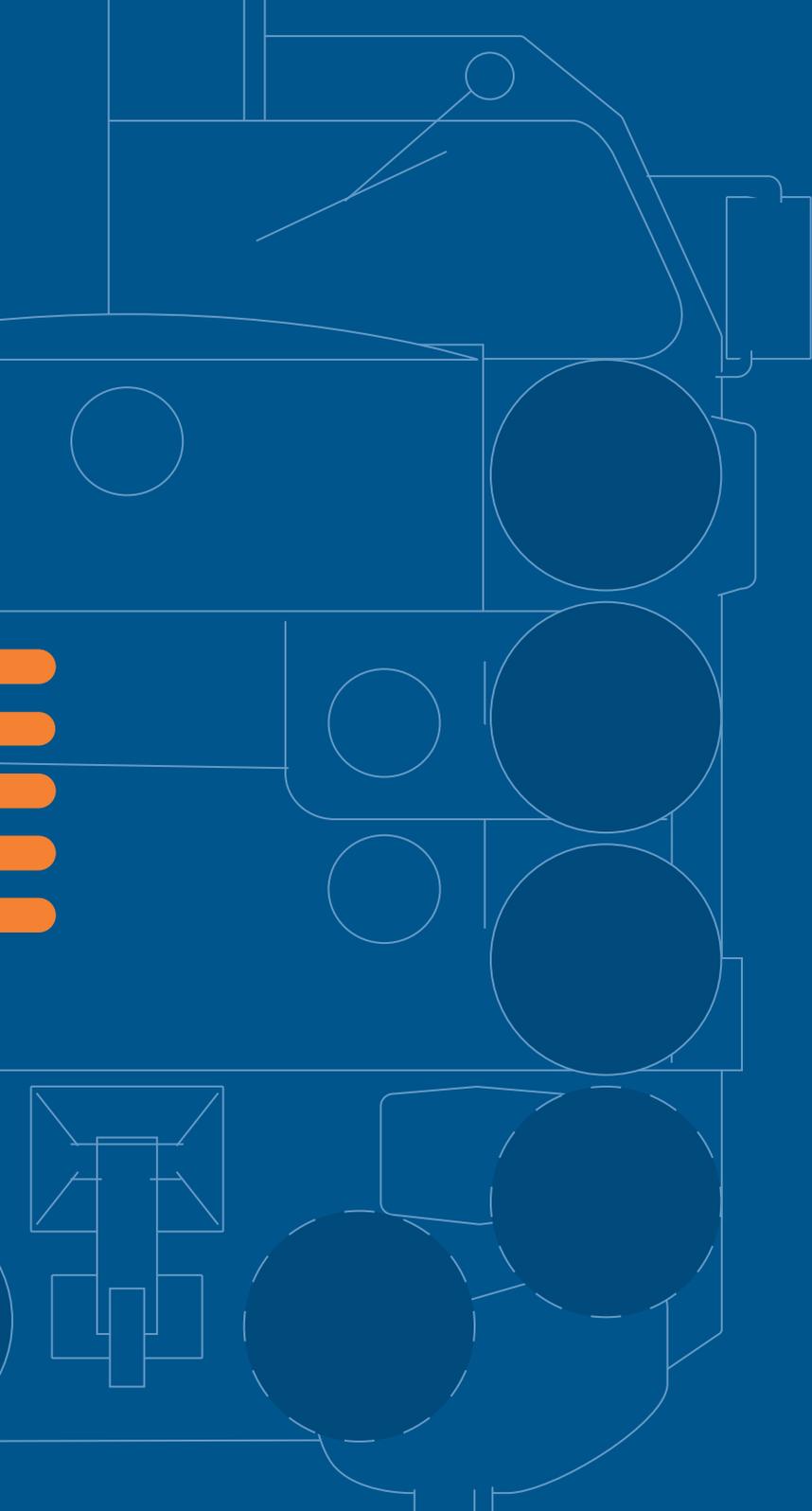


Kernergebnisse der Machbarkeits- analyse alternativer Antriebe im Einsatzgebiet von Rangierloks in Deutschland

NOW
NOW - G M B H . D E



1	Kurzfassung der Studie	3
2	Status quo Rangierlokomotiven in Deutschland	5
	Einsatzfelder von Rangierlokomotiven	5
	Akteursstruktur	5
	Lokomotiven – Struktur und technische Daten	6
	Status quo alternativer Antriebe in Rangierlokomotiven	6
	Bestandsanalyse Rangierlokomotiven	7
	Bestellungen von Neubau-Rangierlokomotiven	8
	CO ₂ -Emissionen	8
3	Technologische und betriebliche Anforderungen an Rangierloks	9
	Technische Anforderungen an Rangierlokomotiven mit alternativen Antrieben	9
	Befragung von Eisenbahnverkehrsunternehmen und Haltern von Rangierlokomotiven	9
	Ableitung generische Lastprofile	10

4

Analyse der Eignung alternativer Antriebe für den Rangierlokbetrieb 12

Referenzlokomotiven	12
Antriebssysteme	12
Variierende Anforderungsprofile im Schienengüterverkehr	
Dauerleistung und Reichweiten als Herausforderung	14
Auslegungsergebnisse und Komponentenanzahl für vierachsige Drehgestelllok	15
Auslegungsergebnisse und Komponentenanzahl für dreiachsige Lok	20
Alternative Kraftstoffe auf Basis von Verbrennungsmotoren	22
Eignungsanalyse Antriebe	22
Eignungsmatrix Einsatzfelder (für Deutschland)	24
Vorzugsantriebssysteme nach Oberleitungsverfügbarkeit und Einsatzfeldern	27
Kosten alternativer Antriebssysteme	27
Abschätzung Marktpotenzial	30

5

Abbildungsverzeichnis	34
Abkürzungsverzeichnis	35
Impressum	36

1 Kurzfassung der Studie

Kernergebnisse

Das DLR-Institut für Fahrzeugkonzepte hat im Auftrag der NOW GmbH die Machbarkeit und die Potenziale alternativer Antriebe im Einsatzfeld von Rangierlokomotiven in Deutschland untersucht.

Die untersuchten alternativen Antriebskonzepte umfassen: Akkuantrieb (ohne Oberleitungsanbindung), Brennstoffzellenhybrid, Wasserstoff-Verbrennungsmotor, BiMode-Akku-Oberleitungs-Hybrid sowie BiMode-Brennstoffzellen-Oberleitungs-Hybrid. Als repräsentative Fahrzeuge wurden eine dreiachsige und eine Drehgestell-Rangierlokomotive herangezogen. Für drei unterschiedliche Szenarien mit charakteristischen Tagesprofilen (reines Rangierprofil, kombiniertes Rangier- und Streckenprofil sowie ein leichtes Zustell-/Bedienfahrtprofil) kann gezeigt werden, dass alternative Antriebe unter bestimmten Voraussetzungen für Rangierlokomotiven technisch umsetzbar sind. Vor allem im Streckenbetrieb mit hohen Anhängelasten ist jedoch eine Anpassung oder sogar ein grundsätzliches Loslösen von aktuellen Lokomotivkonzepten notwen-

dig, um die erforderliche Leistung und das Mitführen des benötigten Energieinhalts zu realisieren. Hauptgrund hierfür sind die hohen Leistungs- und Energieanforderungen verbunden mit den geringeren spezifischen und volumetrischen Energiedichten alternativer Energiewandler- und Energiespeicherkomponenten. Dies stellt aktuell und auch perspektivisch Herausforderungen an die Integration der Antriebs- sowie der Energiespeicher- und -wandlerkomponenten in den Bestandsbauraum von Dieselreferenzlokomotiven dar.

Die technischen Analysen wurden durch eine systematische Befragung von Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) begleitet. Die Ergebnisse zeigen, dass neben den wechselnden Anhängelasten das Einsatzspektrum von Rangierlokomotiven auch im Hinblick auf Laufleistung, Lastprofile und Einsatzzeit sehr vielfältig ist. Diese Herausforderungen mögen, im Verbund mit der noch jungen Akku-, Wasserstoff-Verbrennungs- und Wasserstoff-Brennstoffzellen-Technologie und dem margenschwachen Schienengüterverkehr, dazu beitragen, dass bei Herstellern und Betreibern von Rangierlokomotiven jenseits von Dieselhybridantrieben

und dem Einsatz von biogenen Kraftstoffen bisher erst wenige Aktivitäten im Bereich der alternativen Antriebe zu beobachten sind.

Auch wenn innerhalb der nächsten 10 bis 15 Jahre mit einer relevanten Erneuerung der Rangierlokomotivenflotte in Deutschland zu rechnen ist, fokussieren sich die Anstrengungen bezüglich alternativer Antriebe noch immer überwiegend auf Dieselhybridantriebe. Aktuell sind erste konkrete Überlegungen und Vorhaben zum Einsatz von Wasserstoff in der Vorbereitung und erste Batterie-Oberleitungs-Hybridrangierlokomotiven wurden bestellt. Allerdings ist eine tiefgreifende Dekarbonisierung von Rangierlokomotiven in Deutschland aufgrund der typischerweise langen Einsatzdauer von Rollmaterial zumindest kurz- bis mittelfristig nicht zu erwarten. Steigende Kraftstoffbezugskosten und regulatorische Vorgaben könnten die Umstellung jedoch beschleunigen.

In Folgeuntersuchungen sollte die Datengrundlage in Bezug auf unterschiedliche, reale Einsatzprofile mittels Messkampagnen deutlich erweitert werden. Auf diesem soliden Datenfundament können im nächsten Schritt standardisierte Lokplattformen mit skalierbaren, bedarfsangepassten, modularen Leistungs- und Energiespeichermodulen abgeleitet werden. Für die zukünftige Dekarbonisierung von Rangierlokomotiven ist ein orchestriertes Vorgehen von Fahrzeugherstellern, Zulieferern, Fahrzeughaltern, Aufsichtsbehörden, der Forschung und der Politik erforderlich.

Die in der Studie untersuchten fünf Antriebssysteme stellen zum gegenwärtigen Zeitpunkt allerdings keine gleichwertige Alternative zu konventionellen Dieselerangierlokomotiven in Bezug auf die betriebliche Flexibilität dar. Weitere Antriebs- und Kraftstoffoptionen sind z.B. Methanol- und Ammoniakbasierte Verbrennungsmotoren sowie für den Wasserstoffverbrenner Hybridisierungs- und Mehrmotorenkonzepte. Ferner könnten weiterentwickelte oder andere Energiespeichertechnologien die Eignung alternativer Antriebssysteme beeinflussen. Dies betrifft neben den wasserstoffbasierten auch die akkubasierten Antriebssysteme.

