden für das Bestandsfahrzeug und ein Neufahrzeug jeweils ein grobes Integrationskonzept entwickelt und dargestellt, wobei für das Bestandsfahrzeug zusätzlich ein Konzept zur Elektrifizierung der bislang hydrodynamischen Leistungsübertragung entwickelt wird.

Aufbauend auf den Ergebnissen der beschriebenen technischen Arbeiten werden speziell die notwendigen Arbeiten für die Zulassung des umgerüsteten Bestandsfahrzeugs analysiert. Dabei werden auch die sicherheitstechnischen und zulassungsseitigen Anforderungen sowohl fahrzeugseitig als auch für die Tankstelle erfasst (AP 5). Die beschriebenen Arbeiten werden in einer Kostenschätzung zusammengefasst (AP 6), mit dem Hauptziel, in den Handlungsempfehlungen ein Konzept und den erwarteten Kostenrahmen für die Entwicklung und die Zulassung der erarbeiteten Lösung darzustellen.

Abschließend werden in AP 7 die Optionen Umrüstung eines Bestandsfahrzeugs und Aufbau eines Neubaufahrzeugs vergleichend gegenübergestellt. Die Handlungsempfehlungen umfassen die Identifikation notwendiger und geeigneter Partner und deren Rollen in einem eventuell nachfolgenden Projekt. Weiterhin wird der Aufbau und der Zeitplan eines möglichen F&E-Umsetzungsprojekts einer wasserstoffbetriebenen Rangierlokomotive“ skizziert.

1 AP 1 Aktueller Betrieb und Ableitung Anforderungen an Wasserstofflokomotiven

Autoren: DLR, mit Beiträgen von: Duisport

1.1 Charakterisierung des heutigen dpr-Betriebs mit Dieselrangierlokomotiven

Um die grundsätzlichen Anforderungen an Wasserstoff-Brennstoffzellenhybrid-Lokomotiven abzuleiten, wird zunächst das derzeitige Betriebsprofil der duisport rail GmbH (dpr) mit Diesellokomotiven genauer untersucht und beschrieben. Der Schienengüterverkehr im Duisburger Hafen wird durch das Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) duisport rail GmbH (dpr) als 100 %-iges Tochterunternehmen der Duisburger Hafen AG als auch durch Dritte EVU durchgeführt. Die dpr operiert mit ihren Fahrzeugen innerhalb der Betriebsbereiche des Duisburger Hafens im Bereich der ersten und letzten Meile und darüber hinaus auch auf dem öffentlichen Netz im Streckenregionalverkehr zur Verbindung der einzelnen Bereiche des Duisburger Hafens und auch zur Anbindung weiterer Industrie- und Chemieparks in ganz Nordrhein-Westfalen in Regel- und Spotverkehren.

1.1.1 Aktueller Rangierlokbestand der dpr

Für den schweren Rangierdienst und den Streckendienst im Güterregionalverkehr werden derzeit 15 vierachsige Rangierlokomotiven der Typen MaK G 1206, Vossloh Locomotives DE 18, LEW V100 (Ost) sowie MaK V90 eingesetzt. Tabelle 1 gibt einen Überblick über den dpr-Fahrzeugbestand sowie einige Kerndaten. Innerhalb der Hafengebiete sind aktuell fünf dreiachsige Lokomotiven des Typs MaK 503 und MaK G 761C für den reinen Rangierbetrieb im Einsatz.

Im Fokus dieser Studie stehen die schweren Drehgestelllokomotiven MaK G 1206 mit 1500 kW Dieselmotor und hydraulischer Leistungsübertragung sowie die Vossloh Locomotives DE 18 mit 1800 kW Dieselmotorleistung und elektrischer Leistungsübertragung.

Tabelle 1: Rangierloks der dpr

Hersteller	Typ	Baujahr	Achszahl	Dienstmasse (t)	Leistung Dieselmotor (kW)	Anfahrzugkraft max. (kN)	Leistungsübertragung	Vmax (km/h)	Anzahl
Drehgestell-Strecken-/Rangierlokomotiven									
MaK	G 1206	2003-2012	4	84-90	1500	260-291	Hydraulisch	100	8
Vossloh Locomotives	DE 18	2019	4	80	1800	260-291	Elektrisch	120	2
LEW	V100	1975	4	64	1082-1240	227	Hydraulisch		2
MaK	V90	1975	4	80	1000	236	Hydraulisch	80	3
Rangierlokomotiven ausschließlich für Rangierbetrieb im Hafengebiet									
MaK	DE 502	1982-1989	3	60	560		Hydraulisch	45	4
MaK	G 761C	1978	3	60	500		hydraulisch	55	1
									
MaK G 1206 ¹			Vossloh Locomotives DE 18 ²			LEW V100 (Ost) ³			
									
MaK V90 ⁴			MaK DE 502 ¹			MaK G 761C ⁵			

Quellen Abbildungen: Duisport ¹, Vossloh DE 18 von Clic ([Link](#)), CC BY-SA 4.0 ², v100-online.de ³, BV Lokwerkstatt ⁴, loks-aus-kiel.de, Ingmar Weidig ⁵

1.1.2 Infrastruktur und Rangierverkehr innerhalb Duisport

Der Großteil der Rangiertätigkeiten findet in den Bereichen des Duisburger Hafens statt. Die Duisburger Hafen AG ist für diese Bereiche das verantwortliche Eisenbahninfrastrukturunternehmen (EIU) und betreibt die Gleisinfrastruktur in den Hafengebieten von Duisport.

Die insgesamt 200 km Gleislänge der Duisburger Hafen AG verteilen sich auf die Hafengebiete Ruhrort Hafen, Duisburg Hafen, Hochfeld und Logport (Duisburg-Rheinhausen). Der Großteil der Gleisanlagen wird nach der Eisenbahn-Bau und Betriebsordnung (EBO) betrieben, teilweise auch nur nach der Anschlussbahnverordnung des Landes Nordrhein-Westfalen (BOA-NRW).

Die Gleisanlagen des Duisburger Hafens sind nicht mit einer Oberleitung überspannt und es existiert keine relevante Neigung (i.d.R. 1:400). Die maximal zulässige Geschwindigkeit für Rangierfahrten beträgt 25 km/h. Der kleinste Radius beträgt 140 m, die zulässige Achslast 22,5 t und die zulässige Meterlast 8 t/m. Streckenklasse ist D4.

Der Zugang der Hafenbereiche zur Gleisinfrastruktur der DB Netz AG erfolgt über die Bahnhöfe Hafen Ruhrort (Bf Duisburg-Ruhrort Hafen), Hafen Duisburg (Abzw. Sigle), Kultur-/Südhafen (Bf Duisburg-Hochfeld Süd) sowie Hochfeld Nord und die Vorbahnhöfe Logport und Logport III. Die einzelnen Duisport-Hafenbereiche sind über das öffentliche Gleisnetz teilweise bis zu 14 km voneinander entfernt.

Die Hauptwirkungsbereiche der dpr sind in Abbildung 2 dargestellt. Als Bildausschnitte sind ferner die beiden räumlichen Schwerpunkte Duisburg Hafen/Ruhrort (u.a. trimodales DUSS-Terminal, Bahnhof Duisburg-Ruhrort Hafen) sowie Logport I (trimodale Terminals) & Logport III (bimodales Terminal) sowie Logport II in Wanheim (Logistikbereich und Terminal) herausgestellt.

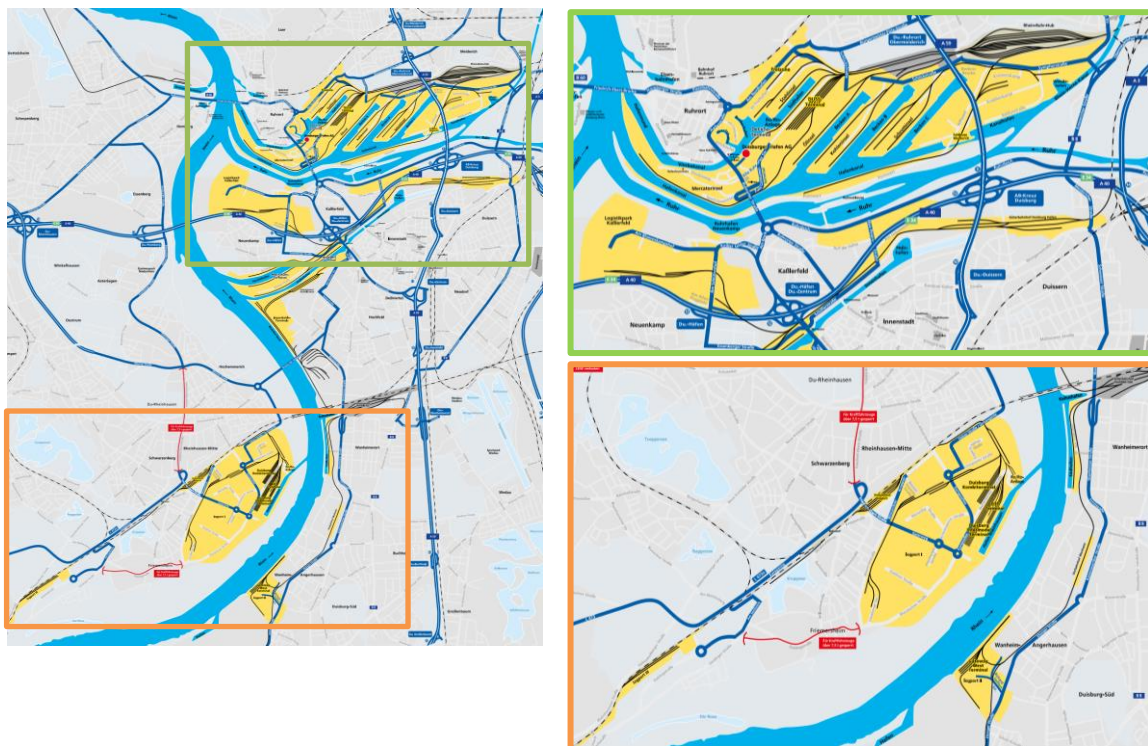


Abbildung 2: Duisport-Hafenbereiche (gelb eingefärbt) sowie Ausschnitte Duisburg-Hafen (oben rechts) sowie Logport I-III (unten rechts)

1.1.3 Relationen im Streckenregionalverkehr

Duisport Rail übernimmt mit ihren Rangierlokomotiven Transportleistungen zwischen den verschiedenen Duisport-Hafengeländen und zu Industrie- und Chemie-Werksbahnen im Umkreis von etwa 10 km (Verbindung der Hafenbereiche), 50 km (Chemiepark Marl) und teilweise bis zu 100 km (Logistikzentrum Ruhr-Ost in Bönen nahe Hamm). Für diese regionalen Einsätze kommen überwiegend schwere Diesel-Rangierlokomotiven wie die MaK G 1206 und Vossloh Locomotives DE 18 zum Einsatz.

Die dpr-Lokomotiven werden sowohl im Regel- als auch im Spotverkehr eingesetzt. Tabelle 2 führt die Hauptrelationen auf, die von der dpr bedient werden mit Angabe der streckenspezifischen Grenzlasten am Beispiel der MaK G 1206. Die Streckenlängen geben die einfachen Distanzen zwischen den Betriebsstellen (Bahnhöfen) an. Häufig werden jedoch auch komplette

Umläufe gefahren. Im Vor- und Nachlauf kommen i.d.R. noch 2-5 km für Rangiertätigkeiten hinzu.

Tabelle 2: Verbindungen duisport rail im Streckenregionalverkehr (Stand März 2021)

Von	Nach	Fahrzeugeinsatz	Streckenlänge (einfache Strecke)	Grenzlasten (bei G 1206)	Verkehrsart
Marl	DU-Rheinhausen	Loktypen G 1206, DE 18	rd. 50 km	1.650 t	Regelverkehr
DU-Rheinhausen	Marl			1.340 t	
Marl	DU-Ruhrort		rd. 39 km	1.650 t	Regelverkehr
DU-Ruhrort	Marl			1.390 t	
Bönen	DU-Wanheim		rd. 96 km	1.200 t	Regelverkehr
DU-Wanheim	Bönen			1.060 t	
Krefeld-Uerdingen	DU-Hochfeld		rd. 20 km	1.320 t	Regelverkehr
DU-Hochfeld	Krefeld-Uerdingen			1.380 t	
DU-Ruhrort	DU-Hochfeld		rd. 9 km	1.430 t	Regelverkehr
DU-Hochfeld	DU-Ruhrort			1.380 t	
DU-Ruhrort	DU Hafen		rd. 4 km	1.430 t	Regelverkehr
DU Hafen	DU-Ruhrort			1.200 t	
DU-Ruhrort	DU-Wanheim		rd. 12 km	1.430 t	Regelverkehr
DU-Wanheim	DU-Ruhrort			1.380 t	
DU-Ruhrort	DU-Rheinhausen		rd. 13 km	1.430 t	Spotverkehr
DU-Rheinhausen	DU-Ruhrort			1.320 t	
DU-Ruhrort	Oberhausen-West		rd. 5 km	2.370 t	Spotverkehr
Oberhausen-West	DU-Ruhrort			2.810 t	
DU-Ruhrort	Gladbeck-West		rd. 21 km	1.520 t	Spotverkehr
Gladbeck-West	DU-Ruhrort			1.610 t	
Gladbeck-West	Marl		rd. 18 km	1.480 t	Spotverkehr
Marl	Gladbeck-West			1.650 t	
Bottrop	Marl		rd. 25 km	1.480 t	Spotverkehr
Marl	Bottrop			1.650 t	
Gladbeck-West	Bottrop		rd. 7 km	3.080 t	Spotverkehr
Bottrop	Gladbeck-West			1.670 t	
DU-Ruhrort	Bottrop		rd. 14 km	1.520 t	Spotverkehr
Bottrop	DU-Ruhrort			1.610 t	
Krefeld-Uerdingen	Oberhausen-West		rd. 21 km	1.320 t	Spotverkehr
Oberhausen-West	Krefeld-Uerdingen			1.290 t	

Die Fahrten der Lokomotiven auf dem öffentlichen Streckennetz der DB Netz AG finden zu einem großen Teil unter Oberleitung statt, wie Abbildung 3 zu entnehmen ist.

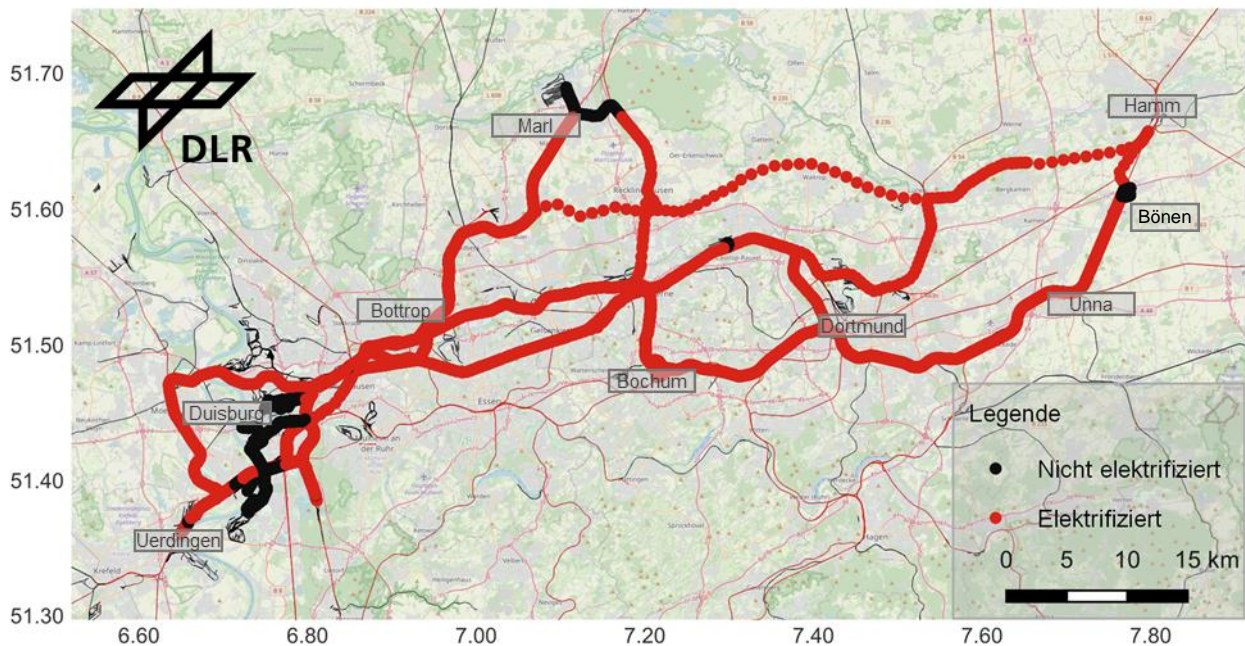


Abbildung 3: Gesamtrationen Duisport von 12/2020 bis 07/2021

Am Zughaken der Diesellokomotiven im Streckenregionalverkehr sind überwiegend Container auf Tragwagen sowie Kesselwagen (siehe Abbildung 4). Ein typischer Containerzug nach Marl (Marl Express) ist 300 m lang und transportiert 40 TEU-Container.



Abbildung 4: Links: Einsatz einer MaK G 1206 mit Containertragwagen im Streckenregionalverkehr (Rob Dammers, CC BY 2.0, Link), Rechts: MaK G 1206 mit Kesselwagen (Bild: Duisport).

1.1.4 Einsatzprofile der Dieselerangierlokomotiven

Um eine einheitliche Verteilung von Laufleistung und Betriebsstunden der Rangierlokomotiven zu gewährleisten, werden die Loks rollierend auf den typischen Streckenrelationen und auch auf den Rangierstandorten eingesetzt. Mehrere dieser Relationen können sich im Rahmen einer Schicht aneinanderreihen, wobei es keine typische Reihenfolge der Abfolge der Relationen auf Grund des Spotverkehrscharakters gibt. Die Diesellokomotiven werden teilweise mehrere Tage hintereinander ohne Zwischentankvorgang betrieben.

Die Rangierlokomotiven des Typs MaK G 1206 und Vossloh Locomotives DE 18 werden sowohl im reinen Rangierdienst als auch im Streckenregionalverkehr eingesetzt. Ein solches Mischprofil eines beispielhaften Tages einer Rangierlokomotive des Typs DE 18 ist in Abbildung 5 dargestellt. Die Lok operierte in den einzelnen Duisport-Hafenstandorten sowie auf dem

Streckennetz der DB Netz zur Verbindung der Duisport-Standorte und zur Anbindung an den Chemiepark Marl.

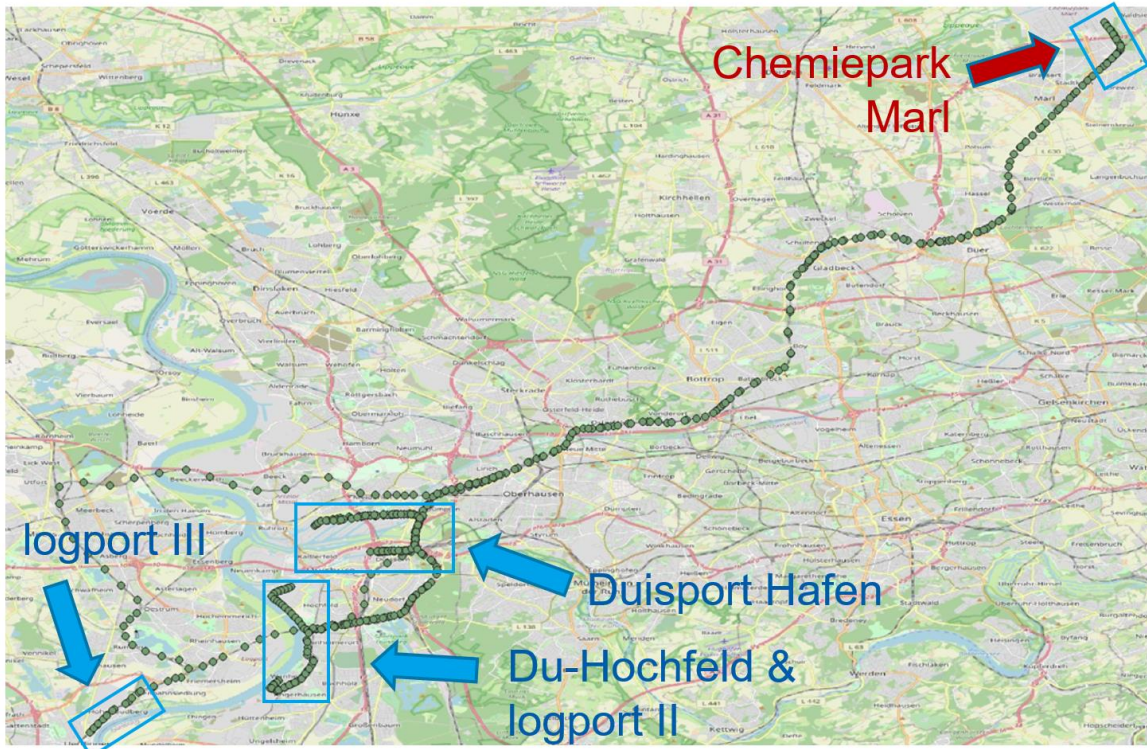


Abbildung 5: Beispielhafter Tagesbetrieb einer Vossloh DE 18 (aus Messdatenauswertung)
 Blau: Duisport-Standorte, Rot: Chemiepark Marl

Die Zugfahrten beginnen und enden immer in den jeweiligen Vorbahnhöfen der dpr-Hafenbereiche. Rangierfahrten mit den Lokomotiven MaK G 1206 und Vossloh Locomotives DE 18 bei der dpr sind üblicherweise Fahrten mit gebildeten Wagengruppen bis zum Vorbahnhof bzw. vom Vorbahnhof zum jeweiligen Zielterminal oder Bestimmungsort im Hafenbereich. Vereinzelt werden bereits gebildete Züge auch wieder aufgelöst um beispielsweise einen Schadwagen aus dem Verband heraus zu rangieren. Eher selten werden einzelne Wagen von diesen Lokomotiven rangiert. Grundsätzlich sind Rangierfahrten geprägt von einem hohen Leerlaufanteil, wie die Auswertungen der kategorisierten Rangierfahrten in Abschnitt 1.3 zeigen.

Betriebsstunden

Die monatlichen Betriebsstunden der Baureihe MaK G 1206 bewegen sich typischerweise zwischen etwa 200 und 350 Stunden, in einzelnen Monaten sind sie aber auch bis zu 550 Stunden im Einsatz. Für eine Vossloh DE 18 der dpr liegen für 10 Tage neben aufgezeichneten Messdaten eines auf der Lok installierten Datenlogger auch die konkreten Einsatzbereiche vor, aufgeteilt nach Zugfahrt und Rangierfahrt, sowie den jeweiligen Abgangs- und Bestimmungsbahnhöfen.

Verkehrstag	Zugprodukt	Zugfahrt/Rangierfahrt	gezogen/geschoben	Abgangsbahnhof	Bestimmungsbahnhof	Abgangsbahnhof	Bestimmungsbahnhof	Distanz (km)	Zugnummer	Masse	Ist-Beginn	Ist-Ende
30.06.2021	Containertragwagen	Rangierfahrt	gezogen	EDRH	EDRH	Duisburg-Ruhrort Hafen	Duisburg-Ruhrort Hafen			597	00:15	01:15
30.06.2021	Containertragwagen	Zugfahrt		EDRH	EDHA	Duisburg-Ruhrort Hafen	Duisburg Hafen	4	94154	2271	08:35	08:55
30.06.2021	Containertragwagen	Rangierfahrt	geschoben	EDHA	EDHA	Duisburg Hafen	Duisburg Hafen			2271	08:55	10:35
30.06.2021	Containertragwagen	Rangierfahrt	gezogen und geschoben	EDWM	EDWM	Duisburg-Wanheim	Duisburg-Wanheim			Teil 1: 453,7 Teil 2: 495,3	15:23	15:56
30.06.2021	Containertragwagen	Zugfahrt		EDWM	EBEO	Duisburg-Wanheim	Bönen	96	89216	949	15:56	18:00
30.06.2021	Containertragwagen	Rangierfahrt	gezogen und geschoben	EBEO	EBEO	Bönen	Bönen			949	18:00	18:24
01.07.2021	Containertragwagen	Rangierfahrt	gezogen und geschoben	EBEO	EBEO	Bönen	Bönen			700	01:00	01:45
01.07.2021	Containertragwagen	Zugfahrt		EBEO	EDWM	Bönen	Duisburg-Wanheim	96	89220	700	01:45	04:45
01.07.2021	Kesselwagen	Rangierfahrt	gezogen	EDRH	EDRH	Duisburg-Ruhrort Hafen	Duisburg-Ruhrort Hafen			690	10:05	10:45
01.07.2021	Kesselwagen	Zugfahrt		EDRH	EDHA	Duisburg-Ruhrort Hafen	Duisburg Hafen	4	68711	1789	10:45	11:30
01.07.2021	Kohlewagen	Rangierfahrt	gezogen	EDHN	EDHN	Duisburg-Hochfeld Nord	Duisburg-Hochfeld Nord			1713	15:50	16:00
01.07.2021	Kohlewagen	Zugfahrt		EDHN	KKRU	Duisburg-Hochfeld Nord	Krefeld-Lierdingen	20	89217	1713	16:00	17:35
01.07.2021	Kesselwagen	Rangierfahrt	geschoben	EDRH	EDRH	Duisburg-Ruhrort Hafen	Duisburg-Ruhrort Hafen			196	23:33	00:33
02.07.2021	Containertragwagen	Rangierfahrt	gezogen	EDRH	EDRH	Duisburg-Ruhrort Hafen	Duisburg-Ruhrort Hafen			670	01:12	01:27
02.07.2021	Containertragwagen	Rangierfahrt	geschoben	EDRH	EDRH	Duisburg-Ruhrort Hafen	Duisburg-Ruhrort Hafen			1249	02:00	03:00
02.07.2021	Containertragwagen	Rangierfahrt	gezogen	EDRH	EDRH	Duisburg-Ruhrort Hafen	Duisburg-Ruhrort Hafen			575	04:30	04:52
02.07.2021	Kesselwagen	Rangierfahrt	gezogen	EDRH	EDRH	Duisburg-Ruhrort Hafen	Duisburg-Ruhrort Hafen			560	06:40	07:40
02.07.2021	Kesselwagen	Rangierfahrt	gezogen und geschoben	EDRH	EDRH	Duisburg-Ruhrort Hafen	Duisburg-Ruhrort Hafen			1855	07:40	09:15
02.07.2021	Containertragwagen	Rangierfahrt	gezogen und geschoben	EDWM	EDWM	Duisburg-Wanheim	Duisburg-Wanheim			700	09:45	10:45
02.07.2021	Einzelwagen	Rangierfahrt	gezogen	EDWM	EDWM	Duisburg-Wanheim	Duisburg-Wanheim			50	10:45	11:10
02.07.2021	Einzelwagen	Rangierfahrt	gezogen und geschoben	EDRH	EDRH	Duisburg-Ruhrort Hafen	Duisburg-Ruhrort Hafen			62	11:40	12:15
02.07.2021	Kesselwagen	Zugfahrt		EDHA	EDRH	Duisburg Hafen	Duisburg-Ruhrort Hafen	4	88969	512	16:20	16:50
02.07.2021	Containertragwagen	Zugfahrt		EDRH	EDWM	Duisburg-Ruhrort Hafen	Duisburg-Wanheim	12	69652	380	17:10	17:40
02.07.2021	Containertragwagen	Rangierfahrt	gezogen und geschoben	EDWM	EDWM	Duisburg-Wanheim	Duisburg-Wanheim			380	17:40	18:10
02.07.2021	Containertragwagen	Rangierfahrt	geschoben	EDRH	EDRH	Duisburg-Ruhrort Hafen	Duisburg-Ruhrort Hafen			545	19:20	20:40
02.07.2021	Containertragwagen	Zugfahrt		EDHA	EDRH	Duisburg Hafen	Duisburg-Ruhrort Hafen	4	59808	1121	22:40	23:00
02.07.2021	Containertragwagen	Rangierfahrt	geschoben	EDHA	EDHA	Duisburg Hafen	Duisburg Hafen			1121	23:00	00:30

Abbildung 6: Einsatzprotokoll einer dpr Vossloh DE 18 mit hohem Rangieranteil (Auszug)

Zugmassen

Die Zugmassen der Zugfahrten betragen im rangierlastigen Mischverkehr (Definition siehe 1.3.3) 400 t bis zu im Einzelfall 2200 t auf der kurzen Relation zwischen Duisburg-Ruhrort Hafen und Duisburg Hafen (4 km). Bei Zugfahrten im Streckenregionalverkehr, dies betrifft insbesondere die Relationen von Duisburg - Marl sowie Duisburg - Bönen, betragen die typischen Zugmassen 300 t bis zu 1000 t. Die zulässigen Massen werden durch die relations- bzw. streckenabhängig zulässigen Grenzlaster begrenzt. Typische Zug- und Schiebmassen im Rangierbetrieb (Rangierfahrten) reichen ebenfalls bis zu 2000 t.

Dieserverbrauch

Der gesamte Dieserverbrauch aller dpr-Lokomotiven im Jahr 2019 betrug 845.000 Liter. Dies entspricht CO₂-Emissionen von ca. 2.231 t.

Für vier Lokomotiven Typ MaK G 1206 lagen für das Jahr 2019 auswertungsfähige Daten sowohl zum Dieserverbrauch als auch den Jahresbetriebsstunden vor. Demnach betragen die mittleren Dieserverbräuche in Liter je Betriebsstunde im Monatsmittel des Jahres 2019 zwischen 27,3 l/h und 44,1 l/h. Der geringste in einem Monat aufgetretene mittlere Dieserverbrauch einer Lokomotive betrug 8,9 l/h und der maximale Verbrauch einer Lokomotive in einem Einzelmonat betrug 66,3 l/h. Dies verdeutlicht, dass sich die benötigten Energiemengen in einem breiten Band bewegen. Dies ist unter anderem bedingt durch die teilweise sehr unterschiedlichen Transportaufgaben und Anhängemassen sowie die teilweise nur durch Streckenfahrten erreichbaren unterschiedlichen Einsatzorte.

Die Daten zeigen, dass die Jahresdieserverbräuche der G 1206 (70.000, 80.000 l, 82.000 l, 134.000 l Diesel/Jahr) zum Teil deutlich unter denen der DE 18 (ca. 160.000 l Diesel/Jahr), für die auswertungsfähige Daten vorhanden sind, liegt. Dies deutet darauf hin, dass die DE 18 ein anspruchsvolleres Profil fährt.

1.2 Konzeptionelle Anforderungen an Wasserstoff-Brennstoffzellen-Rangierloks

1.2.1 Betriebliche Anforderungen

Für die Konzeption eines Brennstoffzellenhybridantriebs ergeben sich eine Reihe von betrieblichen Randbedingungen im Einsatzgebiet von dpr, die sich als konkrete Anforderungen übersetzen lassen (Tabelle 3).

Tabelle 3: Betriebliche Anforderungen an einen Brennstoffzellenhybridantrieb

Randbedingungen – Anforderungs-Kategorie	Beschreibung der Anforderung
Einsatzprofil	Einsatz im Rangierdienst und im Streckenregionalverkehr wie Bestands-Dieselloks (MaK G 1206 & Vossloh DE 18), d. h. sowohl auf öffentlichem Netz als auch auf duisport-Gleisgelände inkl. Funkfernbetrieb
	H2BZ-Betrieb muss unter elektrifizierten Gleisen, in Hallen und unter harscheren Umweltbedingungen (z.B. bei starker Staubentwicklung) möglich sein
EVU-übergreifende Einsatzfähigkeit	Einsetzbarkeit für verschiedene EVU/Fahrzeughalter (in Bezug auf Leistung und Tankkapazität)
Lebensdauer Lokomotive	Einsatzdauer Lokomotive für ca. 30 Jahre, Modernisierungsfähigkeit
RAMS-LCC	Zuverlässigkeit: Vergleichbar mit Diesellokomotiven
	Verfügbarkeit: Vergleichbar mit Diesellokomotiven
	Wartungsfähigkeit: leichte Zugänglichkeit zu Baugruppen über Hauben, Wechselbarkeit schadhafter Bauteile
	Sicherheit: Nachweis der funktionalen Sicherheit
	Lebensdauerkosten: Vergleichbar mit Diesellokomotiven
Betankungsintervall	Aktionsradius zwischen zwei Tankvorgängen einer BZH-Lokomotive wird auf Grund der geringeren Energiedichte von H2-Tanks deutlich geringer ausfallen als der einer Dieselerangierlokomotive; auf Basis der Vergangenheitsdaten (Abschnitt 1.3) soll Betankung in einer mindestens 30-minütigen Betriebspause ermöglicht werden können
	Ein mehrtägiger Betrieb ohne Nachtanken ist nicht erforderlich

1.2.2 Fahrzeugaufbau und technische Eigenschaften

1.2.2.1 Fahrzeugaufbau

Bei der Neukonstruktion einer Lokomotive besteht weitgehend Flexibilität bzgl. der Abmessungen (innerhalb zulässiger Bereiche der Streckenklassen und des Lichtraumprofils). Im Fall des Umbaus einer Bestandslokomotive sollten im Interesse der Wirtschaftlichkeit so viele Bestandssysteme wie möglich beibehalten werden bzw. die zulassungsrelevanten Hauptparameter der Lokomotive (Masse, Fahrdynamik etc.) möglichst unverändert bleiben. Grundsätzliche fahrzeugkonzeptuelle technische Anforderungen fasst Tabelle 4 zusammen.

Tabelle 4: Anforderungen in Bezug auf Fahrzeugaufbau und -konstruktion an einen Brennstoffzellenhybridantrieb

Kategorie / System	Beschreibung der Anforderung
Fahrzeugaufbau	Der Fahrzeugaufbau ist bei Umrüstung einer Bestandslokomotive durch die Struktur der Bestandslokomotive determiniert (Drehgestelllokomotive mit Mittelführerhaus)
	Auch bei einer Neubaulokomotive ist eine 4-achsige Konfiguration sinnvoll
Achs- und Meterlasten	Achslasten und Meterlasten sind entsprechend der mindestens befahrbaren Streckenklasse einzuhalten. Im gesamten Duisport-Hafengebiet und auf den befahrenen Strecken der DB Netz gilt die Streckenklasse D (22,5 t Radsatzlast).
Fahrzeuggestaltungslinien / Lichtraumprofil	Fahrzeuggestaltungslinie entsprechend Regellichtraum G D.h., kein Überschreiten von Fahrzeugteilen über die Begrenzungslinie (statisch) bzw. Bezugslinie (dynamisch)
Längsdruckfestigkeit	gemäß DIN EN 12663 analog zu Bestandsdiesellokomotiven
Seitengänge / Umläufe	ggf. Nutzung eines Seitengangs für Baugruppen bei Beibehaltung der frontseitigen Zugänglichkeit des Mittelführerhauses über die Treppe und Gewährleistung der freien Puffersicht
Modularer Aufbau	Modularer Aufbau mit standardisierten Schnittstellen; Ermöglichung der Integration auch anderer Antriebssysteme auf gleicher Lokbasis (z. B. Batterie-Oberleitungshybrid); Schnittstellen elektrisch, mechanisch entsprechend vorbereitet
Modernisierbarkeit	Ermöglichung einer grundlegenden technischen Modernisierung im Rahmen des Refurbishments (2. Hauptuntersuchung)
Anpassungen anderer Fahrzeugsysteme/-baugruppen	Möglichst geringe Anpassungen an Bremsanlage und Druckluftgerüst, Fahrzeuggestaltungstechnik und -steuerung (VCU/ZSG) und Zugsicherung

Bei der Konzeption und Umsetzung eines Brennstoffzellenhybridantriebssystems ist darüber hinaus die Einhaltung der technischen Regelwerke und des aktuellen Normenwerkes erforderlich. Diese werden in Abschnitt 0 beschrieben.

1.2.2.2 Leistungsfähigkeit

Die grundsätzliche Leistungsfähigkeit einer Brennstoffzellenhybridkonfiguration sollte sich in einem Bereich analog zur MaK G 1206 und Vossloh Locomotives DE 18 bewegen. Dies betrifft die nachfolgenden Eigenschaften:

- Zugkraftcharakteristik (max. 300 kN)
- Beschleunigungsverhalten
- Maximalgeschwindigkeit (100-120 km/h)
- Leistungsbereich (1500-1800 kW)

Die realisierbare Zugkraftkurve der Brennstoffzellenhybridlokomotive soll mindestens die Zugkraftcharakteristik der MaK G 1206 abbilden. Die beiden Zugkraftkurven dieser Fahrzeuge sind in Abbildung 7 dargestellt.

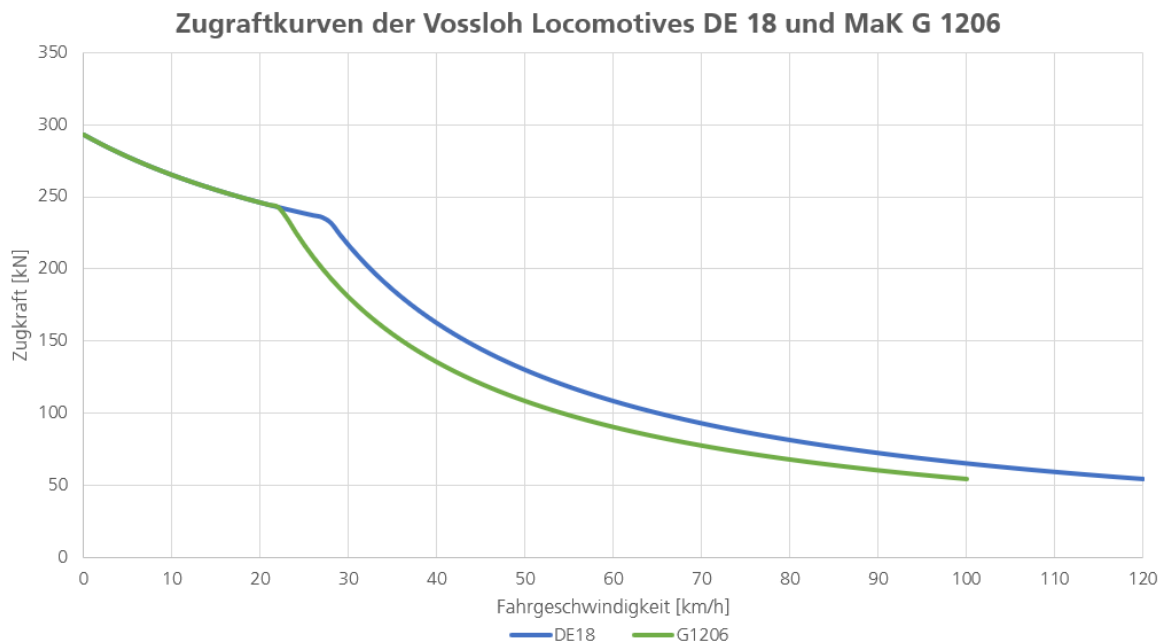


Abbildung 7: Zugkraftkurven G 1206 und DE 18

1.3 Leistungs- und Energieanforderungen (Auswertung Lastprofile)

1.3.1 Datengrundlage und Methodik

Als Datengrundlage zur Ableitung der Leistungs- und Energieanforderungen an den Brennstoffzellenhybrid- Antriebsstrang und dessen Komponenten diente ein Messdatensatz einer bei dpr eingesetzten Vossloh DE 18 über einen Messzeitraum von neun Monaten (12/20 bis 07/21) aus dem Regelbetrieb sowie zusätzlich die aufgezeichneten Daten einer separaten Messwoche im Anschluss, welche Rangierfahrten inkl. Streckenaufträgen ausführte, um einen ähnlichen Betrieb analog zur MaK G 1206 abzubilden. Für diese Woche wurde ergänzend zu den elektronisch aufgezeichneten Messdaten durch die dpr ein Fahrtenprotokoll inkl. Anhängelasten erstellt. Die Messdatensätze beinhalten in sekundlicher Auflösung unter anderem Fahrgeschwindigkeit, Dieserverbrauch, Dieselmotordrehzahl, Zugkraft sowie die Leistungskanäle für Antriebssteuergeräte, Motorstromrichter, Bremswiderstände sowie Hilfsbetriebe. Darüber hinaus sind GPS-Daten im 40s-Intervall vorhanden. Die nachfolgende Datenauswertung erfolgt vordergründig auf Basis der Messdaten aus dem Regelbetrieb über neun Monate und wird mit zusätzlichen Ergebnissen auf der darauffolgenden Messwoche abgeglichen und ergänzt.