2 Status quo Rangierlokomotiven in Deutschland

Einsatzfelder von Rangierlokomotiven

Die Einsatzfelder von Rangierlokomotiven sind vielfältig. Sie werden unter anderem im Rangierdienst für die Zugbildung und -auflösung in Rangierbahnhöfen oder den Verschub von Wagen und Wagengruppen in Anschlussgleisen genutzt. Darüber hinaus werden sie auch im reinen Werksbahnbetrieb eingesetzt. Rangierlokomotiven mit Streckenzulassung finden teilweise auch im Streckendienst für Übergabefahrten im Einzelwagenverkehr zu Anschlussgleisen sowie für Shuttle-Fahrten im regionalen Schienengüterverkehr Verwendung. Besondere Relevanz haben Rangierlokomotiven in den Produktionsformen Wagenladungsverkehr (in Zugbildungsanlagen und im Anschlussbahnbetrieb), im Werk-, Hafen- und Industriebahnverkehr sowie bei Spezialverkehren wie Baustellenzügen. Darüber hinaus kommen Rangierlokomotiven teilweise im kombinierten Ladungsverkehr sowie im Direktzugverkehr zum Einsatz.

Akteursstruktur

Die Halterstruktur von Rangierlokomotiven ist sehr vielfältig und setzt sich zusammen aus Vermietungsgesellschaften wie beispielsweise Alpha trains, Northrail und Heros sowie Eisenbahnverkehrsunternehmen. Laut Eisenbahnbundesamt führen in Deutschland 381 Unternehmen Schienengüterverkehre durch (nicht alle davon mit Rangierlokomotiven). RailBusiness listet 114 Rangierdienstleister auf.

Die historische Herstellervielfalt in Deutschland hat sich im Rahmen einer Marktkonsolidierung in den letzten Jahren stark reduziert. In den letzten Jahren dominierten Vossloh Locomotives und Alstom den deutschen Markt in Bezug auf Neuzulassungen von Rangierlokomotiven. Neu auf dem deutschen Markt treten, teils durch Unternehmensakquisitionen, asiatische Hersteller wie CRRC oder Toshiba auf. Darüber hinaus existiert eine Vielzahl an größeren Bahnbetriebswerken, die sich auf die Modernisierung und den Umbau von Rangierlokomotiven spezialisiert haben.

Technische Daten

Rangierlokomotiven sind in der Regel als Zweirichtungsfahrzeuge mit Mittelstandsführerstand ausgeführt. Um den fahrdrahtunabhängigen Betrieb gewährleisten zu können, sind die Fahrzeuge heute zum allergrößten Teil mit Dieselmotoren als Hauptantrieb ausgerüstet.

Die Dienst- und Reibmasse, das Antriebs- und Energieübertragungskonzept sowie die Achskonfiguration der Rangierlokomotiven richten sich nach dem jeweiligen Einsatzzweck. Entsprechend ist am Markt eine große Bandbreite an technischen Ausführungen verfügbar, von der Kleindiesellok/Zweiwegefahrzeug (<45 t, <300 kW, <250 kN Anfahrzugkraft) über dreiaxsig mittelschwere Rangierloks (60–70 t, 500–750 kW, 200–250 kN) bis hin zu schweren Drehgestell-Rangierlokomotiven (80–90 t, 750–2.000 kW, 300–350 kN). Während ein großer Teil der Bestandsrangierlokomotiven über dieselhydraulische Kraftübertragungssysteme verfügt, zeigt sich ein Trend in Richtung dieselektrischer Leistungsübertragung zum Teil in Kombination mit Traktionsbatterien (Dieselhybrid). Darüber hinaus werden seit einiger Zeit vermehrt Streckenlokomotiven als Dual-Mode-Varianten oder mit Last-Mile-Aggregaten für Rangierleistungen auf nicht elektrifizierten Abschnitten eingesetzt.

Status quo alternativer Antriebe in Rangierlokomotiven

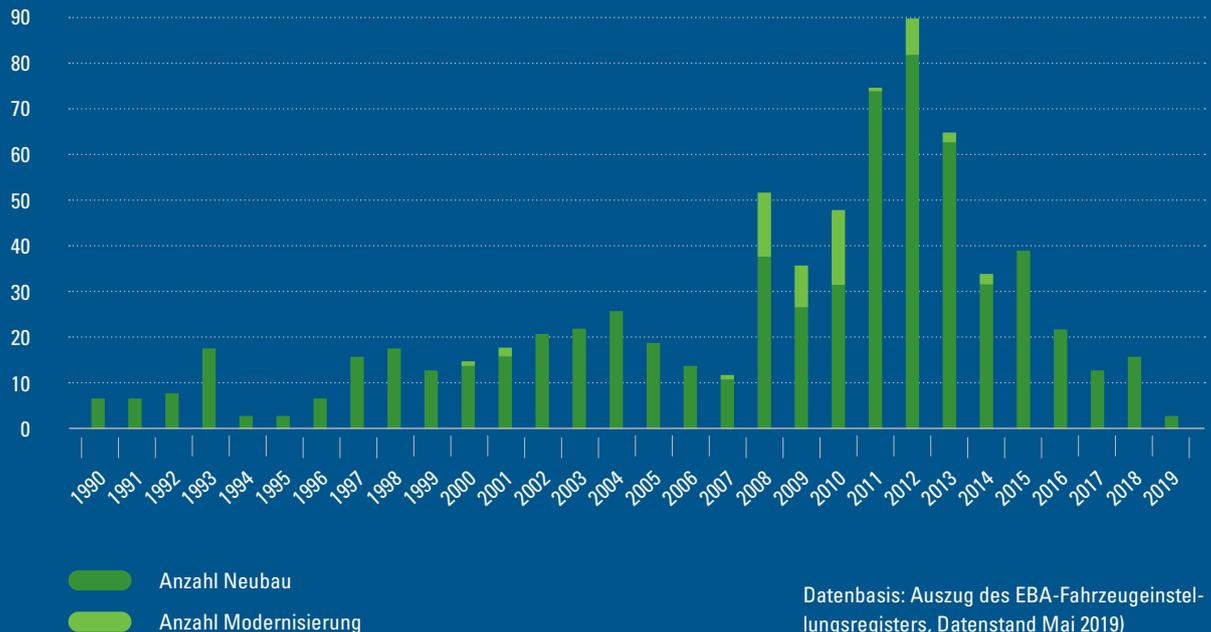
Während der größte Teil des Rangierlokbestands heute über einen klassischen Dieselantrieb verfügt, werden seit einiger Zeit seitens der Fahrzeughalter vermehrt Dieselhybridantriebe nachgefragt (z. B. DB Cargo). Daneben werden ab 2024 die ersten Oberleitungs-Batterie-Hybridrangierloks des Herstellers Vossloh Locomotives im Einsatz sein. Nicht angeboten auf dem deutschen Markt werden Elektro-Diesel-Dual-Mode-Rangierlokomotiven, die neben einem Dieselantrieb über eine 15-kV-Ausrüstung für den Betrieb unter Oberleitung verfügen. Solche Lokomotiven sind wiederum in der Schweiz aufgrund der nahezu kompletten Vollelektrifizierung des Streckennetzes im Einsatz. Ebenfalls werden erste Rangierlokdemonstratoren mit Wasserstoff-Brennstoffzellen und Wasserstoff-Verbrennungsmotoren entwickelt. Bereits im täglichen Einsatz befinden sich in Deutschland akkubetriebene Rangierroboter und Zweiwegefahrzeuge für den innerbetrieblichen Rangierdienst. Große Akkulokomotiven sind in den USA in Entwicklung (beispielsweise für den Port of Los Angeles, Bolivien und Australien). Rangierlokomotiven als Oberleitungs-Batterie-Hybrid werden in Deutschland bisher noch nicht eingesetzt. Alternative Kraftstoffe für Verbrennungsmotoren erprobt aktuell die Deutsche Bahn auf Basis von hydrierten Pflanzenölen (HVO).

Bestandsanalyse Rangierlokomotiven

Etwa 2.800 Rangierlokomotiven waren in Deutschland im Jahr 2019 gemeldet (Datengrundlage: EBA-Fahrzeugeinstellungsregister, Datenstand Mai 2019, Status „aktiv“, ohne Fahrzeuge, die ausschließlich im inner-

betrieblichen Rangierdienst eingesetzt werden). Die DB Cargo als größter Fahrzeughalter hatte 2020 ca. 670 Fahrzeuge im Einsatz. Kennzeichnend für Rangierlokomotiven ist das hohe Durchschnittsalter – das der Flotte von DB Cargo beträgt beispielsweise 42 Jahre.

ABBILDUNG 1 Bestand Rangierlokomotiven in Deutschland nach Herstellungsjahr, unterteilt in Neubau (N=684) und Modernisierungen (N=56), für den Zeitraum 1990 bis 2019



Ein großer Teil der heute aktiven Rangierlokomotive ist in den Jahren 1955 bis 1980 produziert worden, danach reduziert sich der Bestand an Lokomotiven mit Baujahren zwischen 1980 und 1990. In den letzten 30 Jahren (1990 bis 2019) konnten 684 neue Rangierlokomotiven sowie 56 Modernisierungen älterer Lokomotiven erfasst werden. Insbesondere zwischen 2008 und 2015 ist eine deutliche Zunahme an Neuzulassungen zu verzeichnen.

Bestellungen von Neubau-Rangierlokomotiven

Eine Auswertung der Bestellungen von Rangierlokomotiven von August 2019 bis Februar 2021 mit dem Einsatzgebiet Deutschland (Quelle: RailBusiness) zeigt, dass insgesamt 21 Diesellokomotiven (Vossloh DE 12 und DE 18) und 71 Dieselhybridloks (9 Alstom H3, 4 CRRC Hybridrangierloks, 58 Toshiba HDB 800) bestellt wurden. Hinzu kommen 162 Bestellungen von Streckenlokomotiven mit Dual-Mode- oder Last-Mile-Antrieb (6 Bombardier Traxx LastMile, 106 Siemens Vectron Dual Mode und ca. 50 Stadler Rail EuroDual), die zumindest teilweise Arbeiten im klassischen Einsatzfeld von Rangierlokomotiven übernehmen werden.

CO₂-Emissionen

Verlässliche statische Angaben zu den gesamten CO₂-Emissionen von Rangierlokomotiven in Deutschland existieren bisher nicht. Es gibt jedoch Hochrechnungen. Der gesamte dieselbetriebene Schienenverkehr (Personen- und Güterverkehr) emittiert etwa 1 Mt CO₂ jährlich, wozu Schätzungen zufolge der Schienenpersonennahverkehr (SPNV) mit etwa 0,7 Mt CO₂, Streckengüterloks mit ca. 0,24 Mt CO₂ und der Rangierverkehr mit rund 0,12 Mt CO₂ (Angaben BAG-SPNV sowie Prof. Hecht, TU Berlin) beitragen.

3 Technologische und betriebliche Anforderungen an Rangierloks

Technische Anforderungen an Rangierlokomotiven mit alternativen Antrieben

Rangierlokomotiven sind in der Regel als Mittelführerhauslokomotiven ausgeführt, um einen schnellen Richtungswechsel zu ermöglichen und die freie Sicht auf beide Pufferseiten aus dem Führerhaus zu gewährleisten. Im Rangierverkehr sind hohe Zugkräfte gefordert, charakteristisch sind geringe Geschwindigkeiten sowie ein hoher Leerlauf- und ein geringer Volllastanteil. Daraus resultieren geringe mittlere Leistungen, obwohl es kurzzeitig mitunter zu sehr hohen Leistungen kommen kann, die sich aus Beschleunigungsvorgängen mit hohen Anhängemassen ergeben. Werden die Lokomotiven auch im Streckendienst eingesetzt, erhöhen sich die mittleren Leistungen aufgrund des erhöhten Volllastanteils deutlich. Die erforderlichen hohen Reibmassen werden teilweise mittels Ballastierungen umgesetzt.