Innerhalb des Rohdatensatzes treten an zahlreichen Stellen Datenlücken auf, an denen der sonst sekundlich auftretende Zeitstempel aussetzt, sodass für diese jeweiligen Zeitpunkte keine Messdaten aufgezeichnet wurden. Diese Datenlücken sind entsprechend identifiziert und veranschaulicht worden (siehe Abbildung 8).

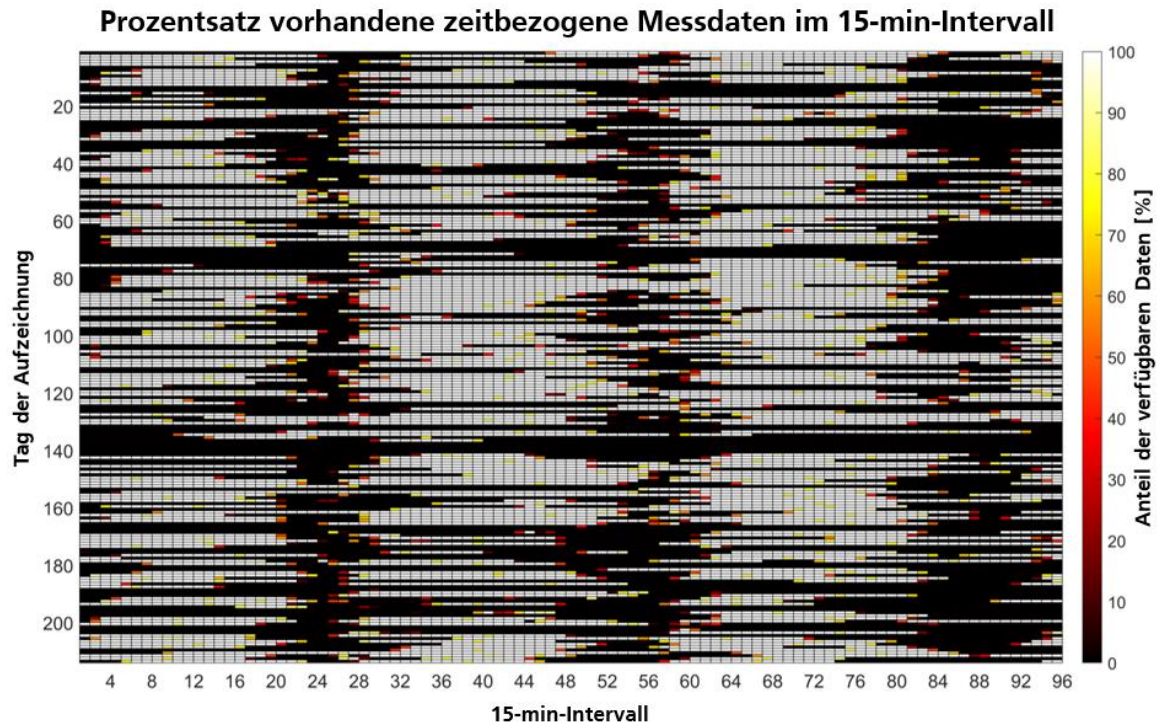


Abbildung 8: Vollständigkeitsgrad der zeitbezogenen Messwerte des aufgezeichneten Datensatzes aus dem Regelbetrieb

Das Diagramm veranschaulicht das Vorhandensein der Messdaten innerhalb von 15-Minuten-Intervallen (x-Achse) über alle Messtage (y-Achse). Dabei wird farblich differenziert, für welchen prozentualen Anteil innerhalb der 15-minütigen Intervalle der Zeitstempel und somit Messdaten vorhanden sind. Dieser prozentuale Anteil richtet sich nach den theoretisch möglichen sekundlich aufgezeichneten Daten innerhalb von 15 Minuten. Demnach stehen schwarze Felder für 0% vorhandene Daten innerhalb des betrachteten Intervalls und weiße Bereiche entsprechend für 100% Datenverfügbarkeit.

Auf Basis dieser Datenlücken wurde der Datensatz anschließend in einzelne Fahrzyklen aufgeteilt. Als Trennkriterium zwischen zwei Zyklen wurde eine Datenlücke von ≥ 30 min definiert. Daraus ergeben sich 475 Einzelfahrzyklen über den neunmonatigen Messzeitraum.

Neben den bereits erläuterten Datenlücken aufgrund des fehlenden Zeitstempels sind zudem innerhalb der Fahrzyklen Messlücken der einzelnen Messkanäle zu beobachten. Dabei zeigt sich, dass auch bei vorhandenem Zeitstempel nicht für alle Messkanäle zu jedem Zeitpunkt Werte aufgezeichnet worden sind. Diese unvollständig gefüllten Messkanäle werden im Prozess des Pre-Processing analysiert und Methoden zu deren Vervollständigung geprüft.

1.3.2 Datenaufbereitung (Pre-Processing)

Das Pre-Processing beinhaltet im Wesentlichen das Vervollständigen der lückenhaften Datenreihen innerhalb der einzelnen Messkanäle. Dafür wurden unter anderem Interpolationsmethoden wie lineare Interpolation oder Stufeninterpolationen angewandt. Um die Methode mit der geringsten kumulierten Messungenauigkeit zu identifizieren, wurden im Anschluss Plausibilitätsprüfungen durchgeführt, wofür zunächst Leistungsbilanzen der einzelnen Messkanäle erstellt und verglichen wurden. Zudem wurde eine weitere Prüfung auf Basis der Integrale der unterschiedlich interpolierten Messwerte herangezogen. Mit dem Ergebnis, dass eine

Stufeninterpolation unter Verwendung des jeweils vorangegangenen Wertes zu den geringsten Abweichungen führt, wurden alle 475 Einzelfahrzyklen entsprechend aufbereitet.

Der Messdatensatz enthält unterschiedliche Leistungskanäle, welche auf Basis der Antriebsstrangtopologie eingeordnet werden können. Die Gesamtleistung am Zwischenkreis beinhaltet neben den Leistungen der Antriebssteuergeräte der Fahrmotoren zudem die aufgenommene Leistung durch die Bremswiderstände sowie die Leistungen an den Hilfsbetriebeumrichtern.

1.3.3 Ergebnisse (Post-Processing)

Die aufbereiteten Daten der Einzelzyklen werden anschließend genutzt, um die Gesamtheit der Fahrten zu charakterisieren. Dazu soll eine Kategorisierung aller Einzelfahrten beitragen, um die ausgearbeiteten Eigenschaften der Fahrzyklen zusammenzufassen. Im späteren Verlauf (AP 3 und AP 4) wird auf dieser Basis ein Auslegungskonzept ausgearbeitet, mit dem Ziel, die Einzelfahrzyklen möglichst umfangreich abzudecken und die Gesamtheit der Anforderungen (ggf. einzelner Kategorien) zu berücksichtigen.

Zunächst wird die maximal auftretende Geschwindigkeit aller Fahrzyklen untersucht, indem eine Häufigkeitsverteilung über die Anzahl der Zyklen erstellt wird (siehe Abbildung 9).

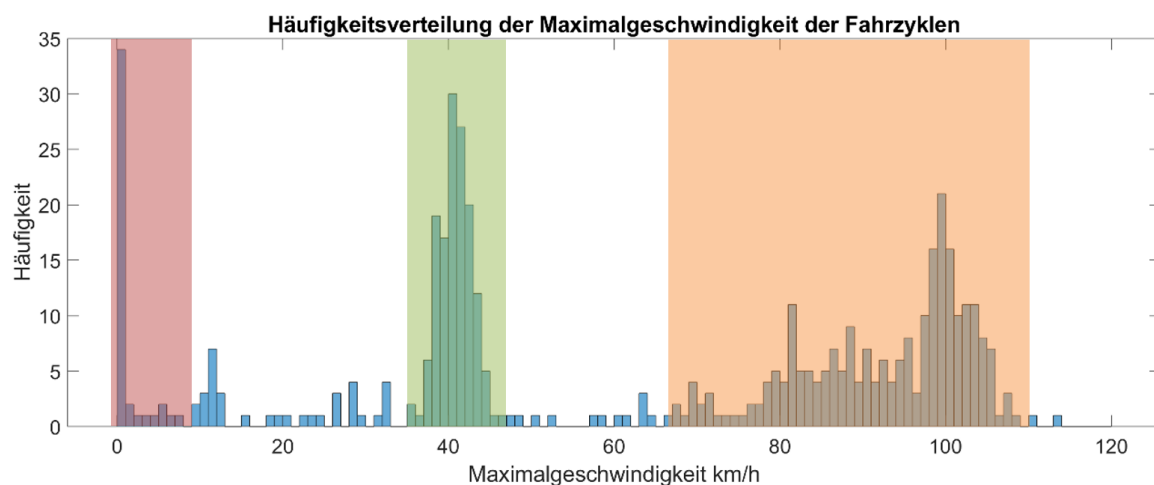


Abbildung 9: Histogramm über Maximalgeschwindigkeit der einzelnen Fahrzyklen

Bei der Betrachtung der Maximalgeschwindigkeit zeigen sich bereits Bereiche (farblich hinterlegt), die für eine anschließende Kategorisierung der Fahrzyklen weitergehend untersucht werden sollen. Dafür wird zunächst eine 3D-Häufigkeitsverteilung der Fahrzyklusdauer und der Maximalgeschwindigkeit erstellt, in welcher sich die bereits vermutete Clusterung nochmals verdeutlicht (Abbildung 10).

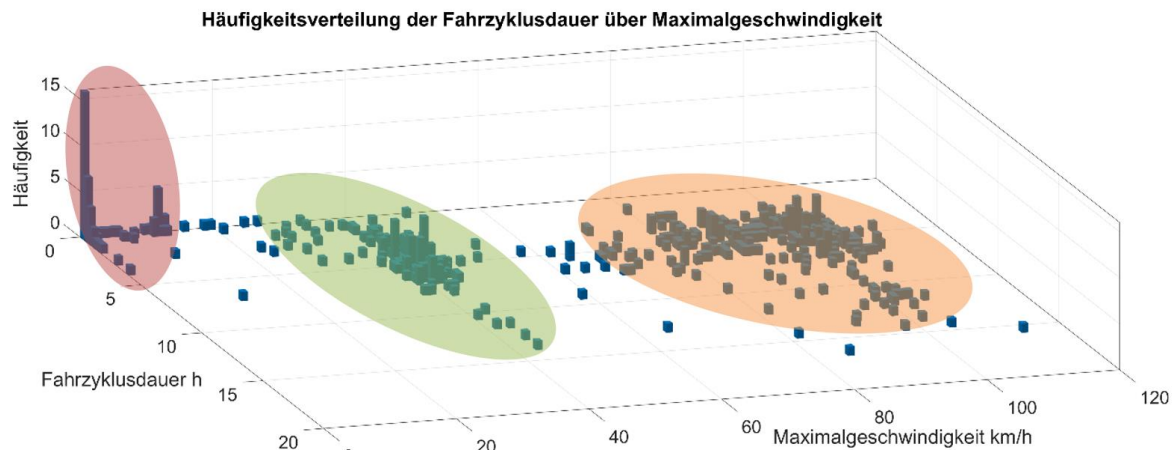


Abbildung 10: 3D-Histogramm der Fahrzyklusdauer über Maximalgeschwindigkeit der einzelnen Fahrzyklen

Neben der Maximalgeschwindigkeit ist zusätzlich die zurückgelegte Distanz zur Fahrzyklus kategorisierung analysiert worden, indem ein entsprechendes 3D-Histogramm aufgetragen wird (Abbildung 11). Hierbei werden ebenfalls Bereiche deutlich, welche für eine Kategorisierung anhand der Maximalgeschwindigkeit und der zurückgelegten Distanz sprechen (farblich hinterlegt).

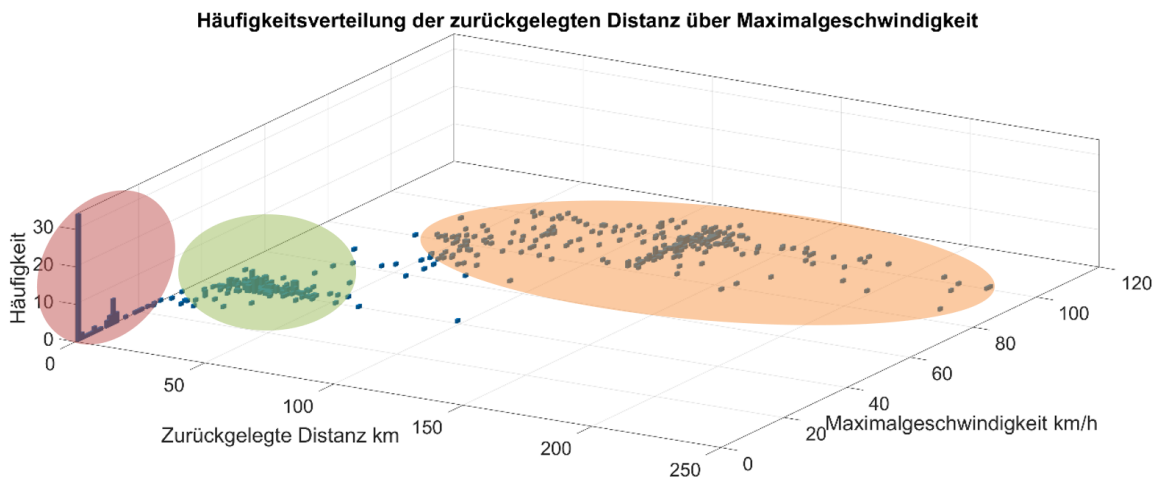


Abbildung 11: 3D-Histogramm der zurückgelegten Distanz über Maximalgeschwindigkeit der einzelnen Fahrzyklen

Kategorisierung der Fahrzyklen

Diese ersten Erkenntnisse lassen darauf schließen, dass sich die Kombination aus Maximalgeschwindigkeit und zurückgelegter Distanz als Kriterien eignen, die Fahrten je nach Einsatzart zu kategorisieren. Durch die dpr wurden die Kriterien ebenfalls aus betrieblicher Hinsicht geprüft und auf dieser Basis eine Kategorisierung vorgenommen, welche die Fahrzyklen wie folgt einteilt (Tabelle 5).

Tabelle 5: Kategorisierung der Fahrzyklen

Kategorisierungskriterien	Rangierlastiger Mischverkehr	Streckenregionalverkehr
Maximalgeschwindigkeit [km/h]	≤45	>45
zurückgelegte Distanz [km]	≤50	>50

Der **rangierlastige Mischverkehr** (RM) charakterisiert sich im Wesentlichen durch Rangiertätigkeiten innerhalb der Duisburger Hafenanlagen sowie kurze Überführungsfahrten zwischen den einzelnen Hafenbereichen. Bei diesen Fahrten wird eine Maximalgeschwindigkeit von 45 km/h und eine zurückgelegte Distanz von 50 km nicht überschritten. Eine typische solche Fahrt stellt beispielsweise der Fahrzyklus 321 dar (siehe Abbildung 12). Der Startpunkt ist grün markiert, der Endpunkt rot.

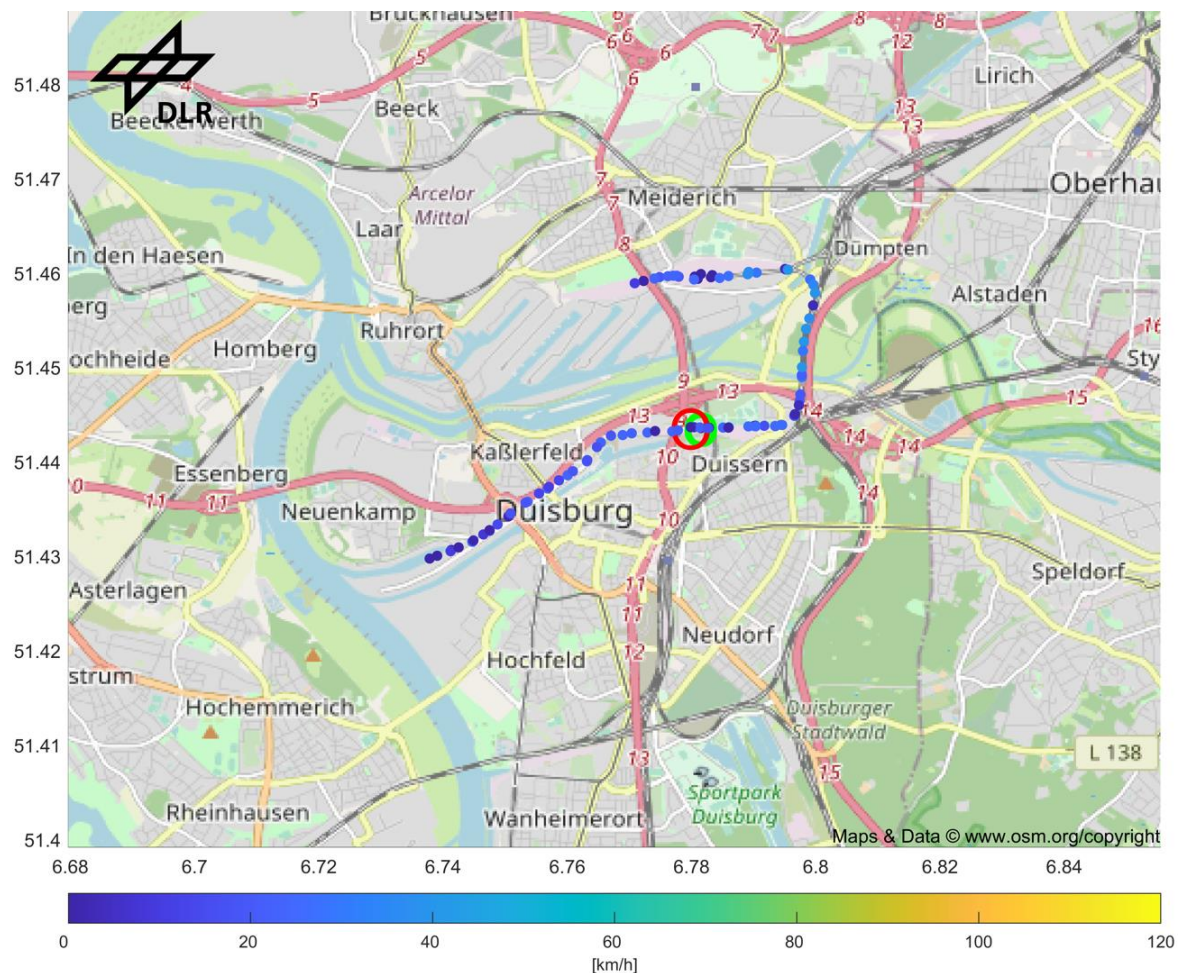


Abbildung 12: Typischer Streckenverlauf der Lok im rangierlastigen Mischverkehr am Beispiel des Fahrzyklus 321

Der **Streckenregionalverkehr** (SR) hingegen bezieht sich auf alle Fahrzyklen mit mindestens 50 km Fahrtstanz sowie einer Maximalgeschwindigkeit von mehr als 45 km/h. Es zeigt sich, dass der Streckenregionalverkehr häufig Fahrten nach bzw. über Krefeld, Uerdingen, Marl, Moers oder Bönen beinhaltet (vgl. Abschnitt 1.1.3). Im Durchschnitt werden 109 km zurückgelegt, wobei während einiger Zyklen durchaus Laufwege von bis zu 250 km aufgezeichnet wurden. Zur beispielhaften Darstellung dieser Kategorie dient der Fahrzyklus 166 mit einer Fahrt von Duisburg nach Marl und zurück nach Duisburg (siehe Abbildung 13).

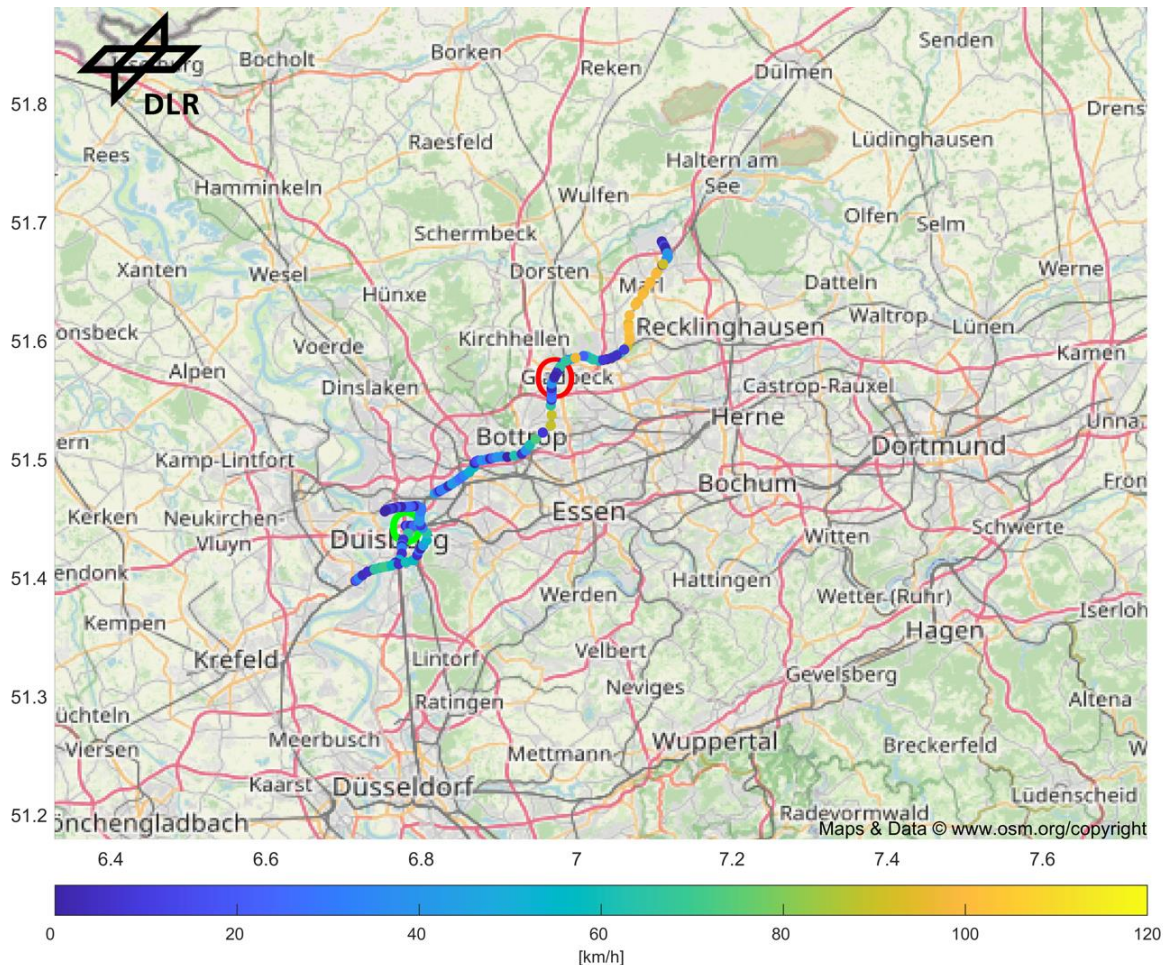


Abbildung 13: Typischer Streckenverlauf der Lok im Streckenregionalverkehr am Beispiel des Fahrzyklus 166

Hinsichtlich der Kategorisierungskriterien für den Streckenregionalverkehr ist darüber hinaus zu beachten, dass die entsprechenden Fahrzyklen durchaus Rangiertätigkeiten innerhalb eines Zyklus beinhalten, und zwar in der Regel am Anfang und/oder am Ende des Zyklus. Das heißt, auf eine Zugbildung im Vorbahnhof des Rangierbahnhofs bzw. des Duisport-Geländes folgt eine Streckenfahrt und anschließend eine Zugauflösung im Zielrangierbahnhof. Auf Basis der definierten Einzelfahrzyklen in Kapitel 1.3.1 werden diese anhand der Datenverfügbarkeit getrennt, sodass nach erfolgter Kategorisierung Streckenzyklen mit Rangieranteil vorhanden sein können, welche jedoch lediglich als Streckenzyklen klassifiziert werden. Ein solcher Rangieranteil ist am beispielhaften Fahrzyklus 166 im Raum Duisburg erkennbar (siehe Abbildung 13). Die Rangiertätigkeiten werden auch durch die detaillierte Auswertung der weiteren Messkanäle bestätigt.

Alle Zyklen, welche sich in die genannten Kategorien nicht zuordnen lassen, werden im Weiteren nicht tiefergehend betrachtet. Dabei handelt es sich mit 27 Fahrzyklen (rund 5%) um eine geringe Anzahl an Fahrten, welche für die energetische Betrachtung und Auslegung als weniger relevant einzuordnen sind. Dies wird ebenfalls durch die veranschaulichten Häufigkeiten in der entsprechenden Abbildung deutlich (siehe Abbildung 11). Darüber hinaus gibt es Fahrzyklen, welche aufgrund des in Kapitel 1.3.1 definierten Trennkriteriums zur Einteilung des Gesamtdatensatzes als Einzelfahrten separiert wurden, jedoch bei genauerer Betrachtung für die energetische Auslegung als weniger relevant eingestuft werden können. Dabei handelt es sich insbesondere um Zyklen, bei denen eine Distanz von weniger als 2,5 km zurückgelegt

wurde oder deren Dauer geringer als 30 Minuten ist. Diese Zyklen sind im Wesentlichen in den rot hinterlegten Bereichen der Häufigkeitsverteilungen zu sehen (siehe Abbildung 9, Abbildung 10 und Abbildung 11).

Neben den bereits erläuterten Analysen der Messkanäle wurde ebenfalls der Energiebedarf der Zyklen untersucht. Um diese unabhängig von der zurückgelegten Distanz energetisch einzuordnen, wird der spezifische Energiebedarf der Fahrzyklen herangezogen (kWh/km). Dabei zeigt sich, dass einige Zyklen einen überdurchschnittlich hohen spezifischen Energiebedarf aufweisen. Dies kann darauf hindeuten, dass die Lokomotive im Stillstand oder bei sehr wenig Bewegung mit eingeschaltetem Dieselmotor betrieben wurde. Diese Zyklen wurden folglich auf Grund des geringen Absolutenergiebedarfs ebenfalls als vernachlässigbar eingestuft und nicht tiefergehend analysiert. Für die Erarbeitung der energetischen Anforderungen ergeben sich aus dem Langzeitmessdatensatz 380 Fahrzyklen, die in zwei Kategorien eingeteilt werden können, sodass den Zyklen innerhalb der Kategorien Eigenschaften zugeordnet werden können (siehe Tabelle 6). Zudem werden die Fahrzyklen, welche aus der Einzelmesswoche resultieren im Vergleich aufgetragen. Dabei zeigt sich, dass sich die Ergebnisse aus beiden Datensätzen weitestgehend decken.

Tabelle 6: Auswertungsergebnisse nach Kategorisierung für alle Zyklen

		Rangierlastiger Mischbetrieb		Streckenregionalverkehr	
		LDS* ¹	MW* ²	LDS* ¹	MW* ²
Anzahl der Fahrzyklen		145	12	235	6
durchschnittliche mittlere Leistung am ZK inkl. Standzeiten	kW	42	44	184	160
durchschnittliche mittlere Leistung am ZK ohne Standzeiten	kW	128	119	331	340
durchschnittlicher Energiebedarf am ZK inkl. Standzeiten	kWh	209	198	1064	1175
durchschnittlicher spezifischer Energiebedarf	kWh/km	9,1	7,6	9,4	9,8
Durchschnittliche Zyklendauer	h	5,1	4,7	6,5	8,6
Durchschnittliche Distanz	km	22,9	25,8	108,9	116,6

*1: Langzeitdatensatz, *2: Messwoche, ZK: Gleichspannungszwischenkreis

Detaillierte Auswertung der einzelnen Fahrzyklen

Um die Energiebedarfsanalyse durchzuführen und eine Leistungsverteilung zwischen den Antriebskomponenten sowie die Konzeption des BZH-Antriebsstranges anzuschließen (Kapitel 3), werden im Folgenden die einzelnen Fahrzyklen detaillierter analysiert. Dazu wird neben der Auswertung des spezifischen Laufwegs mithilfe der GPS-Daten auch eine zeitgewichtete Belastungsanalyse der mittleren Leistung am Zwischenkreis aller Zyklen durchgeführt. Diese wertet den Leistungsverlauf am Zwischenkreis aus und bildet über unterschiedliche gleitende Zeitfenster jeweils die arithmetischen Mittelwerte. Zudem wird eine statistische Betrachtung der Perzentile dieser Leistungsaufkommen ergänzt. Dies dient dazu, Leistungsspitzen, deren Dauer und Häufigkeit zu identifizieren. Am Beispiel der Streckenfahrt (Zyklus-Nr. 210) wird diese zeitgewichtete Belastung veranschaulicht (siehe Abbildung 14).

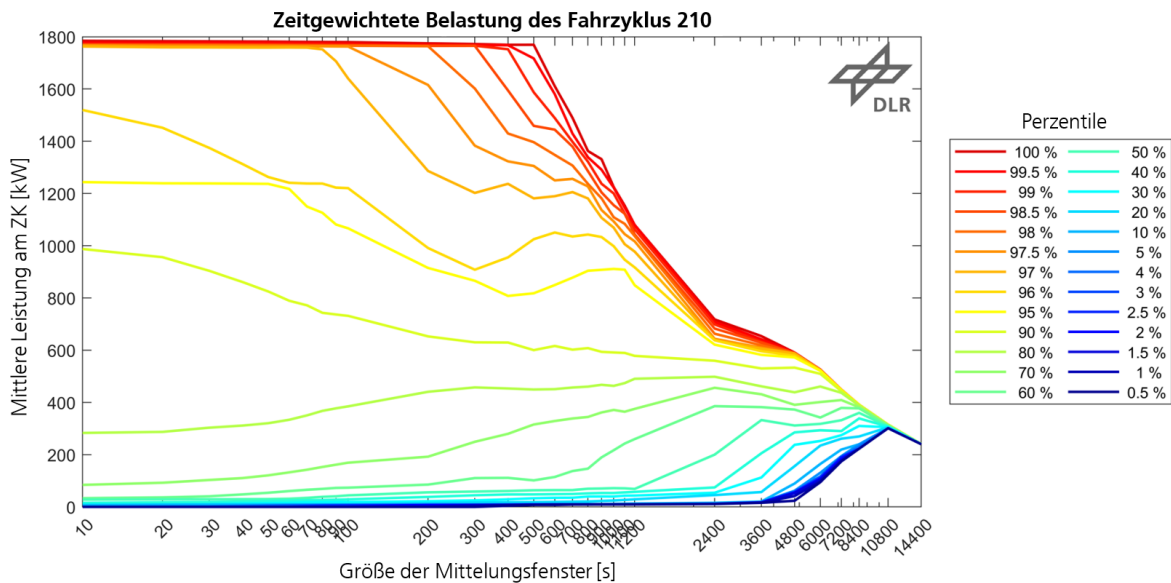


Abbildung 14: Zeitgewichtete Belastung am Beispiel des Fahrzyklus 210

Wie zu erkennen ist, beträgt bei Betrachtung von beispielsweise 100% der auftretenden Werte die maximale mittlere Leistung am Zwischenkreis gemittelt über 600 s in diesem Zyklus 1600 kW. Über ein Mittelungsfenster von 3600 s beträgt die maximal auftretende mittlere Leistung hingegen nur rund 700 kW. Mithilfe dieser Auswertungsmethodik ist es möglich, Aussagen zu treffen, mit welcher Häufigkeit welche mittleren Leistungen über unterschiedliche Zeitfenster auftreten. Am Beispiel dieses Zyklus lässt sich bspw. ableiten, dass unter Vernachlässigung der anspruchsvollsten 5% der Leistungswerte (95%-Perzentil) die maximale Leistung im 600 s-Fenster lediglich ca. 850 kW beträgt und nur 5% des gesamt auftretenden Leistungsbedarf über diesem Wert liegen.

Die zeitgewichtete Belastungsauswertung über alle Fahrzyklen ist in Abbildung 15 dargestellt. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die einzelnen Perzentillinien nicht jeweils einem einzelnen Fahrzyklus zugeordnet werden, sondern für das jeweilige Mittelungsfenster und Perzentil die entsprechende Belastung aus allen Fahrzyklen zugeordnet wird. Alle Datenpunkte eines Perzentils werden anschließend über alle Fenstergrößen miteinander verbunden, sodass in die einzelnen Perzentile die Daten mehrerer Fahrzyklen einfließen. Diese Art der Auswertung auf Basis der zeitgewichteten Belastung dient der Antriebsauslegung (AP 3) als Grundlage, um für die einzelnen Fahrzyklen jeweils die Leistung der Brennstoffzellen sowie Leistung und Kapazität des benötigten Pufferspeichers zu berechnen.

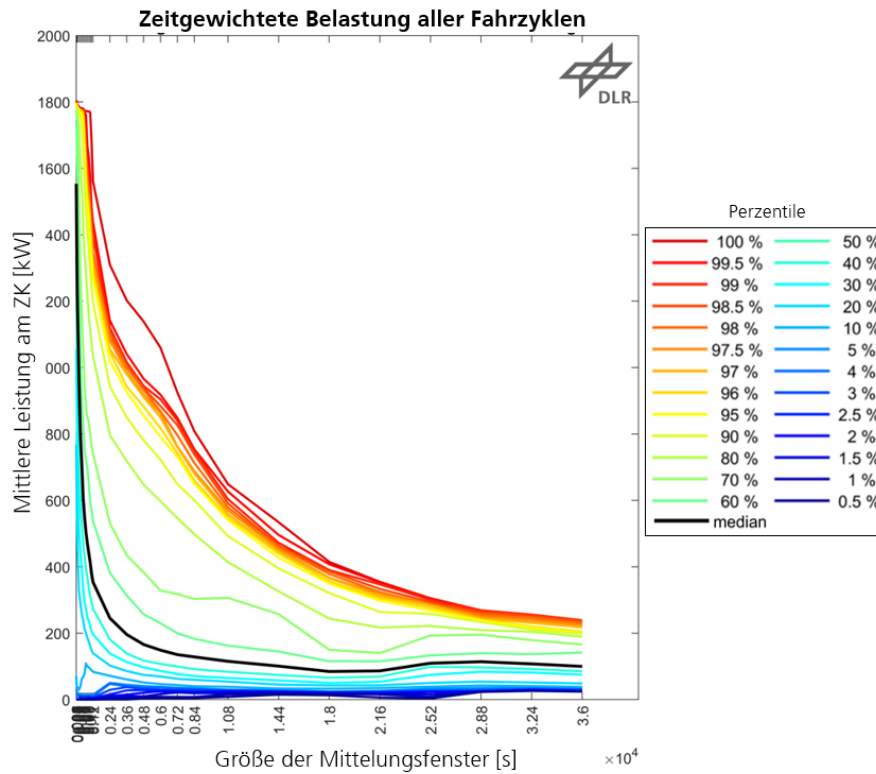


Abbildung 15: Zeitgewichtete Belastung aller Fahrzyklen

Auf Basis dieser Auswertungsmethode wird die zeitgewichtete Belastungsauswertung ebenfalls für die Kategorien getrennt aufgeführt und verglichen (siehe Abbildung 16). Dadurch wird der Unterschied der energetischen Anforderungen für den rangierlastigen Mischverkehr im Vergleich zum Streckenregionalverkehr deutlich. So zeigt sich im Wesentlichen, dass im rangierlastigen Betrieb zwar nahezu gleiche Maximalleistungen wie im Streckenregionalverkehr zu bewältigen sind, diese jedoch während deutlich kurzer Zeitfenster anfallen.

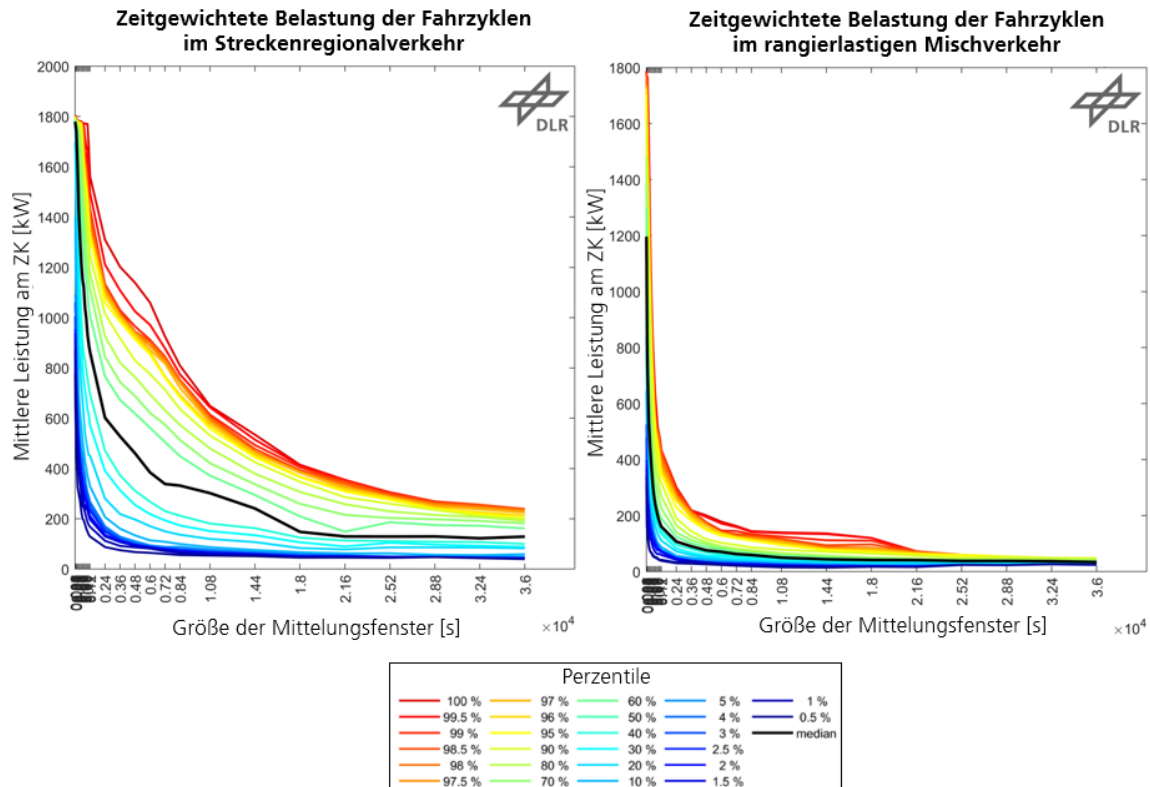


Abbildung 16: Zeitgewichtete Belastung aller Fahrzyklen getrennt nach Kategorien

Detaillierte Auswertung aller Fahrzyklen und Kategorien in Bezug auf die Anforderungen zur späteren Auslegung des Brennstoffzellenhybridantriebs

Für die Auslegung des Brennstoffzellenhybridantriebs in Kapitel 3 sind unter anderem die Werte der mittleren Leistung, die Höhe der Leistungsspitzen sowie deren Dauer und der Gesamtenergiebedarf erforderlich. Die mittlere Leistung dient dabei als Grundlage für die Auslegung der Leistung des Brennstoffzellensystems, wohingegen die Leistungsspitzen sowie der Gesamtenergiebedarf vorrangig für die Auslegung des Traktionsenergiespeichers relevant sind. Dafür wird unter anderem die Größe des Pufferenergiespeichers berechnet, welche die erforderliche Leistungsabgabe durch die Batterie abbildet.

Die auftretenden Leistungsspitzen für alle Mittelungsfenster in kW (abzüglich mittlerer Leistung des betrachteten Zyklus) werden dazu jeweils mit der Dauer der jeweiligen Zeitfenster multipliziert, in welchem diese auftreten, um den benötigten Energiebedarf des Pufferenergiespeichers zu ermitteln. Da je Fahrzyklus unterschiedlich ausgeprägte Leistungsspitzen über unterschiedliche Zeitdauern auftreten, wird je Fahrzyklus die maximale erforderliche Energie des Pufferspeichers ermittelt, um die je Zyklus erforderliche Mindestgröße des Pufferspeichers (nutzbarer Energieinhalt in kWh) zu bestimmen. Dieser entspricht jedoch noch nicht der benötigten Kapazität einer späteren Batterie, da als weitere Einflussfaktoren der Gesamtenergiebedarf sowie batterietechnische Eigenschaften wie unter anderem die zulässige Entladetiefe und die auftretenden Lade- bzw. Entladeraten berücksichtigt werden müssen.

Diese auslegungsrelevanten Kennzahlen werden für alle Fahrzyklen individuell bestimmt, so dass jeweils eine passgenaue Auslegung für jeden einzelnen Fahrzyklus erfolgen kann. Weiterhin besteht die Möglichkeit, jeweils kategorienspezifische Auslegungsparameter zu bestimmen, sodass letztlich mit einer Auslegung alle Fahrzyklen der jeweiligen Kategorie abgedeckt werden können.