Der für alternative Antriebs- und Speicherkomponenten zur Verfügung stehende Bauraum ist bei Beibehaltung der in Fahrzeuglängsrichtung beidseitig angeord-

neten Umläufe im Vergleich zu Streckenlokomotiven mit zwei Endtrieb-Fahrzeugführerständen deutlich eingeschränkt.

Befragung von Eisenbahnverkehrsunternehmen und Haltern von Rangierlokomotiven

Im Rahmen einer Online-Befragung (insgesamt wurden 188 EVU kontaktiert, davon haben 27 Befragte die Umfrage vollständig oder teilweise beantwortet) wurden systematisch u.a. Fragen zum typischen Betriebsprofil der von den EVU eingesetzten Lokomotiven gestellt. Dazu gehörten Einsatzdauer, Laufleistungen, Anhängelasten und Traktionsanforderungen sowie die Erhebung von Anforderungen und der Einschätzung der Eignung neuer alternativer Antriebe.

Die Auswertung der Umfrage hat unter anderem ergeben, dass im Rangierdienst bei 94 % der Antworten die Laufleistung weniger als 80 km bei einer maximalen Anhängemasse von 2.000 t und im Streckendienst bei 95 % der Antworten die Laufleistung maximal

300 km bei maximal 2.000 t beträgt. Die mittleren 50 % der typischen Anhängemassen der unterschiedlichen Lokomotiven auf typischen Strecken im Streckendienst liegen zwischen 500 t und 1.750 t. 14 Befragte setzen ihre Rangierlokomotiven mindestens zeitweise unter Fahrdraht ein. Der Gesamtanteil des Betriebs unter Fahrdraht bewegt sich im Bereich von 10 % bis 70 % (insgesamt 10 Antworten).

Sehr wichtig sind den befragten Betreibern neben kurzen Tank- und Ladezeiten die Nutzung erneuerbarer Energieträger sowie eine hohe Verfügbarkeit und Ausfallsicherheit der Rangierlokomotiven mit alternativen Antrieben. Die von den Betreibern meistgenannten Voraussetzungen für die Umstellung auf alternative Antriebe sind eine hohe Marktreife, vergleichbare Kosten für Betrieb und Wartung im Verhältnis zu Diesellokomotiven sowie die uneingeschränkte Fahrzeugzulassung.

Die EVU erwarten, dass sich zukünftig die Anhängelasten erhöhen werden, ferner wurden eine Erhöhung des Rangieraufwands sowie längere Einsatzzeiten und erhöhte Energieanforderungen im Baustellenbetrieb genannt. Für die meisten Befragten ist das Eignungspotenzial von Diesel-Akku-Hybrid-, Oberleitungs-Akku-Hybrid- sowie Akku-Rangierlokomotiven am größten.

Für Brennstoffzellenhybrid, Wasserstoff-Verbrennungsmotoren und Zweikraft-Lokomotiven (Oberleitung-Brennstoffzelle sowie Oberleitung-Diesel) erwarten die EVU im Mittel eher geringere Potenziale. Flottenenerneuerung sowie CO₂- und Schadstoffvermeidung sind die am häufigsten genannten Gründe für eine Fahrzeugneubeschaffung bzw. -umrüstung.

Ableitung generische Lastprofile

Um die grundsätzliche energetische und leistungsbezogene Machbarkeit der in der Studie untersuchten Antriebssysteme zu ermitteln, wurden drei Szenarien definiert. Das Szenario Rangierbetrieb (R) mit insgesamt 66 km Länge und 11,3 h Dauer bildet eine Abfolge aus verschiedenen leichten bis schweren Rangierprofilen ab. Das Szenario Zwischenwerkverkehr (Z) mit insgesamt 117 km und 7,6 h Dauer setzt sich aus einer Kombination aus Rangier- und mittlerem Streckendienst zusammen. Das Szenario Zustell-/Bedienfahrt (B) wiederum besteht aus einem Rangier- und Beladungsfahrtzyklus und einer Zustellfahrt.

Alle Profile sehen einen ausschließlichen Betrieb in der Ebene vor, das heißt, der Einfluss von Längsneigungen auf den Leistungs- und Energiebedarf

wurde nicht ermittelt. Für die Untersuchung der Machbarkeit wurden bewusst anspruchsvolle Einsatzprofile, basierend auf den Befragungsergebnissen, abgeleitet. Dabei wurden insbesondere bei Abschnitten mit Rangiercharakter häufig wechselnde Anhängelasten berücksichtigt, um die daraus abgeleiteten veränderlichen Leistungsanforderungen abzubilden.



4 Analyse der Eignung alternativer Antriebe für den Rangierlokbetrieb

Referenzlokomotiven

Als Referenzlokomotiven wurden eine Drehgestell-Rangierlokomotive und eine dreiachsige Rangierlokomotive betrachtet.

Die vierachsige Drehgestell-Rangierlokomotive orientiert sich an der weit verbreiteten MaK G 1206 mit Mittelführerhaus und 87 t Dienstmasse. Für das Referenzfahrzeug wurden eine Leistung am Rad von 1.500 kW und 300 kN maximale Anfahrzugkraft festgelegt. Die dreiachsige Rangierlokomotive orientiert sich an der Alstom Prima H3. Für die Auslegung wurde die Referenzlok mit 67 t Dienstmasse, 700 kW Leistung am Rad und ca. 225 kN Anfahrzugkraft angesetzt.

Der simulierte saldierte Gesamtenergiebedarf am Zwischenkreis beträgt für die Drehgestell-Rangierlokomotive im Szenario R (Rangierbetrieb) 1.469 kWh und im Szenario Z (Zwischenwerkverkehr) 1.368 kWh. Der Gesamtenergiebedarf der dreiachsigen Rangierlokomotive beträgt im Szenario B (Zustell-/Bedienfahrt im regionalen Güterverkehr) 557 kWh.

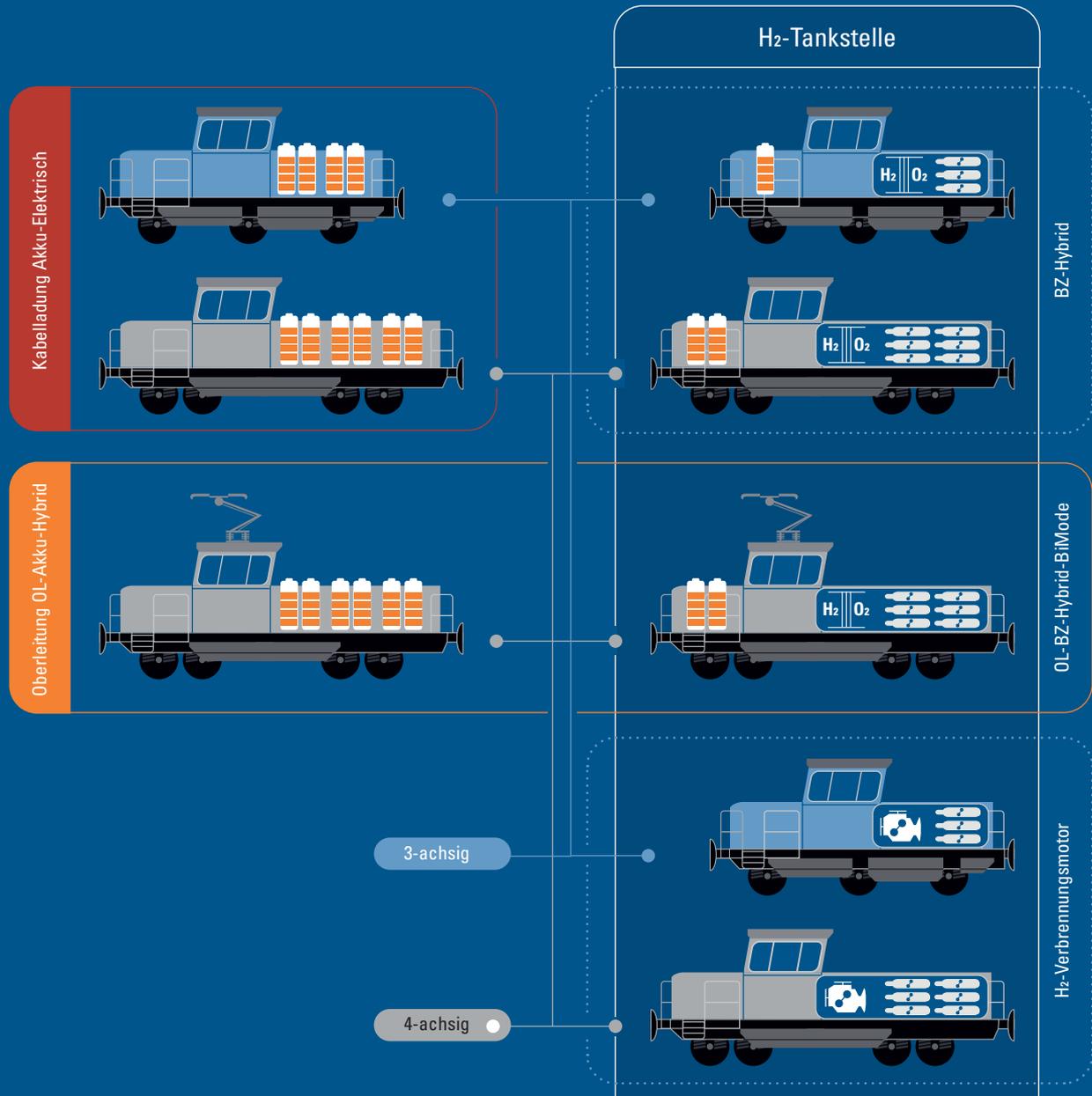
Antriebssysteme

In der Studie wurden die nachfolgenden Antriebssysteme untersucht:

- Akku mit externer Nachladefunktion (nicht 15-kV-Oberleitung)
- Oberleitungs-Akku-Hybrid
- Wasserstoff-Brennstoffzellen-Hybrid
- BiMode-Oberleitungs-Brennstoffzellen-Hybrid
- Wasserstoff-Verbrennungsmotorantrieb

Die Untersuchungen erfolgten für die lastprofilbasierten Szenarien R, Z und B für jeweils generische dreiachsige (Szenario B) und vierachsige Lokomotiven (Szenarien R und Z). Die Varianten mit Ausrüstung für den Betrieb unter Oberleitung wurden auf die vierachsige Drehgestellkonfiguration beschränkt (siehe nachfolgende Abbildung). Dies ist darin begründet, dass das Einsatzprofil der dreiachsigen Lok überwiegend im Rangierdienst ergänzt um Zustellfahrten auf hauptsächlich nicht elektrifizierten Nebenstrecken gesehen wird.

ABBILDUNG 2 Untersuchte Antriebssysteme und Arten der Traktionsenergiezuführung bzw. Energiespeichernachladung



Für die Referenzprofile wurden für die Antriebssysteme die jeweils erforderlichen Energiespeicher und Leistungswandler dimensioniert und ausgelegt. Dazu wurde eine vorkonzeptionelle Anordnung der Komponenten auf dem je Loktyp zur Verfügung stehenden Bauraum vorgenommen. Auf dieser Grundlage konnte eine überschlägige Machbarkeit der Antriebssysteme ermittelt, aber es konnten auch Restriktionen der jeweiligen Antriebssysteme aufgezeigt werden.

Sofern Rangierlokomotiven auch im **Streckenbetrieb** eingesetzt werden sollen und ein überwiegender Teil der Hauptstrecke mit einem **Fahrdraht** ausgerüstet ist, können ein OL-Akku-Hybrid oder ein BiMode-OL-BZ-Hybrid sinnvoll sein. Da die befahrenen Strecken im Güterverkehr jedoch typischerweise sehr variabel sind (Spotverkehre sowie baustellenbedingte Umleitungen), ist der Aktionsradius solcher Fahrzeuge damit auf oberleitungsfreien Strecken eingeschränkt. Eine zusätzliche Herausforderung kommt für batterie- und wasserstoffbasierte Antriebssysteme hinzu, wenn substanzielle Höhenunterschiede überwunden werden müssen, da diese sehr stark reichweitenmindernd wirken.

Variierende Anforderungsprofile im Schienengüterverkehr – Dauerleistung und Reichweiten als Herausforderung

Anders als im SPNV, wo batterie- und brennstoffzellenbasierte Antriebssysteme ihre Machbarkeit bereits unter Beweis gestellt haben und aktuell in den Regelbetrieb gehen, gibt es derzeit bei Rangierlokomotiven noch keine entsprechenden Umsetzungsprojekte. Dies begründet sich durch das anspruchsvolle, höchst variable und damit schwer planbare Nutzungsspektrum. Dieses ergibt sich unter anderem durch variierende Güterwagenlasten und eine damit einhergehende große Spannbreite an Bruttozugmassen, die bewegt werden müssen, von 60 t bis 80 t (Leerfahrt, nur Lokomotive) bis zu 2.000 t und mehr (im SPNV ca. 100 t bis 150 t).

Insbesondere in den Fällen, in denen die Lokomotiven auch im Streckendienst mit hohen Wagenzuglasten eingesetzt werden, resultieren daraus relativ hohe Dauerleistungen und dadurch bedingt eingeschränkte Reichweiten. Dies stellt für die Auslegung der untersuchten Antriebssysteme aufgrund der im Vergleich zu Dieselantrieben deutlich geringeren Energiedichte von Wasserstofftanks und mehr noch von Akkumulatorsys-

temen eine besondere Herausforderung dar. Hier zeigt sich, dass der zur Verfügung stehende Bauraum auf Rangierlokomotiven eine größere Limitation bedeutet als die Begrenzung der Achslasten.

Die Erhöhung der mitgeführten Speicherkapazität (das heißt der Reichweite) oder auch der installierten Leistung kann beispielsweise durch eine – der Normenlage entsprechende – Anordnung von Komponenten auf den Umläufen der Rangierlokomotiven für Speicher- bzw. Wandlerkomponenten inklusive Peripherie realisiert werden – allerdings nur in begrenztem Umfang und insbesondere stellt dies für die Umrüstung bestehender Lokomotiven nur unter bestimmten Umständen eine realisierbare Option dar.

Auslegungsergebnisse und Komponentenanzordnung für vierachsige Drehgestelllok

Für die untersuchten Antriebssysteme sind in der nachfolgenden Tabelle die Auslegungsdimensionierungen und die jeweilige konzeptuelle Anordnung der wesentlichen Wandler- und Speicherkomponenten für eine beispielhafte vierachsige Rangierlok dargestellt. Es zeigt sich, dass für zwei Auslegungen in bestimm-

ten Szenarien der zur Verfügung stehende Bauraum am Beispiel der Dieselreferenzlokomotive MaK G 1206 nicht ausreichen würde und damit fahrzeugseitige Anpassungen zur Erschließung weiterer Bauraumpotenziale erforderlich wären, wie zum Beispiel eine Fahrzeugverlängerung, die Nutzung der Umläufe oder ein Energiespeichertender.



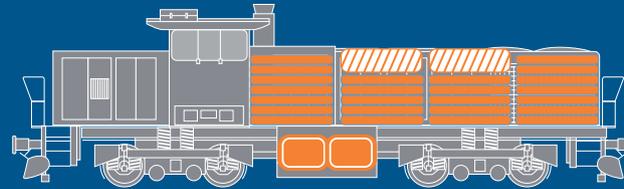
ABBILDUNG 3 Auslegungen und Komponentenanordnungen für vierachsige Drehgestelllok (Akku, BZ-Hybrid)

Antriebskonzept und Details

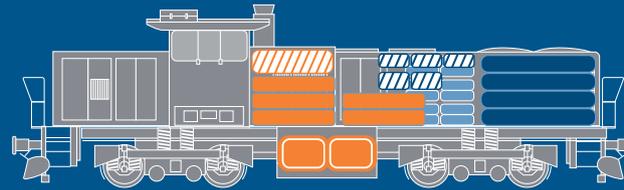
Komponentenanordnung

- Akku-Lok Szenario R + Z***
- Batteriespeicher: 1.766 kWh

Seitenansicht

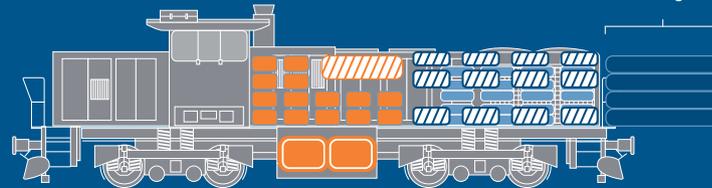


- BZ-Hybrid Auslegung Szenario R***
- Brennstoffzellenleistung: 600 kW
 - Batteriespeicher: 146 kWh
 - Wasserstoffvorrat: 109 kg H₂



- BZ-Hybrid Auslegung Szenario Z***
- Brennstoffzellenleistung: 1.170 kW
 - Batteriespeicher: 204 kWh
 - Wasserstoffvorrat: 109 kg H₂

um 3,1 m verlängertes Fahrzeug (17,8 m)



* Szenario R: Rangierverkehr
 Szenario Z: Zwischenwerkverkehr

Bildquelle Hintergrundabbildung: Vossloh Locomotives

-  Batterieanlage
-  Kühlanlage f. Batterien
-  Brennstoffzellen

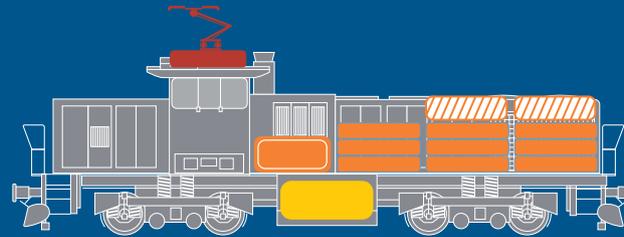
ABBILDUNG 4 Auslegungen und Komponentenanordnungen für vierachsige Drehgestellloks (OL-Akku-Hybrid, OL-BZ-Hybrid-BiMode)

Antriebskonzept und Details

Komponentenanordnung

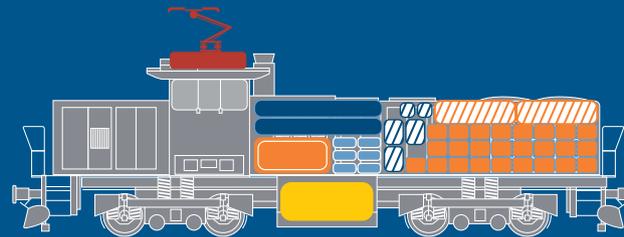
OL-Akku-Hybrid

- Batteriespeicher: 662 kWh



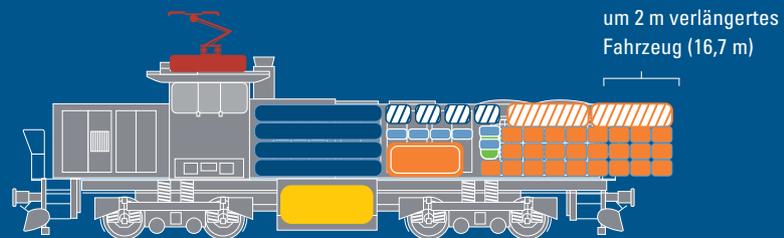
OL-BZ-Hybrid-BiMode Szenario Z*

- Brennstoffzellenleistung: 360 kW
- Batteriespeicher: 375 kWh
- Wasserstoffvorrat: 54 kg H₂



OL-BZ-Hybrid-BiMode Szenario R*

- Brennstoffzellenleistung: 360 kW
- Batteriespeicher: 375 kWh
- Wasserstoffvorrat: 108 kg H₂



- Kühlanlage f. Brennstoffzellen
- DC / DC-Wandler
- Wasserstofftanks

- Netz- und Antriebsstromrichter, DC / DC-Wandler inkl. Kühlung
- Trafoeinheit
- Pantograph u. HV-Ausrüstung

ABBILDUNG 5 Auslegungen und Komponentenanordnungen für vierachsige Drehgestellok (H2VM)

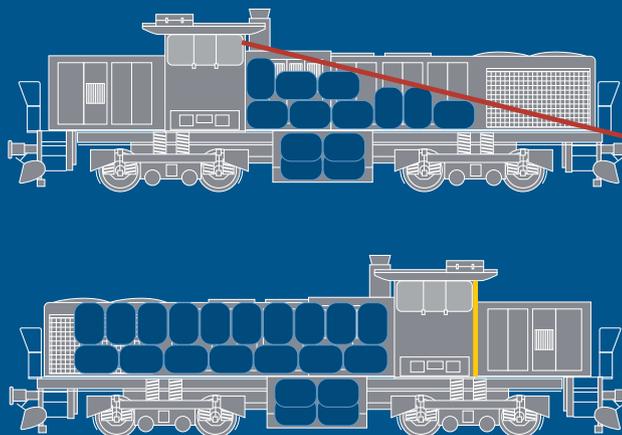
Antriebskonzept und Details

H2VM 350 bar

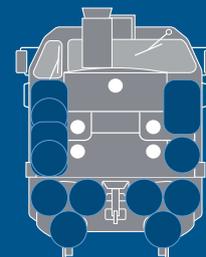
- Wasserstoffmotor: 1.500 kW
- Wasserstoffvorrat: 162 kg H₂