Für eine erste Einordnung der Anforderungen werden die mittlere Leistung sowie die erforderliche Mindestgröße der Pufferspeicher je Fahrzyklus in Form eines Histogramms für alle Fahrzyklen aufgetragen (siehe Abbildung 17). Es zeigt sich, dass als Berechnungsgrundlage für die Auslegung unter Berücksichtigung aller Fahrzyklen eine mittlere Leistung von rund 450 kW und ein Pufferspeicher von etwa 1500 kWh herangezogen werden müssen.

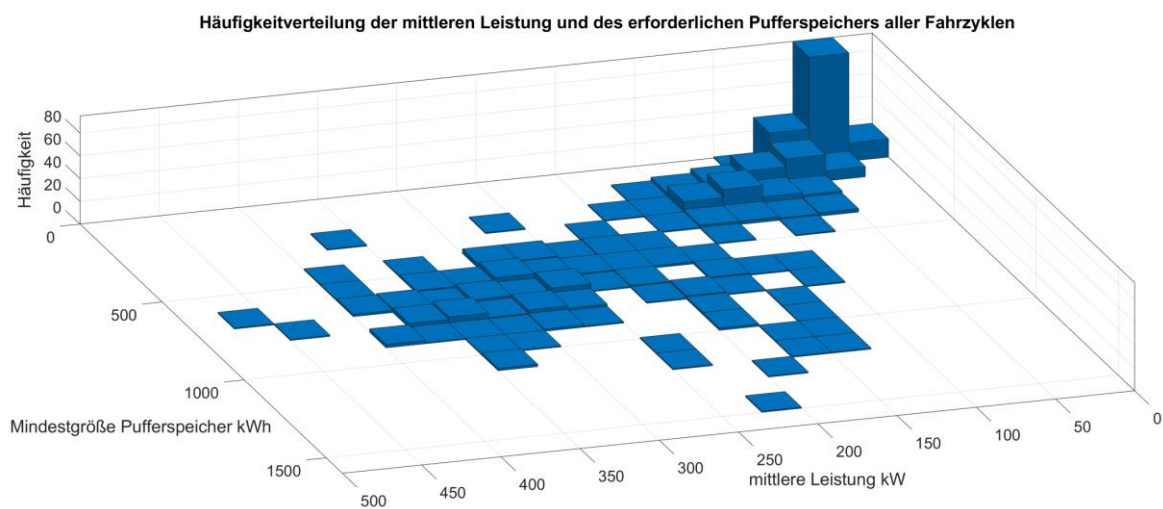


Abbildung 17: Häufigkeitsverteilung der mittleren Leistung und des erforderlichen Pufferspeichers aller Fahrzyklen

Diese Darstellung der Häufigkeiten wird darüber hinaus separat für den rangierlastigen Mischverkehr und den Streckenregionalverkehr aufgeführt (siehe Abbildung 18). Daraus gehen sehr differenzierte energetische Anforderungen für die einzelnen Kategorien hervor. Es zeigt sich, dass im rangierlastigen Mischbetrieb deutlich geringere Anforderungen an die Komponenten auftreten, als bei der Betrachtung aller Fahrzyklen. So wären hier nur etwa 125 kW mittlere Leistung bei 200 kWh Pufferspeicher als Auslegungsgrundlage zu berücksichtigen. Folglich würde eine Auslegung auf Basis der Streckenregionalfahrten alle rangierlastigen Mischfahrten ebenfalls abdecken.

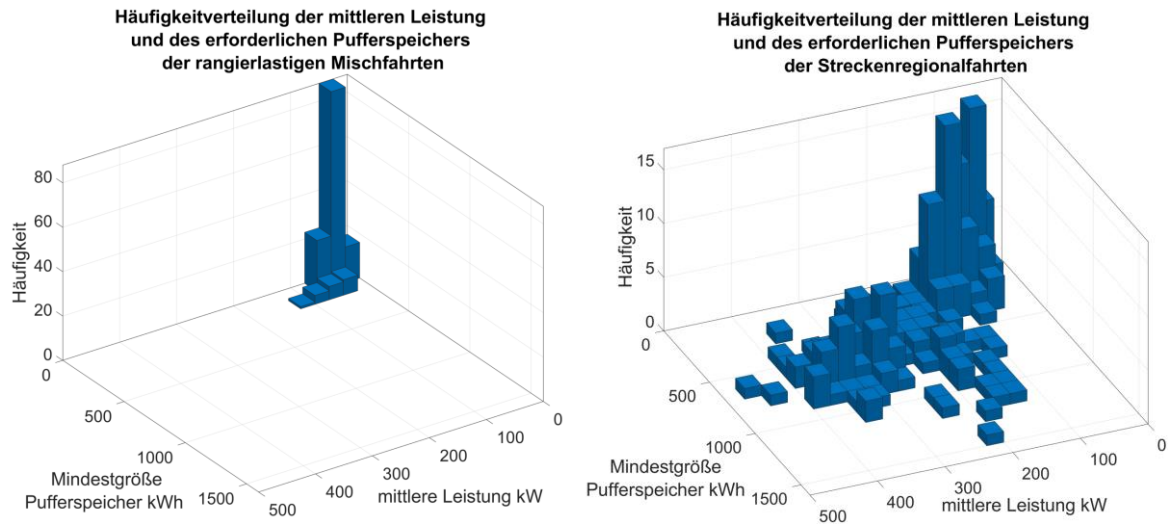


Abbildung 18: Häufigkeitsverteilung der mittleren Leistung und des erforderlichen Pufferspeichers separiert nach rangierlastigen Mischfahrten (links) und Streckenregionalverkehr (rechts)

Welche bzw. ob ausgewählte Einzelfahrzyklen bzw. Kategorien der Fahrzyklen für die Auslegung in AP 3 und AP 4 herangezogen werden, wird im späteren Verlauf des Kapitels 3 festgelegt. Die in diesem Abschnitt durchgeführte Anforderungsanalyse dient als Grundlage für die weiterführenden Arbeiten und der spezifischen Auslegung des BZ-hybriden Antriebsstranges.

2 AP 2 Stand der Technik

Autoren: DLR

Brennstoffzellenantriebe erfordern eine Reihe von im Bahnbereich noch vergleichsweise jungen Technologien wie Brennstoffzellen, Akkumulatoren und Wasserstofftanks. Diese werden in den folgenden Unterabschnitten kurz anhand konkreter Daten von verfügbaren Systemen vorgestellt (Abschnitte 2.1 bis 2.4) für straßengebundene Nutzfahrzeuge oder Schienenfahrzeuge. Um schließlich eine herstellerunabhängige und repräsentative Übersicht der spezifischen volumetrischen und gravimetrischen Leistungs- und Energiedichte der Antriebsstrangkomponenten des BZ-hybriden Antriebsstrangs abzubilden, werden jeweils Mittelwerte aus einer Vielzahl marktverfügbarer Komponenten bzw. Baugruppen verwendet (Abschnitt 2.5). Dazu wird der DLR-eigene RailTechMonitor herangezogen, welcher eine Übersicht technischer Daten von bahntauglichen Komponenten und Baugruppen darstellt. Diese repräsentativen Daten zur Leistungs- und Energiedichte der Baugruppen werden in AP 3 und AP 4 für die Auslegung und Anordnung der Baugruppen genutzt.

2.1 Brennstoffzellensysteme

2.1.1 Benötigte Baugruppen eines Brennstoffzellensystems

Die Brennstoffzellen gehören zu den Hauptkomponenten eines BZ-hybriden Antriebsstrangs. Diese wandeln die chemisch im Wasserstoff gespeicherte Energie in elektrische Energie um. Für den Betrieb einer Brennstoffzellenanlage sind neben den Brennstoffzellenstacks u.a. Luftfilter und Verdichter zur Bereitstellung und Aufbereitung des Sauerstoffs sowie eine Kühlanlage zur Abführung der Reaktionswärme der Brennstoffzellen erforderlich (auch bezeichnet als Balance of Plant – BoP). Zudem werden mitunter Luftbefeuchtungsanlagen verbaut, jedoch unterscheiden sich diesbezüglich die Anforderungen je nach Hersteller. Die Einheit aus Brennstoffzellen und aller Nebenaggregate wird fortan als Brennstoffzellensystem bezeichnet. Die Kühlung der Brennstoffzellen erfolgt der Regel mit flüssigem Kühlmittel (i.d.R. Wasser-Glykol-Gemisch), welches außerhalb des Brennstoffzellensystems mithilfe eines Lüfters und Umgebungsluft temperiert wird.

Das Brennstoffzellensystem speist den Fahrzeugzwischenkreis, über welchen die Traktions- und Hilfsbetriebe versorgt werden. Um ein konstantes Spannungsniveau der Brennstoffzellen am Zwischenkreis sicherzustellen, werden DCDC-Wandler benötigt, welche separat betrachtet werden (siehe Abschnitt 2.4).

2.1.2 Beispiele für marktverfügbare Brennstoffzellensysteme

Brennstoffzellen und Peripherie für Schienenfahrzeuge werden unter anderem von Ballard, Cummins (ehem. Hydrogenics), Toyota oder AKG (Lüfter für Kühlung) angeboten. Dabei unterscheiden sich die Angebote beispielsweise hinsichtlich der inkludierten Nebenaggregate oder der Leistungsausführungen. Üblicherweise bieten die Hersteller unterschiedliche Ausführungen an bzw. gestalten die Systeme modular. Zudem werden auch Brennstoffzellensysteme für konkrete Einbaumöglichkeiten (z. B. konturangepasst) innerhalb des Fahrzeugs oder zur Aufdachmontage angepasst. Beispielhaft ist der Hersteller Ballard zu nennen, bei welchen sowohl für die explizite Nutzung im Motorraum als auch auf dem Dach Brennstoffzellensysteme angeboten werden (siehe Abbildung 19).



Abbildung 19: Beispielhafte Brennstoffzellensysteme der Firma Ballard für verschiedene Einbauorte (Ballard 2022)

Eine beispielhafte Auflistung marktverfügbarer Brennstoffzellensysteme ist in Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7: Beispiele marktverfügbarer Brennstoffzellensysteme

Hersteller	Bezeichnung	Nennleistung [kW]	Masse [kg]	Volumen [m ³]	integrierte Nebenaggregate
Cummins (Hydrogenics)	HyPM HD 90	90	360	0,60	-
Toyota	Type I	80	250	0,39	Wasserpumpe, Luftkompressor, Wasserstoffpumpe
Ballard	FCmove HD	72	242	0,63	Kühlmittel, Luftbereitstellungssystem, Luftfilter
Ballard	FCmove HD+ Rooftop	100	260	0,70	Kühlmittel, Luftbereitstellungssystem, Luftfilter
Ballard	FCmove HD+ Engine Bay	100	260	0,43	Kühlmittel, Luftbereitstellungssystem

Die Berechnung der mittleren spezifischen volumetrischen und gravimetrischen Leistungskennzahlen der Brennstoffzellensysteme für die anschließende Antriebsauslegung (siehe Kapitel 3) erfolgt aufgrund der abweichenden Ausführungen verschiedener Hersteller immer unter Berücksichtigung aller notwendigen Nebenaggregate. Sofern die sich die inkludierte Peripherie der Systeme unterscheidet, werden für die Ermittlung der Kennzahlen (siehe Kapitel 2.5) Angleichungen vorgenommen, um die Vergleichbarkeit sicherzustellen.

2.2 Batteriesysteme

2.2.1 Benötigte Baugruppen eines Batteriesystems

Batteriesysteme setzen sich aus mehreren Bestandteilen zusammen. Die Batterie¹ selbst besteht aus mehreren parallelgeschalteten Batteriezellen (galvanische Zellen). Einzelne Batterien werden zur Erweiterung der Gesamtspeicherkapazität in Reihe zu Batteriemodulen geschaltet. Batteriepacks werden in der Regel aus mehreren dieser Module zusammengesetzt, um die für den Anwendungsfall erforderliche Batteriekapazität zu erreichen (siehe Abbildung 20).



Abbildung 20: Beispielhafte Zusammensetzung eines Batteriepacks
(Bildquelle: (Akasol 2021), Zusammensetzung eines Batteriepacks)

Batteriepacks benötigen zusätzlich eine Batterie-Managementeinheit BMS (eng. Battery Management System), welche für die Messung sowie Steuerung und Regelung der Spannungen und Ströme verantwortlich ist, um beispielsweise auffällige Zellen oder Module zu isolieren. Zudem kann das BMS den SoC und die Temperatur einzelner repräsentativer Zellen messen. In das BMS wird in der Regel das BTMS (eng. Battery Thermal Management System) direkt integriert, welches für die Temperierung des Batteriepacks zuständig ist. Mithilfe eines Kühlmediums wird das Batteriepack abhängig von den Anforderungen vorgewärmt bzw. gekühlt. Als Batteriesystem wird fortan der Zusammenschluss aus BMS, BTMS und Batteriepack bezeichnet, jedoch können die hier getroffenen Definitionen bei unterschiedlichen Herstellern variieren.

Das Batteriesystem speist den Zwischenkreis mit zusätzlichen Energiereserven bei hohen Leistungsanforderungen und kann zudem überschüssige Energie sowie Rekuperationsenergie aufnehmen und zwischenspeichern bzw. puffern. Für die Einbindung des Batteriesystems an den Zwischenkreis ist somit ein bi-direktionaler DC/DC-Wandler erforderlich (siehe Kapitel 2.4).

Die Eigenschaften von Batterien sind abhängig von der verwendeten Zellchemie in den Batteriezellen. Traktionsbatterien enthalten kathodenseitig meist Lithiumoxide und werden mit unterschiedlichen Anodenmaterialien kombiniert, wodurch die Batteriesysteme unterschiedliche Eigenschaften aufweisen. Gängige Anodenmaterialien sind Graphit (C) für Hochenergie- und Lithiumtitanatoxid (LTO) für Hochleistungsbatterien. Hochenergiebatterien bieten einen Vorteil

¹ Es handelt sich formal um einen Akkumulator, nachfolgend wird gleichbedeutend die Bezeichnung Batterie verwendet.

durch vergleichsweise hohe Energiedichten, jedoch können diese im Vergleich zu Hochleistungsbatterien nur geringere C-Raten realisieren. Die C-Rate beschreibt das Verhältnis zwischen der Leistungsabgabe/-aufnahme und der installierten Gesamtenergiemenge einer Batterie. Hochleistungsbatterien können deutlich höhere C-Raten umsetzen, weshalb diese für den Einsatz bei (kurz- bis mittelfristig) erhöhten Leistungsbedarfen besonders gut geeignet sind.

2.2.2 Beispielhafte Batteriesysteme marktverfügbarer Hersteller

Hersteller von Batteriesystemen für Traktionsanwendungen sind beispielsweise Akasol, Saft, Leclanché oder Forsee, Batterieklimatisierungen werden unter anderem bei Saft oder Technotrans angeboten. In der Regel werden sowohl Hochleistungs-, als auch Hochenergiebatterien für die Anwendung im Schienenfahrzeugbereich hergestellt und sind meist in modular aufgebauten Systemgrößen verfügbar. Beispielhafte Batteriepacks und BTMS sind in Abbildung 20 und Abbildung 21 dargestellt.

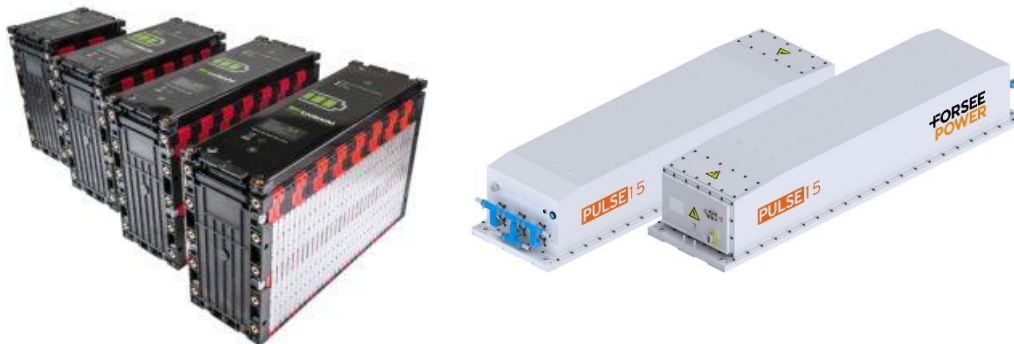


Abbildung 21: Beispielhafte Batteriepacks von Leclanché (li.) und Forsee (re.)

(Leclanché 2022), (Forsee Power 2020)

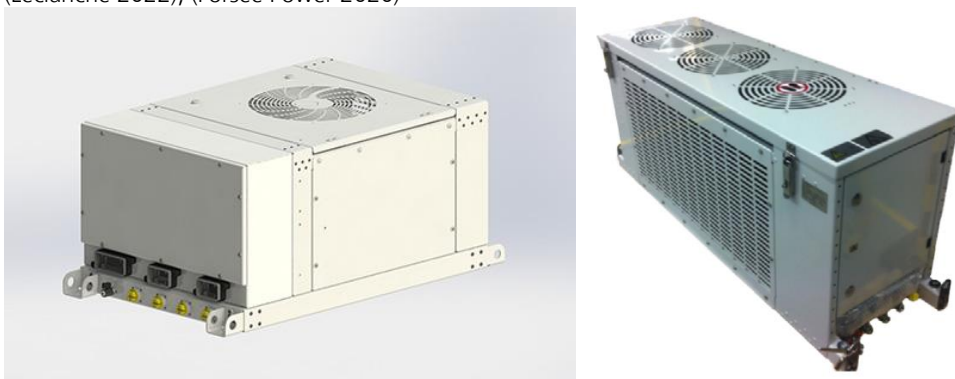


Abbildung 22: Beispielhafte BTMS zur Batterietemperierung von Technotrans (li.) und Saft (re.)

http://www.efo-power.ru/datasheet/Saft/System/Ion_OnBoard_515.pdf

https://old.technotrans.de/fileadmin/user_upload/tt_2016/Elektromobilitaet/Batteriekuehlung_Schienenfahrzeuge.jpg

Beispielhafte Auflistungen marktverfügbarer Batteriepacks und BTMS werden in Tabelle 8 und Tabelle 9 dargestellt.

Tabelle 8: Beispiele marktverfügbarer Batteriepacks

Hersteller	Bezeichnung	Typ	Nennkapazität [kWh]	Masse [kg]	Volumen [m ³]
Akasol	3 AKM 100 CYC	Hochenergie	33	210	0,139
Akasol	15 AKM 46 POC	Hochleistung	30,6	355	0,250
Leclanché	M3 Energy Module	Hochenergie	2,4	16,6	0,0113
Leclanché	M3 Energy Module	Hochleistung	0,7	16,6	0,0113
Forsee	Pulse 15	Hochleistung	14,6	260	0,210

Tabelle 9: Beispiele marktverfügbarer BTMS

Hersteller	Bezeichnung	Kühlleistung [kW]	Masse [kg]	Volumen [m ³]
Saft	Ion-OnBoard Regen Li-ion	6	145	0,366
Technotrans	zeta.line (verschiedene)	0,5-450		

2.3 Wasserstoffspeichersysteme

Die Bevorratung von Wasserstoff in Schienenfahrzeugen erfolgt vorrangig in Druckbehältern (Drucktanks), in denen der Wasserstoff gasförmig mit einem Maximaldruck von 350 bar gespeichert wird (denkbar, jedoch bisher in Schienenfahrzeugen noch nicht umgesetzt, sind grundsätzlich auch 700 bar) (Gardiner 2021). Neben einer Speicherung unter hohem Druck kann Wasserstoff prinzipiell auch in anderen Aggregatzuständen gespeichert auf einer Lokomotive mitgeführt werden. Weitere Speicheroptionen umfassen z.B. die Speicherung in tiefkalter Form in Flüssigwasserstofftanks (LH2 – Liquid Hydrogen) sowie in Kryokompressionstanks (CCH2 – Cryo-Compressed Hydrogen), die temporäre chemische Bindung von Wasserstoff in einer kohlenwasserstoffhaltigen Trägerflüssigkeit (LOHC – Liquid Organic Hydrogen Carrier) oder auch die Wasserstoffspeicherung in Metallhydriden. Diese Technologien sind jedoch nach Kenntnis der Autoren bisher noch nicht zulassungsfähig für Schienenfahrzeuge entwickelt und werden aus diesem Grund nicht weiter vertieft betrachtet.

Die Tankanlage in einem Schienenfahrzeug besteht aus:

- Speichertank-/behälter
- Wasserstoffleitung
- Einfüllstutzen/Tanknippel
- Ventile, Druckminderer
- Mechanische Einhausung und Anbindung an das Fahrzeug
- Sicherheits-, Steuerungs- und Kontrolleinrichtungen

Der Fokus wird nachfolgend auf die Druckspeichertanks gelegt.

2.3.1 Wasserstoffspeichersysteme

Wasserstoffbehälter mit 350 bar Druckniveau haben eine zylindrische Grundform bei mitunter sehr unterschiedlichen Längen und Durchmessern. Eine Auswahl an Wasserstoffdruckbehältern für den Einsatz in Nutzfahrzeugen und in Schienenfahrzeugen ist in Tabelle 10 aufgeführt.

Tabelle 10: Technische Daten ausgewählter Wasserstoffdruckbehälter (350 bar)

Hersteller	Bezeichnung	H ₂ -Kapazität [kg]	Masse Tank [kg]	Volumen [dm ³]
Luxfer	W150H35	3,6	77,6	218,3
Luxfer	W205H35	4,9	99,9	285,4
Hexagon Purus	H	8,4	120,4	476,6
NPROXX	AH500-35	8,1	109,1	463,4
Quantum	108851	3,9	53	251,8

Die Druckbehälter werden innerhalb eines Tankgestells untergebracht. Aufgrund der zylindrischen Form können die Tanks versetzt angeordnet werden, sodass die Zwischenräume möglichst effizient minimiert werden können. Für die Abschätzung der volumetrischen Kennzahlen der gesamten Wasserstofftankanlage (Wasserstoffspeichersystem) ist ein Packagingfaktor zu berücksichtigen, welcher zum einen ein Tankgestell zur Platzierung und Halterung der einzelnen Druckbehälter und zum anderen die versetzte Anordnung derselben berücksichtigt.

Bei wasserstoffbetriebenen Triebzügen des Schienenpersonennahverkehrs (SPNV) werden die Wasserstoffspeicher in der Regel auf dem Fahrzeugdach angeordnet. Deren Außenkontur ist durch die individuelle Fahrzeugbezugslinie bestimmt bzw. in den maximalen Abmaßen limitiert. Bei Rangierlokomotiven ist etwas freiere Anordnung auf dem Lokrahmen möglich. Abbildung 23 zeigt entsprechende Wasserstoffspeicherlösungen für Triebfahrzeuge.

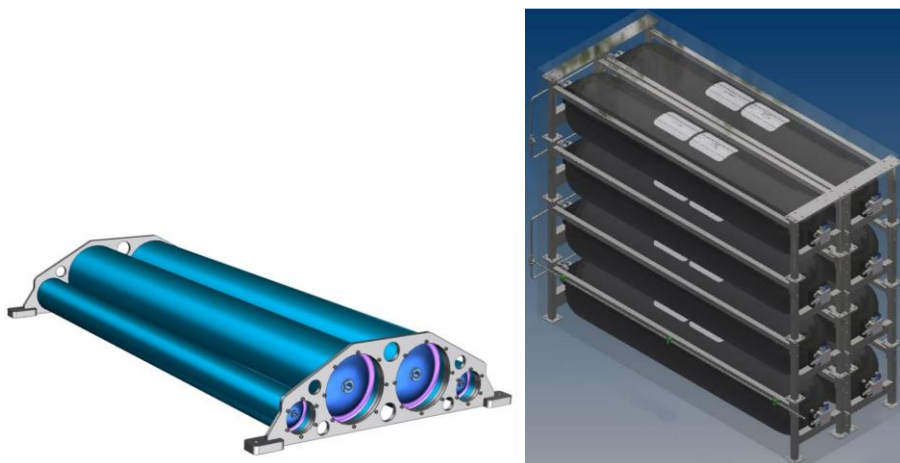


Abbildung 23: Wasserstoffspeichersysteme für Aufdachmontage (links) und für Innenrauminstallation (rechts), Bildquellen: (Siemens Mobility 2022), (Rubio et al. 2021)

Üblich sind Wasserstoffspeicher mit metallischem Liner (innen) und Kohlefaser-Ummantelung (Typ III) sowie Wasserstoffspeicher mit Kunststoff-Liner und Kohlefaser-Ummantelung (Typ IV). (EMCEL 2020) Auf dem Markt gibt es eine Reihe von Druckspeicherherstellern (Hexagon, NPROXX, Luxfer etc.) sowie von Unternehmen, die diese Speichertanks in kompletten einbaufertigen Wasserstofftankanlagen integrieren.

2.3.2 Betankungsschnittstelle

Bei der Betankungsschnittstelle kann in die mechanische Schnittstelle (Dispenser an der Tankstelle, Einfüllstutzen am Fahrzeug) und die Kommunikationsschnittstelle (Temperatur, Druck, Durchflussrate, Füllstandskontrolle) unterschieden werden. Aktuell orientiert man sich in Schienenfahrzeugen bezüglich der Kommunikationsschnittstelle u.a. am für Schwerlaststraßenfahrzeuge entwickelten Betankungsprotokoll SAE J2601-2 (Rubio et al. 2021). Darüber hinaus werden aktuell in verschiedenen Forschungsprojekten und in Normungsarbeitsgruppen spezifisch auf Schienenfahrzeuge und für kürzere Betankungszeiten zugeschnittene Standards erarbeitet und getestet (z. B. CEN/TC 256/WG 43, (Deutsche Bahn 2022)).

2.4 Leistungselektronik und weitere Komponenten

Gleichspannungs- (DC/DC-Wandler) und Wechselrichter (DC/AC-Wandler)

Die Einbindung von Brennstoffzellensystem und Batteriesystem an den Zwischenkreis erfolgt über DC/DC-Wandler, welche den Gleichstrom auf ein definiertes Spannungsniveau wandeln. Für das Batteriesystem ist ein bi-direktionaler DC/DC-Wandler erforderlich, da das Batteriesystem den Zwischenkreis sowohl mit Energie speist als auch Rekuperationsenergie aus dem Zwischenkreis aufnimmt und speichert.

In der praktischen Umsetzung können DC/DC-Wandler für Brennstoffzellensysteme und für Batteriesysteme in einem gemeinsamen Umrichtercontainer mit der Leistungselektronik und Kühlanlagen für die Antriebsumrichter und, sofern antriebskonzeptseitig erforderlich, auch mit dem Netzstromrichter angeordnet werden. Für diese Betrachtung wird von einer Trennung von DC/DC- und DC/AC-Wandlern ausgegangen, wobei die Gleichspannungsrichter für Brennstoffzellensystem und Batteriesystem aufgrund der Verwendung von spezifischen Leistungskennzahlen zusammengefasst werden. Die betrachteten Stromrichter werden unter anderem von Herstellern wie ABB oder Kiepe Electric angeboten und sind in diversen Größenordnungen erhältlich.

Elektrische Fahrmotoren

Bei dieselektrischen Fahrzeugen ist es notwendig, elektrische Motoren in den Antriebsstrang zu integrieren. Als Traktionsmotoren werden meist Asynchronfahrmotoren verwendet, welche in zahlreichen Leistungsklassen erhältlich sind. Somit besteht die Möglichkeit beispielsweise kleinere Motoren im Drehgestell direkt auf den Achsen anzubringen oder mithilfe eines größeren Motors und eines zusätzlichen Getriebes eine zentrale Antriebslösung anzustreben. Traktionsmotoren werden unter anderem von Herstellern wie Toshiba, VEM, ABB oder Siemens angeboten.

Transformator und Pantograph

Ergänzend zur Antriebsauslegung eines Brennstoffzellenhybridantriebs soll in dieser Studie ebenfalls eine BiMode-Variante mit zusätzlichem Stromabnehmer zur Nutzung der Oberleitungen beleuchtet werden. Für eine solche Antriebsanpassung wäre zusätzlich zu den BZ-hybriden Komponenten ein Transformator, ein Netzstromrichter, ein Pantograph sowie weitere Hochvoltkomponenten notwendig.

Transformatoren werden zur Spannungstransformation verwendet, um den Oberleitungsstrom für die Traktion nutzbar zu machen. Dabei handelt es sich um vergleichsweise schwere und große Baugruppen, welche unter anderem von ABB oder Siemens hergestellt werden. Der Stromabnehmer (Pantograph) stellt eine physische Verbindung zwischen Oberleitung und Fahrzeug her und wird benötigt, um die elektrische Energie aus der Oberleitung für das Fahrzeug nutzbar zu machen.

2.5 Spezifische Kennzahlen der Antriebsstrangkomponenten

Um für alle benötigten Antriebsstrangkomponenten jeweils repräsentative volumetrische und gravimetrische Kennzahlen zu ermitteln, werden jeweils die Mittelwerte aus einer repräsentativen Anzahl an Systemen herangezogen. Darin enthalten sind sowohl Komponenten aus den Marktübersichten der vorangegangenen Kapitel sowie zusätzlich Systeme, die dem DLR-RailTechMonitor entnommen wurden (siehe Tabelle 11).

Tabelle 11: Übersicht volumetrischer und gravimetrischer Kennzahlen der Antriebsstrangkomponenten

	Volumetrische		Gravimetrische	
	Leistungs- dichte [kW/dm ³]	Energie- dichte [kW/dm ³]	Leistungs- dichte [kW/kg]	Energie- dichte [kW/kg]
Brennstoffzellensystem*¹	0,10		0,29	
Hochenergiebatterien		0,101		0,089
Hochleistungsbatterien		0,064		0,06
Batteriekühlanlage / BTMS		0,015		0,039
Wasserstoffspeichersystem*²	0,013		0,056	
DCDC-Wandler	5		5	
Antriebsumrichter	0,49		0,84	

*¹ Werte enthalten Balance of Plant (BoP), also Luftfilter- und Ansauganlage und die Kühlanlage

*² Werte in den Einheiten [kg_{H₂}/dm³] (volumetrische Leistungsdichte) bzw. [kg_{H₂}/kg] (gravimetrische Leistungsdichte)

3 AP 3 Auslegung Brennstoffzellenhybridantriebs

Autoren: DLR

3.1 Vorgehensweise und Betriebsstrategie

Das Ziel des AP3 ist eine Auslegung der Brennstoffzellenhybrid-Rangierlok auf Basis der ermittelten spezifischen Leistungs- und Energiedaten der in AP2 ermittelten Komponenten. Für jeden in AP1 spezifizierten Fahrzyklus erfolgt zunächst eine individuelle Betrachtung, sodass mithilfe der kennzahlenspezifischen Komponenteneigenschaften für jeden Fahrzyklus eine Auslegung der Komponenten des Antriebsstranges ermittelt wird. Diese daraus resultierenden Ergebnisse stellen eine Übersicht der möglichen Konfigurationen dar und ermöglichen die anschließende Auswahl einer für den Realbetrieb geeigneten Konfiguration in Hinblick auf eine größtmögliche Realisierbarkeit der Fahrzyklen sowie das Packaging und Integrationskonzept des AP4.

Die Betriebsstrategie wird zunächst so definiert, dass die Brennstoffzellen den mittleren Leistungsbedarf abdecken. Die Brennstoffzellen sind annahmegemäß während der Betriebsphasen dauerhaft in Betrieb. In Zyklen, in denen der Leistungsbedarf geringer als die letztendliche Auslegung ist, werden die Brennstoffzellen temporär abgeschaltet. Die Traktionsbatterien dienen zur Pufferung der Leistungsspitzen, welche über die mittlere Leistung hinaus gehen. Zudem wird in Phasen, in denen der Gesamtleistungsbedarf unterhalb der Brennstoffzellenleistung liegt, überschüssig umgewandelte Leistung der Brennstoffzellen im Batteriesystem gespeichert. Durch diese Strategie wird gewährleistet, dass der Ladezustand der Batterien zu Beginn und zum Ende des Zyklus auf gleichem Niveau liegen (ausgeglichener Ladezustand). Der gesamte Energiebedarf wird mit dieser Strategie ausschließlich durch Wasserstoff gedeckt und es besteht keine Notwendigkeit für eine externen Batterienachladung. In der Praxis sind jedoch Art und Ausprägung der Fahrzyklen nicht in dieser Detailschärfe im Vorhinein bekannt, weshalb diese Betriebsstrategie eine modellierungsbedingte Vereinfachung darstellt. Hier bestünde für einen Brennstoffzellenhybridantrieb die zusätzliche Option, durch Vorsehen einer externen Nachlademöglichkeit die Reichweite durch Nachladung z. B. in der Nachtabstellung noch zu erhöhen bzw. den Ladezustand nachträglich auszugleichen.

Darüber hinaus ist zudem die Verwendung eines Brennstoffzellenhybrid-Oberleistungs-BiMode (BZH-OL-BiMode) denkbar. Bei vorhandener Streckenelektrifizierung wäre das Fahrzeug demnach in der Lage, den Fahrstrom für die Traktion zu nutzen und Wasserstoffkapazitäten zu sparen. Beide Antriebstopologien werden in Abbildung 24 veranschaulicht.

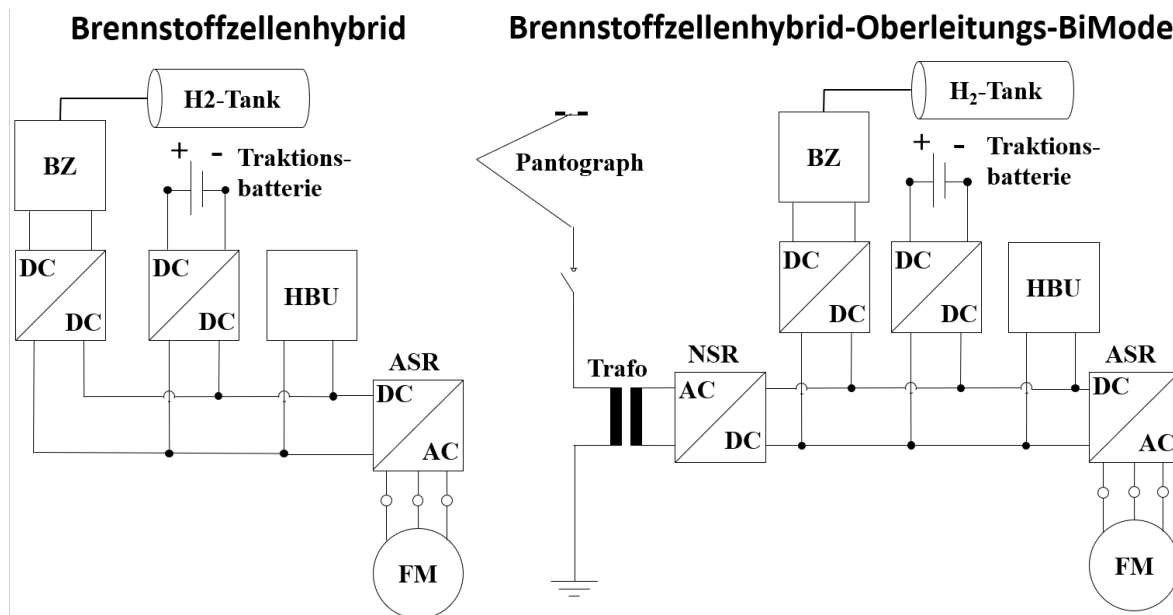


Abbildung 24: Vereinfachte Topologie eines Brennstoffzellenhybridantriebssystems sowie eines Brennstoffzellenhybrid-Oberleistungs-BiMode-Antriebs

3.2 Konkretisierung der Leistungs- und Energieanforderungen an die BZ-Hybrid-Antriebsstrangkomponenten

Brennstoffzellen

Als Grundlage für die energetische Dimensionierung der Brennstoffzellen dient die mittlere Leistung am Zwischenkreis je Fahrzyklus, welche aus der Messdatenauswertung hervorgeht. Zusätzlich werden die zu berücksichtigenden Wirkungsgrade identifiziert und der mittleren Leistung am Zwischenkreis aufgeschlagen. Somit wird sichergestellt, dass die Brennstoffzellen den realen Anforderungen entsprechend dimensioniert werden, um den Leistungsbedarf am Rad decken, sowie die Versorgung der Hilfsbetriebe gewährleisten zu können.

Die Betriebsstrategie sieht weiterhin vor, dass die Batterien ausschließlich durch die Brennstoffzellen geladen werden (Bremsenergieerückgewinnung wird energetisch nicht berücksichtigt). Bei der Betrachtung des Gesamtwirkungsgrades wird die konservative Prämisse angenommen, dass die von der Brennstoffzelle umgewandelte elektrische Energie zu 100% erst in den Traktionsakkumulator ein- und wieder ausgespeichert wird bevor sie für die Traktion und Hilfsbetriebe zur Verfügung steht. Zudem ist der Wirkungsgrad der DC/DC-Wandler einzukalkulieren. Auf Grundlage von Literaturdaten des DLR-RailTechMonitors werden Wirkungsgrade für die entsprechenden Komponenten ermittelt (Tabelle 12). Der resultierende Faktor wird entsprechend für jeden Fahrzyklus auf die berechnete mittlere Leistung am Zwischenkreis aufgeschlagen.

Tabelle 12: Wirkungsgrade zur Berechnung der Brennstoffzellenleistung

Antriebsstrangkomponente	Wirkungsgrad
Batterien (jeweils Laden und Entladen)	97%
DCDC-Wandler	97%

Mithilfe des berechneten Wirkungsgradaufschlages sowie der mittleren Leistung am Zwischenkreis lassen sich die jeweiligen Brennstoffzellenauslegungen für alle Fahrzyklen berechnen.

Traktionsenergiespeicher (Batterien)

Für die energetische und leistungstechnische Dimensionierung des Batteriesystems wird der Leistungsbedarf über unterschiedlich große Zeitfenster gemittelt und verglichen (vgl. Kapitel 1.3.3). Durch die Batterien werden gemäß der Betriebsstrategie die Leistungsspitzen abzüglich der mittleren Leistung abgedeckt.

Die erforderliche Batteriekapazität wird auf Grundlage des Energiebedarfs durch die energetisch anspruchsvollsten Leistungsspitzen berechnet. Dafür werden die benötigten Gesamtenergiemengen der auftretenden Leistungsspitzen über verschiedene Zeitfenster berechnet. Für jeden Zyklus werden 35 unterschiedlich große Mittelungsfenster untersucht, weshalb 35 verschiedene Maximalenergiebedarfe je Zyklus resultieren, welche durch das Batteriesystem abgedeckt werden müssen. Als Berechnungsgrundlage für die erforderliche Batteriekapazität wird die jeweils größte abzudeckende Energiemenge jedes Zyklus bestimmt.

Um anhand der erforderlichen Pufferspeicherenergiemenge die erforderliche Batteriekapazität abzuleiten, müssen zusätzliche Batterieeigenschaften in die Kalkulation einfließen. Diese sind abhängig vom gewählten Batterietyp (Hochenergie- oder Hochleistungszellen). Die kennzahlenbasierte Auslegung erfolgt zunächst ohne konkrete Batterieauswahl und soll eine unabhängige Abschätzung für beide Varianten darstellen.

In Hinblick auf einen Betrieb mit möglichst langer Lebensdauer sind je nach Batteriechemie unterschiedliche zulässige Lade-/bzw. Entladetiefen (DoD) zu berücksichtigen. Für Hochenergiebatterien liegt dieser Wert idealerweise im Bereich von 60% - 80% DOD. Da sich eine geringere Entladetiefe positiv auf die Zyklenfestigkeit auswirkt, wird bei Hochenergiebatterien von 70% DOD ausgegangen. Für Hochleistungsbatterien wird ein Wert von 80% DOD angenommen. Entsprechend des jeweilig zu berücksichtigenden DoD muss der Energieinhalt des oPufferspeichers erhöht werden, um die erforderliche Energiemenge unter Berücksichtigung von alterungsbedingten Kapazitätsverlusten diese selbst zum Lebensdauerende (EoL – End-of-Life) noch bereitstellen zu können.

Als weiteres Auslegungskriterium sind in Hinblick auf die Belastung der Traktionsbatterien die auftretenden Lade- und Entladeraten (C-Raten) zu berechnen und die Batteriekapazität ggf. anzupassen. Die C-Raten beschreiben das Verhältnis aus abgegebener/aufgenommener Leistung durch die Batterien und dem Energieinhalt der Batterien, sodass eine Batterie mit beispielsweise 100 kWh nutzbarem Energieinhalt bei maximal zulässigen 3 C bis zu 300 kW Leistung abgeben kann. Je nach Batterietyp unterscheiden sich die Maximalwerte, sodass bei Hochenergiebatterien 3-4 C und bei Hochleistungsbatterien 6-10 C üblich sind.