Komponentenanordnung

Seitenansicht

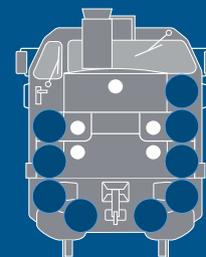
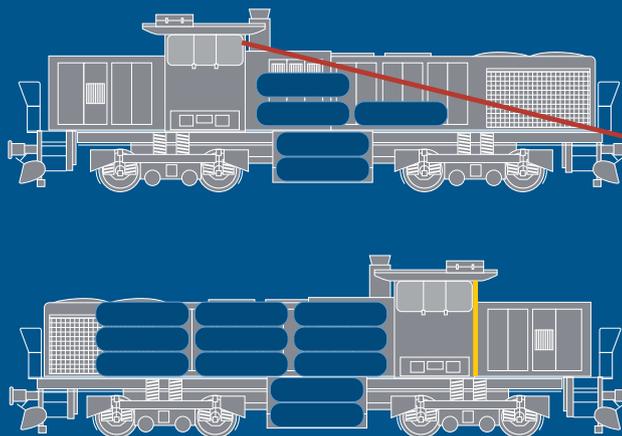


Vorderansicht



H2VM 700 bar

- Wasserstoffmotor: 1.500 kW
- Wasserstoffvorrat: 272 kg H₂



○ Wasserstofftank

— Sichtlinie auf Puffer
 — Ggf. versetzter Zugang linke Lokseite

Bei der Umsetzung eines Wasserstoff-Verbrennungsmotors (H2VM) ergeben sich vorrangig Bauraumlimitationen in Bezug auf die Anzahl und Menge der installierbaren Wasserstoff-Speicheranlagen. Daher wurde der Effekt einer Schaffung von zusätzlichem Bauraum für Wasserstoffspeicher auf beiden Umlaufseiten sowohl für 350-bar- als auch für 700-bar-Druckwasserstofftanks geprüft. Dabei galt die Prämisse, dass die sogenannte Puffersicht vom Triebfahrzeugführerstand gewährleistet bleibt. Zusätzlich ist, zumindest bei der untersuchten Beispiellok MaK G 1206, die Versetzung eines Zugangs zum Mittelführerhaus erforderlich. Die konkrete Untersuchung unter anderem der Zulassungsfähigkeit muss in einem Umsetzungsprojekt erfolgen.

Auslegungsergebnisse und Komponenten-anordnung für dreiachsige Lok

Die Auslegungsdimensionierungen und Anordnungen der wesentlichen Wandler- und Speicherkomponenten für eine dreiachsige Rangierlok sind nachfolgend dargestellt. Im Fall der Variante des Wasserstoff-Verbrennungsmotors wurden grundsätzlich erzielbare Wasserstoff-Bevorratungsmengen von 350 bar sowie von 700 bar Druckwasserstoff durch Nutzung der Umläufe ermittelt.

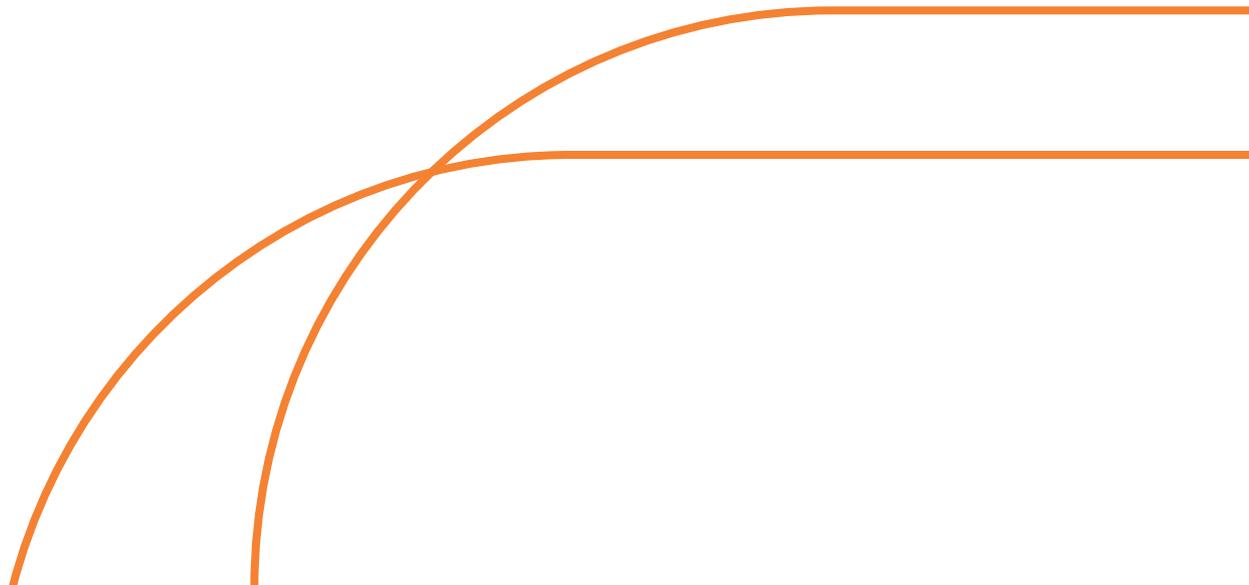


ABBILDUNG 6 Auslegungen und Komponentenanordnungen für dreiachsige Lok (Akku, BZ-Hybrid)

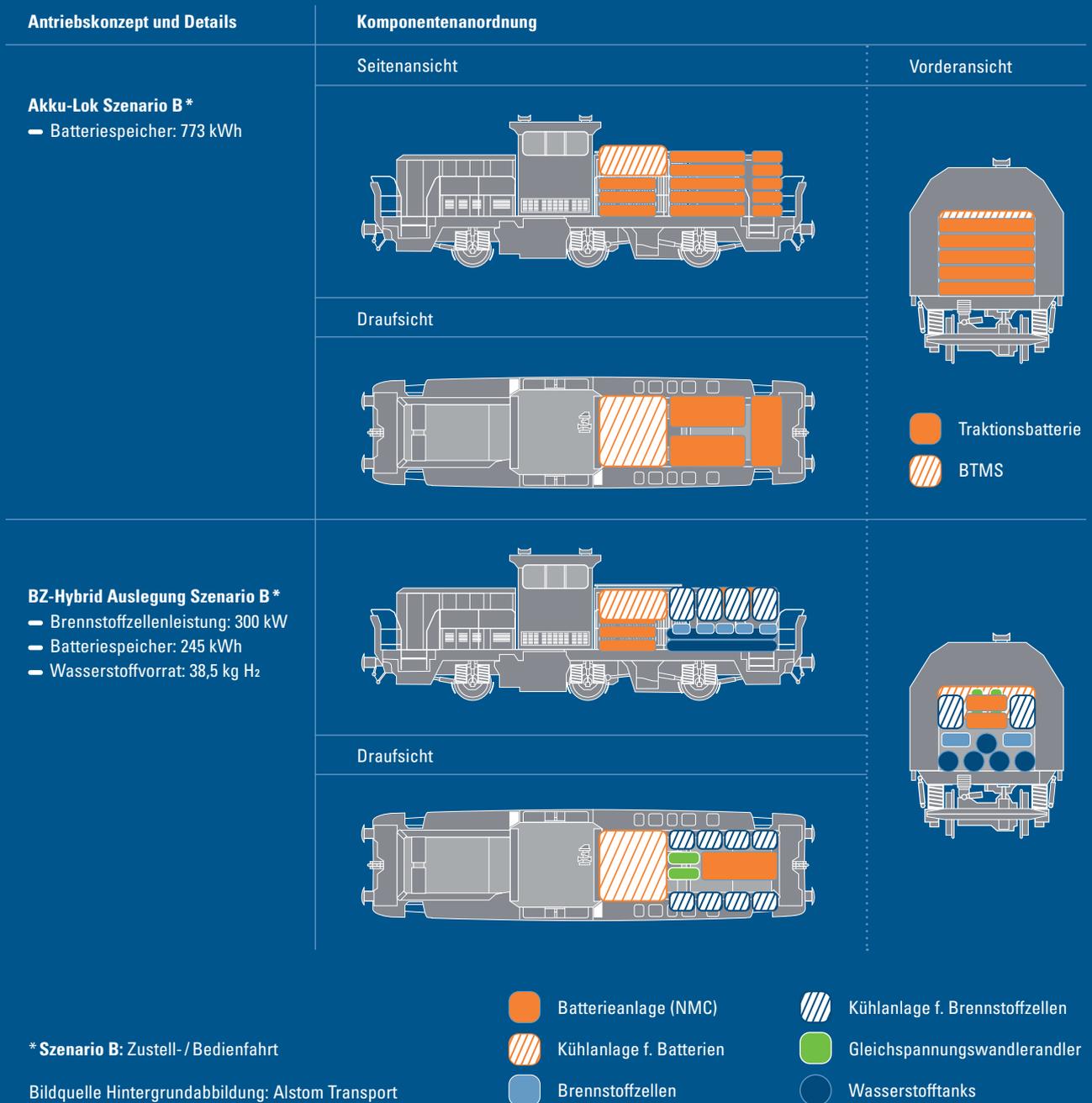
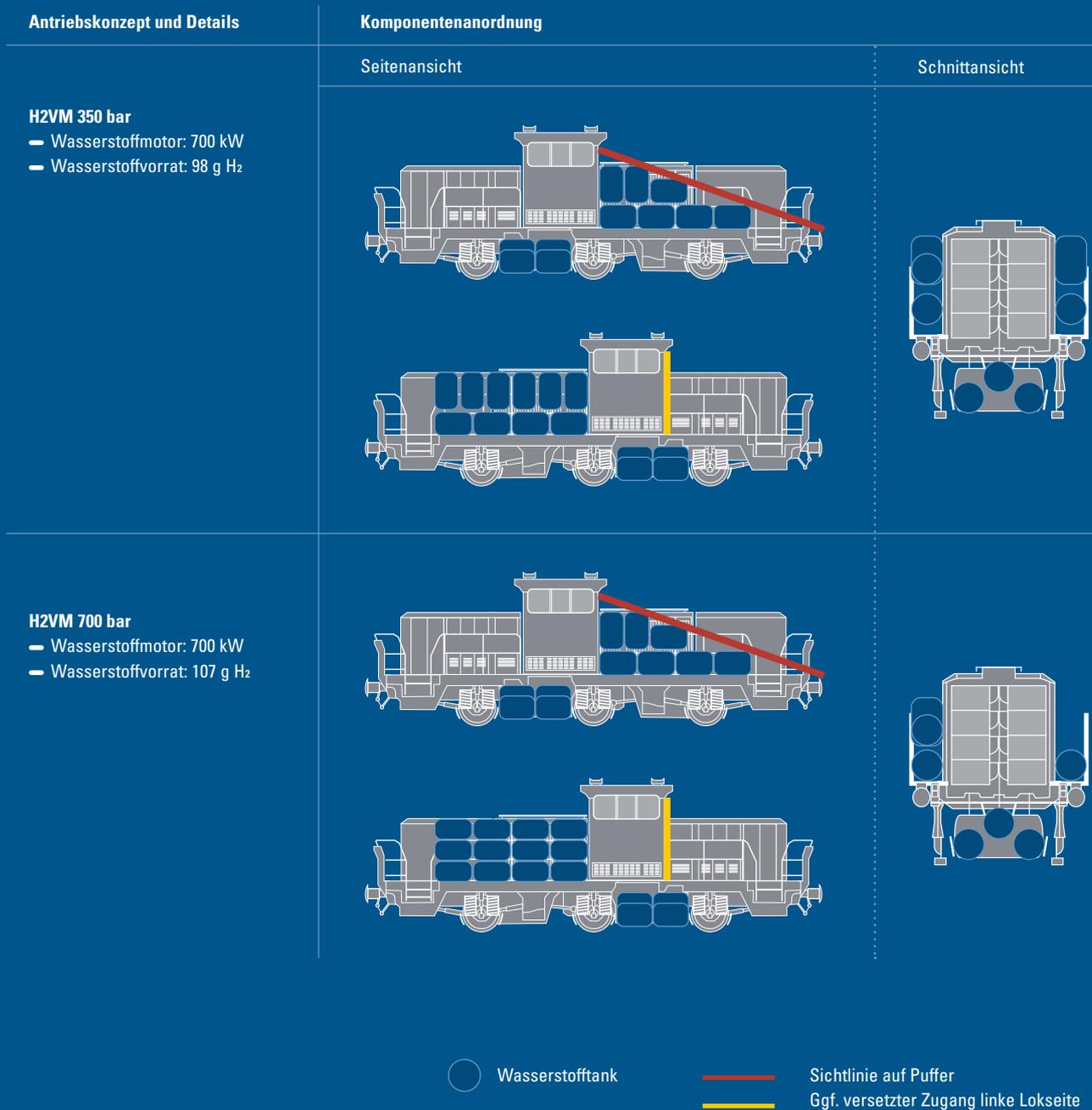


ABBILDUNG 7 Auslegungen und Komponentenanordnungen für dreiachsige Lok (H2VM)



Alternative Kraftstoffe für Verbrennungsmotoren

Ergänzend kann zur Dekarbonisierung großer Altflotten an Rangierlokomotiven mit dem Ziel einer Beibehaltung der Leistungsfähigkeit und Flexibilität von Dieselantrieben für die untersuchten Profile auch der Einsatz von synthetischen (e-Fuels) sowie biobasierten flüssigen Kohlenwasserstoffen (z. B. HVO bzw. BtL oder Biodiesel) als Dieselsubstitut bzw. -beimischung als vielversprechend angesehen werden. Der Vorteil von strombasierten, auf Basis von Erneuerbare-Energien-Anlagen hergestellten e-Fuels ist, dass die Eigenschaften der synthetisch hergestellten Kraftstoffe beliebig an den konventionellen Dieselmotoren anpassbar sind und somit in der Regel nur geringe Veränderungen an Motor, Einspritzsystem oder Kraftstoffleitungen erfordern. Nachteilig sind die hohen Kraftstoffkosten, der hohe Energieeinsatz für die Herstellung und der schlechte Well-to-wheel-Gesamtwirkungsgrad (aufgrund der Beibehaltung des Verbrennungsprozesses). Eine weitere Option stellt die Nutzung flüssiger Kraftstoffe wie Ammoniak oder Methanol in entsprechend angepassten Verbrennungsmotoren, Kraftstoffsystemen und Abgasnachbehandlungssystemen bzw. in Brennstoffzellen dar. Nachteilig ist dabei aber unter anderem die gegenüber Diesel verminderte Reichweite aufgrund der geringeren Energiedichte und der

Erfordernis weiterer Komponenten auf der Lok, wie im Fall von Ammoniak (für den Einsatz in einem Verbrennungsmotor) eines Ammoniakspalters.

Bei durch Streckenverkehr bedingtem Betrieb in wechselnden Regionen ist außerdem die Vorhaltung von bzw. der Zugang zu (gegebenenfalls flächendeckenden) Tank- und Ladeinfrastrukturen erforderlich. Dies gilt für alle Energieträger bzw. Kraftstoffe jenseits von Dieselmotoren.

Eignungsanalyse Antriebe

Der Akku-Antrieb (ohne Möglichkeit des Strombezugs aus dem 15-kV-Fahrdraht) ist insbesondere für den lokal begrenzten Rangier- und Zugbildungseinsatz eine mögliche Option. Bei einem hohen Tagesenergiebedarf ist die Installation einer hohen Batteriespeicherkapazität erforderlich. Durch hohe Erst- und Ersatzinvestitionen bietet sich für diese Variante voraussichtlich nur ein vergleichsweise enges Anwendungsfeld. Der Brennstoffzellenhybrid (BZH) eröffnet je nach Auslegung ein breites Spektrum an möglichen Leistungen und Speicherkapazitäten bzw. Reichweiten. Der H2VM kann bei der zeitlich unabhängigen Bereitstellung einer hohen Dauerleistung punkten, jedoch

ist aufgrund des Systemwirkungsgrades die Reichweite limitierter als beim BZH. Dies gilt umso mehr, wenn der H2VM nicht hybridisiert ist. Die Varianten mit der Möglichkeit eines Betriebs unter Oberleitung (OL-Akku-Hybrid und OL-BZH-BiMode) vergrößern einerseits den Aktionsradius und die Reichweiten, begrenzen andererseits aufgrund des Bauraumbedarfs der 15-kV-Baugruppen (insbesondere Transformator) jedoch die Reichweite und Leistungsfähigkeit im oberleitungsfreien Betriebsmodus.

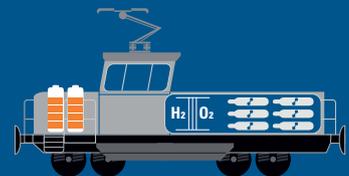
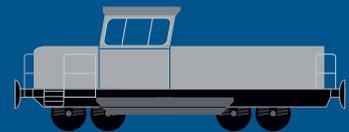
Der Verbrennungsmotorantrieb mit einem flüssigen Kohlenwasserstoff (Diesel, synthetischer Kraftstoff, Biokraftstoff) als Referenz ist aufgrund der hohen Energiedichte des Kraftstoffs und der dauerhaft möglichen hohen Leistungsabgabe vielseitig einsetzbar und für alle Varianten technisch gut geeignet (jedoch nicht in Bezug auf lokale Emissionen und den effizienten Einsatz der Energieträger).

Die in der nachfolgenden Übersicht verwendete Systematik mit Abstufungen zwischen *Uneingeschränkt einsetzbar* und *Schlecht einsetzbar* stellt einen groben Orientierungsrahmen dar. Der konventionelle Dieselmotorantrieb ist als Benchmark mit aufgeführt.



Eignungsmatrix Einsatzfelder (für Deutschland)

Für die vier betrachteten Einsatzfelder sind nachfolgend die in dieser Studie untersuchten Antriebssysteme hinsichtlich ihrer Eignung aufgeführt (hier erweitert um das Kriterium der Oberleitungsverfügbarkeit beim reinen Rangierverkehr). Betrachtet man die Eignung der Antriebssysteme nach Einsatzfeldern, so zeigt sich, dass im leichten Rangierdienst die Varianten Akku, BZ-Hybrid und H2VM besonders gut geeignet sind. Für den mittleren bis schweren Rangierdienst eignen sich BZ-Hybrid und H2VM und mit Einschränkungen auch die Akku-Variante.



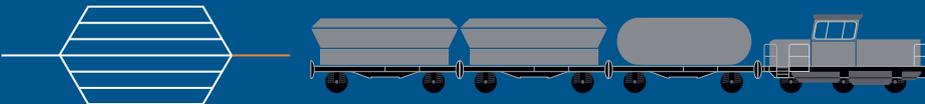
Antriebs-Einsatzfeld-Fit

-  Uneingeschränkt einsetzbar
-  Schlecht einsetzbar

ABBILDUNG 8 Eignungsmatrix Einsatzfelder

		Rangierdienst (leichter Rangierdienst)	Rangierdienst (mittlerer bis schwerer Rangierdienst)	Zwischenwerkverkehr (Rangierdienst + mittlerer/ schwerer Streckendienst)		Zustell-/Bedienfahrten im regionalen Güterverkehr (leichter/mittlerer Rangier-/ Streckendienst)	
				keine OL verfügbar	Strecke teilw. mit OL	keine OL verfügbar	Strecke teilw. mit OL
	Referenz VM (Diesel/e-Fuels, Bio-KS)						
	Akku						
	OL-Akku-Hybrid						
	BZ-Hybrid						
	OL-BZ-Hybrid- BiMode						
	H2VM						

ABBILDUNG 9 **Vorzugsantriebssysteme nach Oberleitungsverfügbarkeit und Einsatzfeldern**

<p>Rangierverkehr</p>		
	<p>Ohne OL</p> 	<p>Mit OL-Nachlademöglichkeit</p> 
<p>Leichter Rangierdienst</p>	<p>Akku, H2VM, BZ-Hybrid</p>	<p>OL-Akku-Hybrid, OL-BZ-Hybrid-BiMode (BZ-Hybrid + H2VM)</p>
<p>Schwerer Rangierdienst</p>	<p>BZ-Hybrid, H2VM (Akku)</p>	<p>OL-Akku-Hybrid, OL-BZ-Hybrid-BiMode (BZ-Hybrid + H2VM)</p>
<p>Kombinierter Strecken- und Rangierdienst</p>		
	<p>Ohne OL</p> 	<p>Mit OL-Nachlademöglichkeit</p> 
<p>Zwischenwerkverkehr (Rangierdienst + mittlerer/schwerer Streckendienst)</p>	<p>Akku, H2VM, BZ-Hybrid</p>	<p>OL-Akku-Hybrid, OL-BZ-Hybrid-BiMode (BZ-Hybrid + mH2VM)</p>
<p>Zustell-/Bedienfahrten im regionalen Güterverkehr (leichter/mittlerer Rangier-/Streckendienst)</p>	<p>BZ-Hybrid, H2VM (Akku)</p>	<p>OL-Akku-Hybrid, OL-BZ-Hybrid-BiMode (BZ-Hybrid + mH2VM)</p>

Vorzugsantriebssysteme nach Oberleitungsverfügbarkeit und Einsatzfeldern

Sofern Rangierlokomotiven auch im Streckendienst und mit hohen Anhängelasten eingesetzt werden wie im Zwischenwerkverkehr, sind für Strecken ohne substanzielle Ausstattung mit Fahrleitungen der BZ-Hybrid und (wegen der Reichweitenlimitationen) mit Einschränkungen auch der H2VM am ehesten geeignet. Für den Fall, dass ein großer Teil der Streckenfahrt unter Fahrdraht absolviert werden kann, sind der OL-Akku-Hybrid und der Dual-Mode-Antrieb mit BZ-Hybrid sinnvolle alternative Antriebseinheiten. Um im Streckenbetrieb ohne Oberleitung durchgehend hohe Leistungen bereitstellen zu können, müssen BZ-Systeme mit hohen Leistungen installiert werden.

Zustellfahrten des Einzelwagenverkehrs im regionalen Güterverkehr sind in der Regel gekennzeichnet durch kleine Wagengruppen (und damit geringere Anhängelasten) sowie durch die Nutzung von Nebenstrecken (geringe Fahrgeschwindigkeiten). Somit ist der Leistungsbedarf trotz Streckenverkehr normalerweise geringer als im Zwischenwerkverkehr. Auch hier sind bei Nutzbarkeit von Oberleitungen der Oberleitungs-Akku-Hybrid und der BiMode-BZH geeignet. Auf nicht elektrifizierten Strecken eignen sich der BZH

und der H2VM sowie mit Einschränkungen auch die Akku-Lok.