Ist die Batterie unter Berücksichtigung des erforderlichen DoD bereits ausreichend dimensioniert, um darüber hinaus die auftretenden C-Raten abdecken zu können, so erfolgt keine weitere Kapazitätsvergrößerung. Andernfalls muss der Energieinhalt der Batterie so angepasst werden, dass neben der angestrebten maximalen Lade-/ bzw. Entladetiefe auch die Grenzen der zulässigen C-Raten eingehalten werden können. Diese Abschätzung erfolgt für jeden Fahrzyklus individuell, sodass eine mindestens notwendige Batteriekapazität für die kennzahlenbasierte Abschätzung aller Fahrten erfolgen kann.

Im Zuge der Batterieauslegung werden darüber hinaus Nebenaggregate wie u.a. Kühlanlagen benötigt. Diese werden abhängig von der durch die Batterie zu erbringende Leistung bemessen. Die Leistung der Kühlanlage (bzw. Battery Thermal Management System, BTMS) ergibt sich zum einen aus der maximalen Batterieleistung über ein Mittelungsfenster von 20 min, da davon auszugehen ist, dass aufgrund der thermischen Trägheit der Batterie es erst ab dieser Zeitspanne zu nennenswerten Erwärmungen kommt. Zum anderen wird geprüft, welche maximale Ladeleistung in der Batterie theoretisch durch das Brennstoffzellensystem erbracht werden kann. Der Maximalwert aus der Leistung über das 20-Minutenfenster und der Ladeleistung der Brennstoffzelle dient als Leistungsgrundlage zur Dimensionierung des Batteriekühlsystems.

Abhängig von der zu berücksichtigenden Leistungsgrundlage der Batterien sind ausgehend von einem Batterielade- und Entladewirkungsgrad von 97% entsprechend 3% an Abwärmeleistung mithilfe der Kühlanlagen abzuführen.

Wasserstoffspeicher

Die insgesamt benötigte Energie zur Sicherstellung der Traktion und Hilfsbetriebe ergibt sich je Fahrzyklus aus dem Integral der Leistung am Zwischenkreis über der Zeit. Diese Energiemenge ist anschließend noch umzurechnen, sodass eine Wasserstoffmenge in kg resultiert. Dazu wird der Brennwert von Wasserstoff mit 33,33 kWh/kg zu Grunde gelegt. Darüber hinaus sind Wirkungsgrade einzukalkulieren. Dazu gehört zum einen der Brennstoffzellenwirkungsgrad, der bei der Umwandlung der Energie aus dem Wasserstoff in nutzbare elektrische Energie am Zwischenkreis relevant ist. Ausgegangen wird bei der Brennstoffzelle von einem konservativen konstanten Wirkungsgrad von 45% bei Maximallast. Zum anderen wird der Wirkungsgrad des DC/DC-Wandlers mit 97% berücksichtigt.

Leistungselektronik

Um ein konstantes Spannungsniveau der Brennstoffzellen am Zwischenkreis sicherzustellen werden DC/DC-Wandler eingesetzt, welche den Gleichstrom anschließend an den Zwischenkreis weitergeben. Vom Zwischenkreis wird der Strom anschließend über Antriebsumrichter (DC/AC-Wandler) in Wechselstrom umgewandelt, um durch die Fahrmotoren genutzt werden zu können. Sowohl für DC/DC- als auch DC/AC-Wandler wird ein Wirkungsgrad von 97% kalkuliert.

3.3 Auslegung Brennstoffzellenleistung und Batteriekapazitäten für alle Fahrzyklen

Die kennzahlenbasierte Auslegung erfolgt in Tabellenform und gibt für jeden Fahrzyklus eine individuelle Auslegung der Komponenten des BZ-hybriden Antriebsstranges an. Auf Basis der Leistungs- und Energieanforderungen des jeweiligen Zyklus sowie der spezifischen Kennzahlen

der Komponenten wird jeweils die nötige Dimensionierung der Antriebsstrangkomponenten berechnet und der Gesamtbauraumbedarf sowie die Gesamtmasse ermittelt (Tabellenausschnitt siehe Abbildung 25).

Fahrzyklus-Nr.	Kategorie	Dauer [h]	Distanz [km]	Massen					Volumen									
				Gesamtenergie [kWh]	Wasserstoffbedarf [kg]	mittlere Leistung [kW]	Bat [t]	BZ [t]	Bat-Klima [t]	Wandler [t]	Tank [t]	gesamt [t]	Bat [m³]	BZ [m³]	Bat-Klima [m³]	Wandler [m³]	Tank [m³]	gesamt [m³]
1	Streckenregional	9,5	120,47	969,78	66,66	102,11	4,08	0,409	0,440	2,503	1,200	8,628	3,82	1,176	1,144	4,033	5,162	15,337
2	rangierl. Mischve	6,99	20,93	206,84	14,22	29,61	1,45	0,119	0,118	2,503	0,256	4,441	1,35	0,341	0,308	4,033	1,101	7,138
3	Streckenregional	5,8	82,39	369,42	25,39	63,67	3,96	0,255	0,385	2,503	0,457	7,559	3,71	0,733	1,000	4,033	1,966	11,445
4	Streckenregional	5,7	61,75	361,76	24,87	63,5	2,76	0,254	0,194	2,503	0,448	6,155	2,58	0,731	0,504	4,033	1,926	9,778
6	rangierl. Mischve	4,67	21,77	150,76	10,36	32,25	1,59	0,129	0,070	2,503	0,186	4,478	1,49	0,371	0,183	4,033	0,802	6,880
7	Streckenregional	9,25	56,03	485,97	33,4	52,51	2,80	0,210	0,316	2,503	0,601	6,430	2,63	0,605	0,820	4,033	2,587	10,670
8	rangierl. Mischve	3,91	17,45	106,69	7,33	27,28	1,40	0,109	0,086	2,503	0,132	4,229	1,31	0,314	0,224	4,033	0,568	6,451
9	Streckenregional	5,62	127,36	1933,34	132,89	344,3	19,12	1,378	0,919	2,503	2,392	26,309	17,92	3,965	2,388	4,033	10,291	38,600
10	Streckenregional	4,88	115,89	1320,5	90,77	270,35	11,27	1,082	0,952	2,503	1,634	17,442	10,57	3,113	2,474	4,033	7,029	27,217
11	rangierl. Mischve	4,24	28,39	240,71	16,55	56,76	1,49	0,227	0,125	2,503	0,298	4,638	1,39	0,654	0,326	4,033	1,282	7,687
12	Streckenregional	2,26	57,72	583,65	40,12	258,22	4,01	1,034	0,574	2,503	0,722	8,842	3,76	2,974	1,493	4,033	3,107	15,366
13	Streckenregional	5,47	128,76	1852,66	127,34	338,81	14,39	1,356	1,003	2,503	2,292	21,543	13,49	3,902	2,608	4,033	9,861	33,894
14	Streckenregional	4,32	115,87	1112,37	76,46	257,29	10,03	1,030	0,928	2,503	1,376	15,869	9,41	2,963	2,413	4,033	5,921	24,735

Abbildung 25: Ausschnitt der Tabelle zur kennzahlenbasierten Auslegung aller Fahrzyklen

Darüber hinaus wird parallel zu der ersten Auslegung eine zusätzliche Antriebsstrangauslegung durchgeführt, welche für jeden Fahrzyklus eine zusätzliche Batteriedimensionierung berechnet, welche auf einer vorher gewählten und festgelegten Brennstoffzellenleistung basiert. Somit können von der mittleren Leistung abweichende Brennstoffzellenkonfigurationen sowie die entsprechend daraus resultierenden neuen Batteriegrößen berechnet werden. Anschließend wird ermittelt, welcher Anteil aller Fahrzyklen in Bezug auf Bauraumverfügbarkeit mithilfe dieser gewählten Auslegungsvariante abgedeckt werden kann. Ergänzend wird diese Auswertung auch kategoriespezifisch unterteilt in rangierlastigen Mischverkehr und Streckenregionalverkehr durchgeführt. Der in der jeweiligen Lok zur Verfügung stehende Bauraum wird dafür zu Beginn festgelegt und kann je nach betrachtetem Fahrzeug angepasst werden. Somit können Aussagen zur Machbarkeit für beliebige Rangierloks mit unterschiedlichen Bauräumen getroffen werden.

Die Tabelle bietet zudem zahlreiche Filtermöglichkeiten, sodass die Ergebnisse der einzelnen Fahrzyklen beispielsweise nach Dauer, Distanz, Bauraumbedarf oder Kategorie (rangierlastige Mischfahrt oder Streckenregionalfahrt) gefiltert werden können. Dies ermöglicht eine spezifischere Auswertung, sodass bestimmte Kriterien oder Eigenschaften der Fahrzyklen detaillierter betrachtet werden können.

Die dargestellte kennzahlenbasierte Tabelle mit den beschriebenen Funktionalitäten ermöglicht einen Überblick zur Machbarkeit der im Realbetrieb dokumentierten Einsatzfahrten. Somit bieten die kennzahlenbasierten Auslegungen die Grundlage für das Packaging und Integrationskonzept in AP 4, da auf Basis der Tabelle anschließend entschieden werden kann, welche Auslegungsvariante den gesamten Datensatz bestmöglich abbildet.

3.4 Exkurs: Überlegung zu Batterie-Oberleitungs-BiMode

Eine Erweiterung des Antriebsstrangs um eine Oberleitungseinheit soll neben dem reinen Brennstoffzellenhybridantrieb als eine weitere Möglichkeit untersucht werden um den Streckenregionalverkehr inkl. des rangierlastigen Mischbetriebs zu ermöglichen. Es wird davon ausgegangen, dass die nahezu vollständige Streckenelektrifizierung auf den von der dpr befahrenen Abschnitten mithilfe der OL-Einheit für die Traktion genutzt werden kann. Nichtelektrifizierte Anschlussstrecken sowie Rangiertätigkeiten im Hafengebiet hingegen sind durch die BZ-Einheit abzudecken.

Diese zusätzliche Antriebsoption muss sich der Fragestellung entgegenstellen, inwiefern auch ein reiner Batterie-Oberleitungs-BiMode ohne Brennstoffzelleneinheit für den Betrieb geeignet ist. Dabei handelt es sich um eine 15 kV/16,7 Hz-Oberleitungsrangierlokomotive für den Bezug von Fahrstrom aus der Streckenoberleitung mit zusätzlichem Energiespeicher (z.B. Akkumulator) zur Überbrückung nicht elektrifizierter Abschnitte. Der Akkumulator wird in diesem Fall unter der Oberleitung nachgeladen.

Eine Besonderheit des Duisburger Hafens ist die vergleichsweise große Gesamtgleislänge von ca. 200 km, auf denen die Rangierlokomotiven mitunter mehrere Tage operieren ohne zwischendurch in den Streckenbetrieb überzugehen. Diese Hafengebiete verfügen jedoch über keine 15 kV-Nachlademöglichkeiten (16,7 Hz oder 50 Hz) durch Oberleitungen oder Ladestationen. Hinzu kommt die Anforderung einer hohen betrieblichen Produktivität sowohl an die Fahrzeuge als auch die Triebfahrzeugführer und somit das Ziel möglichst geringer Stillstandzeiten für Nachladung oder Betankung sowie langer Intervalle zwischen den Betankungen/Nachladungen im Stand (angestrebt wird maximal 1x täglich).

Die Analyse der Messdaten des rangierlastigen Mischbetriebs hat gezeigt, dass während anspruchsvoller Zyklen mit hohem Energiebedarf häufig bis zu 400-500 kWh am Zwischenkreis innerhalb einer Fahrzyklusdauer von 4 Stunden Dauer erforderlich sind. Unter Berücksichtigung der Wirkungsgrade von stromführenden Komponenten und der Reserven für End-of-Life-Kriterien der Batterie sowie der Vermeidung von Tiefenendladung (DoD-Limitierung) ergeben sich daher zu installierende Batteriekapazitäten von schätzungsweise 800 kWh. Aufgrund der Begrenzung der Stromtragfähigkeit im Stillstand auf 80 A bei der Batterienachladung unter Oberleitung würde folglich bei einer Ladeleistung von 1200 kW und 800 kWh nachzuladenden Energieinhalt eine Nachladezeit von mindestens 40 min resultieren.

Erschwerend kommt hinzu, dass die Einsatzgebiete der Lokomotiven keinem definierten Fahrplan folgen und sich die Lokomotiven bei Nachladeerfordernis an sehr verschiedenen Orten des 200 km langen Gleisnetzes befinden können. Somit kann nicht sichergestellt werden, dass sich bei Erschöpfung der Energiereserven eine Nachlademöglichkeit in betrieblich sinnvoller und vertretbarer Distanz befindet. Bei einem wasserstoffbetriebenen BiMode-Fahrzeug mit BZ-Einheit kann ohne Einschränkung des Betriebsablaufs bzw. -programms an dezidierten (und wenigen) Orten eine Nachtankung in kurzer Zeit erfolgen, vergleichbar mit der Betankung von Dieselkraftstoff. Daher genügt auch die Vorhaltung nur einiger weniger Tankstellenstandorte.

Auf Basis dieser überschlägigen Annahmen erscheint im Betrieb der dpr ein BZH-OL-BiMode eine größere Flexibilität gegenüber einer Batterie-OL-BiMode-Variante zu bieten. In jedem Fall wären jedoch zur Absicherung vertiefte Untersuchungen zum Batterie-OL-BiMode außerhalb dieser Vorstudie erforderlich.

4 AP 4 Packaging and Integrationskonzept Bestandslok vs. Neubaulok

Autoren: DLR

4.1 Methodik der fahrzeugbasierten Auslegungen

Die Entwicklung von Packaging und Integrationskonzepten folgt dem dargestellten Ablaufschema und berücksichtigt die aufgeführten Arbeitsschritte (siehe Abbildung 26):

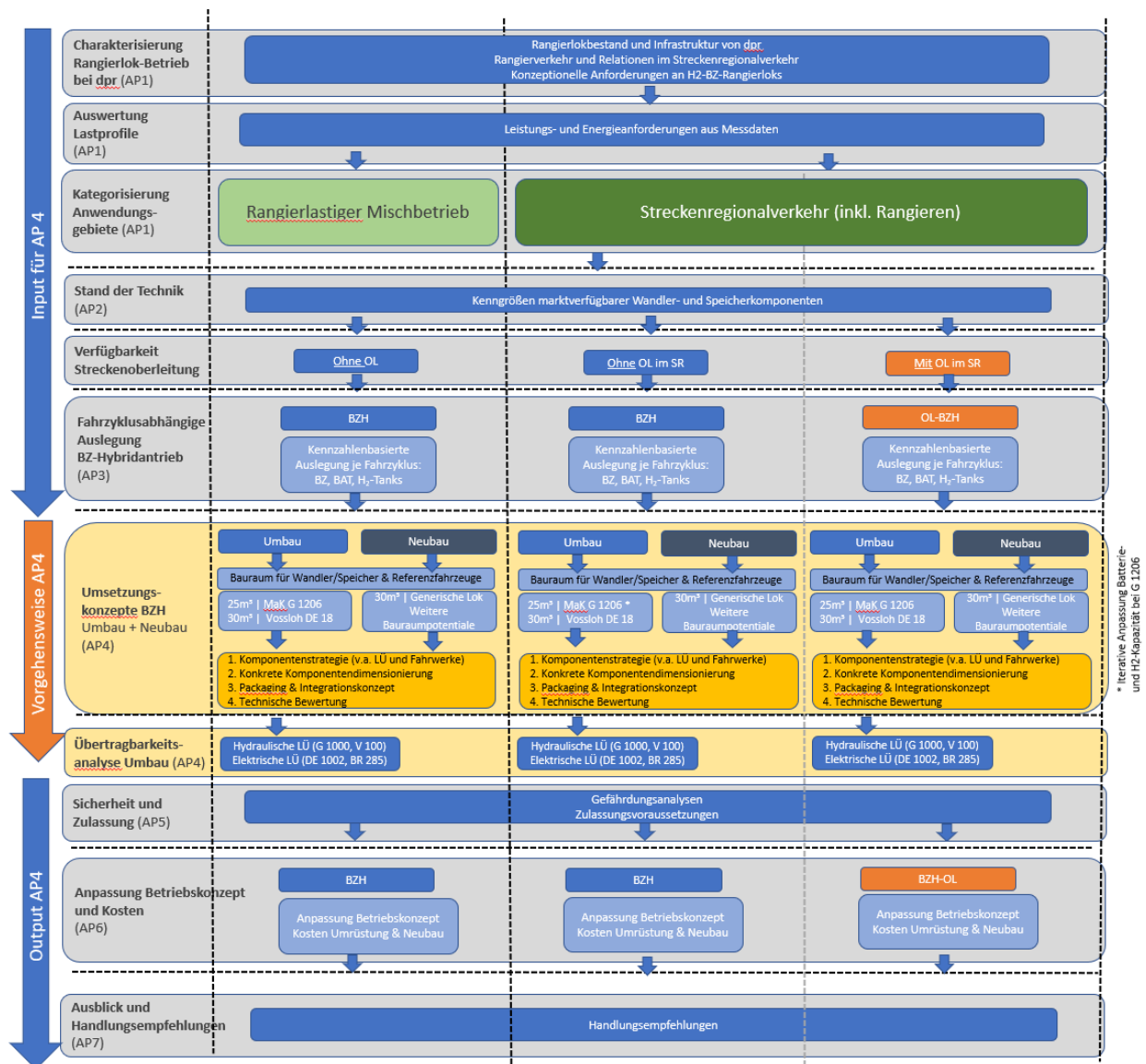


Abbildung 26: Ablaufschema des Projekts (AP 4 gelb hervorgehoben)

Ausgangspunkt für die Integrationsuntersuchung stellt das gewünschte **Anwendungsgebiet** dar, konkret die Kategorien rangierlastiger Mischbetrieb sowie der Streckenregionalverkehr (Erläuterung in Abschnitt siehe Tabelle 5 in Abschnitt 1.3.3). Für den **Bauraum** werden zwei Ausprägungen betrachtet. Zum einen eine Variante mit 25 m³ verfügbarem Bauraum auf dem vorderen Aufbau des Lokrahmens (dies entspricht etwa dem verfügbaren Bauraum auf einer

MaK G 1206) und zum zweiten eine Variante mit 30 m³ verfügbarem Bauraum (der äquivalente Bauraum einer Vossloh Locomotives DE 18).

Als Optionen für eine **Umsetzung** werden jeweils Varianten für den Umbau von Bestandslokomotiven und für den Neubau abgeleitet und bewertet.

Für den Umbau von Bestandslokomotiven werden einmal die bei dpr eingesetzte MaK G 1206 und die Vossloh Locomotives DE 18 betrachtet. In der anschließenden **Übertragbarkeitsanalyse** für den **Umbau** wird untersucht, inwiefern die spezifischen Erkenntnisse für die betrachteten Referenzfahrzeuge auf weitere Rangierlokbaureihen mit Dieselantrieb übertragbar sind.

Ergänzend zu den bisherigen Auslegungen des BZ-Hybrids wird als weitere relevante Dimension der Faktor **Oberleitungsverfügbarkeit** im Streckenbetrieb als entscheidungsrelevantes Merkmal eingeführt. Dies hat Rückwirkungen auf das **technische Antriebskonzept**, konkret auf die Entscheidung, ob ein Brennstoffzellenhybrid (BZH) ausgelegt wird oder ein zusätzliches 15 kV-Oberleitungsantriebsmodul in die Fahrzeugstruktur eingebracht wird. Dies entspricht einem Brennstoffzellenhybrid-Oberleitungs-BiMode (BZH-OL).

4.2 Umbaukonzeption

Die grundlegenden Untersuchungen werden zunächst für die Fahrzeuge MaK G 1206 mit hydraulischer Leistungsübertragung sowie für die Vossloh DE 18 mit elektrischer Leistungsübertragung durchgeführt. In beiden betrachteten Fällen soll der verfügbare Bauraum zwischen den Drehgestellen für die Antriebsstromrichtereinheit genutzt werden. Bei der DE 18 ist dort bereits ein Antriebsstromrichter angeordnet, bei der G 1206 könnte der Bauraum des heutigen Dieselmotortanks genutzt werden. Daraus ergibt sich, dass jeweils der Bereich der vorderen Aufbauten auf dem Lokrahmen für die Energieversorgungs- und Wandlerkomponenten des BZ-hybriden Antriebsstranges zur Verfügung steht. In diesem Bereich werden die Brennstoffzellen, die Batterien, die Wasserstofftanks sowie alle erforderlichen Wandler und Kühler untergebracht.

4.2.1 Komponentenstrategie Umbau - Allgemeine Randbedingungen

Bei einem Umbau auf einen alternativen Antriebsstrang gilt es eine Vielzahl an allgemeinen Randbedingungen einzuhalten. Dazu zählen unter anderem:

- Achslasteinhaltung
- Gleiche Masseverteilung
- Freihaltung des für den Rangierbetrieb notwendigen Sichtfelds
- Beibehaltung Mittelführerhaus
- Beibehaltung Umläufe

Weiterhin sollen möglichst viele der aktuell bestehenden Baugruppen und Systeme beibehalten werden können bzw. nur geringfügig geändert werden müssen. Dazu zählen beispielhaft:

- Lokrahmen
- Puffer und Kupplungen
- Bremsanlage inkl. Druckluftanlage

- Bremssteuerung
- Fahrwerke (insofern möglich)
- Zugsicherungsanlage und Zugfunk
- Anbauten

Die Anpassung oder Erneuerung der Fahrzeugsteuerung dürfte in vielen Umrüstungsfällen erforderlich werden. Im Falle einer Umrüstung auf BiMode-Antrieb mit Oberleitungseinheit gilt es weiterhin zu prüfen inwieweit der bestehende Führerstand für die Dachausrüstung (Pantograph und HV-Ausrüstung) geeignet ist um die notwendigen Normen und Richtlinien zu erfüllen und inwiefern ausreichend Platz zur Verfügung steht.

4.2.2 Umbaukonzept – MaK G 1206

Fahrzeugbeschreibung



Abbildung 27: MaK G 1206 - Dieselhydraulische Rangierlokomotive von Hugh Llewelyn. Lizenz: CC BY-SA 2.0 (Bildausschnitt)

Bei der MaK G 1206 (Abbildung 27) handelt es sich um vierachsige Mittelführerhaus-Diesellokomotive mit hydraulischen Leistungsübertragung. Ihr übliches Einsatzfeld ist der mittlere bis schwere Rangierdienst sowie der Streckendienst. Je nach Einsatzzweck und Anforderung kann die Dienstmasse durch zusätzliche Ballastierungen zwischen 80 und 90 t variiert werden. Die maximal zulässige Achslast beträgt gemäß Streckenklasse D4 22,5 t. Die Fahrzeuglänge über Puffer liegt bei 14,7 m. Die installierte Leistung des Dieselmotors beträgt 1500 kW und die erreichbare Anfahrzugkraft 291 kN. Die Fahrzeuge weisen keinen modularen Aufbau (im Sinne eines frei gestaltbaren Wechsels des Antriebssystems) auf. Die schematische Darstellung in Abbildung 28 (hier auf Basis einer Vossloh Locomotives G 18) verdeutlicht den prinzipiellen Aufbau der Lokomotive mit dieselhydraulischer Leistungsübertragung.



Abbildung 28: Aufbau Vossloh Locomotives G 18 mit dieselhydraulischer Leistungsübertragung, der Aufbau einer MaK G 1206 ist vergleichbar, Abbildung: (Vossloh Locomotives o.J.)

Blau: Dieselmotor, in rot die Primär- sowie die Sekundärgelenkwellen zur Rotationsübertragung und in grün mittig am Fahrzeug das Strömungsgetriebe zur Momentenwandlung und in grün an den Radsätzen die Radsatzgetriebe.

Zunächst wurden die für die in der Studie als „nutzbar“ identifizierten und definierten Bauräume für den alternativen Antriebsstrang analysiert. Durch den Wegfall des hydrodynamischen Strömungsgetriebes, des Dieselmotors und der Motorkühler ergeben sich die in Abbildung 29 dargestellten farblich gekennzeichneten Bauräume der Referenzdiesellokomotive MaK G 1206 für die Komponenten des alternativen Antriebsstranges.

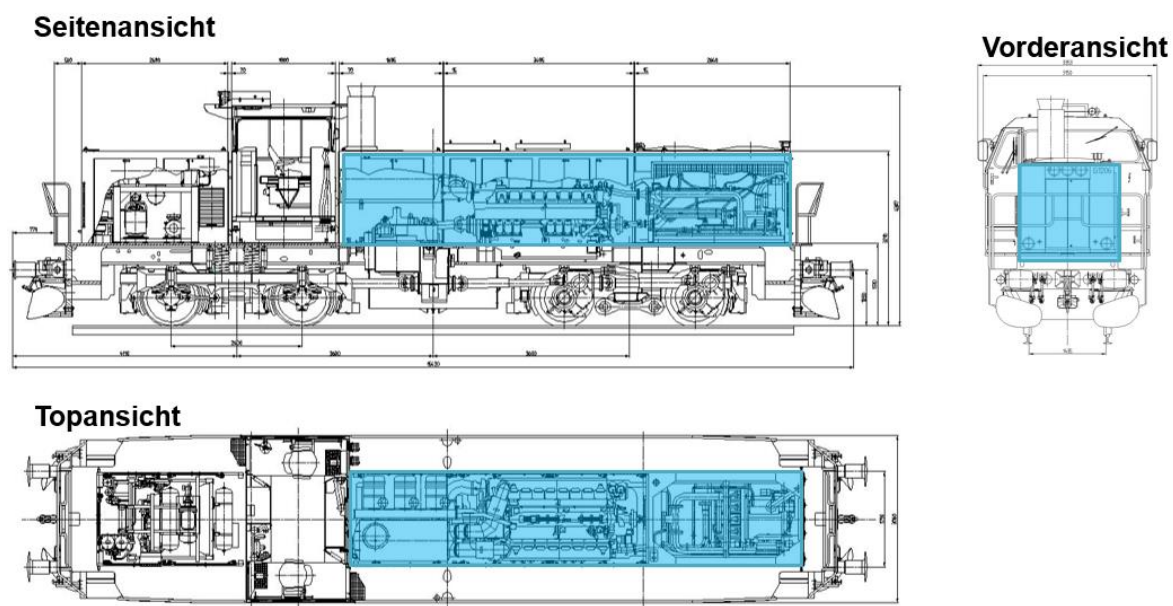


Abbildung 29: Bauräume der MaK G 1206 für neue Antriebsstrangkomponenten (Bildquelle: Vossloh Locomotives, eigene Hervorhebung)

Die hellblau hervorgehobenen Bereiche besitzen ein Volumen von schätzungsweise 24,6 m³. In diesem Bereich werden die Batterien, die Brennstoffzellen, die Wasserstofftanks sowie alle erforderlichen Wandler und Kühler untergebracht. Im hinteren Aufbau des Fahrzeuges wird die Fahrzeugsteuerung sowie das Bremsgerüst erhalten bzw. nur geringfügig angepasst.

Im Bereich zwischen den Drehgestellen, in welchem beim aktuellen Fahrzeug u.a. die Dieselmotorkraftstofftanks mit einem Fassungsvermögen von ca. 3150 l untergebracht sind, soll bei einem Umbau auf eine elektrische Leistungsübertragung die Umrichtereinheit angeordnet werden.

Umbau auf BiMode-Oberleitungs-BZ-Hybrid-Fahrzeug

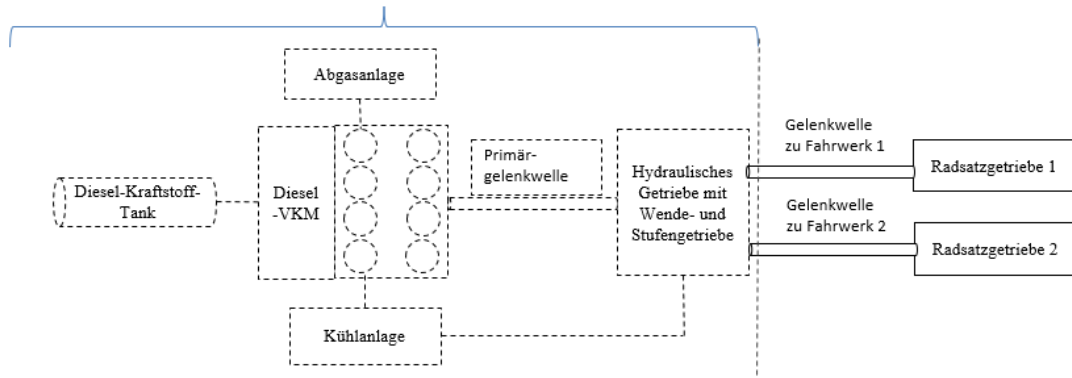
Grundsätzlich ist auf Basis des dpr-spezifischen Einsatzgebietes auch die Nutzung einer BZ-Hybrid-Lokomotive mit zusätzlicher Elektroenergieentnahme aus dem Fahrdraht denkbar. Die Hürden bei einer Umrüstung einer G 1206 auf ein BZ-Hybrid-Fahrzeug mit Oberleitungsanlage sind jedoch sehr vielseitig. Es ist davon auszugehen, dass das Mittelführerhaus vollständig überarbeitet werden muss. In diesem Zusammenhang muss auch ein neuer Bauraum für die Innenraumklimatisierungsanlage gefunden werden. Zusätzlich erweitert sich die technische Komplexität und somit der Aufwand zur Erlangung der Zulassungsgenehmigung.

4.2.2.1 Variante 1: Beibehaltung Fahrwerke und Gelenkwelle

Die Umrüstung eines Fahrzeuges mit dieselhydraulischer Leistungsübertragung zu einer elektrischen Leistungsübertragung erfordert neben dem Ersatz der Dieselmotor-Strömungsgetriebe-Kombination durch eine Brennstoffzellenhybrid-Kombination auch ein Konzept zur Leistungsübertragung. Um den technischen Änderungsumfang an den Drehgestellen gering zu halten, muss eine Umwandlung der elektrischen Leistung auf die Gelenkwellen erfolgen, also eine Anpassung an Drehzahl- und Drehmomentcharakteristik der Gelenkwellen-Achsgetriebe-Kombination im Bestandsfahrzeug. Entfallen würde in diesem Fall der Dieselmotor, die Motor Kühlanlage, die Abgasanlage, die Dieseltanks und das hydraulische Getriebe. Die Sekundär gelenkwellen müssen mit zentral angebrachten elektrischen Motoren über ein Zwischengetriebe verbunden werden. Die erforderlichen Fahrumrichter könnten links und rechts neben den Gelenkwellen unterhalb des Rahmens angebracht werden. Abbildung 30 verdeutlicht schematisch, welche der Baugruppen in diesem Fall übernommen werden können und welche entfallen bzw. ersetzt werden müssen.

Dieselhydraulischer Antrieb

Entfall des dieselhydraulischen Antriebsstrangs



BZ-Hybrid mit unveränderten Fahrwerken/Gelenkwellen

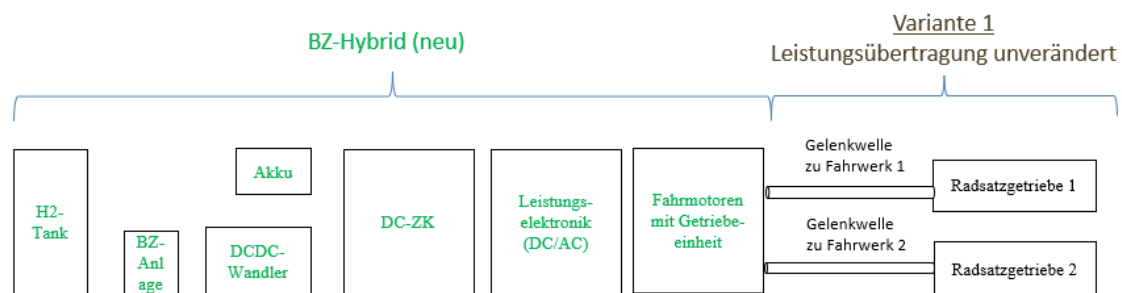


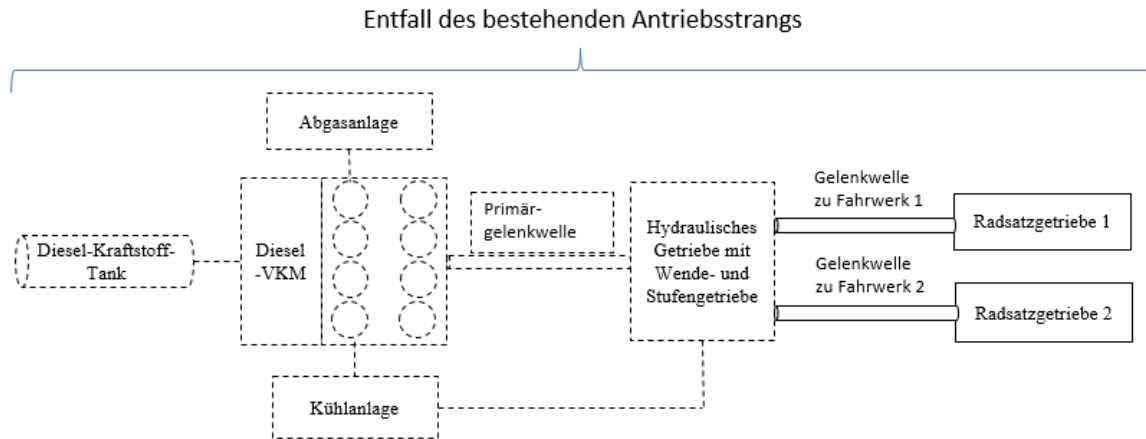
Abbildung 30: MaK G 1206 Konzept Beibehaltung Fahrwerk und Gelenkwellen

Aus technischer Sicht wird das vorgeschlagene Konzept grundsätzlich als beherrschbar eingeschätzt. Wirtschaftlich ist das Konzept durch die Beibehaltung größerer Baugruppen und dem damit verbundenen Wegfall möglicher erforderlicher Neuzulassungen einzelner Baugruppen grundsätzlich denkbar, müsste jedoch einer vertieften Prüfung unterzogen werden.

4.2.2.2 Variante 2: Fahrmotoren und Radsatzgetriebe in Drehgestell, Entfall Gelenkwellen

Ein zweites Konzept für die Umrüstung der bestehenden Leistungsübertragung des Fahrzeuges zu einer elektrischen Leistungsübertragung besteht darin, die Drehgestelle mit Fahrmotor-Getriebeeinheiten an den Achsen zu versehen. Bei dieser Variante entfallen nahezu alle Komponenten des dieselhydraulischen Antriebsstranges und werden durch die Komponenten mit elektrifizierter Leistungsübertragung ersetzt. In Abbildung 31 sind die Komponenten des bisherigen Antriebsstranges sowie die Komponenten des neuen Antriebsstranges topografisch dargestellt.

Dieselhydraulischer Antrieb



BZ-Hybrid mit elektrischer Leistungsübertragung

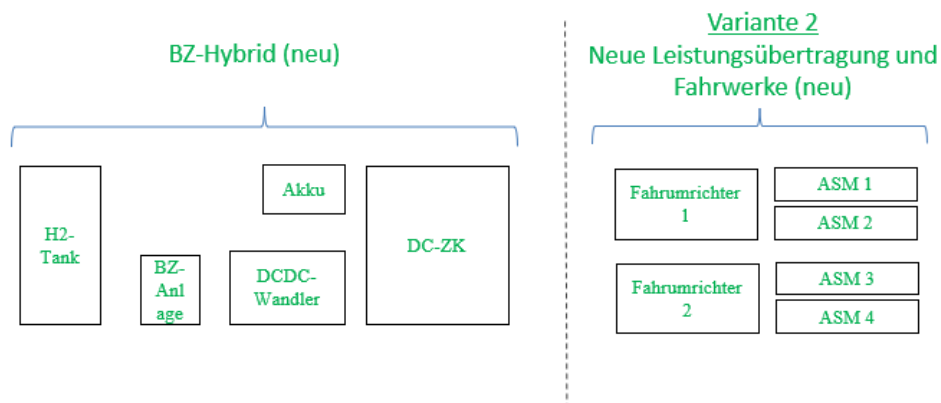


Abbildung 31: G 1206 Konzept Elektrifizierung Drehgestell

Aus technischer Sicht ist das dargestellte Konzept grundsätzlich realisierbar. Jedoch erfordert der Umbau in jedem Fall eine Neuzulassung der Drehgestelle und der Bremsanlage. Das Konzept bietet allerdings Vorteile hinsichtlich des Bauraums und der Rekuperationsmöglichkeit.

4.2.3 Umbaukonzept – Vossloh Locomotives DE 18

Fahrzeugbeschreibung



Abbildung 32: Vossloh DE 18 (Clic, [CC BY-SA 4.0](#), [Link](#), Bildausschnitt)

Die Vossloh DE 18 ist eine vierachsige Mittelführerhaus-Rangierlokomotive mit 1800 kW Dieselmotor und einer elektrischen Leistungsübertragung. Sie wird im schweren Rangierdienst

sowie im Streckendienst eingesetzt. Die Länge über Puffer beträgt 17 m. Durch die Leistung und eine Dienstmasse von 80 bis zu 90 t ist eine Anfahrzugkraft von bis zu 300 kN möglich. Jedes Drehgestell wird, u.a. aus Redundanzgründen separat durch ein Umrichterpaket angesteuert.

Die Hauptbaugruppen des dieselelektrischen Antriebsstranges und deren Anordnung in der Lok wird in Abbildung 33 veranschaulicht. In blau gekennzeichnet ist die Motor-Generatoreinheit, in gelb die Komponenten der Abgasanlage sowie im vorderen Bereich die Kühlanlage.

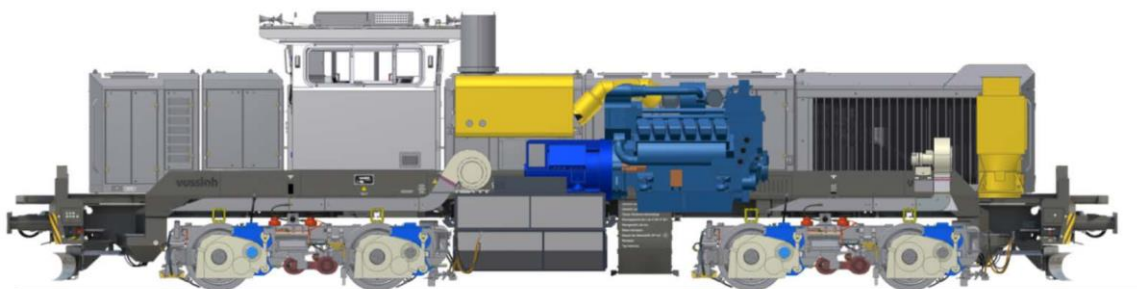


Abbildung 33: Aufbau Vossloh DE 18 mit elektrischer Leistungsübertragung (Vossloh Locomotives o.J.)

Auf dem Rahmen, blau: Dieselmotor und Generator; gelb: Abgasanlage und Kühlanlage (vorn) – in den Drehgestellen, blau: Fahrmotor und Getriebe.

Zunächst wurde untersucht, welcher Bauraum für die Komponenten des BZ-hybriden Antriebsstranges grundsätzlich zur Verfügung steht. Bei einem Umbau müssten in jedem Falle die Dieselmotor- sowie die Generatoreinheit ersetzt werden welche sich im vorderen Aufbau der Lok befinden. Unter der Annahme, dass die bestehenden Baugruppen unterhalb des Rahmens (Umrichter, Fahrmotoren, Radsatzgetriebe) zunächst erhalten bleiben können ergibt sich der in Abbildung 34 in hellblau gekennzeichnete Bauraum für Batteriesystem, Brennstoffzelleneinheit, Wasserstofftanks sowie alle zusätzlich erforderlichen Umrichter. Zusätzlich entfällt der Dieselmotortank, der theoretisch als weitere Bauraumreserve unterhalb des Rahmens zur Verfügung steht.