Kosten alternativer Antriebssysteme

Die Kosten (aus der Perspektive von Fahrzeugherstellern) bzw. die Preise (aus der Perspektive von Fahrzeughaltern) von Rangierlokomotiven mit alternativen Antriebssystemen sind schwer prognostizierbar. So wirkt sich die konkrete technische Ausgestaltung der Fahrzeuge einzelfallspezifisch sehr unterschiedlich auf die Höhe der Gesamtkosten aus, wobei die Energiespeicher- und Wandlerkomponenten den größten kostenbestimmenden Faktor darstellen. Auch andere technische Systeme jenseits des Antriebssystems wirken sich kostenbestimmend aus, wie zum Beispiel die Ausrüstung mit den jeweiligen nationalen Zugversicherungssystemen. Eine gewichtige Kostenposition stellen ferner Einmalaufwände für Engineering, Tests und Zulassung dar. Die Kosten für die Entwicklung und Zulassung einer neuen Rangierlokplattform werden in der Branche auf einen niedrigen zweistelligen Millionenbetrag abgeschätzt. Je größer die Anzahl der potenziell absatzfähigen bzw. umrüstbaren Lokomotiven ist, desto geringer sind die lokspezifischen Einzelkosten.

Hinzu kommen bei einer Antriebsumstellung zusätzliche Kosten für die benötigte Infrastruktur, insbesondere für Nachlade- und Tankinfrastruktur sowie für Anpassungen an Abstell- und Werkstatthanlagen.

Neubau-Rangierlokomotiven

Am Beispiel einer vierachsigen Rangier-Drehgestelllok wurden für die Variante mit Dieselantrieb mit 1.500 bis 1.800 kW Motorleistung Material- und Montagekosten in Höhe von 2 Mio. € angesetzt. Die aktuellen Verkaufspreise solcher Lokomotiven betragen je nach Ausführung etwa 2,7 bis 3,5 Mio. €. Die Differenz zu den 2 Mio. € bilden anteilige Entwicklungs-, Zulassungs- und Gemeinkosten sowie Risikorückstellungen und die Marge. Für die oben dargestellten Auslegungsbeispiele der alternativen Antriebe wurden Kosten (nur Material, Montage und Inbetriebsetzung in Bezug auf die Energiewandler- und Energiespeicheranlagen) von ca. 2,2 Mio. € für die Oberleitungs-Akku-Hybridlok und für die Lok mit Wasserstoff-Verbrennungsmotor sowie von ca. 2,9 Mio. € für die Brennstoffzellen-Hybridlok (Szenario-R-Auslegung) und die Oberleitungs-Brennstoffzellen-Hybrid-BiMode-Lok abgeschätzt. Für die reine Akku-Lok wurden Kosten von ca. 3,1 Mio. € veranschlagt. Hinzu kommen analog zur Diesellok

anteilige Entwicklungs-, Zulassungs- und Gemeinkosten sowie Risikorückstellungen und Marge. Da diese Kosten in starker Abhängigkeit von der Antriebsvariante und der Losgröße stehen, sollen sie hier nicht ausgewiesen werden. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass dieser Aufschlag je Lok bei den alternativen Antriebssystemen um einiges höher ist als bei den Dieselpendants.

Für die dreiachsige Rangierlok wurden Kosten von 1,3 Mio. € (BZ-Hybrid), 1,1 Mio. € (H₂-Verbrennungsmotor) und 1,4 Mio. € (Akku-Lok) gegenüber 1 Mio. € für eine konventionelle Diesellok abgeschätzt. Hinzu kommen auch hier anteilige Einmalkosten, Margen usw.

Umrüstung Rangierlokomotiven

Entscheidenden Einfluss auf die tatsächlich resultierende Kostenhöhe von Vorhaben zum Umbau bestehender Diesellokomotiven auf alternative Antriebssysteme haben eine Reihe von Randbedingungen. Dazu gehören unter anderem der technische Ausrüstungsstand sowie der Zustand und der Modernisierungsbedarf der umzurüstenden Lokomotive, das alternative Antriebssystem, auf das umgerüstet werden soll, und

der erforderliche Zulassungsaufwand. Als Kosten für eine Umrüstung von Diesellokomotiven auf Dieselhybridantrieb werden in der Branche 1 bis 1,5 Mio. € genannt.

Bei der vierachsigen Rangierlok werden in der Studie die geringsten Umbaukosten für den Wasserstoff-Verbrennungsmotor und den Oberleitungs-Akku-Hybrid geschätzt (je ca. 1,5 Mio. €), gefolgt vom BZ-Hybrid und der Oberleitungs-BZ-Hybrid-BiMode-Lok (je 2,2 Mio. €) sowie der reinen Akkulok (2,5 Mio. €). Hinzu kommen wieder anteilige Einmalkosten für Entwicklung, Zulassung und Marge. Für die dreiaxelige Rangierlok werden Umbaukosten von ca. 0,85 Mio. € (Hz-Verbrennungsmotor), 1 Mio. € (BZ-Hybrid) sowie 1,3 Mio. € (Akku-Lok) angenommen, jeweils zuzüglich anteiliger Einmalkosten.

Betriebskosten

Bei geringen Wasserstoffbezugspreisen, insbesondere bei Nutzung von günstigem Prozesswasserstoff aus der chemischen Industrie, ist mit geringeren Betriebskosten im Vergleich zu Dieselrangierlokomotiven zu rechnen. Im Gegensatz zu Fahrzeugen mit H₂VM bestehen für BZ-Hybrid-Fahrzeuge höhere Reinheitsan-

forderungen, weshalb der Prozesswasserstoff vor der Betankung nachgereinigt werden muss, wodurch sich die Wasserstoffbezugskosten erhöhen. Für regenerativ erzeugten Wasserstoff zum Beispiel aus Wasserelektrolyse ist die Höhe der Strombezugs- und insbesondere der Stromnebenkosten kostenbestimmend. Bei rein elektrischen Rangierlokomotiven sind die Energiekosten aufgrund des höheren Traktionswirkungsgrades, der Vermeidung von Leerlaufverbräuchen und der Möglichkeit der Energierückspeisung deutlich geringer als bei Dieselrangierlokomotiven. Die Instandhaltungskosten fallen bei elektrischen Antrieben grundsätzlich geringer aus als bei Dieselantrieben. Einen bedeutenden Kostenfaktor stellen jedoch die Kosten für den Austausch bzw. Wechsel neuartiger Energiespeicher und -wandler dar. Aufgrund der im Vergleich zu Dieselmotoren kürzeren Lebensdauer von Akkumulatoren und Brennstoffzellen wirken sie sich erhöhend auf die Lebensdauerkosten aus.

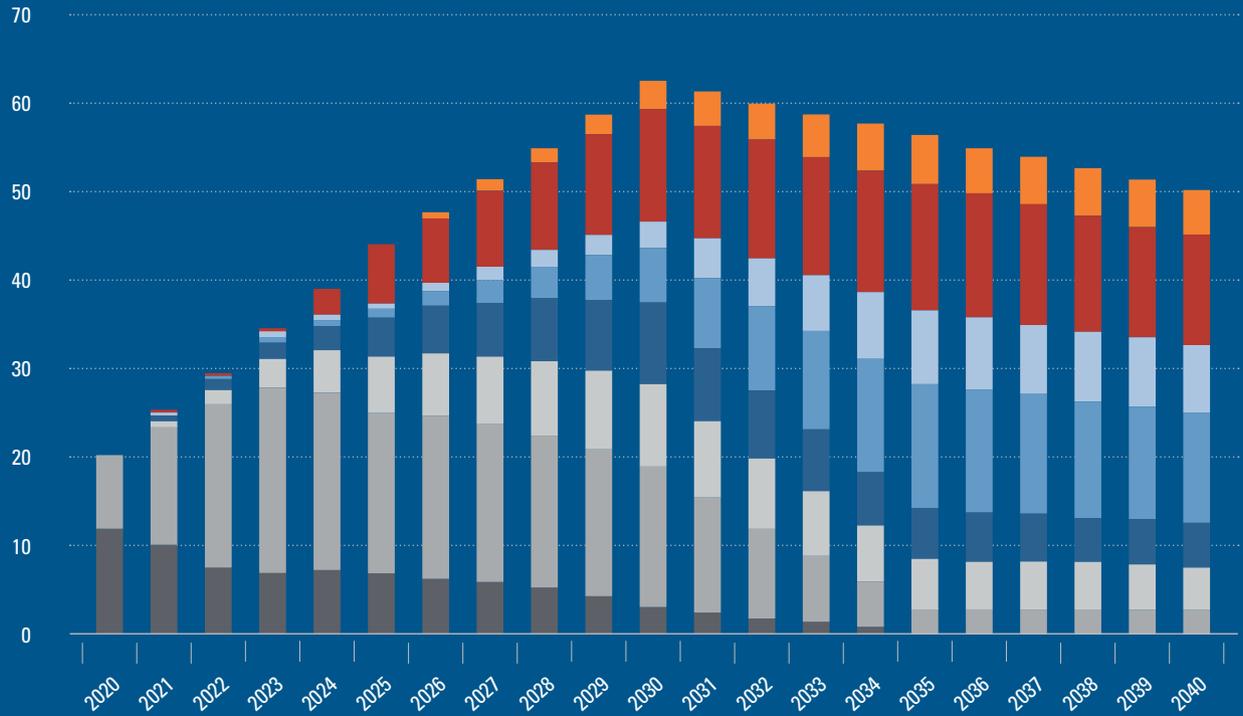
Abschätzung Marktpotenzial

Auf Basis aktuell getätigter Bestellungen von Rangierlokomotiven (mit EBO-Zulassung) ist davon auszugehen, dass die Anzahl der jährlich neu zugelassenen Rangierlokomotiven – ausgehend von 2020 etwa 25 Rangierlokomotiven – bis etwa 2030 kontinuierlich auf 50 bis 75 Lokomotiven jährlich zunehmen und sich danach auf hohem Niveau zwischen 40 und 60 Lokomotiven pro Jahr einpendeln wird. Das jährliche Potenzial an Umbauten auf alternative Antriebe wird auf 20 bis 30 Lokomotiven abgeschätzt. Aus heutiger Sicht ist kaum mit Verlässlichkeit zu beurteilen, wie sich die Anteile der Antriebssysteme im Neubau und bei Modernisierung entwickeln werden, da (mit Ausnahme des Dieselhybrids) keine Erfahrungen mit neuen Antriebssystemen in Rangierloks vorliegen und andere alternative Antriebssysteme erst nach und nach am Markt verfügbar sind.