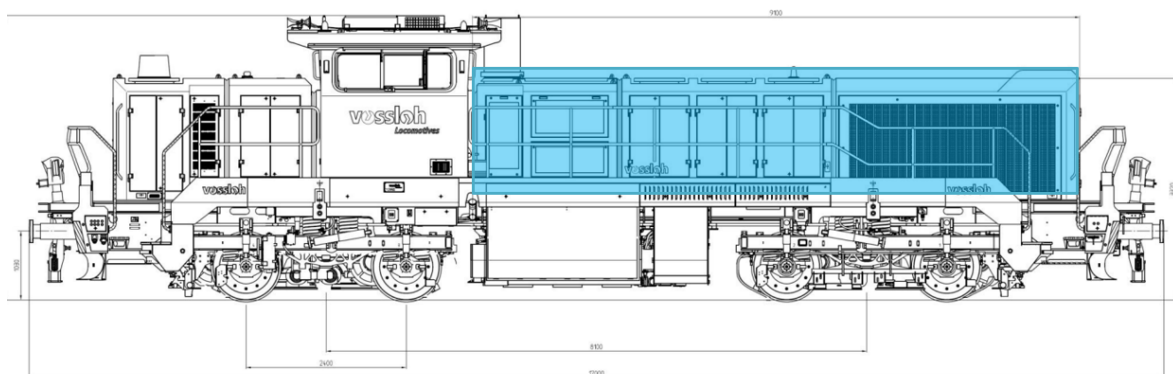


Abbildung 34: Vossloh Locomotives DE 18 mit Bauräumen für alternative Antriebsstrangkomponenten in blau hervorgehoben

Eigene Hervorhebung auf Basis (Hildebrandt und Schwarz 2013)

Nach einer ersten Abschätzung stehen in diesem Bereich etwa 30 m³ für die Komponenten des alternativen Antriebsstranges im vorderen Aufbau der Lok zur Verfügung.

Umbau auf BZ-Hybrid-Fahrzeug

Da das Fahrzeug bereits über eine elektrische Leistungsübertragung, das heißt, neben dem Generator auch über Fahrumrichter, im Drehgestell verbaute Fahrmotor-Radsatzgetriebekombinationen verfügt, wird davon ausgegangen, dass diese Komponenten beibehalten werden. Vor einem konkreten Umbau auf ein Brennstoffzellen-Hybridfahrzeug sollte zunächst spezifisch untersucht werden, ob die vorhandene Leittechnik sowie die Steuerung vollständig oder in Teilen erhalten bleiben kann. Zusätzlich soll sichergestellt werden, dass bzw. wie die Achslastverteilung sowie sonstige zulassungsrelevante Änderungen und der damit verbundene Zulassungsaufwand und Kosten möglichst minimiert werden können. Die Energieversorgungs- und Wandlerkomponenten des brennstoffzellenhybriden Antriebsstranges werden bei der vorgestellten Variante im vorderen oberen Aufbau der Lok platziert.

Grundsätzlich ist ein Umbau als nicht trivial anzusehen, allerdings aus technischer Sicht grundsätzlich möglich. Die Weiterverwendung der Fahrumrichter ohne konkrete Anpassungen ist spezifisch zu prüfen. Weiterhin ergibt sich bei Übernahme der bestehenden Fahrumrichter der Nachteil, dass dieser nicht für Rekuperation, also der Rückgewinnung von Bremsenergie in die Batterie geeignet ist.

Umbau auf BiMode-Oberleitungs-BZ-Hybrid-Fahrzeug

Grundsätzlich ist auch bei einer DE 18 die zusätzlicher Elektroenergieentnahme aus dem Fahrdraht vorstellbar. Da ein Großteil der Streckenfahrten der dpr unter Oberleitung stattfinden, soll diese Möglichkeit auch grundsätzlich untersucht werden.

Technisch ist eine Umrüstung einer DE 18 auf ein BZH-OL-Fahrzeug denkbar. Jedoch bedarf es genauerer Untersuchungen hinsichtlich der dafür erforderlichen Zulassung auf Grund der zusätzlichen Oberleitungsanbindung, was zu Konsequenzen in Bezug auf die zu erfüllenden Normen führen dürfte.

Die Umrüstung auf ein BZH-OL-Fahrzeug ist grundsätzlich als sehr komplex anzusehen. Auf dem Mittelführerhaus muss unter anderem eine dachseitige Hochspannungsausrüstung installiert werden. Dafür gilt es zunächst sicherzustellen, dass dafür die Voraussetzungen sowohl seitens des benötigten Platzes sowie auch der elektrischen Anforderungen erfüllt sind. Es ist davon auszugehen, dass ein Austausch bzw. eine grundsätzliche Änderung des Führerhauses notwendig wird, auch um u.a. die dynamischen Lasten, welche sich durch die Pantografeneinheit ergeben könnten, sowie auch den Schutz vor Funkenbildung etc. gewährleisten zu können. Weiterhin muss geprüft werden ob die bisherige Anlage zur Innenraumklimatisierung welche sich bisher auf dem Dach des Führerhauses befindet an einer anderen Stelle des Fahrzeuges installiert werden kann.

4.3 Auslegungs- und Optimierungsstrategie

4.3.1 Differenzierung der Auslegungen

Um die Ergebnisse der kennzahlenbasierten Auslegung für die einzelnen Fahrzyklen in konkrete Antriebsauslegungen zu überführen, wird zunächst nach den zu betrachtenden Fahrzeugen und den Fahrtenkategorien differenziert. Somit werden die Auslegungs- und Optimierungsrechnungen jeweils für die folgenden Auslegungsgruppen durchgeführt (siehe Tabelle 13).

Tabelle 13: Betrachtete Auslegungsgruppen der Fahrzyklen am Beispiel konkreter Fahrzeuge

Gruppe	Fahrzeug	Betrachtete Fahrzyklen	Antrieb
1	G 1206	Rangierlastige Mischfahrten	BZH
2	DE 18	Rangierlastige Mischfahrten	BZH
3	G 1206	Streckenregionalfahrten, rangierlastige Mischfahrten	BZH
4	DE 18	Streckenregionalfahrten, rangierlastige Mischfahrten	BZH
5	G 1206	Streckenregionalfahrten (inkl. OL), rangierlastige Mischfahrten	BZH-OL
6	DE 18	Streckenregionalfahrten (inkl. OL), rangierlastige Mischfahrten	BZH-OL

Bei der vorgenommenen Gruppierung für die Auslegungen ist zu beachten, dass bei den Gruppen 5 und 6 davon ausgegangen wird, dass bei allen Streckenabschnitten von einer durchgängigen Verfügbarkeit von Oberleitungen ausgegangen wird. Dementsprechend wird für diese Gruppen eine Zweikraftvariante des Brennstoffzellenhybridantriebs untersucht, welche neben den BZ-Antriebsstrangkomponenten für den Rangier- und Mischbetrieb auch eine Oberleitungseinheit für den Streckeneinsatz beinhaltet.

Neben der Einteilung in Auslegungsgruppen wird zudem die Batteriespeicherchemie vorausgewählt. Für alle Auslegungs- und Optimierungsstrategien werden Hochleistungsbatterien (LTO-Chemie) angesetzt. Die Analyse der bereits vorhandenen kennzahlenbasierten Auslegungsergebnisse aller einzelner Fahrzyklen hat in Voruntersuchungen gezeigt, dass bei einem Großteil der Fahrzyklen die Dimensionierung der Batteriegröße auf Basis der erforderlichen Leistungsent-/aufnahme und folglich der C-Raten dominierend bestimmt wird. Die benötigte Energiemenge ist somit in Bezug auf die Batteriedimensionierung weniger relevant.

Hochleistungsbatterien haben im Vergleich zu Hochenergiebatterien zwar eine um den Faktor von ca. 1,6 geringere spezifische volumetrische Energiedichte (siehe Tabelle 8 in Kapitel 2.2.2), dennoch können diese mit im Schnitt doppelt so hohen C-Raten betrieben werden, sodass in Summe ein geringeres Batterievolumen benötigt wird im Vergleich zu Hochenergiebatterien. Zudem bieten Hochleistungsbatterien Vorteile in Bezug auf die zulässige Entladetiefe sowie auf die Lebensdauer und Zyklenfestigkeit.

4.3.2 Entwicklung und Optimierung von Auslegungskonzepten für gruppierte Fahrzyklen

Die in Kapitel 3 erstellte Ergebnistabelle (Abbildung 25) für die kennzahlenbasierten Auslegung der einzelnen Fahrzyklen wird genutzt, um für jede Auslegungsgruppe (Tabelle 13) eine

konkrete Antriebsauslegung auf Basis des zur Verfügung stehenden Bauraums der jeweiligen Lokomotive zu erarbeiten.

Im ersten Schritt wird das Gesamtvolumen aller Komponenten mithilfe eines Minimierungskriteriums optimiert. Dazu werden zunächst Brennstoffzellen- und Batteriegröße (inkl. aller Nebenaggregate) hinsichtlich des minimalen Gesamtvolumens dimensioniert, wobei die Nebenbedingungen dieser Optimierungsberechnung so gewählt werden, dass eine möglichst große Anzahl an Fahrzyklen realisiert werden können. Anschließend wird der verbleibende Bauraum mit Wasserstofftanks aufgefüllt, sodass der zur Verfügung stehende Bauraum möglichst vollständig genutzt wird. Dennoch zeigt sich zunächst für die Gruppe 3, dass mit der mitführbaren Wasserstoffmenge zahlreiche Fahrzyklen nicht realisierbar sind. Dabei ist in Bezug auf die kalkulierte Wasserstoffmenge zu beachten, dass alle Auslegungen auf der Grundlage basieren, dass nach jedem Fahrzyklus nachgetankt werden kann.

Die für diese Fahrzyklen benötigte Brennstoffzellengröße erfüllt die Anforderungen aller Fahrzyklen und wird als festgelegt betrachtet. Anschließend folgt ein weiterer Iterationsschritt, um die Menge des mitgeführten Wasserstoffs zu erhöhen und folglich mehr Fahrzyklen realisieren zu können.

Die aus der Optimierung hervorgehende Batteriekapazität deckt basierend auf den definierten Nebenbedingungen ein Maximum an erfüllbaren Fahrzyklen ab und orientiert sich an den Maximalanforderungen aller Fahrzyklen (siehe Abbildung 35).

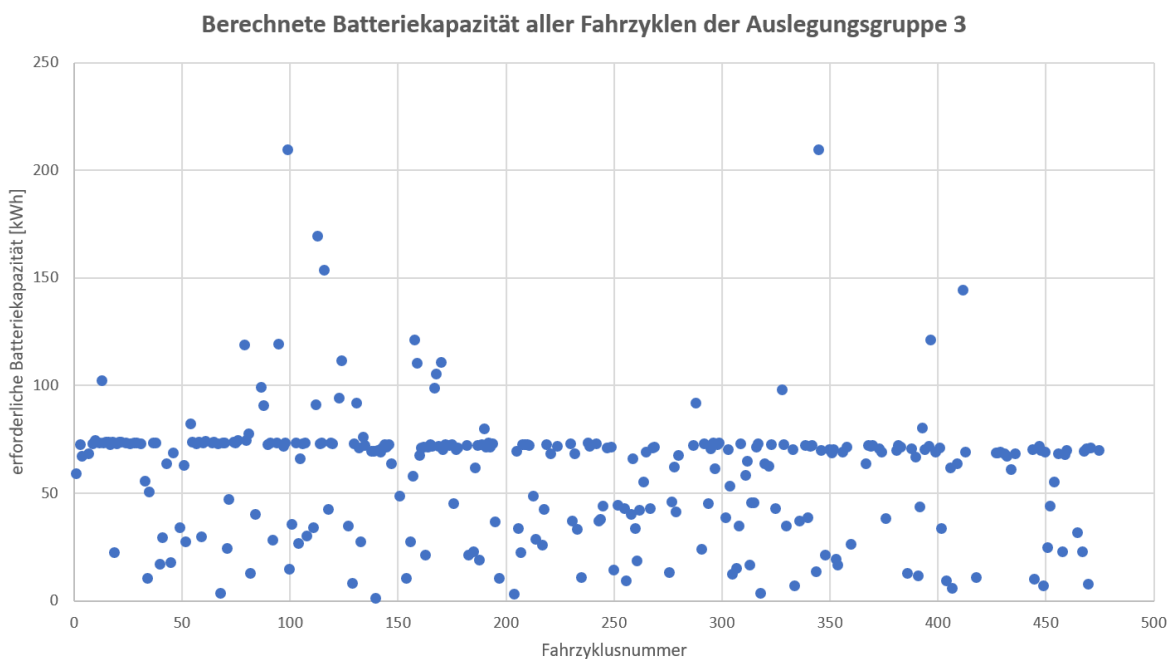


Abbildung 35: Erforderliche Batteriekapazität aller Zyklen in Auslegungsgruppe 3

Jedoch zeigt sich, dass eine deutliche Verringerung der Batteriekapazität die Anzahl der Fahrzyklen nur unwesentlich verringern würde. Wird der durch die Batteriereduzierung freigewordene Bauraum genutzt, um die Tankkapazitäten zu erhöhen, steigt die Anzahl der in Summe realisierbaren Fahrzyklen deutlich an. Einige Fahrzyklen mit erhöhten Anforderungen an die Batteriekapazität sowie die Wasserstoffspeichergöße wären dann zwar nicht realisierbar, dennoch bietet die durchgeführte Auslegungs- und Optimierungsstrategie die Möglichkeit, das

Maximum an Fahrzyklen in Rahmen der durch die Referenzfahrzeuge gegebenen Randbedingungen zu realisieren.

4.4 Auslegungsergebnisse

4.4.1 Rangierlastiger Mischbetrieb | BZ-Hybrid

4.4.1.1 MaK G 1206 – 25 m³

Die Antriebsauslegung auf Basis der Auslegungsgruppe 1 (vgl. Kapitel 4.3.1) erfolgt unter Berücksichtigung der Auslegungsstrategie für das Fahrzeug MaK G 1206 mit einem zur Verfügung stehenden Bauraum von ca. 25 m³ auf dem vorderen Aufbau. Für dieses Fahrzeug können alle rangierlastigen Mischfahrten realisiert werden. Ausgehend davon, dass der maximale Wasserstoffbedarf über alle rangierlastigen Mischzyklen bei 42,8 kg liegt, werden für den betrachteten Auslegungsfall für alle Komponenten des BZ-hybriden Antriebsstranges lediglich 8,12 m³ des Bauraums benötigt. Um die Betankungsintervalle zu minimieren, wird der restliche zur Verfügung stehende Bauraum genutzt, um zusätzliche Wasserstoffspeicher auf dem Fahrzeug unterzubringen. Daraus ergibt sich die nachfolgende Auslegung und damit die spezifischen Auslegungsgrößen aller BZ-Hybrid-Antriebsstrangkomponenten (siehe Tabelle 14).

Tabelle 14: Auslegungsergebnisse im rangierlastigen Mischbetrieb für die G 1206 – 25m³

Komponente	spezifische Auslegungsgröße	Volumen [m ³]	Masse [t]
Batterie [kWh]	165	2,58	2,75
Batterie-Kühlsystem [kW]	9,3	0,62	0,096
Brennstoffzellensystem [kW]	124,5	1,25	0,43
DC/DC-Wandler BZ-System [kW]	124,5	0,02	0,02
DC/DC-Wandler Batterie [kW]	1675,5	0,34	0,34
H2-Tankkapazität [kg]	260	20,13	4,68
		∑ 24,94	∑ 8,32

Für diese Antriebsstrangkomponenten, welche im vorderen oberen Lokrahmen untergebracht werden, können im Fahrzeug schematisch die Volumenverhältnisse dargestellt werden (siehe Abbildung 36). Auf Grund der Berechnung anhand spezifischer Kennzahlen für alle Komponenten, werden in dieser Darstellung keine geometrischen Eigenschaften der Bauteile berücksichtigt. Darüber hinaus wurden die Komponenten beispielhaft angeordnet, ohne dass betriebliche oder sicherheitstechnische Aspekte berücksichtigt wurden.

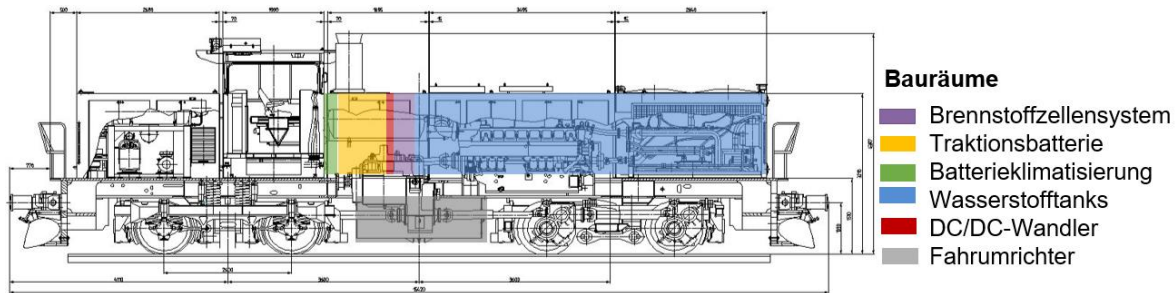


Abbildung 36: Schematische Volumenverhältnisse der Komponenten für die Auslegung im rangierlastigen Mischbetrieb für die G 1206

(beispielhafte Anordnung ohne Berücksichtigung von betrieblichen oder sicherheitstechnischen Aspekten; keine Darstellung der Fahrmotoren (Anordnung im Drehgestell oder zentral unter Beibehaltung Gelenkwellen möglich))

Für die Realisierung des Brennstoffzellenhybridantriebs für alle rangierlastigen Mischfahrten im Umbauszenario einer G 1206 stellt der Bauraum keinen begrenzenden Faktor dar. Der zusätzlich für Wasserstoffspeicher genutzte Bauraum ermöglicht bei einem durchschnittlichen Wasserstoffverbrauch von 14,4 kg je Fahrzyklus im rangierlastigen Mischverkehr folglich eine Verkleinerung der Betankungsintervalls. Somit sind im durchschnittlichem Betrieb Tankvorgänge erst nach rund 18 Fahrzyklen erforderlich. Bei einer mittleren Zykluslänge von 5,15 h entspricht dies knapp 3,9 Kalendertagen.

Für Betriebsprofile mit dem Fokus auf rangierlastigen Tätigkeiten und kurzen Streckenabschnitten mit verringerten Leistungsanforderungen stellt das ausgelegte Konzept eine geeignete Lösung dar. Die kompakte BZ-Einheit erfüllt die Leistungs- und Energieanforderungen der betrachteten Fahrzykluskategorie und beansprucht gleichzeitig wenig Bauraum, sodass durch zusätzliche Wasserstoffreserven betriebliche Vorteile und Flexibilität im Bereich der Rangiertätigkeiten ermöglicht werden. Lediglich die Eignung für anspruchsvollere Streckenfahrten ist nicht im vollen Maß gegeben bzw. ist im Einzelfall zu prüfen.

4.4.1.2 Vossloh Locomotives DE 18 – 30 m³

Analog zum Vorgehen im vorangegangenen Kapitel wurde eine Auslegung für die Gruppe 2 (rangierlastiger Mischbetrieb, DE 18) mit einem Bauraum von ca. 30 m³ ermittelt. Da sich die Anforderungen an den hybriden Antriebsstrang für die Betrachtung des rangierlastigen Mischverkehrs für unterschiedliche Fahrzeuge nicht unterscheiden, führt lediglich der größere Bauraum der DE 18 zu einem angepassten Ergebnis, da dadurch eine erhöhte Menge an Wasserstoff mitgeführt werden kann (siehe Tabelle 15).

Tabelle 15: Auslegungsergebnisse im rangierlastigen Mischbetrieb für die DE 18 – 30m³

Komponente	spezifische Auslegungsgröße	Volumen [m ³]	Masse [t]
Batterie [kWh]	165	2,58	2,75
Batterie-Kühlsystem [kW]	9,3	0,62	0,096
Brennstoffzellensystem [kW]	124,5	1,25	0,43
DC/DC-Wandler BZ-System [kW]	124,5	0,02	0,02
DC/DC-Wandler Batterie [kW]	1675,5	0,34	0,34
H ₂ -Tankkapazität [kg]	325	25,17	5,85
		Σ 29,97	Σ 9,49

Somit zeigt die Darstellung der Volumenverhältnisse in dem Schema der DE 18 ebenfalls einen vergrößerten Anteil der Wasserstofftanks am Gesamtvolumen (siehe Abbildung 37).

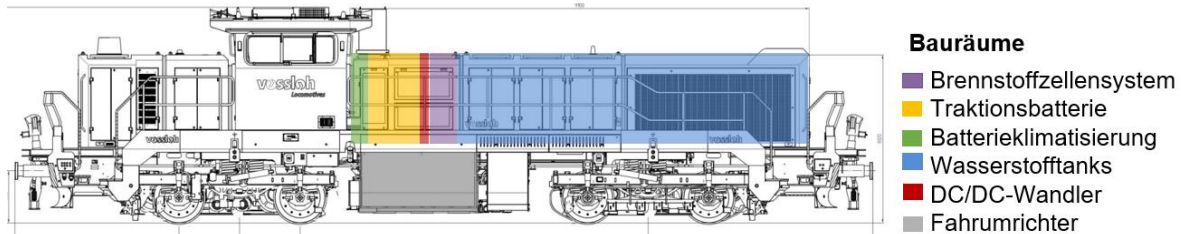


Abbildung 37: Schematische Volumenverhältnisse der Komponenten für die Auslegung im rangierlastigen Mischbetrieb für die DE 18

(beispielhafte Anordnung ohne Berücksichtigung von betrieblichen oder sicherheitstechnischen Aspekten; keine Darstellung der Fahrmotoren)

Für die Realisierung des Brennstoffzellenhybridantriebs für alle rangierlastigen Mischfahrten im Umbauszenario einer DE 18 stellt der Bauraum keinen begrenzenden Faktor dar. Aufgrund der Erhöhung der mitführbaren Wasserstoffkapazität können die Tankintervalle im rangierlastigen Mischverkehr im Mittel auf 22,5 Fahrzyklen bzw. 4,8 Kalendertage erhöht werden.

Für Betriebsprofile mit dem Fokus auf rangierlastigen Tätigkeiten und kurzen Streckenabschnitten mit verringerten Leistungsanforderungen stellt das ausgelegte Konzept eine geeignete Lösung dar. Die kompakte BZ-Einheit erfüllt die Leistungs- und Energieanforderungen der betrachteten Fahrzykluskategorie und beansprucht gleichzeitig wenig Bauraum, sodass durch zusätzliche Wasserstoffreserven betriebliche Vorteile und Flexibilität im Bereich der Rangiertätigkeiten ermöglicht werden. Lediglich die Eignung für anspruchsvolle Streckenfahrten ist nicht, bzw. nur sehr eingeschränkt gegeben.

In Bezug auf die Umbaueignung bietet die elektrische Leistungsübertragung der DE 18 gegenüber der hydrodynamischen Leistungsübertragung den Vorteil, dass die Fahrmotoren und die Drehgestelle grundsätzlich unverändert weiter genutzt werden können, wodurch einerseits der Zulassungsaufwand verringert wird und andererseits im vorderen Bauraum kein zentraler Elektromotor und Getriebe angeordnet werden müssen.

4.4.2 Streckenregionalverkehr | BZ-Hybrid

4.4.2.1 MaK G 1206 – 25 m³

Die Auslegung der Gruppe 3 (Streckenregionalverkehr, G 1206) erfolgt unter Berücksichtigung aller Fahrzyklen, welche sowohl rangierlastige Mischfahrten als auch Streckenregionalfahrten einschließen. Auf Basis der Auslegungsstrategie ergeben sich aufgrund der veränderten Leistungs- und Energieanforderungen andere spezifische Auslegungsgrößen für die benötigten Komponenten. Durch den höheren Bauraumbedarf des deutlich vergrößerten Brennstoffzellensystems kann nur eine vergleichsweise geringe Menge an Wasserstoff und Batteriespeicherkapazität mitgeführt werden. Mit der aufgeführten Auslegung, welche ein Maximum hinsichtlich der absolvierbaren Zyklen darstellt, können 92,1% aller Zyklen ermöglicht werden (siehe Tabelle 16). Weitere 7,1% der Zyklen wären erfüllbar, wenn eine Zwischenbetankung während des Fahrzyklus sichergestellt werden könnte.

Tabelle 16: Auslegungsergebnisse im Streckenregionalverkehr ohne OL für die G 1206 – 25m³

Komponente	spezifische Auslegungsgröße	Volumen [m ³]	Masse [t]
Batterie [kWh]	125	1,95	2,08
Batterie-Kühlsystem [kW]	31,8	2,12	0,81
Brennstoffzellensystem [kW]	1058	10,60	3,68
DC/DC-Wandler BZ-System [kW]	1058	0,21	0,21
DC/DC-Wandler Batterie [kW]	742	0,15	0,15
H ₂ -Tankkapazität [kg]	120,8	9,35	2,17
		Σ 24,38	Σ 9,12

Die Darstellung der Volumenverhältnisse der Antriebsstrangkomponenten ergibt sich wie folgt (siehe Abbildung 38).

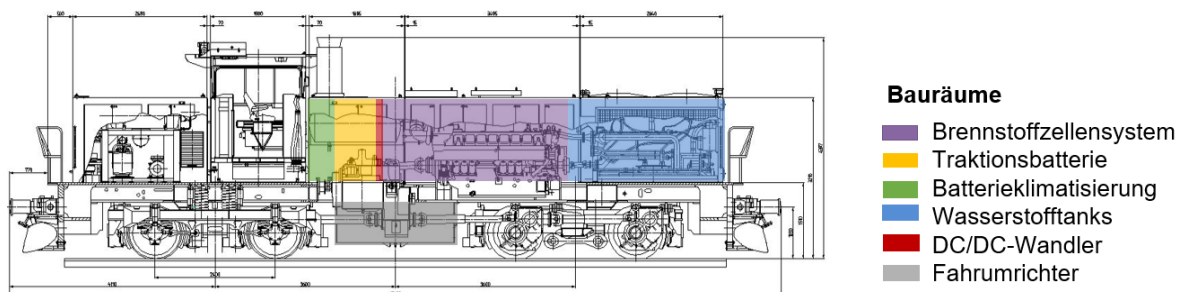


Abbildung 38: Schematische Volumenverhältnisse der Komponenten für die Auslegung im Streckenregionalverkehr ohne OL für die G 1206

(beispielhafte Anordnung ohne Berücksichtigung von betrieblichen oder sicherheitstechnischen Aspekten; keine Darstellung der Fahrmotoren (Anordnung im Drehgestell oder zentral unter Beibehaltung Gelenkwellen möglich))

Bei der Umrüstung einer G 1206 zur Realisierung der Fahrzyklen des Streckenregionalverkehrs zu einem BZ-hybriden Antriebsstrang ist ein Kompromiss zwischen mitführbarer Batterieenergiekapazität und Wasserstoffspeicherkapazität erforderlich, sodass möglichst viele Fahrzyklen absolviert werden können. Trotz der gewählten, bauraumoptimalen Konfiguration können nicht alle Fahrzyklen realisiert werden.

Zudem ist die Menge des mitführbaren Wasserstoffs begrenzt, sodass im Durchschnitt nach ca. 2,4 Fahrzyklen nachgetankt werden muss. Sofern anspruchsvollere Fahrten absolviert werden ist eine Betankung nach jedem Fahrzyklus erforderlich. Durch die deutlich vergrößerte BZ-Hybrid-Einheit ist zwar die Einsatzflexibilität gegenüber den Auslegungen im Kapitel 4.4.1 erhöht, indem sowohl Rangier- als auch Streckendienst ermöglicht wird, jedoch ist die betriebliche Flexibilität aufgrund der engen Tankintervalle als verringert zu bewerten. So müssten im Fall von Duisport/dpr bei energetisch anspruchsvollen Streckenfahrten mit hohen Zuglasten von Duisburg nach Marl (ca. 50 km einfache Entfernung) oder Bönen (ca. 100 km einfache Entfernung) dort jeweils Betankungsmöglichkeiten geschaffen werden um eine Rückfahrt im Brennstoffzellenbetrieb in allen Betriebsszenarien zu ermöglichen. Allerdings sind selbst dann 27,3 % der Fahrten nach oder über Bönen mit dieser Auslegung nicht durchführbar, bei Fahrten nach oder über Marl sind es 13,2 % der Fahrten.

4.4.2.2 Vossloh Locomotives DE 18 – 30 m³

Die Auslegung für alle Fahrzyklen am Beispiel der DE 18 ohne Nutzbarmachung der Oberleitung zeigt Tabelle 17. Mit dieser Auslegung können aufgrund des im Vergleich zur G 1206 um 5 m³ größeren Bauraums alle Einzelfahrzyklen absolviert werden.

Tabelle 17: Auslegungsergebnisse im Streckenregionalverkehr ohne OL für die DE 18 – 30m³

Komponente	spezifische Auslegungsgröße	Volumen [m ³]	Masse [t]
Batterie [kWh]	210	2,58	3,15
Batterie-Kühlsystem [kW]	31,8	2,12	3,5
Brennstoffzellensystem [kW]	1058	10,60	3,68
DC/DC-Wandler BZ-System [kW]	1058	0,21	0,21
DC/DC-Wandler Batterie [kW]	742	0,15	0,15
H2-Tankkapazität [kg]	175	13,55	0,36
		Σ 29,90	Σ 11,51

Die Darstellung der Volumenverhältnisse der Antriebsstrangkomponenten zeigt Abbildung 39.

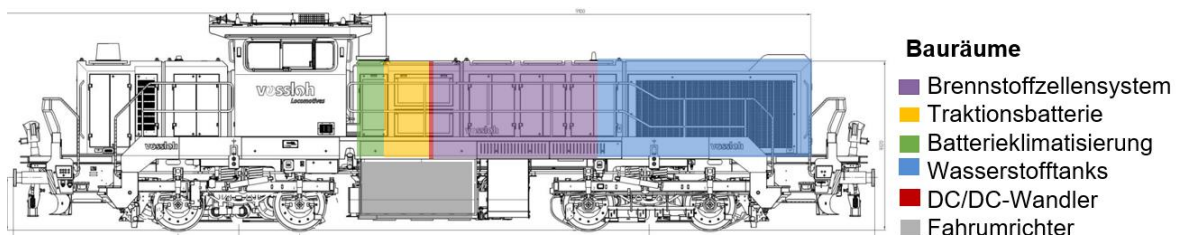


Abbildung 39: Schematische Volumenverhältnisse der Komponenten für die Auslegung im Streckenregionalverkehr ohne OL für die DE 18

(beispielhafte Anordnung ohne Berücksichtigung von betrieblichen oder sicherheitstechnischen Aspekten; keine Darstellung der Fahrmotoren)

Eine Umrüstung der DE 18 zu einem Brennstoffzellenhybrid ist grundsätzlich möglich und im Fall dieses Referenzfahrzeugs können alle betrachteten Fahrzyklen absolviert werden. Im Vergleich zur G 1206 (vgl. Kapitel 4.4.2.1) kann bei diesem Konzept durch vergrößerte Wasserstoffspeicher das Tankintervall leicht vergrößert werden, sodass im Durchschnitt nach ca. 3,5 Fahrzyklen eine Betankung erfolgen muss. Sofern anspruchsvollere Fahrten absolviert werden, ist eine Betankung nach jedem Fahrzyklus erforderlich. Durch die deutlich vergrößerte BZ-Hybrid-Einheit ist zwar die Einsatzflexibilität gegenüber den Auslegungen für den rangierlastigen Mischbetrieb (Kapitel 4.4.1) erhöht, indem sowohl Rangier- als auch Streckendienst ermöglicht wird, jedoch ist die betriebliche Flexibilität aufgrund der engen Tankintervalle verringert. So müssen im Fall von Duisport/dpr bei anspruchsvollen Fahrten nach Marl oder Bönen im Einzelfall Betankungsmöglichkeiten an den Zielorten geschaffen werden, sofern hohe Anhängelasten transportiert werden sollen.

4.4.3 Streckenregionalverkehr | Oberleitungs-BZ-Hybrid-BiMode

4.4.3.1 MaK G 1206 – 25 m³

Für die Auslegungen der Fahrzeuge für den Streckenregionalverkehr mit Oberleitungsverfügbarkeit gilt die Annahme, dass im Streckenbetrieb die (Elektro-)Energiezuführung über den Pantographen erfolgt und im Rangierbetrieb auf die BZ-Hybrideinheit zurückgegriffen wird.

Dementsprechend wird diese wie in Kapitel 4.4.1 ausgelegt, um die Anforderungen des rangierlastigen Mischbetriebs mit dem mitgeführten BZ-hybriden Antriebsstrang zu decken. Für Streckenabschnitte wird die Oberleitungseinheit ausgelegt. Der Transformator wird so dimensioniert, dass neben der Versorgung der Traktions- und Hilfsbetriebe auch eine Batterienachladung erfolgen kann. Der Stromabnehmer wird auf dem Dach des Führerstands angeordnet, demzufolge wird dieser in der volumetrischen Betrachtung des vorderen Bauraums nicht aufgeführt (siehe Tabelle 18).

Tabelle 18: Auslegungsergebnisse im Streckenregionalverkehr mit OL für die G 1206 – 25m³

Komponente	spezifische Auslegungsgröße	Volumen [m ³]	Masse [t]
Batterie [kWh]	165	2,58	2,75
Batterie-Kühlsystem [kW]	9,3	0,62	0,096
Brennstoffzellensystem [kW]	124,5	1,25	0,43
DC/DC-Wandler BZ-System [kW]	124,5	0,02	0,02
DC/DC-Wandler Batterie [kW]	1675,5	0,34	0,34
H2-Tankkapazität [kg]	188	14,56	3,38
Transformator [kW]	2000	5,56	5,13
		Σ 24,92	Σ 12,15

Die Darstellung der Volumenverhältnisse der Antriebsstrangkomponenten inkl. Transformator für die OL-Einheit ergibt sich wie folgt (siehe Abbildung 40).

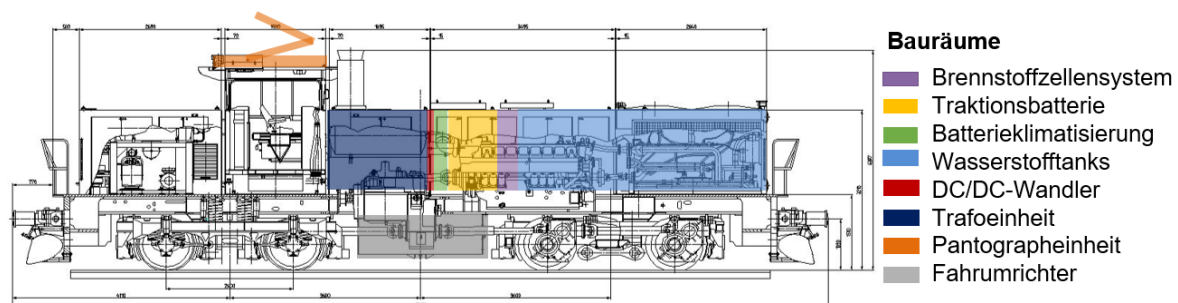


Abbildung 40: Schematische Volumenverhältnisse der Komponenten für die Auslegung im Streckenregionalverkehr mit OL für die G 1206

(beispielhafte Anordnung ohne Berücksichtigung von betrieblichen oder sicherheitstechnischen Aspekten; keine Darstellung der Fahrmotoren (Anordnung im Drehgestell oder zentral unter Beibehaltung Gelenkwellen möglich))

Für die Realisierung des Brennstoffzellenhybridantriebs für alle rangierlastigen Mischfahrten im Umbauszenario einer G 1206 inkl. einer Oberleistungseinheit stellt der Bauraum keinen begrenzenden Faktor dar. Der zusätzlich für Wasserstoffspeicher genutzte Bauraum ermöglicht bei einem durchschnittlichen Wasserstoffverbrauch im rangierlastigen Mischverkehr folglich eine Vergrößerung der Betankungsintervalle. Somit sind im durchschnittlichen Betrieb Tankvorgänge erst nach rund 13 Fahrzyklen erforderlich. Bei einer mittleren Zykluslänge von 5,15 h entspricht dies im Mittel 2,8 Kalendertagen.

Für Betriebsprofile mit dem Fokus auf rangierlastigen Tätigkeiten und kurzen Streckenabschnitten mit verringerten Leistungsanforderungen ohne Oberleitungsverfügbarkeit stellt das ausgelegte Konzept eine grundsätzlich mögliche Lösung dar. Die kompakte BZ-Einheit erfüllt die Leistungs- und Energieanforderungen der rangierlastigen Mischzyklen und beansprucht

gleichzeitig wenig Bauraum, sodass durch zusätzliche Wasserstoffreserven betriebliche Vorteile und Flexibilität im Bereich der Rangiertätigkeiten ermöglicht werden. Zudem wird mithilfe der OL-Einheit die Möglichkeit geschaffen, anspruchsvolle Streckeinsätze durchzuführen und dennoch auf nicht elektrifizierten Strecken den Einsatz im Last-Mile-Betrieb fortzuführen. Damit sind im Fall Duisport/dpr aufgrund des hohen Elektrifizierungsgrades im Aktionsradius des Betreibers alle betrachteten Fahrzyklen durchführbar. Die Eignung für anspruchsvollere Streckenfahrten in anderen Gebieten ohne Oberleitungsverfügbarkeit ist nicht im vollen Maß gegeben bzw. ist im Einzelfall zu prüfen.

4.4.3.2 Vossloh Locomotives DE 18 – 30 m³

Die Auslegung des BZH-OL-BiMode-Antriebs auf Basis der DE 18 erfolgt analog der G 1206, wobei mehr Bauraum zur Verfügung steht. Dadurch kann die mitführbare Wasserstoffkapazität erhöht werden (siehe Tabelle 19).

Tabelle 19: Auslegungsergebnisse im Streckenregionalverkehr mit OL für die DE 18 – 30m³

Komponente	spezifische Auslegungsgröße	Volumen [m ³]	Masse [t]
Batterie [kWh]	165	2,58	2,75
Batterie-Kühlsystem [kW]	9,3	0,62	0,096
Brennstoffzellensystem [kW]	124,5	1,25	0,43
DC/DC-Wandler BZ-System [kW]	124,5	0,02	0,02
DC/DC-Wandler Batterie [kW]	1675,5	0,34	0,34
H2-Tankkapazität [kg]	250	19,36	4,5
Transformator [kW]	2000	5,56	5,13
		∑ 29,72	∑ 13,27

Die Darstellung der Volumenverhältnisse der Antriebsstrangkomponenten inkl. Transformator für die OL-Einheit ergibt sich wie in Abbildung 41: Schematische Volumenverhältnisse der Komponenten für die Auslegung im Streckenregionalverkehr mit OL für die DE 18 dargestellt.

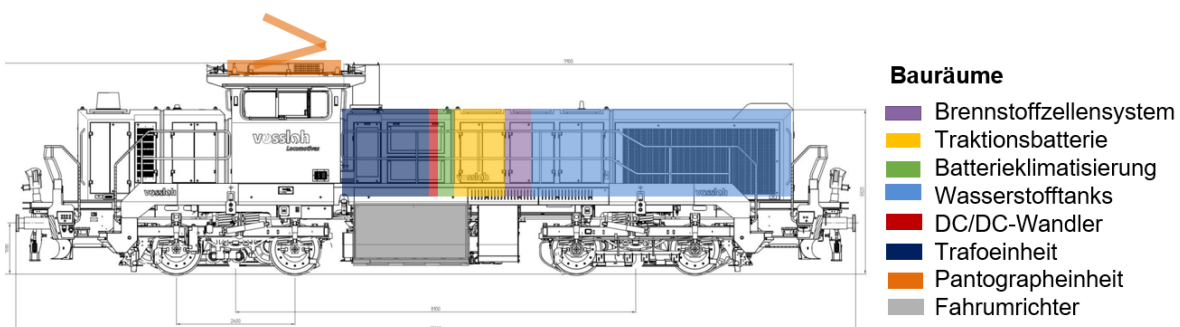


Abbildung 41: Schematische Volumenverhältnisse der Komponenten für die Auslegung im Streckenregionalverkehr mit OL für die DE 18

(beispielhafte Anordnung ohne Berücksichtigung von betrieblichen oder sicherheitstechnischen Aspekten; keine Darstellung der Fahrmotoren)

Für die Realisierung des Brennstoffzellenhybridantriebs für alle rangierlastigen Mischfahrten im Umbauszenario einer DE 18 inkl. einer Oberleistungseinheit stellt der Bauraum keinen

begrenzenden Faktor dar. Der zusätzlich für Wasserstoffspeicher genutzte Bauraum ermöglicht bei einem durchschnittlichen Wasserstoffverbrauch im rangierlastigen Mischverkehr folglich eine Verkleinerung der Betankungsintervalls. Somit sind im durchschnittlichem Betrieb Tankvorgänge erst nach rund 17,4 Fahrzyklen erforderlich. Bei einer mittleren Zykluslänge von 5,15 h entspricht dies 3,7 Kalendertagen.