Das Szenario für die Neubau-Lokomotiven basiert auf folgenden Annahmen:

- Ansatz: Mittelwert der unteren und oberen Schätzung des Gesamtmarktes
- Nach stetigem Anstieg ab 2021 bis 2030 Erreichung eines hohen Niveaus jährlicher Neuzulassungen
- Produktion von Dieselloks auch in den nächsten Jahren, jedoch ergänzt durch Fahrzeuge, die auch mit Dieselderivaten (biogene Flüssigkraftstoffe, HVO, Methanol etc.) betrieben werden können, nach 2030 Produktionsauslauf von Dieselantrieben
- Dieselhybrid ab 2021 bis etwa Ende des Jahrzehnts dominierend
- Oberleitungs-Akku-Hybridloks treten ab 2024 in den Markt
- H2VM, BZH, OL-BZH-BiMode, Akku-Antriebe: zunächst als Prototypen und später als Serienfahrzeuge in geringer Stückzahl; in nennenswerter Stückzahl aber erst ab etwa 2030

ABBILDUNG 10 Neubau-Rangierlokomotiven – Aufteilung Antriebsysteme
(Ansatz Mittelwert aus Min- und Max-Schätzung)



- VM-Diesel
- VM-H2
- OL-Akku
- VM-Diesel-Hybrid
- BZ-H2-Hybrid
- Akku
- VM-Methanol/HVO inkl. Hybrid
- OL-BZ-H2-Zweikraft

Das Szenario für Modernisierungen geht von folgenden Prämissen aus:

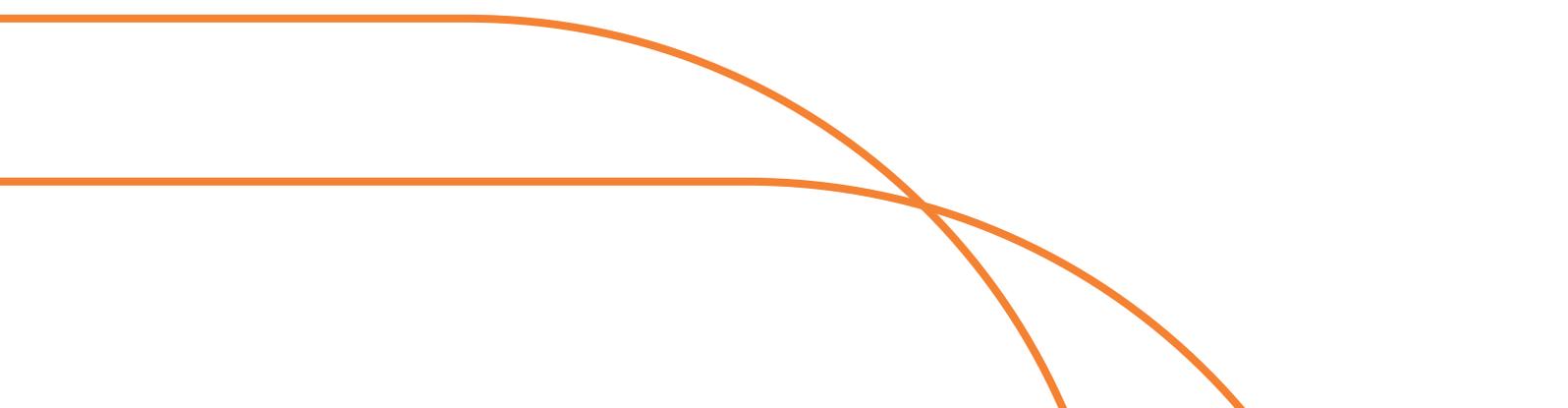
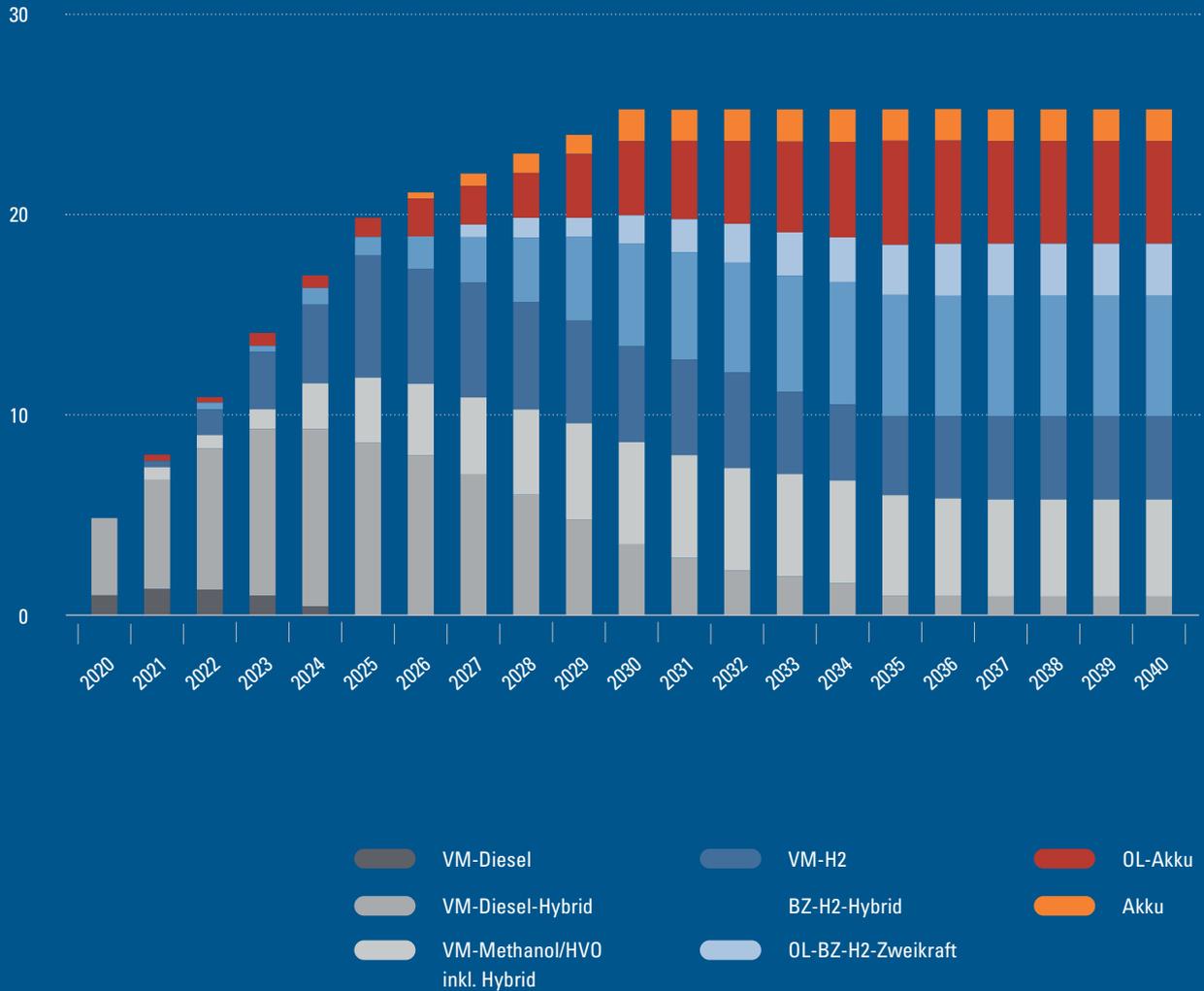
- Ausgehend von einem geringen Niveau 2020 mit wenigen Modernisierungen dominieren in den nächsten Jahren insbesondere Umrüstungsprojekte der DB Cargo auf Hybridantrieb (150 Lokomotiven)
 - Ab 2025 vermehrt Umrüstungen auch von Lokomotiven privater EVU, da dann ein Grundstock an Rangierloks mit elektrischer Leistungsübertragung vorhanden ist (DE 18, Alstom H3, Toshiba HDB 800, Vossloh Locomotives, Hybridrangierloks aus Ausschreibung von DB Cargo)
 - Ähnlich wie im Szenario Neubau nach 2025 vermehrt Umrüstungen auf Wasserstoff-Verbrennungsmotor und brennstoffzellenbasierte Antriebe, ebenso Umbauten auf Oberleitungs-Akku-Hybride
- 

ABBILDUNG 11 Modernisierung Rangierlokomotiven – Aufteilung Antriebsysteme
(Ansatz Mittelwert aus Min- und Max-Schätzung)



Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1	Bestand Rangierlokomotiven in Deutschland nach Herstellungsjahr, unterteilt in Neubau (N=684) und Modernisierungen (N=56), für den Zeitraum 1990 bis 2019	7
ABBILDUNG 2	Untersuchte Antriebssysteme und Arten der Traktionsenergiezuführung bzw. Energiespeichernachladung	13
ABBILDUNG 3	Auslegungen und Komponentenanordnungen für vierachsige Drehgestelllok (Akku, BZ-Hybrid)	16
ABBILDUNG 4	Auslegungen und Komponentenanordnungen für vierachsige Drehgestelllok (OL-Akku-Hybrid, OL-BZ-Hybrid-BiMode)	17
ABBILDUNG 5	Auslegungen und Komponentenanordnungen für vierachsige Drehgestelllok (H2VM)	18
ABBILDUNG 6	Auslegungen und Komponentenanordnungen für dreiachsige Lok (Akku, BZ-Hybrid)	20
ABBILDUNG 7	Auslegungen und Komponentenanordnungen für dreiachsige Lok (H2VM)	21
ABBILDUNG 8	Eignungsmatrix Einsatzfelder	24/25
ABBILDUNG 9	Vorzugsantriebssysteme nach Oberleitungsverfügbarkeit und Einsatzfeldern	26
ABBILDUNG 10	Neubau-Rangierlokomotiven – Aufteilung Antriebssysteme (Ansatz Mittelwert aus Min- und Max-Schätzung)	31
ABBILDUNG 11	Modernisierung Rangierlokomotiven – Aufteilung Antriebssysteme (Ansatz Mittelwert aus Min- und Max-Schätzung)	33

Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitspaket	KS	Kraftstoff
BTMS	Battery Thermal Management System	kV	Kilovolt
BZ	Brennstoffzelle	kW	Kilowatt
BZH	Brennstoffzellenhybrid	kWh	Kilowattstunde
CO₂	Kohlenstoffdioxid	Mt	Millionen Tonnen
DC	Direct Current (Gleichstrom)	NMC	Nickel-Mangan-Kobalt
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.	OL	Oberleitung
EBA	Eisenbahnbundesamt	Rbf	Rangierbahnhof
EBO	Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung		
EVU	Eisenbahnverkehrsunternehmen		
h	Stunde		
H₂	Wasserstoff		
H₂VM	Wasserstoff-Verbrennungsmotor		
HVO	Hydrogenated Vegetable Oils (Hydrierte Pflanzenöle)		
km	Kilometer		
kN	Kilonewton		

Auftraggeber

NOW GmbH
Fasanenstraße 5
10623 Berlin
+49 (0)30 311 66 16 – 00

Ansprechpartner

Michael Graß
Manager Presse und Publikationen
michael.grass@now-gmbh.de

Verfasser

Johannes Pagenkopf, Mathias Böhm, Victoria Jäger,
Marcel Konrad
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.
(DLR), Institut für Fahrzeugkonzepte



Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt

Institut für Fahrzeugkonzepte

Gestaltung

kursiv Kommunikationsdesign | Katrin Schek
Peter Frey, Angela Köntje

Erscheinungsjahr 2022