Für Betriebsprofile mit dem Fokus auf rangierlastigen Tätigkeiten und kurzen Streckenabschnitten mit verringerten Leistungsanforderungen ohne Oberleitungsverfügbarkeit stellt das ausgelegte Konzept eine geeignete Lösung dar. Die kompakte BZ-Einheit erfüllt die Leistungs- und Energieanforderungen der rangierlastigen Mischzyklen und beansprucht gleichzeitig wenig Bauraum, sodass durch zusätzliche Wasserstoffreserven betriebliche Vorteile und Flexibilität im Bereich der Rangiertätigkeiten ermöglicht werden. Zudem wird mithilfe der OL-Einheit die Möglichkeit geschaffen, anspruchsvolle Streckeinsätze durchzuführen und dennoch auf nicht elektrifizierten Strecken den Einsatz im Last-Mile-Betrieb fortzuführen. Damit sind im Fall Duisport/dpr aufgrund des hohen Elektrifizierungsgrades im Aktionsradius des Betreibers alle betrachteten Fahrzyklen durchführbar. Die Eignung für anspruchsvollere Streckenfahrten in anderen Gebieten ohne Oberleitungsverfügbarkeit ist nicht im vollen Maß gegeben bzw. ist im Einzelfall zu prüfen.

Für die zusätzliche Anordnung des Transformators auf dem Mittelführerhaus gelten grundsätzlich die bereits bei der G 1206 geschilderten Zwänge. Bei der DE 18 kommt hinzu, dass für die auf dem Bestandsdach installierte Klimaanlage ein Ersatzinstallationsort gefunden werden muss.

4.4.4 Implikationen für die Neukonstruktion einer Lokomotive

Anders als bei einem Umbau von Bestandsfahrzeugen bestehen bei einer Neukonstruktion einer Lokomotive deutlich mehr Freiheitsgrade und es ist möglich das Fahrzeug an die konkreten Anforderungen des Einsatzgebietes spezifisch anzupassen. Es muss also keine Rücksicht auf die durch die Bestandsfahrzeugkonzepte resultierenden Limitationen (Bauraum, hydraulische Leistungsübertragung, Masse-/Lastverhältnisse) Rücksicht genommen werden.

Im Fall, dass ein Neufahrzeug konzipiert wird, kann sich an den bereits bestehenden aktuellen Rangierlokplattformen mit elektrischer Leistungsübertragung der großen Systemhäuser (z. B. Vossloh Locomotives DM 20, Alstom Prima H4) orientiert werden.

Die Integration einer Oberleitungs-ausrüstung sollte dabei keine grundsätzliche Hürde darstellen. Je nach Einsatzzweck sollte die Lokomotive **modular mit definierten elektrischen, mechanischen und steuerungsseitigen Schnittstellen** gestaltet werden, sodass statt der Ausstattung mit einer Brennstoffzellenhybrideinheit auch die Anordnung von Batteriepacks oder z. B. eine Wasserstoffverbrennungskraftmaschine inkl. Generator ermöglicht werden kann. Es sollte ein breites Spektrum an EVU-Anforderungen in Bezug auf energetische und betriebliche Charakteristika auf der Basis einer einheitlichen Lokomotivplattform erfüllt werden können.

Da im Rahmen der Untersuchungen der Bestandsfahrzeuge ermittelt werden konnte, dass der zur Verfügung stehende Bauraum fast immer einen begrenzenden Faktor darstellt, sollten **weitere Bauraumpotentiale** für Wandler und Speicher ermittelt werden. Dies könnte z.B. durch eine Verlängerung oder Verbreiterung der Aufbauten und die Bauräume zwischen den Drehgestellen erfolgen. Einer Verlängerung der Lok ist auf Grund der sich aus der

Einschränkungsrechnung ergebenden Limitationen nur bis zu einem bestimmten Maß möglich. Zusätzliche Möglichkeiten der Bauraumgewinnung könnten unter anderem die Nutzung von einem oder beider Seitengänge für Baugruppen, eine optimierte Ausnutzung des Lichtraumprofils, oder auch die Einbindung von zwei Endführerständen sein (zumindest für den Streckeneinsatz), um dadurch den kompletten Aufbau für Komponenten nutzen zu können.

Die aufgezeigten Möglichkeiten müssen zudem mit den **spezifischen Bedürfnissen und Anforderungen der jeweiligen EVU** sowie des Komforts des Lokführers rückgespiegelt werden, um jeweilige betriebliche Gesichtspunkte zu berücksichtigen und umsetzen zu können.

Für die Auslegung eines optimalen BZ-Hybrid Systems einer Neubauplattform sind die betrieblichen und energetischen Anforderungen ausgehend von dem dpr-Anwendungsfall auf ein **breites Spektrum an Fahrzeughaltern** und deren jeweilige Einsatzanforderungen zu erweitern, um EVU-übergreifend nutzbare Antriebssysteme zu konzipieren. Dies hat den Vorteil, dass die Entwicklungs- und Zulassungskosten auf eine breite Basis an Fahrzeugabnehmern verteilt werden können wodurch die Lokpreise verringert werden können.

Schließlich sollten alle benötigten Komponenten des BZ-hybriden Antriebsstranges so **modular aufgebaut** und integriert sein, dass eine einfache Wartung sowie Austausch und Anpassung an das jeweilige Aufgabenfeld des Fahrzeuges ermöglicht werden kann. Auch sollte eine spätere Modernisierung des Antriebssystems unter Nutzung des dann aktuellen Stands der Technik möglich sein.

4.5 Übertragbarkeitsanalyse Umbau

4.5.1 Vorüberlegungen

Ausgehend von den beispielhaft betrachteten Fahrzeugen MaK G 1206 und Vossloh Locomotives DE 18 stellt sich die Frage, inwiefern sich die bisherigen Erkenntnisse aus AP3 und AP4 auf andere dieselbetriebene Bestandslokomotiven übertragen lassen. Die Beantwortung dieser Frage erfordert die Betrachtung einer Reihe von Dimensionen, die in jeweils in die Bewertung einfließen müssen.

Tabelle 20: Bewertungsaspekte bei der Übertragung des Umbaus auf weitere Baureihen

Dimension	Detailierung / Aspekte
Betrieblich	
Einsatzspektrum	<ul style="list-style-type: none"> - Wo wird die Lok eingesetzt? - Welcher Leistungs- und Energiebedarf besteht?
Technisch	
Art der Leistungsübertragung	<ul style="list-style-type: none"> - hydrodynamisch vs. elektrisch - Sind Leistungselektronik, Fahrmotoren und Radsatzgetriebe weiter nutzbar oder müssen diese ausgetauscht werden?
Alter des Fahrzeugs	<ul style="list-style-type: none"> - strukturelle Festigkeit des Lokrahmens - Restwert Lokomotive - Einzelfallprüfung, inwiefern weitere Systeme und Baugruppen tatsächlich weitergenutzt werden können, auch in Hinblick auf Verfügbarkeit (Sub-)Komponenten sowie von Software bei Modernisierung/Refurbishment (Obsoleszenz, Abkündigung), Beispiele: <ul style="list-style-type: none"> o Fahrzeugsteuerung (ZSG) o Bremsgerätegerüst o Lokrahmen o u.a.
Massen und Bauräume	<ul style="list-style-type: none"> - Stehen genügend Massereserven zur Verfügung? - Änderung der Masseverteilung (Radsatzaufstandskräfte) - Welche Bauräume und Massereserven für Antriebs- und Speicherkomponenten sind vorhanden
Modulare Basis der Lokomotiven	<ul style="list-style-type: none"> - Rangierlokomotiven sind grundsätzlich modular konstruiert und aufgebaut, auch, um eine spätere Remotorisierung zu ermöglichen, per se also gute Voraussetzungen für eine Umrüstung - Ein tiefgreifender Umbau (Wechsel auf BZH) bedeutet jedoch tiefgreifendere Änderungen - inwiefern die Modularität eine solche Umrüstung noch ermöglicht und den Aufwand rechtfertigt, muss separat geprüft werden
Zulassung	
Fahrzeuggenehmigung	<ul style="list-style-type: none"> - Aufwand der Genehmigung (u.a. abhängig davon, wer ursprünglich Inhaber der Inbetriebnahmegenehmigung ist) und generelle Genehmigungsfähigkeit - Mit Umsetzung des 4. Eisenbahnpakets sind die Hürden für eine genehmigungsfähige Umrüstung deutlich erhöht worden
Kosten	
Anzahl potentiell umrüstbarer Fahrzeuge	<ul style="list-style-type: none"> - Je weniger Fahrzeuge, desto höher die auf ein einzelnes Fahrzeug umzulegenden Umrüstungskosten
Aufwand	<ul style="list-style-type: none"> - In Abhängigkeit der technischen Basis der Fahrzeuge <ul style="list-style-type: none"> o Diesellokomotiven mit elektrischer Leistungsübertragung sind grundsätzlich mit geringerem Aufwand umrüstbar o Je geringer der Eingriffsgrad, desto geringer die Kosten

4.5.2 Betrachtung konkreter Fahrzeuge (Auswahl)

Für eine baureihenspezifische Übertragbarkeitsuntersuchung werden konkrete Strecken- und Rangierlokomotiven mit dieselbetriebenen Verbrennungskraftmaschinen herangezogen (Tabelle 21). Es werden vorrangig Fahrzeuge betrachtet, die in Nordrhein-Westfalen im Einsatz sind. Zusätzlich zu den aufgeführten Fahrzeugen gibt es in der Regel jeweils Vorgänger- und

Nachfolgebaureihen oder verwandte Baureihen mit einem im Prinzip ähnlichen Antriebssystem. Dadurch erhöht sich die Fahrzeuganzahl entsprechend.

Tabelle 21: Weitere Diesellokbaureihen und die zur Verfügung stehenden Bauräume

Bezeichnung	Hersteller	Anzahl in EU	Baujahre	Leistung Dieselmotor (kW)	Art der Leistungsübertragung	Primäre Einsatzart	Verfügbare Bauräume [m³]
Rangierlokomotiven							
G 1206	MaK / Vossloh	323	1997-2004	1500	DH	Rangier- & Streckendienst	ca. 24,6
G 1000	MaK	103	2002-16	1100	DH	Rangierdienst	ca. 22,5
V100 (Ost)	LEW	210 ¹⁾	1966-85 (Umbau tlw. bis 2015)	1082-1240	DH	Rangierdienst	ca. 21,6
DE 18	Vossloh	115	Seit 2010	1800	DE	Rangier- & Streckendienst	ca. 30
DE 1002	MaK	24	1982-93	1120-1320	DE	Rangierdienst	ca. 20
Streckenlokomotiven							
Class 66	EMD/GE	93 ¹⁾	1998	2400	DE	Rangier- & Streckendienst	ca. 47
TRAXX F140 DE (BR 285)	Bombardier	35 / 16 ¹⁾	2007-13	2200-2400	DE	Streckendienst	ca. 50

DH: Dieselhydraulisch, DE: Dizelelektrisch

Quellen: loks-aus-kiel.de, Fahrzeugeinstellungsregister des EBA

¹⁾ in Deutschland

MaK G 1000

Die MaK G 1000 ist eine Mittelführerhauslokomotive mit Strömungsgetriebe und 1100 kW Dieselmotorleistung. Sie wird häufig im Rangierdienst, aber auch im leichten Streckendienst eingesetzt. Der Umbau- sowie Zulassungsaufwand gerade auch in Hinblick auf die Antriebs-einheit wird grundsätzlich ähnlich der G 1206 eingeschätzt. Durch den recht geringen zur Verfügung stehenden Bauraum für die Komponenten des Antriebsstranges wird ein umgebautes Fahrzeug lediglich im Bereich des leichten Rangierdienst gesehen und auch hier mit dem Nachteil des relativ häufigen Nachtankbedarfs.



Abbildung 42: MaK G 1000

(Alf van Beem, [CC0 1.0](#), [Link](#), Bildausschnitt)

V 100 (Ost)

Die V 100 wurden von den 1960er bis in die 1980er Jahre von LEW Hennigsdorf produziert und überwiegend in den letzten Jahren bereits modernisiert (u.a. auch remotorisiert). Die Lokomotiven sind heute vielfach noch im Bauzugdienst im Einsatz. Der Umbau dieser Baureihe auf einen BZ-Hybridantrieb ist grundsätzlich technisch denkbar. Berücksichtigt werden muss

jedoch das hohe Alter der Fahrzeuge (Stichwort Stahlalterung). Hinzu kommt, dass auf Grund der langen Produktionsdauer und der Modernisierungen eine hohe Variantenvielfalt im Bestand zu erwarten ist. Es ist davon auszugehen, dass Zulassungs- sowie Umbaudokumente nicht durchgehend vorhanden bzw. verfügbar sind. Demzufolge gibt es keine „Musterumbau- lösung“, sondern diese ist jeweils fahrzeugspezifisch zu analysieren. Aufgrund des grundsätzlichen zur Verfügung stehenden Bauraumes wird hier ebenfalls nur der Einsatz eines umgebaute n Fahrzeuges im Einsatzgebiet des Rangierdienstes und im Bauzugdienst gesehen und auch hier ebenfalls mit erhöhtem Tankintervall.



Abbildung 43: V 100 (Ost) Umbau auf Baureihe 203
(Paul Smith, [CC BY 2.0](#), [Link](#), Bildausschnitt)

MaK DE 1002

Die MaK DE 1002, produziert von 1982 bis 1993, verfügt wegen der elektrischen Leistungsübertragung über eine zumindest grundsätzlich gute Eignung für eine Umrüstung auf einen BZ-Hybridantrieb, insbesondere für den Rangier- und Bauzugeinsatz. Allerdings ist zu prüfen, inwiefern Baugruppen tatsächlich übernommen werden können, z.B. die Ansteuerung der Fahrmotoren. Die elektronischen Baugruppen aus dieser Produktionszeit sind auf Grund von Abkündigungen der Hersteller i.d.R. nicht mehr verfügbar. Aufgrund der geringen Fahrzeuglänge von 13 m und dem daraus resultierenden geringeren Bauraum ist mit einem kurzen Tankintervall zu rechnen. Weiterhin wird der Hebel zur CO₂-Reduktion aufgrund der geringen Stückzahl der in Deutschland vertretenen Fahrzeuge eher als gering eingeschätzt.



Abbildung 44: MaK DE 1002 (Paul Smith, [CC BY-SA 2.5](#), [Link](#), Bildausschnitt)

Class 66

Die Class 66, eine Streckengüterzuglokomotive, welche zwischen 1998 und 2016 produziert wurde. Sie ist auf Grund der elektrischen Leistungsübertragung grundsätzlich ein potentieller Kandidat für einen Umbau auf Brennstoffzellenbetrieb. Durch die Endführerstände steht ein relativ großer Bauraum für die Komponenten zur Verfügung und eine entsprechend große Menge an Wasserstoff kann mitgeführt werden. Da die Haupteinsatzart dieser Lok der Streckenbetrieb und dadurch verbunden mit dem Auftreten hoher Leistungen über große Zeiträume ist, wird eine hohe Brennstoffzellenleistung und viel Wasserstoffspeicherkapazität erforderlich sein. Weiterhin ist die Möglichkeit der Übernahme von bestehenden Baugruppen tiefergehend zu prüfen. Da die Lok je nach Betreiber auch unter Fahrdracht im Streckenbetrieb agiert, sollte in diesem Fall geprüft werden inwiefern oder ob sich eine OL-Nachrüstung mit kleiner Zusatz-BZ-Einheit für OL-freie Rangiertätigkeiten technisch und wirtschaftlich darstellbar ist.



Abbildung 45: EMD/GE Class 66 (Alf van Beem, [CC0 1.0](#), [Link](#), Bildausschnitt)

Bombardier TRAXX F140 DE

Auf Basis der TRAXX-Plattform sind verschiedene Antriebssysteme in Streckenlokomotiven im Personen- und Güterverkehr im Einsatz. Ein Beispiel ist die TRAXX F140 DE (Baureihe 285) für den Schienengüterverkehr mit elektrischer Leistungsübertragung und 2200-2400 kW installierter Dieselmotorleistung. Durch die Ausführung als klassische Streckenlok mit zwei Endführerständen und einer Länge von 18,9 m steht grundsätzlich deutlich mehr Bauraum als bei Rangierlokomotiven für die Speicher- und Wandlerkomponenten zur Verfügung.

Durch die primäre Einsatzart dieser Lokomotive gilt es betreiberspezifisch zu prüfen, ob entweder die Variante mit großem BZ-Hybridsystem oder als BiMode-Oberleitungsvariante mit kleinem Last-Mile Rangier-BZ-Hybridsystem oder als vollwertige Streckenausführung mit leistungstärkerem BZ-Hybridsystem geeignet und umsetzbar umsetzbar ist. Weiterhin muss spezifisch untersucht werden, welche der Baugruppen des Bestandsfahrzeuges übernommen werden können. Basierend auf der Bestandslokomotive ist davon auszugehen, dass bspw. die Fahrumsrichter nicht bi-direktional sind. Das führt dazu, dass die Leistungselektronik entweder ersetzt werden müssen oder das Fahrzeug keine Rückspeisung der Traktionsenergie in die Batterie gewährleisten kann, was sich energetisch als nachteilig darstellt.



Abbildung 46: Bombardier TRAXX F140 DE (Chris from Poznan, [CC BY 2.0](#), [Link](#), Bildausschnitt)

Grundsätzliche Einschätzung

In technischer Hinsicht sind alle vorgestellten Fahrzeuge prinzipiell umrüstbar. Es ist jedoch damit zu rechnen, dass in der Regel äußerst tiefgreifende Umbaumaßnahmen erforderlich sind, die in dieser Vorstudie jedoch nur auf konzeptueller Ebene grob umrissen werden können. Bei einigen Fahrzeugen ist damit zu rechnen, dass ggf. nur Lokrahmen und Fahrwerke weitgehend unverändert übernommen werden können. Grundsätzlich sind einige der vorgestellten Fahrzeuge aus technischer Sicht mehr geeignet als andere. Der jeweilige Aufwand für die Umrüstung sowie die Kosten sind mit dem erreichbaren Hebel der CO₂-Reduktion über die Anzahl der Fahrzeuge als auch über die jeweilige Einsatzart abzuwägen. Zusätzlich ist bei allen umgerüsteten Fahrzeugen die Auswirkung auf die universelle Einsetzbarkeit zu berücksichtigen, so ist in der Regel mit einer deutlichen Erhöhung an benötigten Tankvorgängen zu rechnen und auch eine zu Dieselmotoren vergleichbare hohe und konstante Dauerleistung wie mit Dieselmotoren ist mit Brennstoffzellenhybridantrieben nicht bzw. nur eingeschränkt möglich.

Neben den skizzierten technischen Limitationen in Bezug auf Bauraum, technischer Ist-Zustand oder Leistungsübertragung spielen auch die Wirtschaftlichkeit (lohnt ein Umbau für die konkrete Baureihe, das konkrete Fahrzeug) und das avisierte Einsatzprofil eine Rolle bei der Beurteilung der Sinnhaftigkeit einer Umrüstung. Die hohe Baureihenvielfalt bei Rangierlokomotiven resultiert zudem in einer verminderten Nutzbarmachung von Skaleneffekten. Fallweise sollte geprüft werden ob die Umrüstung auch auf andere Antriebssysteme wie z.B. den Wasserstoffverbrennungsmotorantrieb sinnvoll sein könnten, insbesondere bei Fahrzeugen mit hydrodynamischer Leistungsübertragung. Allerdings ist auch hier mit einer deutlichen Zunahme an Tankvorgängen zu rechnen.

Es ist letztlich für jedes Fahrzeug und jeden Einsatz einzeln zu bewerten, ob eine Umrüstung technisch-betrieblich möglich und auch wirtschaftlich tragfähig ist.

5 AP 5 Sicherheit und Zulassung

5.1 Gefährdungsanalyse

Autoren: ZBT

Das Vorhandensein einer Gefährdung bedeutet, dass die Möglichkeit des Aufeinandertreffens von Schutzgut und Gefahrenquelle besteht. Unter Schutzgütern können verstanden werden:

- Menschen: Gefahr für die Unversehrtheit und das Leben,
- Ausrüstung: Gefahr der Beschädigung oder des Verlusts,
- Umwelt: Gefahr der Verschmutzung und Schädigung.

Sollen neue oder veränderte (umgerüstete) Fahrzeuge eingesetzt werden, muss sichergestellt werden, dass diese das Sicherheitsniveau des Eisenbahnsystems nicht gefährden, also keine Gefährdungen für die oben genannten Schutzgüter durch den Eisenbahnbetrieb bestehen. Hierzu ist unter anderem die funktionale Sicherheit des Fahrzeuges, der Teilsysteme sowie der verbauten Komponenten zu gewährleisten und nachzuweisen. Diese grundsätzliche Vorgehensweise ist sowohl für den Einsatz von konventionell mit Verbrennungsmotoren als auch mit Brennstoffzellen betriebenen Fahrzeugen gültig.

Das Prinzip des funktionalen Sicherheitsnachweises beruht auf der iterativen fahrzeugbezogenen Identifikation von Gefährdungen, der Bestimmung der Risiken, der Ableitung von Sicherheitsanforderungen sowie dem Nachweis, dass die Sicherheitsanforderungen durch eine geeignete technische und organisatorische Architektur erfüllt werden. Der geschilderte Prozess muss daher nach Möglichkeit bereits in der Phase der Planung angewendet werden, damit die funktionale Sicherheit des Zielsystems frühzeitig sichergestellt ist.

Kern der Gestaltung der funktionalen Sicherheit bildet die Gefährdungsanalyse. Die Gefährdungsanalyse für Systeme, welche auf die Nutzung und Speicherung von Wasserstoff abzielen, ist bereits Inhalt einiger Veröffentlichungen. Die Gefährdungsanalyse für die Nutzung von Brennstoffzellen auf Fahrzeugen wurde bereits von Haden beleuchtet. (RSSB 2020) Im Folgenden soll diese Vorgehensweise zur Identifikation von Gefährdungen auf wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen aufgegriffen werden.

Für Identifikation von Gefährdungen auf wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen hat sich eine zweigeteilte Vorgehensweise als zielführend erwiesen. Der erste Teil der Betrachtung bezieht sich auf das technische System des Fahrzeugs, der zweite Teil auf die Integration des Fahrzeugs in das Eisenbahnsystem.

Technisches System des Schienenfahrzeugs

Bei einem Schienenfahrzeug handelt es sich um ein komplexes technisches System aus vielen Einzelkomponenten. Die Funktionserfüllung, in diesem Fall die Fahrzeugbewegung im Rahmen des Rangierens oder der Zugfahrt eines Triebfahrzeugs im Schienengüterverkehr, wird durch sicherheitsbezogene Wirkkreise auf dem Fahrzeug erreicht, in denen Fahrzeugfunktionen verankert sind. Die Funktionen und die mit ihnen verbundenen Komponenten, Baugruppen und Teilsysteme des Fahrzeugs bilden die Ausgangsbasis für die fahrzeugbezogene Gefährdungsanalyse.

Zentrale, aber nicht alleinige Bedeutung für die Gefährdungsanalyse besitzen die Funktionen zum Beschleunigen und Bremsen des Fahrzeugs, der Rangiereinheit bzw. des Zuges. Üblicherweise stehen die Komponenten des Antriebsstranges sowie die mechanischen und pneumatischen Elemente der Bremse im Fokus der Gefährdungsanalyse für diese Funktionen. Bei der Realisierung eines brennstoffzellen-betriebenen Triebfahrzeugs für den Schienengüterverkehr stehen aufgrund des Gefahrenpotenzials unter anderem folgende Komponenten, Baugruppen und Teilsysteme im Fokus:

- Wasserstoff-Tank
- Brennstoffzelle
- Batterie
- Leitungen, Steuerventile des relevanten Systemteils
- Steuerung bzw. Software zur Steuerung des Antriebsstrangs

So ergeben sich, über den Aufbau eines verbrennungsmotorisch angetriebenem Triebfahrzeugs hinausgehend z.B. Gefährdungen aus der Lagerung des Wasserstoffs im Tank auf dem Fahrzeug. Beispielsweise könnte dieser beschädigt werden, wodurch unmittelbare Explosionsgefahr durch umgebungsinduzierte Selbstentzündung oder Fremdentzündung resultiert. Ähnlich kann aus Entweichungen von Wasserstoff aus dem System, z.B. durch undichte Leitungen, Ventile oder Verbindungsstellen, eine extreme Gefährdung ausgehen. Eine systematische Ermittlung der Gefährdungen, welche von den Systemkomponenten des Fahrzeugs in Verbindung mit Wasserstoff ausgehen, kann durch den Rückgriff auf den Hydrogen Accident Escalation Path, anwendbar für sämtliche wasserstoffbetrieben Assets, unterstützt werden. (RSSB 2020), (United States Department of Energy 2017)

Integration des Fahrzeugs in den Eisenbahnbetrieb

Die Nutzung eines Fahrzeugs im Schienenverkehr geht mit potenziell gefährlichen Situationen einher. Diese stehen in Wechselwirkung mit gefährlichen Situationen mit Bezug zur Verwendung von Wasserstoff. So ist es möglich, dass konventionelle Gefährdungen im Eisenbahnsystem durch Präsenz von Wasserstoff oder Gefährdungen durch Wasserstoff durch Gefährdungen des Eisenbahnsystems verstärkt werden. Außerdem können bestimmte Einsatzgebiete oder -szenarien die Gefährdung durch Präsenz von Wasserstoff erhöhen. Diese Situationen sollten als Ausgangspunkt für die Gefährdungsidentifikation genutzt werden. Beispielhafte Szenarien zur Ermittlung der Gefährdungen können sein:

- Zugkollisionen
- Auffahren auf einen Prellbock,
- Kollision mit einem Fahrzeug auf einem Bahnübergang, etc.

Die Ermittlung der Gefährdungen kann durch einzelne Experten, aber auch in der Gruppe, z.B. unter Einsatz der Delphi-Methode, erfolgen.

Umgang mit den ermittelten Gefährdungen

Auf Basis der ermittelten Gefährdungen erfolgt eine Risikobewertung für die ermittelten Gefährdungen im Rahmen der Risikoevaluierung. Dazu werden beispielsweise im Rahmen einer Fehler-Möglichkeiten-Einfluss-Analyse (FMEA) die Risiken hinsichtlich der drei Faktoren Expositionsdauer, Schaden und Vermeidbarkeit (Dachnorm zur Risikobewertung gemäß FMEA: EN 60158) bewertet. Das so quantifizierte Risiko wird entsprechend des zugrunde gelegten

Risikoakzeptanzgrundsatzes (z.B. konkrete Regelwerke wie EN 50128/50129, ähnliche Referenzsysteme, explizite Risikoabschätzung) in Sicherheitsanforderungen (z.B. Sicherheitsanforderungsstufen in Form von Safety Integrity Levels, kurz SIL oder Sicherheitsanforderungsstufen, kurz SAS an die jeweilige Funktion) überführt. An die Erfüllung der Sicherheitsanforderungen sind dann konkrete auslegungsseitige Sicherheitsprinzipien (z.B. Redundanz) und sicherheitsbezogene Zielparameter geknüpft. Das iterative Verfahren wird durchgeführt, bis die vom Fahrzeug ausgehenden Risiken auf ein akzeptables Maß reduziert wurden.

Um ein harmonisiertes Risikomanagement im Rahmen des Zulassungsprozesses zu gewährleisten, ist im Rahmen von Fahrzeugzulassungen für Neu- und Bestandsfahrzeuge das Vorgehen gemäß EU/402/2013 (Common Safety Method, CSM-VO) anzuwenden. Dieses Verfahren gibt, erweitert um den Aspekt der Bewertung der Sicherheitsrelevanz (Beispiele für Kriterien: Folgen von Ausfällen, Einsatz innovativer Elemente, Komplexität, etc.) des betrachteten Systemauschnitts, auf generischer Ebene den verbindlichen Risikomanagementprozess vor, welcher die oben geschilderten Schritte zur Gefährdungsidentifikation und -bewertung beinhaltet.

5.2 Zulassungsvoraussetzungen

Autoren: DLR

5.2.1 Genereller Genehmigungsprozess und Zuständigkeiten

Sofern das Einsatzgebiet der Rangierlokomotiven ausschließlich auf nicht-öffentlichen Gleisen (Industrie- und Hafeneisenbahnen) erfolgen würde, wäre eine Betriebserlaubnis nach BOA (durch zuständige Landesbehörde) ausreichend. Im vorliegenden Fall soll jedoch ein Betrieb der Lokomotiven auch im öffentlichen Netz erfolgen. Damit ist eine **Zulassung (Genehmigung) nach EBO** erforderlich. Da zusätzlich auch ein Betrieb auf dem TEN-T-Netz erfolgt, muss auch eine **TSI-konforme Genehmigung** erwirkt werden.

Die entsprechenden Genehmigungsbehörden überprüfen die Einhaltung der einschlägigen Sicherheitsanforderungen von Fahrzeugneu- und Fahrzeugumbauten und sind zuständig für die Erteilung der Genehmigung von Schienenfahrzeugtypen sowie die *Genehmigung für das Inverkehrbringen von Fahrzeugen*. Für **Neufahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb** ist eine Erstgenehmigung für den entsprechenden Fahrzeugtyp zu beantragen. Sofern sich bei unveränderter technischer Ausrüstung des Fahrzeugs die TSI oder nationalen Regeln geändert haben ist eine erneute Genehmigung erforderlich. Eine neue Genehmigung ist erforderlich, wenn ein Fahrzeug geändert worden ist, wie es beispielsweise bei einer **Umrüstung** der Fall ist, siehe dazu auch Abschnitt 5.2.3. (Salander 2019)

Gemäß dem **4. Eisenbahnpaket** und der Durchführungsverordnung (EU) 2018/545 ist die **ERA** (Eisenbahnagentur der Europäischen Union) zuständig für Fahrzeuge im grenzüberschreitenden Einsatz. Das **EBA** (Eisenbahnbundesamt) ist für Schienenfahrzeuge, die nur in Deutschland operieren, zuständig, wobei der Antragsteller auch bei nur in Deutschland eingesetzten Fahrzeugen das ERA wählen kann. (Eisenbahn-Bundesamt 2021)

Für die Neubaulok im Einsatzgebiet der dpr ist eine EG-Prüfung und Zertifizierung, konkret eine **TSI LOC&PAS-konforme** Zulassung erforderlich, da der Einsatz auch auf (interoperablen) Hauptstrecken erfolgt. Hinzu kommt der Nachweis der Konformität zu den länderspezifischen Regelwerken (**NNTR**). Um die Genehmigung zu erhalten, muss der Antragsteller, also der Fahrzeughalter oder der Hersteller der Lokomotive, mit Unterstützung **beauftragter Stellen** und

ggf. zusätzlicher externer Fachgutachter, durch *Technische Prüfungen* eine Reihe von berechnungs- und versuchsgestützten Nachweisen gegenüber der Genehmigungsbehörde erbringen:

- Einhaltung Konformität der betroffenen Teilsystemen zu TSI LOC&PAS, TSI NOI und ggf. TSI SRT und auf die dort verwiesenen Normen (durch Benannte Stellen - **NoBo**)
- Konformität zu sonstigen nationalen Vorschriften (NNTR) (durch Bestimmte Stellen - **DeBo**)
- Risikobewertung gemäß CSM - Common Safety Methods (durch unabhängige Risikobewertungsstellen - **AsBo**)

Die erforderlichen Nachweiskategorien gemäß der die TSI ergänzenden nationalen Regeln (NNTR) umfassen u.a. die Bereiche Festigkeit, Fahrsicherheit und -dynamik, Bremsen, Zugsicherung und Zugfunk, elektromagnetische Verträglichkeit sowie Fahrzeugbegrenzung. Zusätzlich zur Beantragung der Fahrzeuggenehmigung muss das Eisenbahnverkehrsunternehmen mit dem zuständigen Eisenbahninfrastrukturunternehmen (EIU) noch die Kompatibilität des Fahrzeugs mit den Strecken prüfen. (Erpenbeck 2020)

5.2.2 Geltende Normen und Standards und Sicherheitsnachweise

Durch den Einsatz von alternativen Antrieben bei Rangierlokomotiven resultieren neue Anforderungen an die Genehmigung der Schienenfahrzeuge und an den damit verbundenen Sicherheitsnachweis der wasserstoffführenden- und Hochvolt-Komponenten.

Grundsätzlich müssen alle elektrischen, elektronischen und pneumatischen Systembaugruppen und Komponenten, und somit auch die Brennstoffzellen, Batterien, Wandler und das Wasserstofftanksystem die einschlägigen **Eisenbahn- und CENELEC-Normen** hinsichtlich Bahnfestigkeit erfüllen, und zwar u.a. (nicht erschöpfend):

- Schwingungen, Schocks und Stöße: EN 61373, spezifiziert nach Installationsort der betroffenen Komponenten (auf der Achse, im Drehgestell, oder auf dem Lokaufbau)
- Brandsicherheit: DIN EN 45545-2,
- Umweltbedingungen: DIN EN 50125-1,
- Zuverlässigkeitsengineering / RAMS: DIN EN 50126
- Software für Eisenbahnsteuerungs- und Überwachungssysteme: DIN EN 50128
- Sicherheit in Elektronik und Software: DIN EN 50129
- Software auf Schienenfahrzeugen: DIN EN 50657
- Elektromagnetische Verträglichkeit: EN 50155 und EN 50121-3-2 sowie Eindringenschutz gegen Staub und Flüssigkeiten gemäß IP (Ingress Protection) - Klassifikation (EN 50155)
- Akustik von Fahrzeugen: EN ISO 3095
- Kollisionssicherheit (auf Fahrzeugebene): DIN EN 15227
- IRIS (International Railway Industry Standard - Qualitätsmanagementsysteme)

In Bezug auf **Wasserstoff- und Brennstoffzellenanlagen** existieren teilweise **noch keine direkt anwendbaren Normengruppen und Regelwerke für Schienenfahrzeuge**, sodass für die Genehmigung Normen und technische **Regeln aus der Industrie** (z.B. Druckgeräteverordnung) oder dem Automobilbereich herangezogen werden müssen (Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung 2020). Dabei muss die Kompatibilität zu den bahnspezifischen und den komponentenbezogenen nicht bahnspezifischen Regelwerken nachgewiesen werden. Über **risikobasierte Sicherheitsnachweise (z. B. Gefährdungsanalysen, FMEA)** auf Komponenten- und Fahrzeugebene ist nachzuweisen, dass Gefährdungen auf ein vertretbares Maß reduziert werden können (Tolga Wichmann 2021). Sofern das nicht möglich ist, sind im

Rahmen des CSM Risikoabschätzungen mit Hilfe eines ASBO durchzuführen. (Tolga Wichmann 2021) Analoges gilt für die Tankstelle. Für wasserstoffbasierte Antriebssysteme müssen durch die risikobasierte Nachweisführung potentielle Gefahren identifiziert werden (z.B. Leckagebedingte Ansammlungen von Wasserstoff) und Maßnahmen beschrieben werden, wie diese minimiert werden (siehe auch Abschnitt 5.1).

Am Beispiel des Nachweisführung von Wasserstofftankanlagen in Schienenfahrzeugen stellt sich der Prozess auf Basis eines Überblicksartikels des TÜV Süd (Tolga Wichmann 2021) wie folgt dar. Wasserstoffdruckspeicher müssen in Deutschland über eine Zulassung entsprechend der Verordnung (EG) Nr. 79/2009 (Europäische Union 2009) verfügen, welche die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich des Wasserstoffantriebs und auch die Typgenehmigung von Wasserstoffbehältern regelt. Für Schienenfahrzeuge existiert aktuell keine eigene Regelung. Eine Zulassung ist daher derzeit noch auf Basis von einzelfallbasierten Risikobewertungen mit umfangreicher Nachweisführung erforderlich, orientiert u.a. an Druckgeräterichtlinien (2014/68/EU (Europäische Union 2014) , PED, TPED) und der Genehmigung wasserstoffbetriebener Straßenfahrzeuge. Bei Kombination dieser Regelwerke mit den etablierten bahnspezifischen Normen müssen die meisten Gefährdungen beherrscht werden können (Tolga Wichmann 2021). Die übrigen Gefährdungen sind durch individuelle Maßnahmen auf Basis risikobasierter Sicherheitsnachweise im Verbund mit EN 50126-1 bis auf ein akzeptables Restrisiko abzusichern (Tolga Wichmann 2021).

Internationale Normungsarbeiten erfolgen derzeit z.B. im Bereich Wasserstoffspeicherung im Projekt PNW 9-2697 ED1 (International Electrotechnical Commission 2021). Ergänzende Grundlagen für die Entwicklung eines bahnspezifischen Standards für Wasserstoffanwendungen in Schienenfahrzeugen wurden vom Deutschen Zentrum für Schienenverkehrsforschung im Rahmen eines Forschungsprojektes mit der TÜV Rheinland Inter Traffic GmbH bearbeitet (Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung 2020). Der Ergebnisbericht war zum Zeitpunkt der Erstellung des vorliegenden Berichts noch nicht veröffentlicht.

Neben der Wasserstofftank- und der Brennstoffzellenanlage muss auch das Hochvolt-Akkumulatorsystem einem Sicherheitsnachweis unterzogen werden, um eine Gesamtfahrzeuggenehmigung zu erhalten.

5.2.3 Besonderheiten der Zulassung einer Umbaulok im Vergleich zur Neubaulok

5.2.3.1 Allgemeine Regelungen

Die nachfolgenden Ausführungen basieren u.a. auf (Fuchs und Bühler 2021), (Salander 2019) und (Erpenbeck 2020) sowie den die Fahrzeuggenehmigung betreffenden nationalen und EU-Regelwerke.

Bei Fahrzeugumrüstungen handelt es sich genehmigungsrechtlich i.d.R. um **Fahrzeugänderungen**. In Abhängigkeit des Änderungsumfangs spezifiziert das **4. Eisenbahnpaket**, in welchen Fällen nur eine Anzeige der Änderungen gegenüber der Genehmigungsstelle ohne eine neue Genehmigung ausreicht und wann eine neue Genehmigung erfolgen muss. Relevant ist ferner die Unterscheidung, ob es sich um eine Änderung eines bereits genehmigten Fahrzeugs oder eines bereits genehmigten Fahrzeugtyps handelt. Zentral für die Beantwortung der Frage, ob eine neue Genehmigung erforderlich ist, ist **Artikel 21, Absatz 12 der EU-Interoperabilitätsrichtlinie 2016/797**. Demnach ist insbesondere zu prüfen, ob sich durch

die Fahrzeugänderung TSI und nationale Vorschriften betreffende relevante Parameter ändern, sich das Sicherheitsniveau ändert oder die TSI eine neue Genehmigung für den konkreten Fall vorschreibt:

„Im Falle der Erneuerung oder Aufrüstung bestehender Fahrzeuge, die bereits über eine Genehmigung für das Inverkehrbringen von Fahrzeugen verfügen, ist eine neue Genehmigung für das Inverkehrbringen von Fahrzeugen erforderlich, wenn

- a) *Änderungen an den Werten der in Absatz 10 Buchstabe b genannten Parameter vorgenommen werden, die außerhalb des Bereichs annehmbarer Parameter gemäß den TSI liegen,*
- b) *durch die geplanten Arbeiten das Gesamtsicherheitsniveau des betreffenden Fahrzeugs beeinträchtigt werden könnte oder*
- c) *es in den einschlägigen TSI vorgeschrieben ist.“*

Sofern eine Genehmigung erforderlich ist, ist auch die Erstellung einer Risikoerklärung erforderlich, die die Änderung des Gesamtsicherheitsniveaus des Fahrzeugs beschreibt erforderlich. Diese muss durch einen AsBo erfolgen. (Erpenbeck 2020)

Ein weiterer Prüfschritt umfasst darüber hinaus die Unterscheidung gemäß der die Interoperabilitätsrichtlinie spezifizierende **Durchführungsverordnung zur Fahrzeuggenehmigung (EU 2018/545)**. In **Artikel 14 und 15** wird der weitere Genehmigungsprozess in Abhängigkeit davon beschrieben, ob der Antragsteller zugleich Inhaber der bestehenden Fahrzeugtypgenehmigung ist (i.d.R. der Fahrzeughersteller) oder nicht.

Zusätzlich gilt **Artikel 15, Absatz 1** der Durchführungsverordnung zur Fahrzeuggenehmigung (EU 2018/545). Dabei wird unterschieden, ob sich beispielsweise nur die **Technischen Unterlagen** oder auch **grundlegende Konstruktionsmerkmale** ändern und inwiefern die o.g. Punkte der Interoperabilitätsrichtlinie in Artikel 21, Absatz 12 berührt sind. Die Technischen Unterlagen werden im Assessment Schema der ERA spezifiziert (Krach et al. 2021). In Abhängigkeit vom Änderungsumfang reicht es entweder aus, nur die Dokumentation zu aktualisieren und abzulegen, die Änderungen ebenso der Genehmigungsstelle anzuzeigen oder den Genehmigungsprozess komplett für die betroffenen Teilsysteme zu durchlaufen.

Entscheidungsrelevant in Bezug auf eine etwaige Genehmigungserfordernis bzw. den Nachweisumfang ist, ob die Änderung rückwirkungsfrei, insbesondere ohne Einfluss auf die Fahrzeugsteuerung, ist. Dabei sind die Änderungen in Bezug auf ihre Genehmigungserfordernlichkeit im Einzelnen mit den Genehmigungsbehörden zu klären.

Geprüft werden muss bei der Genehmigung von neuen Fahrzeugtypen ferner, ob eine **Genehmigung einer neuen Typvariante** (grundlegende Fahrzeugparameter ändern sich nach der Interoperabilitätsrichtlinie 2016/797, Artikel 21, Absatz 12, die eine neue Genehmigung erforderlich machen) oder eine **Typversion ohne Genehmigungspflicht** (nur Dokumentation) vorliegt. (Salander 2019)

5.2.3.2 *Einschätzung für Umrüstung einer Diesellokomotive auf Wasserstoffbrennstoffzellenantrieb*

Die nachfolgenden Ausführungen basieren auf Expertengesprächen mit einem Fahrzeughersteller, einem Anbieter von Lokmodernisierungen, sowie zwei Experten im Bereich der Genehmigung von Schienenfahrzeugen.

Durch eine Umrüstung auf einen Wasserstoffbrennstoffzellenantrieb sind **deutliche Änderungen** am Fahrzeug zu erwarten. Die Notwendigkeit einer umfassenden Genehmigung des Fahrzeugs bzw. des Fahrzeugtyps durch die Genehmigungsstelle lässt sich daraus ableiten. Eine Einbeziehung von Interoperabilitäts-Bewertungsstellen ist damit ebenfalls erforderlich.

Entscheidend für die Frage, ob eine Genehmigung der Umrüstung erforderlich ist und mit welcher Nachweisintensität, ist der **Umfang der Änderungen** (Anteil Änderungen der Teilsysteme) und hier insbesondere ob sich **grundlegende Fahrzeugparameter ändern** wie oben dargelegt. Eine Änderung der Fahrzeugparameter ist insbesondere dann zu erwarten, wenn Änderungen erfolgen an der

- Software (Fahrzeugsteuerung/Leittechnik, Energiemanagement)
- Fahrzeugmasse (mehr als 10% nach EBO), Masseverteilung, Radsatzaufstandsbelastung,
- Bremsanlage und Fahrdynamik,
- Fahrzeugbegrenzungslinie

Bei einer Änderung der Antriebsanlage sind in der Regel auch **zulassungsrelevante Eingriffe in Leittechnik (TCMS) und Bremssystem** erforderlich. Die Fahrzeugparameter ändern sich dadurch und eine komplette Nachweisführung in Bezug auf Lauftechnik und Bremstechnik ist zu erwarten. Sofern sich die **Parameter nicht ändern**, ist **keine neue Nachweisführung erforderlich** und es kann sich auf den bestehenden Fahrzeugtyp gestützt werden. Eine neue Genehmigung ist demnach nur für geänderte Baugruppen erforderlich, jeweils differenziert nach NNTR oder TSI LOC & PAS. Von einem interviewten Experten wurde geäußert, dass nicht auszuschließen ist, dass auch bei geringem Änderungsumfang beispielsweise eine neue (FEM-)Berechnung des Lokrahmens erforderlich sein könnte. Da sich die Nachweisanforderungen des heutigen Zulassungsstandards gegenüber dem zum Zeitpunkt der Zulassung der Rangierlokomotiven wie der G 1206 geltenden Zulassungsniveaus verschärft haben, stelle dies weitere Herausforderungen an die Zulassungsfähigkeit von umgebauten Fahrzeugen dar. (Erpenbeck 2020) verweist ferner auf den besonderen Klärungsbedarf bei Änderungen, der im Vorfeld eines Umrüstungsvorhabens im Hinblick auf die Verantwortung für den bereits genehmigten Teil des Fahrzeugs erfolgen sollte.

Im Falle eines Umbaus einer **MaK G 1206** ist davon auszugehen, dass nicht alle Komponenten und Baugruppen angepasst werden müssen. So ist die Variante der Beibehaltung der Fahrwerke und Gelenkwelle mit zentralem E-Motor am Gelenkwelleneingang in Bezug auf die Genehmigungsanforderungen als weniger herausfordernd einzuschätzen im Vergleich zu einem Umbau auf eine rein elektrische Leistungsübertragung, da sich dann in jedem Fall auch die Fahrwerke ändern. Sofern bei einer Umrüstung eines dieselhydraulischen Antriebs auf einen Brennstoffzellen-Hybridantrieb die Fahrwerke und Gelenkwellen beibehalten werden, ist zu prüfen, ob sich zum Beispiel Änderungen an der Gelenkwellenbelastung durch **veränderte Kennliniencharakteristika** im Zuge der geänderten Leistungsübertragung ergeben. Dies könnte eine zusätzliche Nachweisführung zur Folge haben. Ebenfalls ist zu prüfen, ob und in

welchem Maß sich die Schwerpunktlage verändert. Die **Fahrzeugsteuerung** der G 1206 muss voraussichtlich in jedem Fall erneuert werden. Insofern resultiert daraus eine komplett **neue Fahrzeuggenehmigung**. Eine Neuzulassung der Bremsanlage ist erforderlich, sofern sich die Fahrzeugmasse wesentlich ändert oder eine Umstellung auf eine elektrische Leistungsübertragung mit Rekuperationsfähigkeit erfolgen würde.

Der Änderungsumfang im Fall der Umrüstung einer **Vossloh Locomotives DE 18** auf einen Brennstoffzellenhybridantrieb ist auf Grund des Vorhandenseins einer elektrischen Leistungsübertragung grundsätzlich als geringer im Vergleich zu einer dieselhydraulischen Lokomotive wie der G 1206 einzustufen.

Insbesondere die dieselhydraulischen Rangierlokomotiven von MaK (später Vossloh Locomotives) sind im Laufe der Jahre in sehr hohen Stückzahlen gefertigt worden. Die einzelnen Baureihen bauten in der Regel technisch jeweils auf den Vorgängerbaureihen auf. Jedoch führen die Besonderheiten des Bahnsektors (geringe Stückzahlen, lange Produktionszeiten der Baureihen) in der Regel zu **Änderungen innerhalb einer Baureihe**, sodass die (Folge-)Fahrzeuge sich oft nicht unerheblich voneinander unterscheiden. Diese Tatsache, verbunden mit der hohen Baureihenvielfalt führt zu Herausforderungen bei einer Anwendbarkeit bzw. Übertragbarkeit bereits erhaltener Genehmigungen auf andere Fahrzeuge.

Sofern ein anderer Akteur als der ursprüngliche Fahrzeughersteller die Zulassungsunterlagen für den Umbau bei der Genehmigungsbehörde einreicht, so wird dieser automatisch der **Inverkehrbringer des umgebauten Fahrzeugs** werden. Die **Konstruktionsunterlagen des Herstellers** sollten verfügbar sein, um den Nachweisumfang und damit den Genehmigungsaufwand zu verringern. Der Antragsteller wird letztlich *Inhaber der Fahrzeugtypgenehmigung*, ist damit in der Produkthaftung (für den von ihm geänderten Anteil) und zeichnet verantwortlich für das Konfigurationsmanagement. (Erpenbeck 2020)

Im Vergleich zu früheren Jahren wurden die Rahmenbedingungen für Umbauvorhaben seitens der Genehmigungsbehörden erschwert. Die mit dem **4. Eisenbahnpaket** eingeführten geänderten Zulassungsregeln haben z.B. das Umbauvorhaben *EcoTrain*, also den Umbau von Dieseltriebzügen auf Hybridantrieb durch ein von der DB geführtes Konsortium letztlich unwirtschaftlich erscheinen lassen. (RailBusiness 2020)

In jedem Fall sollten **so früh wie möglich alle relevanten Akteure** im Bereich der Zulassung (Technische Berater, Prüforganisationen, Aufsichtsbehörden) **einbezogen** werden, möglichst bereits ab der ersten frühen Konzeptphase. Sowohl bei Neufahrzeugen als auch bei Umrüstungen ist mit Entwicklungs- und Genehmigungszeiträumen von zusammen mindestens vier Jahren zu rechnen. Grundsätzlich ist es ratsam, eine **Beratung im Bereich der Zulassung durch einen unabhängigen Experten** konstruktionsbegleitend in Anspruch zu nehmen.

6 AP 6 Kostenabschätzung Förderprojekt und betriebliche Analyse

Autoren: DLR

6.1 Anpassung Betriebskonzept

Die Einführung von wasserstoffbetriebenen Brennstoffzellenlokomotiven erfordert sowohl die Anpassung einer Reihe von betrieblichen Abläufen als auch die Errichtung und den Betrieb verschiedener Infrastrukturanlagen, welche auf brennstoffzellenbetriebene Lokomotiven zugeschnitten sind.

Änderungen Betriebskonzept

Die Diesellokomotiven werden bei dpr aktuell nur ein bis zweimal die Woche betankt. Bei einer Umstellung auf Wasserstoff-Brennstoffzellen-Betrieb verkürzen sich die Betankungsintervalle und gleichzeitig verringern sich die einzelnen Betankungsgeschwindigkeiten (gemessen in „getankte Reichweite je Betankungsminute“). Diese Tatsache ist nicht rückwirkungsfrei auf die Fahrpersonaleinsatzplanung zu betrachten. Bei der Fahrzeugeinsatz- und die Fahrtenplanung müssen die Reichweiten und die Betankungsturnusse stärker als im Fall der Dieselfahrzeuge berücksichtigt werden. Dabei spielt die Verfügbarkeit des Fahrdrachts im Streckenbetrieb sowie das Antriebskonzept (Brennstoffzellenhybrid oder BiMode-Variante) eine wesentliche Rolle. Ein weiterer Faktor sind etwaige baustellenbedingte Umleitungen und deren Einfluss auf die Fahrzeugeinsatz- und Betankungsplanung. Ferner ist zu prüfen, inwiefern z. B. Sicherheitsprozeduren im duisport-Betrieb durch die Wasserstofflokomotiven berührt werden.

Anpassungen an infrastrukturellen Anlagen

An mindestens einem Standort der Duisburger Hafen AG ist eine Wasserstofftankstelle erforderlich. Aufgrund der unterschiedlichen Einsatzorte an den verschiedenen Hafengebieten im Duisburger Raum ist die Schaffung weiterer verteilter Betankungsmöglichkeiten zu empfehlen. Die Tatsache, dass sich derzeit auch bereits zwei Dieseltankstellen (also mehr als eine) für Lokomotiven auf den Betriebsbereichen von Duisport befinden, unterstreicht dieses Erfordernis. Inwiefern die Tankstellen in der räumlichen Nähe der bereits bestehenden Dieseltankstellen oder an anderen Standorten angeordnet werden sollten, muss in einer detaillierten betrieblichen Analyse erarbeitet werden. Neben der Tankstelle im engeren Sinne (Dispenser, Wasserstoffbevorratung, Verdichter, Steuerungstechnik) sind ebenfalls Anpassungen am Gleislayout (u.a. Tankgleise) sowie der Zuwegung zur Tankstelle erforderlich. Besonderes Augenmerk muss auf die Synchronisierung der auslegungsbezogenen Fahrzeugreichweite und der Einplanung weiterer Betankungsmöglichkeiten gelegt werden. Dies betrifft im Einsatzfeld von dpr insbesondere die Standorte Bönen und Marl. Wie sich gezeigt hat, sind viele Umläufe Duisburg-Marl-Duisburg sowie Duisburg-Bönen-Duisburg mit einer BZH-Konfiguration nicht möglich. Folglich wäre die Errichtung zusätzlicher Tankstellen in Bönen und Marl bzw. eine gezieltere Untersuchung, unter welchen Bedingungen Rundfahrten ermöglicht werden können (z.B. Definition maximaler Anhängelasten) erforderlich.

Die Abstell- und Werkstattanlagen für die leichte Instandhaltung müssen für den Einsatz von Brennstoffzellen und ggf. von Oberleitungsfahrzeugen ertüchtigt werden (ExSchutz in der

Halle, Dacharbeitsstände für Hochvoltanlagen etc.). Zudem muss das Werkstattpersonal entsprechend qualifiziert werden.

6.2 Kostenschätzung

Bei der Abschätzung der Kosten werden die beiden Optionen Umbau und Neubau aufgegriffen und differenziert untersucht. Insbesondere im Fall der Umrüstung ist die Frage der Eigentumsverhältnisse an der Lok und wer diese umrüstet (insb. Fahrzeughersteller, Modernisierungswerk, Fahrzeughalter) relevant. Je nachdem, ob es sich um ein Prototypprojekt oder um eine Serienfertigung auf Basis einer bereits entwickelten und zugelassenen Lokomotive handelt, unterscheiden sich die Kosten ebenfalls deutlich. Nachfolgend werden branchentypische spezifische Kostenansätze für Systembaugruppen herangezogen und mit der Auslegung verknüpft, wobei eine Differenzierung nach prototypischen Einzelkosten und sektortypischen (Klein)Serienkosten mangels detaillierter Daten in dieser Voruntersuchung nicht erfolgt. Bei den nachfolgenden Rechnungen handelt es sich daher um eine grobe Orientierung. In einem späteren Umsetzungsprojekt müssen die Annahmen über eine detaillierte Planung fundiert und u.a. durch Lieferantenangebote unteretzt und verfeinert werden.

6.2.1 Umbau Bestandsfahrzeug

Entscheidenden Einfluss auf die resultierende Kostenhöhe von Umbauvorhaben haben eine Reihe von Randbedingungen. Dazu gehören u.a.:

- Technischer Ausrüstungsstand der umzurüstenden Lokomotive
- Alter, Zustand und Modernisierungsbedarf der umzurüstenden Lokomotive
- Antriebssystem, auf das umgerüstet wird
- Genehmigungsaufwand

Die Kostenschätzung (Abbildung 47) differenziert nach den beiden Diesel-Bestandslokomotiven MaK G 1206 mit hydraulischer Leistungsübertragung sowie der Vossloh DE 18 mit elektrischer Leistungsübertragung. Berechnet werden die Auslegungen des rangierlastigen Mischbetriebs (*RM*) und des Streckenregionalverkehrs (*S'*) sowie nach den Antriebssystemen Brennstoffzellenhybrid (BZH) und BiMode-Oberleitungs-Brennstoffzellenhybrid (BZH-OL). Bei der Umrüstung der G 1206 wird zusätzlich unterschieden nach den in 4.2.2.1 und 4.2.2.2 vorgestellten Leistungsübertragungsvarianten. Bei den **einzelfahrzeugspezifischen Kosten** wird differenziert nach *den Kosten für die Antriebs- und Speicheranlage* sowie nach den Kosten für *Umbau, Montage und Inbetriebnahme (IBN)*.

Zu beachten ist, dass mit einer Umrüstung auf ein neues Antriebssystem auch substantielle Kosten für die Anpassung am Lokrahmen, den Drehgestellen, dem Bremssystem und der Fahrzeugsteuerung entstehen können. Art, Umfang und Kostenhöhe dieser Anpassungen sonstiger Baugruppen sind stark abhängig vom zu Grunde liegenden Basisfahrzeug und der Zielantriebskonfiguration (*Position Kosten für Anpassung sonstiger Baugruppen*) und können hier nur grob geschätzt werden. Ferner sind nicht alle MaK G 1206 aktuell mit ETCS ausgerüstet, je nach aktuellem Ausrüstungsstand entstehen dadurch zusätzliche Kosten für ETCS-Nachrüstung in Höhe von etwa 0,5 Mio. € je Lok. Weitere Kosten sind beispielsweise für die Ersatzlokbeschaffung, respektive -miete in der Zeit, in der die Lokomotiven während des Umbaus und der Genehmigungsphase nicht zur Verfügung stehen, zu berücksichtigen. Um eine Vergleichbarkeit mit dem Szenario Neubau herzustellen, wird eine zusätzliche Position *Restwert*

/ Beschaffung Gebrauchtlok (pauschal, Mak G 1206: 1 Mio. €, Vossloh Locomotives DE 18: 1,25 Mio. €) eingefügt.

Umbau			Basis: Dieselelektrische Rangierlok (z.B. DE 18)				Basis: Dieselhydraulische Rangierlok (z.B. MaK G 1206)											
			BZH		BZH-OL		BZH		BZH		BZH-OL		BZH-OL					
Drehgestell mit Mittelführerhaus			SR	SR	RM	RM	SR	SR	SR	SR	SR	SR						
System	Komponente	Kostenansatz	#	€	#	€	#	€	#	€	#	€	#	€				
Panto + Trafo + HV-System + Netz-SR	Panto+Dach-HV Transformator 40 €/kW 40 €/kW Netz-SR	40 €/kW 40 €/kW 30 €/kW			2000 2000 1800	80.000 80.000 54.000							2000 2000 1800	80.000 80.000 54.000				
BZS + DCDC-Wandler	BZS DCDC-Wandler Kühlanlage	1000 €/kW 200 €/kW 100 €/kW	1058 1.058 1058	1.058.000 211.600 105.800	125 124,5 125	124.500 24.900 12.500	125 125 125	125.000 25.000 12.500	1058 1800 1058	1.058.000 360.000 105.800	1058 1800 1058	1.058.000 360.000 105.800	125 125 125	124.500 24.900 12.500				
H2-Tankanlage	H ₂ -Tanksystem Akku (LTO)	1500 €/kg H ₂ 1.500 €/kWh	175 210	262.500 315.000	250 165	375.000 247.500	260 165	390.000 247.500	260 165	390.000 247.500	121 125	181.500 187.500	121 125	181.500 187.500	188 165	282.000 247.500		
Akku-System + DCDC-Wandler	Akku-System DCDC-Wandler	750 €/kWh 240 €/kW			742	178.080	1.676	402.120	1.676	402.120	1.676	402.120	1.676	402.120	1.676	402.120		
UR + Zwischengetriebe	für Anbindung Gelenkwellen	psch 0,5 (M€)					1	500.000			1	500.000			1	500.000		
ASR + Achsgetriebe + FM	Antriebsstromrichter Achsgetriebe Fahrmotor	75 €/kW 25 €/kW 80 €/kW						1800 1800 1800	135.000 45.000 144.000			1800 1800 1800	135.000 45.000 144.000			1800 1800 1800	135.000 45.000 144.000	
Anpassung sonstiger Baugruppen	Faktor	psch 0,25 (M€)	1	250.000	1,5	375.000	1	250.000	2	500.000	1	250.000	2	500.000	1,5	375.000	2,5	625.000
Antriebs- und Speicheranlage (Summe)			2.380.980		1.775.520		1.952.120		2.026.120		2.642.800		2.716.800		2.182.520		2.256.520	
Restwert / Beschaffung Gebrauchtlok			1.250.000		1.250.000		1.000.000		1.000.000		1.000.000		1.000.000		1.000.000		1.000.000	
Umbau, Montage und IBN			100	€/h	3.000	300.000	4.000	400.000	4.000	400.000	4.000	400.000	4.000	400.000	5.000	500.000	5.000	500.000
Gesamtkosten Lok inkl. Antriebsanlage (Summe)			3.930.980		3.425.520		3.352.120		3.426.120		4.042.800		4.116.800		3.682.520		3.756.520	

Abbildung 47: Kostenschätzung Umbau für Auslegungen RM und SR
(RM: Rangierlastiger Mischverkehr, SR: Streckenregionalverkehr)

Ergebnisse und Interpretation:

Die wiederkehrenden Kosten (Umbau- und Materialkosten, Restwert / Beschaffungskosten Basisfahrzeug bzw. Miete Ersatzfahrzeug) betragen je nach Variante zwischen 3,4 und 4,1 Mio. €. Engineering und Zulassung ist von Kosten im einstelligen bis niedrigen zweistelligen Millionenbereich zu rechnen (Annahme: 4-20 Mio. €).

Die Auslegung für den reinen Rangiermischverkehr ist am günstigsten, da die Leistungen der installierten Komponenten geringer sind als für den kombinierten Rangier- und Streckenverkehr. Die BZH-OL-Auslegungen sind kostengünstiger als die BZH-Auslegungen, dies hängt insbesondere mit den kleineren installierten Brennstoffzellenleistungen und Wasserstofftankkapazitäten der BiMode-Variante zusammen, während es sich bei den Oberleitungskomponenten um etablierte Baugruppen handelt.

Nicht in der Kostenaufstellung enthalten sind sonstige mittelbare Kosten, die aber individuell berücksichtigt werden müssen und durchaus einen substantiellen Einfluss auf die unternehmerische Entscheidung haben können. Dazu gehören im Szenario der Nutzung eines eigenen Fahrzeugs für den Umbau, die Miete für eine Ersatzlok während des Umbaus sowie der Zulassungsphase und im Szenario einer Lokbeschaffung die dafür notwendigen Kosten (je nach kalkulatorischem/bilanziellen Restwert der Lok). Schließlich ist der entgangene Erlös des Restwerts der Altlok auf dem Zweitmarkt zu veranschlagen, der im Szenario einer Fahrzeugneubeschaffung in Ansatz gebracht werden kann. Dieser Effekt dürfte sich aktuell bei den Fahrzeugen der Baureihe Vossloh DE 18 deutlich stärker bemerkbar machen, da diese Fahrzeuge jünger sind als die Fahrzeuge der MaK G 1206-Reihe.

6.2.2 Neufahrzeug

Für das Szenario Neufahrzeug werden wie auch im Umbauszenario die Auslegungen für rangierlastigen Mischbetrieb (RM) und des Streckenregionalverkehrs (SR) unterschieden sowie nach den Antriebssystemen Brennstoffzellenhybrid und BiMode-Oberleitungs-Brennstoffzellenhybrid differenziert.

Für die Systembaugruppen werden die gleichen spezifischen Kosten wie für das Umbauszenario angesetzt. Die beiden wesentlichen Kostenkategorien (aus Sicht des Fahrzeugherstellers) umfassen bei den wiederkehrenden Kosten die Antriebs- und Speicheranlagen (Bezug von Material, Baugruppen, Komponenten) sowie die Kosten für Montage und Inbetriebsetzung. Die Kosten für eine Lokomotive ohne Antriebsanlage einschließlich Montage und Inbetriebnahme werden mit 1,14 Mio. € angesetzt². Wie im Umrüstungsszenario erfolgt auch hier kein Einbezug einer verkaufsbezogenen Marge. Eine Zusammenfassung der Kosten je Antriebsvariante für den Ansatz Neubau zeigt Abbildung 47.

Abbildung 48: Kostenschätzung Neufahrzeug für Auslegungen RM und SR

Neubau			BZH		BZH		BZH-OL	
Drehgestell mit Mittelführerhaus			RM		SR		SR	
System	Komponente	Kostenansatz	#	€	#	€	#	€
Panto + Trafo + HV-System + Netz-SR	Panto+Dach-HV	40 €/kW					2000	80.000
	Transformator	40 €/kW					2000	80.000
	Netz-SR	30 €/kW					1800	54.000
BZS + DCDC-Wandler	BZS	1.000 €/kW	125	125.000	1058	1.058.000	124,5	124.500
	DCDC-Wandler	200 €/kW	125	25.000	1058	211.600	124,5	24.900
	Kühlanlage	100 €/kW	125	12.500	1058	105.800	125	12.500
H2-Tankanlage	H2-Tanksystem	1.500 €/kg H2	325	487.500	175	262.500	250	375.000
Akku-System + DCDC-Wandler	Akku (LTO)	1.500 €/kWh	165	247.500	210	315.000	165	247.500
	Akku-System (NMC)	750 €/kWh						
	DCDC-Wandler	240 €/kW	1.676	402.120	742	178.080	1.676	402.120
ASR + Achsgetriebe + FM	Antriebsstromrichter							
	Achsgetriebe	75 €/kW	1800	135.000	1800	135.000	1800	135.000
	Fahrmotor	25 €/kW	1800	45.000	1800	45.000	1800	45.000
Anpassung sonstiger Baugruppen		psch						
	Faktor	0,25 (M€)	1	250.000	1	250.000	2	500.000
Antriebs- und Speicheranlage (Summe)				1.873.620		2.704.980		2.224.520
Lokomotive ohne Antriebsanlage (inkl. Montage und IBS)				1.140.000		1.140.000		1.140.000
Gesamtkosten Lok inkl. Antriebsanlage (Summe)				3.013.620		3.844.980		3.364.520

(RM: Rangierlastiger Mischverkehr, SR: Streckenregionalverkehr)

Die Werte stellen die Kosten dar, also keinen Einkaufspreis, d.h. ohne Marge sowie sonstige Aufschläge bei der Preisbildung. Hier ist anzumerken, dass es sich bei dieser Position um einen sehr groben Richtwert handelt. Die tatsächlichen kalkulatorischen Kosten je Lokomotive jenseits der reinen Materialbezugs- und Fertigungskosten hängen stark vom individuellen Einzelfall ab.

² Als Referenzfahrzeug wurde eine 4-achsige dieselelektrische Rangierlok (DE) mit ca. 1500-1800 kW gewählt. Aktuelle Marktpreise für eine solche Lokomotive bewegen sich etwa zwischen 2,7 und 3,5 Mio. €. Unter der Annahme, dass von dieser Marktpreisspanne für Marge, Risikorückstellungen, Gemeinkosten sowie anteiligen Entwicklungs- und Zulassungskosten pro Lokomotive etwa 0,7-1 Mio. € abgezogen werden müssen, resultieren (um Einmalaufwände bereinigte) Kosten von 2 Mio. € für Fremdmaterialien und Systeme, Montage sowie Inbetriebnahme. Die Kosten für die antriebs- und speicherrelevante Baugruppen einer DE-Lok (Dieselmotor, Generator, Abgasanlage) wurden mit ca. 0,86 Mio. € abgeschätzt und von diesen 2 Mio. € abgezogen. Dadurch resultieren Kosten in Höhe von ca. 1,14 Mio. € für eine Rangierlokomotive ohne Antriebs- und Speicherkomponenten.

Ergebnisse/Interpretation:

Die Neufahrzeugkosten sind etwas geringer als die Kosten einer Umrüstung von Bestandslokomotiven, der Grund dafür liegt im Wesentlichen darin begründet, dass anders als im Fall der Umrüstung hier nicht die Kosten für die Miete einer Ersatzlok angerechnet werden. Wie im Fall der Umrüstung sind auch hier in der Auslegung Streckenregionalverkehr (SR) die Kosten der Variante BZH höher als die Kosten der BiMode-Variante auf Grund der im Fall der BiMode-Variante deutlich kleineren Auslegung der Brennstoffzellen und der Wasserstofftanks. Die Entwicklungskosten für eine komplette Lokomotivneuentwicklung werden als deutlich höher eingeschätzt als die Kosten für eine Umrüstung einer Bestandslokomotive. Der Grund ist, dass bei einer Neuentwicklung die Kosten für die Entwicklung der kompletten Lokomotive angesetzt werden müssen, also nicht nur der Antriebs- und Energiespeicheranlage wie bei der Anpassungsentwicklung einer bestehenden Lokomotive. Branchenangaben variieren hier stark zwischen einem mittleren einstelligen Millionenbetrag bis zu deutlich zweistelligen Millionenbeträgen, wobei große Schienenfahrzeughersteller zum Teil deutlich höhere Werte ansetzen als kleinere Unternehmen wie beispielsweise Umrüster (Bundeskartellamt 2020). Sofern bereits eine grundsätzlich geeignete Plattform auf Brennstoffzellenhybrid bzw. in der BiMode-Variante Brennstoffzellenhybrid-Oberleitung anpassbar wäre, sind die Entwicklungskosten geringer als bei einer kompletten Neuentwicklung einer Lokomotive. Angenommen werden hier Kosten von mind. 20 Mio. € für die Entwicklung einer Brennstoffzellenhybridlokomotive bzw. einer Bi-Mode Brennstoffzellenhybridlokomotive.

6.2.3 Energiekosten Wasserstoff/Strom – Hochrechnung

Um einen gesamthaften Vergleich der Auslegungsvarianten zu treffen ist es ratsam, neben den reinen Investitions- bzw. Beschaffungskosten der Fahrzeuge und der Infrastruktur auch die Betriebskosten der Fahrzeugvarianten im Vergleich zu betrachten. Eine detaillierte LCC-Analyse mit Instandhaltungskosten unter Berücksichtigung der Lebensdauer der Komponenten, Instandhaltungsaufwände etc. ist nicht Bestandteil dieser Vorstudie. Ein grundsätzlicher Vergleich kann jedoch überschlägig auf Basis der vorliegenden Daten für die Energiekosten getroffen werden. Dafür werden die 7-Monatsmessdaten der DE 18 herangezogen, um den Dieserverbrauch und die Wasserstoff- bzw. Strombedarfe abzuleiten.

Für die Energiepreise werden die nachfolgend angegebenen Werte angesetzt. Es handelt sich dabei um Annahmen, die resultierenden Energiekosten ändern sich aber letztlich linear mit den angesetzten Preisen, d.h. eine Preisvariation und die Prüfung der Ergebnisauswirkung ist anhand der Ergebnistabelle unten leicht möglich.

Tabelle 22: Angesetzte Energiebezugpreise

	€/l	€/kg H2	€/kWh	€/MJ
Diesel	1,3			0,037
Wasserstoff		6		0,050
Strom (OL)			0,15	0,042

Es wurde unterschieden in die Auslegungsgruppen 1-6 (vgl. Abschnitt 4.3.1) für BZH bzw. BZH-OL und zusätzlich wurde der Einfluss der Oberleitung abgeschätzt. Dazu wurde vereinfacht für alle Messdaten angenommen, dass bei einer Geschwindigkeit $v > 45$ km/h eine Oberleitung vorhanden ist und für eine Sensitivität die Variante einer Oberleitungsverfügbarkeit bei einer Geschwindigkeit $v > 25$ km/h.

Unter Oberleitung bezieht die Lokomotive den Strom annahmegemäß ausschließlich aus dem Fahrdraht. Rückspeisung in die Oberleitung oder rekuperatives Nachladen der Batterie wurden in die Berechnungen nicht mit einbezogen. Die Energiebedarfe wurden auf ein Kalenderjahr hochgerechnet und die Wirkungsgrade sind analog zu den in Abschnitt 3.2 aufgeführten Werten angesetzt. Einschränkend muss jedoch angemerkt werden, dass es sich um eine sehr grobe Hochrechnung handelt.

Tabelle 23: Vergleich Energiekosten für die Auslegungsgruppen

Auslegungsgruppen	1 und 2	3 und 4	5 und 6	5 und 6
Antriebstopologie	BZH	BZH	BZH-OL	BZH-OL
Betrieb ¹	RM	RM + SR	RM + SR	RM + SR
Oberleitungsverfügbarkeit			OL bei v > 45km/h	OL bei v > 25km/h
Energiebedarf (Ebene DC-ZK, Brutto, ohne Reku- peration)				
Mittlerer Energiebedarf je Fahrzyklus [kWh]	209,2	737,5	737,5	737,5
Durchschnittliche Dauer der Fahrzyklen [h]	5,15	6	6	6
Energiebedarf im Messzeitraum [kWh]	30.329	280.240	280.240	280.240
Energiebedarf je Betriebsjahr [kWh]	146.333	444.210	444.210	444.210
Zeitanteil OL			49,50%	72,80%
Energiebedarf Messzeitraum OL [kWh]			138.637	204.077
Energiebedarf Betriebsjahr OL [kWh]			219.755	323.483
Zeitanteil ohne OL			50,50%	27,20%
Energiebedarf Messzeitraum ohne OL [kWh]			141.603	76.163
Energiebedarf je Betriebsjahr ohne OL [kWh]			224.455	120.727
Wirkungsgrad (BZ / OL bis DC-ZK)	39 %	39 %	86 %	86 %
Energiebedarfe H2 und Strom ab OL				
Energiebedarf H2 (kWh)	378.679	1.149.522	580.842	312.416
Energiebedarf H2 (kg H2)	11.372	34.520	17.443	9.382
Energiebedarf Strom (kWh)			255.070	375.467
Kosten je Betriebsjahr (€/a)				
H2	68.230	207.121	104.656	56.291
Strom			38.260	56.320
Gesamtkosten Energie (€/a)	68.230	207.121	142.917	112.611

¹ RM: Rangierlastiger Mischbetrieb, SR: Streckenregionalverkehr

Ergebnisse

Der Wasserstoffbedarf würde sich im „rangierlastigen Mischbetrieb + Streckenregionalverkehr“ bei der Variante BZH-OL gegenüber dem BZH halbieren. Mit einer Verringerung des Wasserstoffbedarfs reduziert sich folglich auch die Größe und damit die Investitionskosten der Wasserstofftankstellen.

Die jährlichen Gesamtenergiekosten (Wasserstoff + Strom) sind beim BZH-OL je nach Oberleitungsverfügbarkeit um 31% bis 46 % geringer als in der Variante BZH. Hier machen sich die geringeren spezifischen Preise des Stroms gegenüber Wasserstoff und zum anderen der höhere Systemwirkungsgrad des Oberleitungsbetriebs gegenüber dem Wasserstoffbetrieb bemerkbar. Sofern eine Lokomotive ausschließlich im rangierlastigen Mischbetrieb eingesetzt wird, sind Energiebedarf und Energiekosten am geringsten.

6.2.4 Infrastruktur

Weitere Kosten fallen für die Wasserstoffversorgung (Tankstelle) sowie die Anpassung der Abstell- und Werkstatteinrichtungen an. Als Orientierungswert für die Kosten von Wasserstofftankstellen können auf Basis von aktuell beobachtbaren Branchenwerten (H₂-Tankstellen für den Schienenpersonennahverkehr) 6-12 Mio. € je Tonne benötigten Wasserstoff pro Tag angesetzt werden. Die Kosten enthalten neben den Verdichtern, dem Bevorratungsspeicher, der Steuerungstechnik und dem Dispenser auch Nebenkosten für Gleisanpassungen. Zusätzlich kann der Kauf oder die Miete einer mobilen (transportablen) Wasserstofftankstelle für die Versorgung der Lok während der an verschiedenen Standorten erfolgenden Zulassungstests notwendig sein. Hier sind Kosten von mindestens 1-1,5 Mio. € für den Kauf erforderlich (bei einer Betankungsleistung von etwa 100-200 kg H₂ pro Tag, höhere Mengen sind ebenfalls möglich). Auch Werkstatt- und Depotanlagen müssen standortspezifisch angepasst werden. Auch hier ist mit einem wenigstens mittleren sechsstelligen Betrag zu rechnen. Als zusätzlicher Kostenfaktor (hier nicht betrachtet) kommt hinzu, dass durch die kürzeren Betankungs- und Nachladezyklen und gleichzeitig längeren Zeiten für Nachladung bzw. Betankung im Vergleich zu Diesellokomotiven, ein zusätzlicher Fahrzeugbedarf entstehen kann (mit entsprechend höheren Kosten).

7 AP 7 Bewertung und Handlungsempfehlungen

Autoren: DLR, mit Beiträgen von Duisport

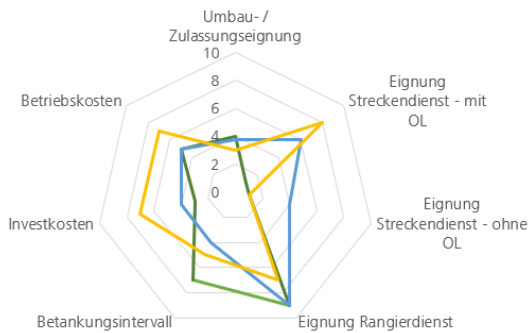
7.1 Bewertung Konzepte

Technisch-konstruktiv ist eine Umsetzung einer Rangierlokomotive mit Brennstoffzellenhybridantrieb grundsätzlich möglich. Eine Neubaulokomotive ist dabei leichter umzusetzen, da die Basislokomotive optimal an einen BZH-Antrieb angepasst werden kann. Grundsätzlich stellt auch der Umbau von Bestandsdiesellokomotiven eine Option dar. Der Vorteil besteht darin, dass bestehende Basislokomotiven, die oft noch mehrere Jahre oder sogar Jahrzehnte Betrieb vor sich haben, auf einen lokal emissionsfreien Betrieb umgestellt werden können und damit zukünftige dieselkraftstoffbedingte CO₂- und Schadstoffemissionen unmittelbar vermeiden. Allerdings ist ein Fahrzeugumbau gegenüber einem Neufahrzeugbau mit einigen Limitationen verbunden. Die dieselektrische Leistungsübertragung stellt dabei per se geringere Anpassungserfordernisse als eine dieselhydraulische Leistungsübertragung. Bei einem Umbau auf ein BiMode-Fahrzeug werden die Herausforderungen nochmals erhöht.

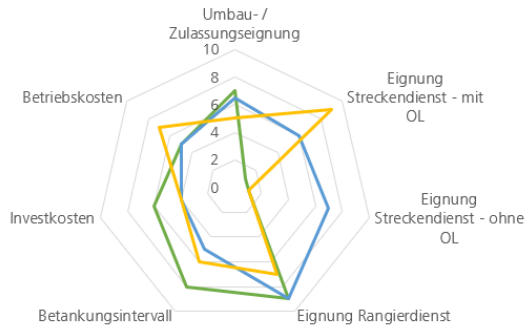
duisport-Betrieb: Die Analyse der konkreten duisport-Lastprofile und -Messdaten hat gezeigt, dass sich das Profil *rangierlastiger Mischbetrieb* problemlos mit einem Brennstoffzellenhybridantrieb realisieren lässt. Im Fall des *Streckenregionalverkehrs* (Streckendienst mit Rangieranteilen) stellt sich die Realisierbarkeit differenzierter dar. Aus dem hohen Streckendienstanteil über weite Distanzen resultiert ein hoher Energiebedarf sowie hohe mittlere Leistungen. Dies erfordert für BZH entsprechende Wasserstoffbetankungen auch an den, von Duisburg aus betrachtet, peripheren Zielorten Marl und Bönen. Im Fall einer umgerüsteten G 1206 auf BZH-Antrieb würde darüber hinaus in einigen Fällen (hohe Anhängelasten) der für 35 MPa-CGH2-Drucktanks nutzbare Bauraum auf dem Fahrzeug nicht genügen, um selbst nur eine Richtungsfahrt zu absolvieren. Bei der DE 18 ist dieses Problem auf Grund größerer Bauraumreserven nicht ganz so deutlich. In einer detaillierten Analyse wäre daher zu prüfen, ob die Installation von H₂-Speichertechnologien höherer Speicherdichte (z. B. 70 MPa, Flüssigwasserstoff, LOHC etc.) dieses Problem reduzieren könnte. Auf Grund der Tatsache, dass die im Streckendienst gefahrenen Relationen im Fall Duisport nahezu vollständig unter Fahrdraht stattfinden, stellt die Variante BZH-OL-BiMode eine interessante Alternative dar. Für diese Antriebslösung spricht auch, dass die Traktionsenergiekosten bei Nutzung der elektrischen Energie aus der Oberleitung geringer sind als bei der Verwendung von Wasserstoff. Auf den nicht mit Oberleitung ausgestatteten Hafengebieten von duisport (200 km Gleislänge) ist ein leistungs- und reichweitenstarker fahrdrahtunabhängiger Antrieb in jedem Fall erforderlich. Die H₂BZ-Technologie ist dafür sehr gut geeignet, dies hat die Auswertung der den *rangierlastigen Mischbetrieb* zugeordneten Zyklen gezeigt. Für alle Umsetzungsvarianten gilt, dass auf Grund der im Vergleich zu Dieselkraftstoff deutlich geringeren Energiedichte von Wasserstoffdruckspeichersystemen eine deutlich häufigere Betankung im Vergleich zu den Diesellokomotiven erforderlich ist.

Die Spinnennetzdiagramme (Abbildung 49) fassen für jedes der Referenzfahrzeuge (Umbau G 1206, Umbau DE 18, Neufahrzeug) jeweils für die Kombination aus Antriebskonzept (BZH, BZH-OL) und Auslegungsvariante (rangierlastiger Mischbetrieb, Streckenregionalverkehr) die Eignung anhand von acht Bewertungsdimensionen zusammen. Eine Bewertung mit 10 stellt die bestmögliche Eignung bzw. Bewertung dar, 0 die schlechteste. Die Basis für die Bewertungen bilden die Auslegungsergebnisse und Kostenberechnungen der vorigen Kapitel.

Umbau G 1206



Umbau DE 18



Neufahrzeug

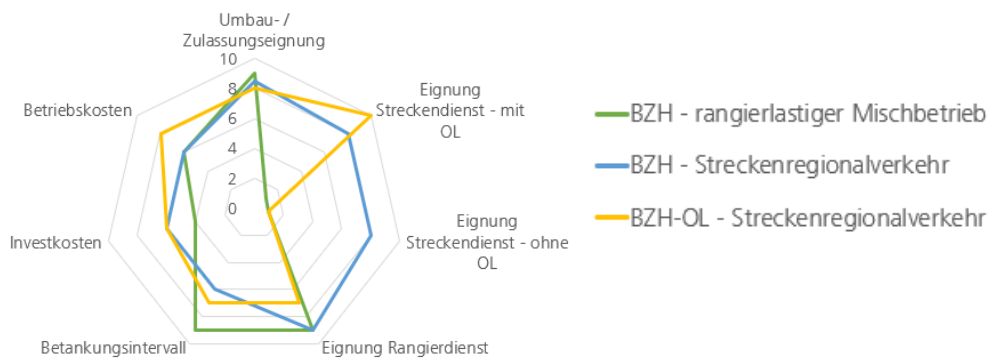


Abbildung 49: Bewertung Umbau/Neubau für die Antriebssysteme und dpr-Einsatzgebiete

Jede der untersuchten Auslegungsvariationen hat seine spezifischen Vor- und Nachteile. Grundsätzlich gilt jedoch, dass die betrieblichen Prozesse gegenüber dem klassischen Dieselmotorbetrieb angepasst werden müssen, dies betrifft u.a. die Tankintervalle und Tankdauern.

Umbau G 1206

- Der bestgeeignete Einsatz für eine Umbauvariante der G 1206 stellt der rangierlastige Mischbetrieb als BZH dar,
- Für den Streckenregionalverkehr ist ein Umbau der G 1206 auf BZH wegen der Reichweitenlimitation nur eingeschränkt einsetzbar
- Der BZH-OL würde die notwendigen Reichweiten schaffen, jedoch ist der Umbauaufwand hier höher

Umbau DE 18

- Ein Einsatz als BZH im rangierlastigen Mischbetrieb und auch im Streckenregionalverkehr wäre grundsätzlich möglich
- Der BZH-OL bietet im Streckenregionalverkehr eine höhere betriebliche Flexibilität, allerdings ist hier der Umbau- und Zulassungsaufwand höher

Neufahrzeug

- Eine Neukonstruktion eröffnet die Möglichkeit, losgelöst von bestehenden Fahrzeugparametern das Antriebssystem passgenau an die Erfordernisse des jeweiligen Betriebs anzupassen

- Auf Grund des hohen Oberleitungsanteils bei den Streckenfahrten stellt der BZH-OL eine sinnvolle Lösung dar

Eine zusammenfassende qualitative Bewertung der Eignung nach Antriebssystem und Fahrzeug für die beiden Einsatzfelder rangierlastiger Mischbetrieb und Streckenregionalverkehr, mit sowie ohne Oberleitung stellt Abbildung 50 dar. Die Eignungsbewertung umfasst sowohl technische, ökonomische als auch Zulassungsaspekte.





















Antriebs-Einsatzfeld-Fit Uneingeschränkt geeignet:  Ungeeignet: 	Rangierlastiger Mischverkehr (Rangierdienst und kurzer Streckendienst)	Streckenregionalverkehr inkl. rangierlastiger Mischverkehr - <u>ohne</u> Oberleitung	Streckenregionalverkehr inkl. rangierlastiger Mischverkehr - <u>mit</u> Oberleitung
Umbau dieselhydraulische Lok G 1206			
BZH			
BZH-OL			
Umbau dieselelektrische Lok DE 18			
BZH			
BZH-OL			
Neufahrzeug			
BZH			
BZH-OL			

Abbildung 50: Eignungsmatrix der untersuchten Variantenkombinationen für die Anwendung bei Duisport (technische, wirtschaftliche und Zulassungsaspekte)

Die Bewertung erfolgte in dieser Studie spezifisch für die duisport-Anwendungsfälle. Eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Eisenbahnverkehrsunternehmen und deren spezifischen Betrieb ist daher nur hinsichtlich der grundsätzlichen Eigenschaften der Fahrzeuge möglich.

7.2 Handlungsempfehlung und Skizzierung Umsetzungskonzepte

7.2.1 Handlungsempfehlung Duisport

Die Ergebnisse der Studie zur Untersuchung der Eignung von Brennstoffzellenrangierlokomotiven im dpr Einsatzfeld zeigen, dass für einen rangierlastigen Mischbetrieb der BZH und für den Streckenregionalverkehr, der auch rangierlastigen Mischbetrieb enthält, ein BiMode-BZH-OL Fahrzeug die Anforderungen am besten erfüllen. Dabei ist im Fall der Umrüstung auf Brennstoffzellenantriebe bei Nutzung einer dieselelektrischen Lokomotive mit einem geringeren Änderungsumfang zu rechnen als bei einer dieselhydraulisch angetriebenen Rangierlokomotive. In Abhängigkeit der Fahrzeugbasis für eine geplante Umrüstung kann es sich als vorteilhafter erweisen den Neubau einer Lokomotive anzustreben.

Seitens der Autorenschaft werden konkret die **folgenden weiteren Schritte** empfohlen:

- a) Branchenworkshop zum Abgleich der Duisport-spezifischen Fahrzeugauslegung mit Einsatzprofilen anderer Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU)

- b) Sondierungsgespräche mit Schienenfahrzeugindustrie
- c) Initiierung einer vertiefenden Durchführbarkeitsstudie mit Herstellerbeteiligung sowie ggf. weiteren EVU als Vorbereitung eines Umsetzungsvorhabens (Ergebnis u.a.: gestufte, modulare Auslegungsgrößen der Antriebskomponenten)
- d) Zusammenstellung eines Konsortiums für ein gefördertes Umsetzungsvorhaben

Die weiteren Schritte für ein Realisierungsvorhaben sind in Abbildung 51 skizziert.

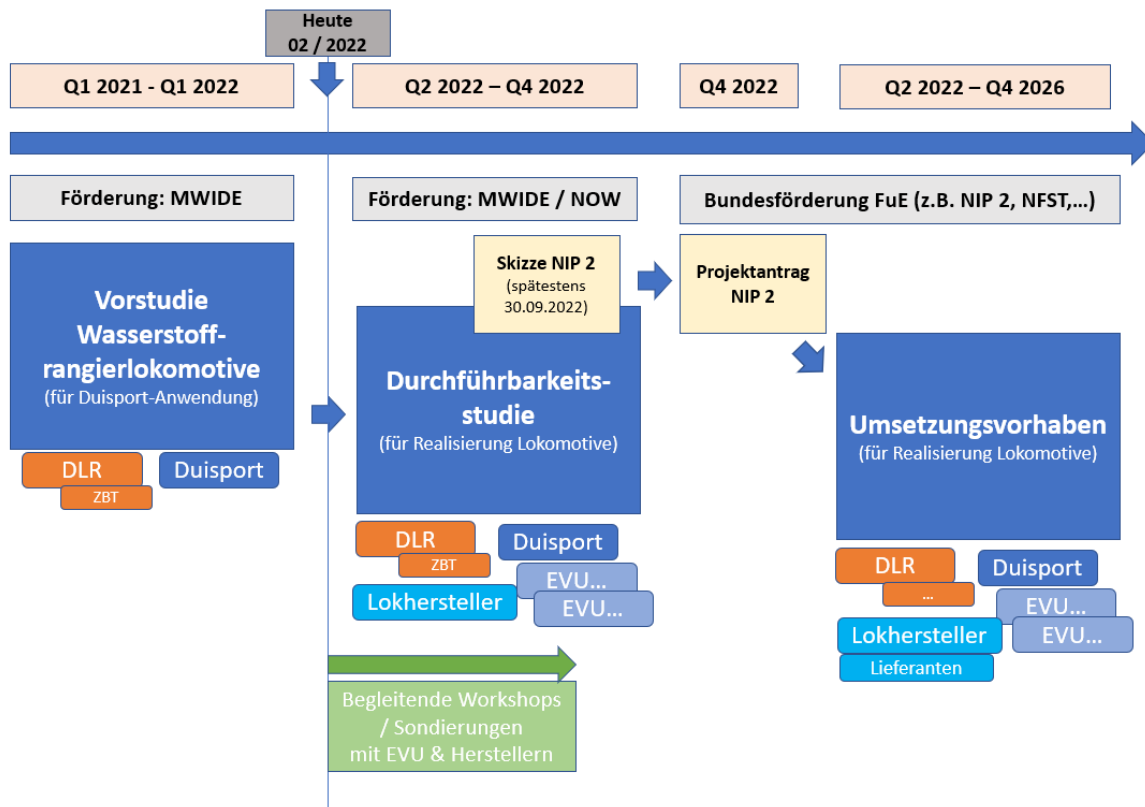


Abbildung 51: Skizzierung der nächsten Schritte für die Realisierung einer Brennstoffzellen-Lokomotive

7.2.2 Skizzierung Umsetzungskonzepte

In Abhängigkeit von der Entscheidung für ein Konzept (Neubau bzw. Umrüstung) werden nachfolgend zwei mögliche Umsetzungspfade skizziert. Der Fokus liegt auf der konkreten Realisierung einer ersten Brennstoffzellenlok. Die Skizzierung erfolgt nachfolgend unabhängig vom Zielantriebssystem (Brennstoffzellenhybrid oder BiMode).

Grundsätzlich sind zwei Umsetzungskonzepte denkbar:

- Umrüstung Bestandslok: FuE-Projekt für Umrüstung
- Neubau Lok: FuE-Projekt für Konstruktion Neufahrzeug

An dieser Stelle erfolgt keine Einschränkung auf Umrüstung oder Neubau, nachfolgend werden daher die grundsätzlich möglichen Konzepte dargestellt. Tabelle 24 fasst die wesentlichen Akteure in einem Umsetzungsprojekt und deren Rollen zusammen. Unterschieden wird nach Neuentwicklung/Neubau einer Lokomotive und der Umrüstung von Bestandslokomotiven.

Während bei einem Neubau einer Lokomotive die Einbeziehung eines Neufahrzeugherstellers (Systemintegrator) erforderlich ist, kann in einem Umrüstungsvorhaben stattdessen auch ein auf Modernisierung bzw. Umrüstung spezialisiertes Unternehmen die Rolle des für die Konstruktion, den Umbau und die Einholung der Zulassung Partners übernehmen.

Tabelle 24: Partner und deren Rollen

Partner	Rolle	
	Neubau Lok	Umrüstung Lokomotive
Fahrzeugmodernisierer / Umrüster	/	Engineering und Umbau
Fahrzeughersteller	Konstruktion Fahrzeug	/
Eisenbahnverkehrsunternehmen / Fahrzeughalter (dpr)	Anforderungsdefinition, Testprogramm	Beistellung Fahrzeug, Anforderungsdefinition, Testprogramm
Forschungseinrichtung	Fahrzeug- und Antriebskonzepte	
Systemlieferanten BZ-Anlage, Batterieanlage, Wasserstofftankanlage	Integrationsangepasste Systembaugruppen (ggf. als Unterlieferant)	
Ingenieurdienstleister (ggf.)	Beratung, Teilaufgaben Engineering (ggf. Unterauftrag)	
Experte Zulassung	Begleitung Genehmigungsprozess (ggf. Unterauftrag)	

Die Inhalte eines Umsetzungsprojektes lassen sich in mehrere Arbeitsschwerpunkte aufteilen.

1. Fahrzeugentwicklung und Umbau
 - Anforderungsspezifikation / Lastenheft
 - Konzeptentwurf
 - Detailkonstruktion
 - Gefährdungsanalyse und Sicherheitskonzept
 - Energiemanagement
 - Systemintegration, Funktionstest
 - Lokmontage
 - Inbetriebnahme und statische Tests
 - dynamische Tests und Nachweisführung
 - Fahrzeuggenehmigung

2. Wasserstofftankstelle (HRS)
 - Anforderungsspezifikation und Beschaffung / Miete mobile HRS
 - Spezifikation, Genehmigungsplanung und Bau ortsfeste HRS

3. Anpassung Werkstatt/Abstellanlage
 - Spezifikation, Planung und Um-/Neubau

Einen möglichen Zeitplan für ein Umsetzungsprojekt skizziert Abbildung 52. Die Darstellung ist bewusst generisch gehalten, das heißt, es wird nicht zwischen einem Neu- und Umbauvorhaben und auch nicht zwischen dem Zielantriebssystem Brennstoffzellenhybrid bzw. Brennstoffzellenhybrid-Oberleitungs-BiMode unterschieden. Die Zeitspannen der einzelnen Umsetzungs-schritte stellen grobe Orientierungswerte auf Basis von typischen Branchenwerten dar.

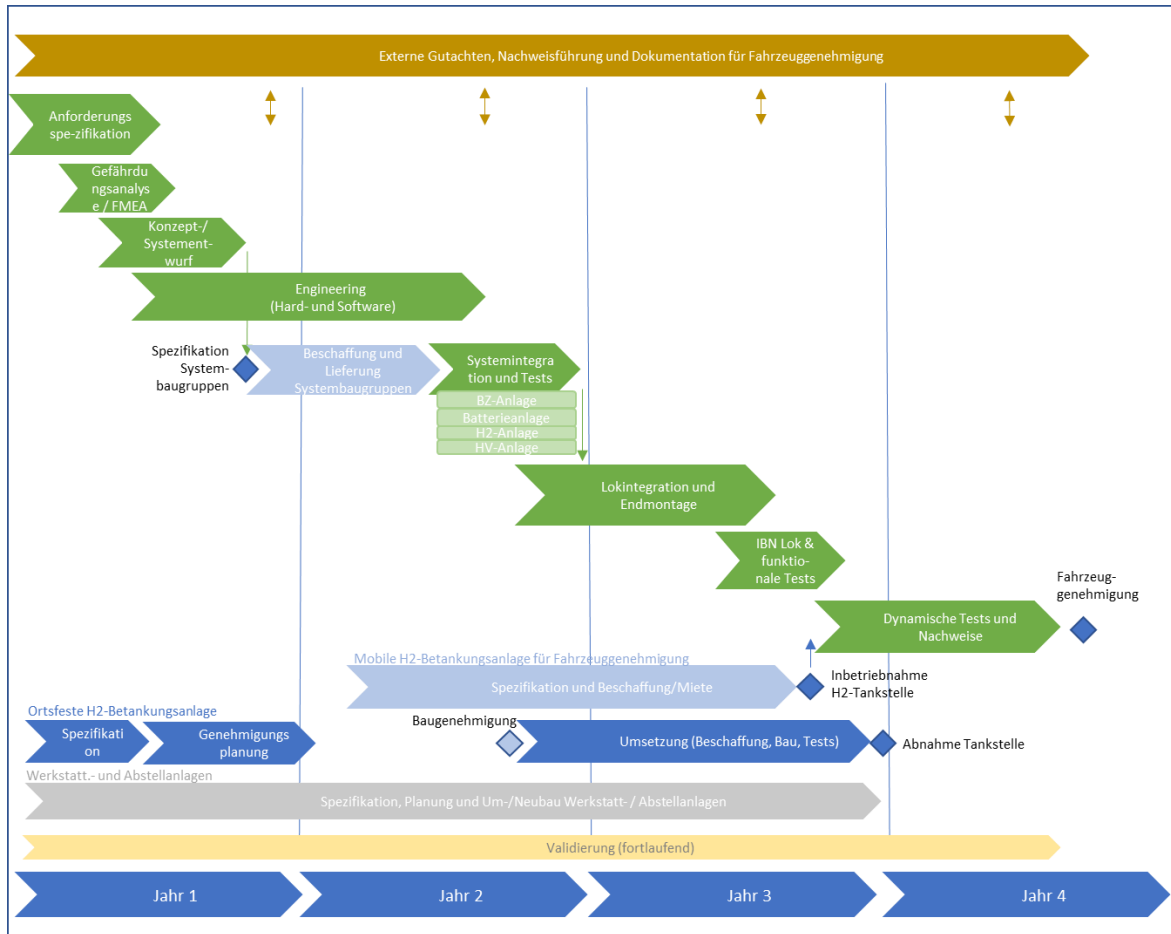


Abbildung 52: Vorläufiger Zeitplan eines prototypischen Umsetzungsprojektes

Die geschätzten Gesamtkosten³ eines solchen Umsetzungsprojektes lassen sich entsprechend Abschnitt 6.2 wie nachfolgend dargestellt zusammenfassen:

- **Einmalkosten Lokomotiventwicklung und -zulassung:**
 - o Fahrzeugentwicklung inkl. Zulassung je Baureihe im Szenario Umrüstung: 4-20 Mio. €⁴
 - o Fahrzeugentwicklung inkl. Zulassung je Baureihe im Szenario Neufahrzeug (Anpassung Plattform): mind. 20 Mio. €
- **Wiederkehrende Kosten (Material, Montage, IBN) je Lokomotive:**
 - o Szenario Umrüstung: 2,9 - 4,1 Mio. €
 - o Szenario Neufahrzeug: 2,9 - 3,6 Mio. €
 - o *hinzu kommen in beiden Szenarien die Einmalkosten für Entwicklung und Zulassung*
- **Kosten Wasserstofftankstelle:**
 - o Mobile Wasserstofftankstelle: mind. 1-1,5 Mio. € (100-200 kg H₂/d Abgabekapazität)
 - o Ortsfeste Wasserstofftankstelle (ohne Elektrolyse) inkl. Gleisarbeiten: 6-12 Mio. € je täglich benötigter Tonne Wasserstoff⁵
- **Kosten Werkstatt- und Abstellanlagen:**
 - o Anpassung Werkstatt- und Abstellanlagen: ca. 1 Mio. €

Auf Grund der zu erwartenden hohen Entwicklungs- und Genehmigungskosten sowie des Umsetzungsrisikos ist die Realisierung über ein gefördertes Forschungs- und Entwicklungsprojekt zu empfehlen. Vorbereitend und begleitend zu der Umsetzungsplanung ist ferner zu empfehlen, Gespräche sowohl mit Systemintegratoren (Fahrzeugherstellern), Umrüstungswerkstätten und Wasserstofflieferanten als auch mit anderen Eisenbahnverkehrsunternehmen und Fahrzeughaltern (Abstimmung Anforderungsspezifikation, Nachfragebündelung) zu führen.

Da die Wirtschaftlichkeit von Neuentwicklungen im Schienenfahrzeugsektor erst ab einer kritischen Mindestanzahl an Fahrzeugen gewährleistet ist (u.a. zur Amortisation der Einmalkosten und wegen dem erforderlichen Aufwand der Baureihenbetreuung etc.), sollten Fahrzeugbedarfe betreiberübergreifend gebündelt werden. Aktuell gibt es in Deutschland gemäß der Studie „Machbarkeitsanalyse alternative Antriebe“ im Auftrag der NOW etwa 2800 Rangierlokomotiven und das Durchschnittsalter der Rangierlokomotive der DB Cargo betrug 42 Jahre im Jahr 2019. Daraus ergeben sich über die nächsten Jahre in Deutschland Absatzpotentiale über alle Antriebsarten hinweg von 20-60 neuen und bis zu 25 modernisierten Lokomotiven pro Jahr (Pagenkopf et al. 2022). Folglich besteht in der Branche ein substantieller Flottenerneuerungsbedarf.

³ Dargestellt sind Kosten, keine Preise, d.h. es sind keine Margen u.ä. enthalten.

⁴ Die Angaben zu Entwicklungs- und Zulassungskosten gehen in der Branche weit auseinander.

⁵ Eine überschlägige Abschätzung des Gesamtwasserstoffbedarfs bei einer angenommenen kompletten Umstellung der dpr-Lokomotivflotte auf Brennstoffzellenbetrieb ergibt einen Bedarf zwischen 0,5 und 1 Tonne Wasserstoff pro Tag (Grundlage: aktueller Dieselkraftstoffbedarf der Rangierlokomotive, kein BiMode-Betrieb, bei Nutzung der Oberleitung würde sich der Wasserstoffbedarf entsprechend reduzieren). Die genaue Bedarfshöhe ist von verschiedenen Faktoren abhängig, die im Rahmen dieser Vorstudie nicht detaillierter spezifiziert werden konnten.

Basierend darauf leiten sich die nachfolgend Handlungsempfehlungen an weitere Branchenakteure ab.

7.2.3 Handlungsempfehlungen für weitere Branchenakteure

EVU/Fahrzeughalter – Übergreifend:

- Durchführung von Studien zur konkreten Analyse der Eignung von BZH-Lokomotiven im spezifischen Einsatzfeld
 - o Die Charakteristika des Betriebs und damit die Anforderungen an die Fahrzeuge sind je nach EVU und Fahrzeughalter sehr unterschiedlich (Zughakenlasten, Betriebskonzept, Einsatzradien, Topografie, Verfügbarkeit von Oberleitungen usw.), daher ist eine Übertragbarkeit der Ergebnisse für Duisport nur eingeschränkt auf andere EVU möglich.
 - o Folglich wird empfohlen, die Eignung der Wasserstofftechnologie in konkreten anderen EVU-Anwendungsfällen analog zu dem in dieser Studie am Duisport-Beispiel erfolgten detaillierten Mess- und Betriebsdatenanalyse zu prüfen und Technologieoptionen auf deren techno-ökonomische Machbarkeit zu untersuchen. Dabei muss auch das aktuell eingesetzte Rollmaterial in die Bewertungssystematik der Antriebssystemeignung einbezogen werden.

Politik:

- Schaffung geeigneter Rahmenbedingungen für Umsetzungsvorhaben mit finanzieller Unterstützung der Anlaufkosten zur Risikominderung, z.B. im Rahmen von sektorenübergreifenden Reallaboren
- Verstetigung von Förderprogrammen für Entwicklung und Beschaffung von BZ-Lokomotiven und Tankstelleninfrastruktur sowie die finanzielle Ausstattung mit ausreichenden Mitteln, auch für die Mehrkosten im Betrieb
- Verstetigung der Forschungs- und Entwicklungsprojektförderung für Hersteller und Forschungseinrichtungen im europäischen Raum

Industrie:

- Entwicklung modularer Fahrzeugplattformen für verschiedene Null-Emissions-Antrieben und variablen Leistungsklassen (Fahrzeughersteller)
- Standards schaffen für bahnzugelassene Systeme
- Demonstration von baureihenübergreifend anwendbare Umbaukonzepte von Diesel- auf Brennstoffzellenhersteller (Umrüster)
- Weiterentwicklung der Technologiekomponenten Brennstoffzelle, Batterie und Wasserstofftanks

8 Literatur

Literaturverzeichnis

Akasol (2021): Neues Ultra-Hochenergie-Batteriesystem AKASystem CYC steigert die Energiedichte signifikant. Online verfügbar unter <https://www.akasol.com/de/news-akasol-new-uhe-de>, zuletzt geprüft am 11.01.2022.

Ballard (2022): Heavy Duty Modules. Online verfügbar unter <https://www.ballard.com/fuel-cell-solutions/fuel-cell-power-products/motive-modules>, zuletzt geprüft am 06.01.2022.

Bundeskartellamt (2020): Fusionskontrollverfahren Entscheidung gemäß § 40 Abs. 2 GWB. Beschluss. Aktenzeichen B4-115/19. Fusion CRRC-Vossloh.

Deutsche Bahn (2022): H2goesRail. Grüne Mobilität dank Wasserstoff. Online verfügbar unter <https://gruen.deutschebahn.com/de/massnahmen/wasserstoff/h2goesrail>, zuletzt geprüft am 07.01.2022.

Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung (2020): Entwicklung eines bahnspezifischen Standards für Wasserstoffanwendungen in Schienenfahrzeugen. Online verfügbar unter https://www.dzsf.bund.de/Shared-Docs/Standardartikel/DZSF/Projekte/Projekt_39_Wasserstoffanwendung.html.

Eisenbahn-Bundesamt (2021): Genehmigung von Fahrzeugen. Genehmigung nach dem 4 EP. Online verfügbar unter https://www.eba.bund.de/DE/Themen/Fahrzeugzulassung/Genehmigung_von_Fahrzeugen/Genehmigung_nach_dem_4_EP/genehmigung_nach_dem_4_ep_node.html, zuletzt geprüft am 10.09.2021.

EMCEL (2020): Wasserstoffdruckbehälter: Welche Druckbehälter-Typen gibt es? EMCEL GmbH. Online verfügbar unter <https://emcel.com/de/wasserstoffdruckbehaelter/>, zuletzt geprüft am 05.01.2022.

Erpenbeck, Thomas (2020): Das 4. Eisenbahnpaket - Bedeutung und Auswirkungen auf die Zulassung von Eisenbahnfahrzeugen in Deutschland. In: *ZEVrail* 144 (6-7), S. 219–225.

Forsee Power (2020): Pulse 14 high-power battery pack. Technical Data Sheet. Online verfügbar unter https://www.forsee-power.com/wp-content/uploads/2020/09/Forsee-Power_Data-sheet_Pulse-15_EN.pdf, zuletzt geprüft am 11.01.2022.

Fuchs, Andrea Katharina; Bühler, Stefan (2021): Erste Erfahrungen mit der Zulassung von Änderungen unter dem 4. Eisenbahnpaket. In: *Eisenbahntechnische Rundschau* (10), S. 68–73.

Gardiner, Ginger (2021): Hydrogen is poised to fuel composites growth, Part 1. Hg. v. CompositesWorld. Online verfügbar unter <https://www.compositesworld.com/articles/the-potential-for-hydrogen-to-fuel-composites-growth-part-1>, zuletzt geprüft am 07.01.2022.

Hildebrandt, Tim; Schwarz, Alexander (2013): Die neue Lokomotivfamilie aus einem Baukasten von Antriebssystemen von der Konzeption zu den lauffechnischen Nachweisen. Schienenfahrzeugtagung 2013. Graz, 07.04.2013.

International Electrotechnical Commission (2021): PNW 9-2697 ED1: Railway applications – Rolling stock – Fuel cell systems for propulsion - Part 2: Hydrogen storage system. Online verfügbar unter https://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:38:9548088943215:::FSP_ORG_ID,FSP_APEX_PAGE,FSP_PROJECT_ID:1248,23,105233.

Krach, Wolfgang; Vonach, Walter; Pascoli, Gert; Handel, Christoph (2021): Nachweisführung für die EG-Prüfung von Schienenfahrzeugen - ein Erfahrungsbericht aus Sicht des Gutachters und des NoBo's am Beispiel der Festigkeitsbewertung. In: *ZEVrail* (Hg.): Tagungsband Schienenfahrzeugtagung Graz 2021, Bd. 145, S. 64–68.

Leclanché (2022): Module. Online verfügbar unter <https://www.leclanche.com/de/unsere-technologien/module/>, zuletzt geprüft am 11.01.2022.

Pagenkopf, Johannes; Jäger, Victoria Carolin; Konrad, Marcel; Böhm, Mathias (2022): Alternative Antriebe für Rangierlokomotiven. Studie für die NOW. Eisenbahnwesen-Seminar der TU Berlin. Berlin, 31.01.2022. Online verfügbar unter <https://elib.dlr.de/148621/>, zuletzt geprüft am 22.02.2022.

RailBusiness (2020): DB Regio: Keine Zukunft für Diesel-Hybrid-Umbaufahrzeuge. In: *RailBusiness*, 05.10.2020 (41/2020), S. 9.

RSSB (2020): Hydrogen Powered Trains: Route to Enter Service. Phase 2 Report: Hazard Analysis. Hg. v. Rail Safety and Standards Board.

Rubio, Sara; Nieto, Beatriz; Jesus, Martin (2021): Hydrogen refuelling and storage requirements for rail vehicles. Deliverable 1.5, Projekt: Fuel Cell Hybrid Power Pack for Rail Applications (FCH2RAIL). FCH JU Grant Agreement Number: 1010066333. Online verfügbar unter https://verkehrsforschung.dlr.de/public/documents/2021/FCH2RAIL_D1.5.pdf, zuletzt geprüft am 05.01.2022.

Salander, Corinna (2019): Fahrzeugzulassung. In: Das Europäische Bahnsystem: Akteure, Prozesse, Regelwerke. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 85–105.

Siemens Mobility (2022): The way is paved for Mireo Plus H. Online verfügbar unter <https://www.mobility.siemens.com/global/en/portfolio/rail/stories/alternative-drives-the-way-is-paved-for-mireo-plus-h.html>, zuletzt aktualisiert am 05.01.2022.

Tolga Wichmann, Jürgen Heyn (2021): Risiko- und regelwerksbasierter Sicherheitsnachweis zur Wasserstofftechnologie bei Schienenfahrzeugen. In: *ZEVrail Tagungsband Schienenfahrzeugtagung Graz 2021* 2021, 2021 (145), S. 57–63.

United States Department of Energy (2017): Safety Planning for Hydrogen and Fuel Cell Projects. PNNL-25279-1. Online verfügbar unter https://h2tools.org/sites/default/files/Safety_Planning_for_Hydrogen_and_Fuel_Cell_Projects-November2017_0.pdf, zuletzt geprüft am 09.12.2021.

Vossloh Locomotives (o.J.): Die Zukunft kommt aus dem Baukasten - Firmenbroschüre.

9 Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitspaket
AsBo	Assessment Body
ASM	Asynchronmotor
Bf	Bahnhof
BiMode	Zweikraft
BMS	Battery Management System
BoP	Balance of Plant
BTMS	Battery Thermal Management System
BZ	Brennstoffzellen
BZH	Brennstoffzellenhybrid(-antrieb)
BZH-OL	Brennstoffzellen-Oberleitungs-BiMode(-Antrieb)
CcH2	Cryo-Compressed Hydrogen
CSM	Common Safety Methods
DE	Dieselektrische Leistungsübertragung
DeBo	Designated Body
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
DoD	Depth of Discharge - Entladetiefe
dpr	Duisport rail GmbH
EBO	Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung
EoL	End of Life - Lebensdauerende
ERA	Europäische Eisenbahnagentur
EVU	Eisenbahnverkehrsunternehmen
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis
FuE	Forschung und Entwicklung
HRS	Hydrogen Refuelling Station
IBN	Inbetriebnahme
KV	kombinierter Ladungsverkehr
LCC	Life Cycle Costing
LOHC	Liquid Organic Hydrogen Carrier
LTO	Lithiumtitanatoxid
NNTR	Notified National Technical Rules
NoBo	Notified Body
OL	Oberleitung
RAMS-LCC	Reliability, Availability, Maintainability, Safety - Life Cycle Costing



Rbf	Rangierbahnhof
RM	Rangierlastiger Mischbetrieb
SoC	State of Charge
SPNV	Schienenpersonenahverkehr
SR	Streckenregionalverkehr
TCMS	Train Control and Management System
TEN-T	Transeuropäische Transportnetze
TEU	Twenty Foot Equivalent
TSI	Technischen Spezifikationen für die Interoperabilität
ZBT	Zentrum für BrennstoffzellenTechnik
ZK	Zwischenkreis
ZSG	Zentrales Zugsteuergerät

10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau der Vorstudie	14
Abbildung 2: Duisport-Hafenbereiche (gelb eingefärbt) sowie Ausschnitte Duisburg-Hafen (oben rechts) sowie Logport I-III (unten rechts).....	18
Abbildung 3: Gesamtrelationen Duisport von 12/2020 bis 07/2021	20
Abbildung 4: Links: Einsatz einer MaK G 1206 mit Containertragwagen im Streckenregionalverkehr (Rob Dammers, CC BY 2.0, Link), Rechts: MaK G 1206 mit Kesselwagen (Bild: Duisport).	20
Abbildung 5: Beispielhafter Tagesbetrieb einer Vossloh DE 18 (aus Messdatenauswertung) Blau: Duisport-Standorte, Rot: Chemiepark Marl.....	21
Abbildung 6: Einsatzprotokoll einer dpr Vossloh DE 18 mit hohem Rangieranteil (Auszug) ..	22
Abbildung 7: Zugkraftkurven G 1206 und DE 18	25
Abbildung 8: Vollständigkeitsgrad der zeitbezogenen Messwerte des aufgezeichneten Datensatzes aus dem Regelbetrieb	26
Abbildung 9: Histogramm über Maximalgeschwindigkeit der einzelnen Fahrzyklen	27
Abbildung 10: 3D-Histogramm der Fahrzyklusdauer über Maximalgeschwindigkeit der einzelnen Fahrzyklen.....	28
Abbildung 11: 3D-Histogramm der zurückgelegten Distanz über Maximalgeschwindigkeit der einzelnen Fahrzyklen.....	28
Abbildung 12: Typischer Streckenverlauf der Lok im rangierlastigen Mischverkehr am Beispiel des Fahrzyklus 321	29
Abbildung 13: Typischer Streckenverlauf der Lok im Streckenregionalverkehr am Beispiel des Fahrzyklus 166	30
Abbildung 14: Zeitgewichtete Belastung am Beispiel des Fahrzyklus 210	32
Abbildung 15: Zeitgewichtete Belastung aller Fahrzyklen	33
Abbildung 16: Zeitgewichtete Belastung aller Fahrzyklen getrennt nach Kategorien.....	34
Abbildung 17: Häufigkeitsverteilung der mittleren Leistung und des erforderlichen Pufferspeichers aller Fahrzyklen	35
Abbildung 18: Häufigkeitsverteilung der mittleren Leistung und des erforderlichen Pufferspeichers separiert nach rangierlastigen Mischfahrten (links) und Streckenregionalverkehr (rechts).....	36
Abbildung 19: Beispielhafte Brennstoffzellensysteme der Firma Ballard für verschiedene Einbauorte (Ballard 2022).....	38
Abbildung 20: Beispielhafte Zusammensetzung eines Batteriepacks	39
Abbildung 21: Beispielhafte Batteriepacks von Leclanché (li.) und Forsee (re.)	40
Abbildung 22: Beispielhafte BTMS zur Batterietemperierung von Technotrans (li.) und Saft (re.).....	40
Abbildung 23: Wasserstoffspeichersysteme für Aufdachmontage (links) und für Innenrauminstallation (rechts), Bildquellen: (Siemens Mobility 2022), (Rubio et al. 2021).....	42

Abbildung 24: Vereinfachte Topologie eines Brennstoffzellenhybridantriebssystems sowie eines Brennstoffzellenhybrid-Oberleistungs-BiMode-Antriebs	46
Abbildung 25: Ausschnitt der Tabelle zur kennzahlenbasierten Auslegung aller Fahrzyklen .	49
Abbildung 26: Ablaufschema des Projekts (AP 4 gelb hervorgehoben).....	51
Abbildung 27: MaK G 1206 - Dieselhydraulische Rangierlokomotive von Hugh Llewelyn. Lizenz: CC BY-SA 2.0 (Bildausschnitt)	53
Abbildung 28: Aufbau Vossloh Locomotives G 18 mit dieselhydraulischer Leistungsübertragung, der Aufbau einer MaK G 1206 ist vergleichbar, Abbildung: (Vossloh Locomotives o.J.)	54
Abbildung 29: Bauräume der MaK G 1206 für neue Antriebsstrangkomponenten (Bildquelle: Vossloh Locomotives, eigene Hervorhebung)	54
Abbildung 30: MaK G 1206 Konzept Beibehaltung Fahrwerk und Gelenkwellen	56
Abbildung 31: G 1206 Konzept Elektrifizierung Drehgestell	57
Abbildung 32: Vossloh DE 18 (Clic, CC BY-SA 4.0, Link, Bildausschnitt).....	57
Abbildung 33: Aufbau Vossloh DE 18 mit elektrischer Leistungsübertragung (Vossloh Locomotives o.J.)	58
Abbildung 34: Vossloh Locomotives DE 18 mit Bauräumen für alternative Antriebsstrangkomponenten in blau hervorgehoben.....	58
Abbildung 35: Erforderliche Batteriekapazität aller Zyklen in Auslegungsgruppe 3	61
Abbildung 36: Schematische Volumenverhältnisse der Komponenten für die Auslegung im rangierlastigen Mischbetrieb für die G 1206	63
Abbildung 37: Schematische Volumenverhältnisse der Komponenten für die Auslegung im rangierlastigen Mischbetrieb für die DE 18.....	64
Abbildung 38: Schematische Volumenverhältnisse der Komponenten für die Auslegung im Streckenregionalverkehr ohne OL für die G 1206.....	65
Abbildung 39: Schematische Volumenverhältnisse der Komponenten für die Auslegung im Streckenregionalverkehr ohne OL für die DE 18	66
Abbildung 40: Schematische Volumenverhältnisse der Komponenten für die Auslegung im Streckenregionalverkehr mit OL für die G 1206	67
Abbildung 41: Schematische Volumenverhältnisse der Komponenten für die Auslegung im Streckenregionalverkehr mit OL für die DE 18.....	68
Abbildung 42: MaK G 1000 (Alf van Beem, CC0 1.0, Link, Bildausschnitt).....	72
Abbildung 43: V 100 (Ost) Umbau auf Baureihe 203 (Paul Smith, CC BY 2.0, Link, Bildausschnitt)	73
Abbildung 44: MaK DE 1002 (Paul Smith, CC BY-SA 2.5, Link, Bildausschnitt)	73
Abbildung 45: EMD/GE Class 66 (Alf van Beem, CC0 1.0, Link, Bildausschnitt)	74
Abbildung 46: Bombardier TRAXX F140 DE (Chris from Poznan, CC BY 2.0, Link, Bildausschnitt)	74
Abbildung 47: Kostenschätzung Umbau für Auslegungen RM und SR (RM: Rangierlastiger Mischverkehr, SR: Streckenregionalverkehr).....	86

Abbildung 48: Kostenschätzung Neufahrzeug für Auslegungen RM und SR.....	87
Abbildung 49: Bewertung Umbau/Neubau für die Antriebssysteme und dpr-Einsatzgebiete	93
Abbildung 50: Eignungsmatrix der untersuchten Variantenkombinationen für die Anwendung bei Duisport (technische, wirtschaftliche und Zulassungsaspekte).....	94
Abbildung 51: Skizzierung der nächsten Schritte für die Realisierung einer Brennstoffzellen- Lokomotive	95
Abbildung 52: Vorläufiger Zeitplan eines prototypischen Umsetzungsprojektes.....	97

11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Rangierloks der dpr	17
Tabelle 2: Verbindungen duisport rail im Streckenregionalverkehr (Stand März 2021)	19
Tabelle 3: Betriebliche Anforderungen an einen Brennstoffzellenhybridantrieb.....	23
Tabelle 4: Anforderungen in Bezug auf Fahrzeugaufbau und -konstruktion an einen Brennstoffzellenhybridantrieb.....	24
Tabelle 5: Kategorisierung der Fahrzyklen	29
Tabelle 6: Auswertungsergebnisse nach Kategorisierung für alle Zyklen.....	31
Tabelle 7: Beispiele marktverfügbarer Brennstoffzellensysteme	38
Tabelle 8: Beispiele marktverfügbarer Batteriepacks	41
Tabelle 9: Beispiele marktverfügbarer BTMS.....	41
Tabelle 10: Technische Daten ausgewählter Wasserstoffdruckbehälter (350 bar).....	42
Tabelle 11: Übersicht volumetrischer und gravimetrischer Kennzahlen der Antriebsstrangkomponenten.....	44
Tabelle 12: Wirkungsgrade zur Berechnung der Brennstoffzellenleistung.....	47
Tabelle 13: Betrachtete Auslegungsgruppen der Fahrzyklen am Beispiel konkreter Fahrzeuge	60
Tabelle 14: Auslegungsergebnisse im rangierlastigen Mischbetrieb für die G 1206 – 25m ³ ..	62
Tabelle 15: Auslegungsergebnisse im rangierlastigen Mischbetrieb für die DE 18 – 30m ³	63
Tabelle 16: Auslegungsergebnisse im Streckenregionalverkehr ohne OL für die G 1206 – 25m ³	64
Tabelle 17: Auslegungsergebnisse im Streckenregionalverkehr ohne OL für die DE 18 – 30m ³	66
Tabelle 18: Auslegungsergebnisse im Streckenregionalverkehr mit OL für die G 1206 – 25m ³	67
Tabelle 19: Auslegungsergebnisse im Streckenregionalverkehr mit OL für die DE 18 – 30m ³ ..	68
Tabelle 20: Bewertungsaspekte bei der Übertragung des Umbaus auf weitere Baureihen	71
Tabelle 21: Weitere Diesellokbaureihen und die zur Verfügung stehenden Bauräume	72
Tabelle 22: Angesetzte Energiebezugspreise	89
Tabelle 23: Vergleich Energiekosten für die Auslegungsgruppen	90
Tabelle 24: Partner und deren Rollen	96